

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA**

LUCAS MENDES SCARPIN

**MONTAGEM DE UMA BANCADA DINAMOMÉTRICA E AVALIAÇÃO
PRELIMINAR DO DESEMPENHO DE UM MOTOR OPERANDO
COM MISTURAS DIESEL-BIODIESEL**

Ilha Solteira - SP

28/04/2014

LUCAS MENDES SCARPIN

**MONTAGEM DE UMA BANCADA DINAMOMÉTRICA E AVALIAÇÃO
PRELIMINAR DO DESEMPENHO DE UM MOTOR OPERANDO
COM MISTURAS DIESEL-BIODIESEL**

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia de Ilha Solteira - UNESP
como parte dos requisitos para obtenção
do título de Mestre em Engenharia
Mecânica.

Prof. Dr. Ricardo Alan Verdú Ramos
Orientador

Ilha Solteira - SP

28/04/2014

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S286m Scarpin, Lucas.
Montagem de uma bancada dinamométrica e avaliação preliminar do desempenho de um motor operando com misturas diesel-biodiesel / Lucas Scarpin. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2014
108 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Ciências Térmicas, 2014

Orientador: Ricardo Alan Verdú Ramos
Inclui bibliografia

1. Bancada dinamométrica. 2. Motor de combustão interna. 3. Avaliação de desempenho. 4. Biodiesel. 5. Diesel.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Montagem de uma bancada dinamométrica e avaliação preliminar do desempenho de um motor operando com misturas diesel-biodiesel

AUTOR: LUCAS MENDES SCARPIN

ORIENTADOR: Prof. Dr. RICARDO ALAN VERDÚ RAMOS

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica ,
Área: CIÊNCIAS TÉRMICAS, pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. RICARDO ALAN VERDÚ RAMOS
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. EMANUEL ROCHA WOISKI
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. JOSÉ ANTONIO ANDRÉS VELÁSQUEZ ALEGRE
Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Data da realização: 28 de abril de 2014.

DEDICO

Ao meu pai, José Ilair Scarpin, e minha mãe, Elisa Mendes da Silva Scarpin, por sempre estarem ao meu lado e por terem proporcionado mais essa conquista.

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, a Deus, por sempre estar presente em todos os momentos da minha vida.

À minha família, meus pais, José e Elisa, meu irmão, Igor, e minha namorada, Natiele, por sempre estarem ao meu lado.

Ao meu orientador e amigo, Prof. Dr. Ricardo Alan Verdú Ramos, por sempre estar ao meu lado, me auxiliando no desenvolvimento e concepção do projeto proposto.

Aos docentes Prof. Dr. Emanuel Rocha Woiski e Prof. Dr. João Batista Campos Silva, pois sempre contribuíram desde o início do trabalho.

Aos colegas discentes Hélio Henrique Rivabene Ferreira Dias e Lucas Barbosa Baldo, pelo auxílio na montagem da bancada dinamométrica e nos ensaios do motor.

Ao José Lucas Verdú Ramos, pelo auxílio durante o conserto do freio eletromagnético.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo suporte financeiro através da concessão da bolsa de estudos.

À Cargill Agrícola S. A. - Unidade Três Lagoas (MS), pela doação do Biodiesel de óleo de soja empregado nos experimentos.

E a todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

Resumo

O emprego de óleos vegetais como combustível é conhecido desde os primórdios do motor de combustão interna de ignição por compressão. Atualmente, por conta dos elevados custos do petróleo e seus derivados, os combustíveis alternativos passam a ser competitivos sob o ponto de vista econômico para uso em motores. Diante desse contexto, foi proposta a construção de uma bancada dinamométrica, envolvendo o desenvolvimento e a concepção dos componentes necessários, e, depois, a realização de testes preliminares do desempenho de um motor reformado, operando com diesel comum comercial (B5), biodiesel de óleo de soja (B100) e nas seguintes proporções de mistura: B20, B50 e B80. Por meio dos ensaios preliminares, foi possível validar os resultados obtidos comparando-os com os valores de torque e potência definidos pelo fabricante do motor. Analisando as curvas obtidas em função da rotação e do combustível utilizado nos ensaios, foi verificado um melhor desempenho do motor com a utilização do B20, especialmente na faixa de rotação ao redor de 1.800 rpm, para a qual o mesmo foi projetado. Por outro lado, nesta mesma faixa de rotação, foi verificado o pior desempenho para a operação com B100, confirmando o que havia sido encontrado na literatura.

Palavras-chave: Bancada Dinamométrica, Motor de Combustão Interna, Avaliação de Desempenho, Biodiesel, Diesel.

Abstract

The use of vegetable oils as fuel is known since the dawn of the internal combustion engine of compression ignition. Currently, due to the high cost of oil and its derivatives, alternative fuels become competitive under the economic point of view for use in engines. In this context, it was proposed the construction of a dynamometer bench involving the development and design of the components required, and, after, performing preliminary testing of the performance of a refurbished engine, operating with common commercial diesel (B5), soybean oil biodiesel (B100) and in the following mixing ratios: B20, B50 and B80. Through the preliminary tests, it was possible validate the results obtained comparing them to the values of torque and power defined by the engine manufacturer. Analyzing the curves obtained in function of rotation and the fuel used in the tests, was found better engine performance using the B20, particularly in the speed range around 1,800 rpm, for which it was designed. On the other hand, in this same speed range, the worst performance was verified for operating with B100, confirming what had been found in the literature.

Keywords: *Dynamometer Bench, Internal Combustion Engine, Performance Evaluation, Biodiesel, Diesel.*

Lista de Figuras

Figura 1. Motor movido a óleo de amendoim	15
Figura 2. Oferta Interna de Energia no Brasil (OIE) em 2012	17
Figura 3. Processo de obtenção do Biodiesel, por meio da transesterificação	20
Figura 4. Vista lateral do motor OM-352	33
Figura 5. Freio eletromagnético TDB500.....	34
Figura 6. Base inercial original	36
Figura 7. Rosca interna usinada na base inercial	36
Figura 8. Conjunto de sustentação da base.....	38
Figura 9. Conjunto fixado na base inercial.....	38
Figura 10. Ponto de sustentação do motor e do dinamômetro.....	39
Figura 11. Ponto de sustentação da célula de carga	39
Figura 12. Flange de acoplamento do freio eletromagnético	41
Figura 13. Acoplamento do tipo cruzeta	41
Figura 14. Suporte do radiador	42
Figura 15. Suporte do sensor de rotação	43
Figura 16. Trava de fixação do mancal ao motor	43
Figura 17. Painel de instrumentos do motor.....	44
Figura 18. Marcação de sincronismo da bomba injetora.....	45
Figura 19. Bomba d'água após troca do reparo.....	46
Figura 20. Alojamento da válvula termostática.....	46
Figura 21. Sensor de temperatura de arrefecimento do motor.	47
Figura 22. Mangueiras instaladas no radiador.....	47
Figura 23. Sistema de monitoramento manual do nível de óleo lubrificante	48
Figura 24. Local onde foi instalada a bucha de alumínio	50
Figura 25. Adaptador para aferir a depressão no coletor de admissão	50
Figura 26. Imagem do motor antes da revitalização.....	51
Figura 27. Imagem do motor depois da revitalização	52
Figura 28. Ponto de sustentação da base inercial	53
Figura 29. Pontos de sustentação do motor e do freio eletromagnético	53
Figura 30. Mancal dianteiro e acoplamento devidamente instalados.....	54
Figura 31. Mancal traseiro instalado	55

Figura 32. Acoplamento do eixo do motor com o do freio	55
Figura 33. Motor e freio eletromagnético montados	56
Figura 34. Torre de resfriamento do freio eletromagnético.....	57
Figura 35. Circuito de arrefecimento do freio eletromagnético	58
Figura 36. Posicionamento do sensor de rotação	59
Figura 37. Célula de carga instalada.....	59
Figura 38. Ligação dos sensores junto à central.....	60
Figura 39. Vista frontal da bancada dinamométrica.....	61
Figura 40. Vista traseira da bancada dinamométrica.....	61
Figura 41. Vidrarias utilizadas para a obtenção das misturas.....	63
Figura 42. Recipientes contendo as proporções de misturas Diesel-Biodiesel preparadas	64
Figura 43. Interface gráfica de aquisição de dados	65
Figura 44 Interface gráfica de controle do dinamômetro	66
Figura 45. Motor sendo ensaiado com a utilização de B5.....	68
Figura 46. Esquema para a transição dos combustíveis	69
Figura 47. Torque e potência diretamente da resposta da interface de aquisição de dados	72
Figura 48. Dados capturados e exportados em forma de planilha.....	73
Figura 49. Diferença entre o torque médio calculado e o obtido pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B5.....	74
Figura 50. Diferença entre o torque médio calculado e o obtido pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B20.....	74
Figura 51. Diferença entre o torque médio calculado e o obtido pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B50.....	75
Figura 52. Diferença entre o torque médio calculado e o obtido pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B80.....	75
Figura 53. Diferença entre o torque médio calculado e o obtido pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B100.....	76
Figura 54. Diferença entre a potência média calculada e a obtida pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B5.....	76
Figura 55. Diferença entre a potência média calculada e a obtida pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B20.....	77
Figura 56. Diferença entre a potência média calculada e a obtida pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B50.....	77

Figura 57. Diferença entre a potência média calculada e a obtida pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B80.....	78
Figura 58. Diferença entre a potência média calculada e a obtida pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B100.....	78
Figura 59. Torque e potência obtidos pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B5	79
Figura 60. Torque e potência médios calculados, em função da rotação e com a utilização do B5	79
Figura 61. Torque e potência obtidos pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B20	80
Figura 62. Torque e potência médios calculados, em função da rotação e com a utilização do B20	80
Figura 63. Torque e potência obtidos pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B50	81
Figura 64. Torque e potência médios calculados, em função da rotação e com a utilização do B50	81
Figura 65. Torque e potência obtidos pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B80	82
Figura 66. Torque e potência médios calculados, em função da rotação e com a utilização do B80	82
Figura 67. Torque e potência obtidos pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B100	83
Figura 68. Torque e potência médios calculados, em função da rotação e com a utilização do B100	83
Figura 69. Comparativo do torque obtido diretamente do programa, em função da rotação e do combustível utilizado	84
Figura 70. Comparativo do torque médio calculado, em função da rotação e do combustível utilizado	84
Figura 71. Comparativo da potência obtida diretamente do programa, em função da rotação e do combustível utilizado.....	85
Figura 72. Comparativo da potência média calculada, em função da rotação e do combustível utilizado	85
Figura 73. Torque obtido pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B5.....	94
Figura 74. Potência obtida pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B5...	94

Figura 75. Torque médio obtido, em função da rotação e com a utilização do B5	95
Figura 76. Potência média obtida, em função da rotação e com a utilização do B5	95
Figura 77. Torque obtido pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B20...	97
Figura 78. Potência obtida pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B20.	97
Figura 79. Torque médio obtido, em função da rotação e com a utilização do B20	98
Figura 80. Potência média obtida, em função da rotação e com a utilização do B20	98
Figura 81. Torque obtido pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B50.	100
Figura 82. Potência obtida pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B50.	100
Figura 83. Torque médio obtido, em função da rotação e com a utilização do B50	101
Figura 84. Potência média obtida, em função da rotação e com a utilização do B50	101
Figura 85. Torque obtido pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B80.	103
Figura 86. Potência obtida pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B80.	103
Figura 87. Torque médio obtido, em função da rotação e com a utilização do B80	104
Figura 88. Potência média obtida, em função da rotação e com a utilização do B80	104
Figura 89. Torque obtido pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B100.	106
Figura 90. Potência obtida pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B100.	106
Figura 91. Torque médio obtido, em função da rotação e com a utilização do B100	107
Figura 92. Potência média obtida, em função da rotação e com a utilização do B100	107

Lista de Tabelas

Tabela 1. Principais características construtivas e funcionais do motor OM-352	32
Tabela 2. Características do amortecedor utilizado na base	37
Tabela 3. Parâmetros construtivos da viga laminada com perfil U	40
Tabela 4. Parâmetros construtivos das barras chatas empregadas.....	40
Tabela 5. Materiais utilizados para a confecção do circuito de resfriamento.....	57
Tabela 6. Proporções em volume em função da mistura desejada	63
Tabela 7. Torque obtido pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B5	93
Tabela 8. Potência obtida pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B5	93
Tabela 9. Torque médio obtido, em função da rotação e com a utilização do B5.....	93
Tabela 10. Potência média obtida, em função da rotação e com a utilização do B5.....	93
Tabela 11. Torque obtido pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B20 ..	96
Tabela 12. Potência obtida pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B20 ..	96
Tabela 13. Torque médio obtido, em função da rotação e com a utilização do B20.....	96
Tabela 14. Potência média obtida, em função da rotação e com a utilização do B20.....	96
Tabela 15. Torque obtido pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B50 ..	99
Tabela 16. Potência obtida pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B50 ..	99
Tabela 17. Torque médio obtido, em função da rotação e com a utilização do B50.....	99
Tabela 18. Potência média obtida, em função da rotação e com a utilização do B50.....	99
Tabela 19. Torque obtido pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B80	102
Tabela 20. Torque obtido pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B80	102
Tabela 21. Torque médio obtido, em função da rotação e com a utilização do B80.....	102
Tabela 22. Potência média obtida, em função da rotação e com a utilização do B80.....	102
Tabela 23. Torque obtido pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B100	105
Tabela 24. Potência obtida pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B100	105
Tabela 25. Torque médio obtido, em função da rotação e com a utilização do B100.....	105
Tabela 26. Potência média obtida, em função da rotação e com a utilização do B100.....	105

Sumário

1. Introdução e Objetivos do Trabalho	14
1.1. Histórico do Biodiesel	14
1.2. Contextualização do Biodiesel no Brasil	16
1.3. Definição do Biodiesel	18
1.4. Processo de obtenção do Biodiesel	19
1.5. Objetivos do Trabalho	22
2. Revisão Bibliográfica	23
3. Equipamentos e Desenvolvimento do Aparato Experimental	32
3.1. Características dos Equipamentos	32
3.1.1. Características do Motor	32
3.1.2. Características do Dinamômetro	34
3.2. Desenvolvimento do Aparato	35
3.2.1. Confeção das Peças	35
3.2.1.1. Base Inercial	35
3.2.1.2. Pontos de Sustentação da Base Inercial	37
3.2.1.3. Pontos de Sustentação do Motor, do Freio Eletromagnético e da Célula de Carga	38
3.2.1.4. Flange de Acoplamento do Freio Eletromagnético	40
3.2.1.5. Acoplamento	41
3.2.1.6. Suporte do Radiador	42
3.2.1.7. Suporte do Sensor de Rotação	42
3.2.1.8. Travas de Fixação do Freio Eletromagnético ao Motor	43
3.2.1.9. Painel de Instrumentos do Motor	43
3.2.2. Revitalização do Motor	44
3.2.2.1. Sistema de Alimentação	44
3.2.2.2. Sistema de Arrefecimento	45
3.2.2.3. Sistema de Lubrificação	48
3.2.2.4. Regulagem das Válvulas de Admissão e Escapamento	49

3.2.2.5. Adaptação do Filtro de Ar.....	49
3.2.2.6. Tomada de Ar da Admissão para a Central Eletrônica	50
3.2.2.7. Pintura do motor e seus componentes.....	51
3.2.3. Montagem da Bancada Dinamométrica.....	52
3.2.3.1. Montagem dos Pontos de Sustentação da Base Inercial e Nivelamento.....	52
3.2.3.2. Montagem dos Pontos de Sustentação do Motor e do Freio Eletromagnético ..	53
3.2.3.3. Montagem dos Mancais e do Flange do Freio Eletromagnético.....	54
3.2.3.4. Montagem do Motor e do Freio Eletromagnético sobre a Base Inercial	55
3.2.3.5. Montagem do Sistema de Arrefecimento do Freio Eletromagnético.....	56
3.2.3.6. Instalação Eletrônica	58
3.2.3.7. Instalação Elétrica	60
3.2.3.8. Bancada Dinamométrica	60
4. Procedimento Experimental	62
4.1. Obtenção das Misturas.....	62
4.2. Metodologia Experimental	64
5. Resultados.....	70
6. Conclusão	87
Referências Bibliográficas.....	89
Apêndice A – Tabelas e Gráficos de Resultados.....	93
Apêndice B – Certificado de Qualidade do Biodiesel	108

1. Introdução e Objetivos do Trabalho

Dentre os maiores produtores de biocombustíveis, o Brasil possui destaque na produção de etanol e no desenvolvimento de tecnologias para este setor, como a produção de etanol de segunda geração e gaseificação da palha. Por outro lado, a produção de Biodiesel, o qual é utilizado em substituição parcial ou total ao óleo Diesel de origem fóssil, é crescente, tanto em termos de produção de matérias-primas quanto em capacidade industrial instalada. O emprego do Biodiesel em motores veiculares ou estacionários reduz o consumo de combustíveis de origem do petróleo e apresenta uma redução na emissão de CO₂ (grande responsável pelo efeito estufa) e SO₂ (causador de chuvas ácidas e doenças respiratórias).

O Biodiesel pode ser de origem vegetal, sendo neste caso o óleo utilizado para a sua produção extraído de plantas oleaginosas como: soja, mamona, palma, girassol, caroço de algodão, pinhão manso, ou pode ser de origem animal, sendo neste caso obtido a partir do sebo bovino, suíno e de aves. Por fim, o Biodiesel pode ser de origem residual, onde os óleos de fritura são recolhidos e devidamente tratados para serem utilizados como matéria-prima.

As estruturas moleculares dos óleos vegetais e das gorduras animais são formadas por três moléculas de ácidos graxos ligados a uma molécula de glicerol, que os tornam conhecidos como triacilgliceróis. Para produzir Biodiesel, o óleo é misturado a um álcool, o qual pode ser metanol ou etanol. Em seguida, é inserido um catalisador que é uma substância que acelera a reação química entre o óleo e o álcool, conhecida como reação de transesterificação. Esta reação quebrará as ligações do glicerol com os ácidos graxos, resultando em uma massa reacional constituída de duas fases: glicerol e ésteres alquílicos (Biodiesel), os quais, dependendo da natureza do álcool empregado, podem ser ésteres metílicos ou etílicos.

1.1. Histórico do Biodiesel

O emprego de óleos vegetais como combustível é conhecido desde os primórdios do motor de ignição por compressão. Em 1900, em uma exposição em Paris, Rudolf Diesel mostrou ao público um motor operando com óleo de amendoim. O uso do óleo de amendoim foi um pedido do governo francês que, naquela época, possuía várias colônias tropicais que produziam esse óleo. A Figura 1 mostra o referido motor.

Figura 1. Motor movido a óleo de amendoim.



Fonte: www.consciencia.net.

Além de afirmar que esse tipo de motor traria independência na importação de combustíveis líquidos nas regiões tropicais, Rudolf Diesel acreditava que, em poucos anos, os óleos vegetais teriam a mesma importância dos óleos minerais (KNOTHE *et al.*, 2006).

Em função disso, Rudolf Diesel teria conduzido outros experimentos em São Petersburgo, na Rússia, com locomotivas movidas a óleo de mamona e a óleos de origem animal. Em ambos os casos, os resultados foram muito satisfatórios e os motores apresentaram bom desempenho (SEBRAE, 2014).

Na primeira metade do século XX vários países europeus, principalmente Alemanha e Grã-Bretanha, se empenharam para que suas colônias obtivessem maior independência energética ao utilizarem óleos vegetais como combustível. Posteriormente, durante a Segunda Guerra Mundial, os óleos vegetais foram usados como combustíveis emergenciais, atingindo, assim, posições estratégicas. No Brasil foi proibida a exportação de óleo de algodão de modo a tentar suprir a demanda interna de óleo Diesel que era importada. Outros países, como os Estados Unidos, China, Argentina e Índia, também exploraram o potencial dos óleos vegetais como combustíveis nesse período (KNOTHE *et al.*, 2006).

As crises do Petróleo de 1973 (ocasionada pela Guerra de Yom Kippur e pela diminuição da produção de petróleo por parte dos países do Oriente Médio) e de 1979 (devido à Revolução Islâmica e à paralisação da produção de petróleo no Irã) mostraram ao mundo

que a oferta de petróleo não era garantida e dependia do contexto político dos países produtores membros da Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP).

Ao contrário das anteriores, a atual crise do petróleo é fruto da crescente demanda de petróleo por países emergentes, como a China e a Índia, e devido à escassez dos estoques globais. Diante deste contexto, é possível observar que nos dias de hoje há uma crescente busca por novas formas de energia, especialmente por meios renováveis. Esse processo se faz necessário para se alcançar a redução da dependência, a nível mundial, do petróleo e de seus derivados.

1.2. Contextualização do Biodiesel no Brasil

Primordialmente, pode-se afirmar que a crise do Petróleo nos anos 70 despertou o mundo para a busca de formas alternativas de energia e, no Brasil, motivou, primeiramente, a criação do PRÓ-ÁLCOOL e depois de outros programas, como o PPT (Programa Prioritário de Termoeletricidade) e o PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica), sempre com a finalidade de incentivar o uso de combustíveis alternativos, dentre os quais se destacam: Biodiesel, biogás, etanol, madeira oriunda de áreas de reflorestamento, óleos vegetais e outros.

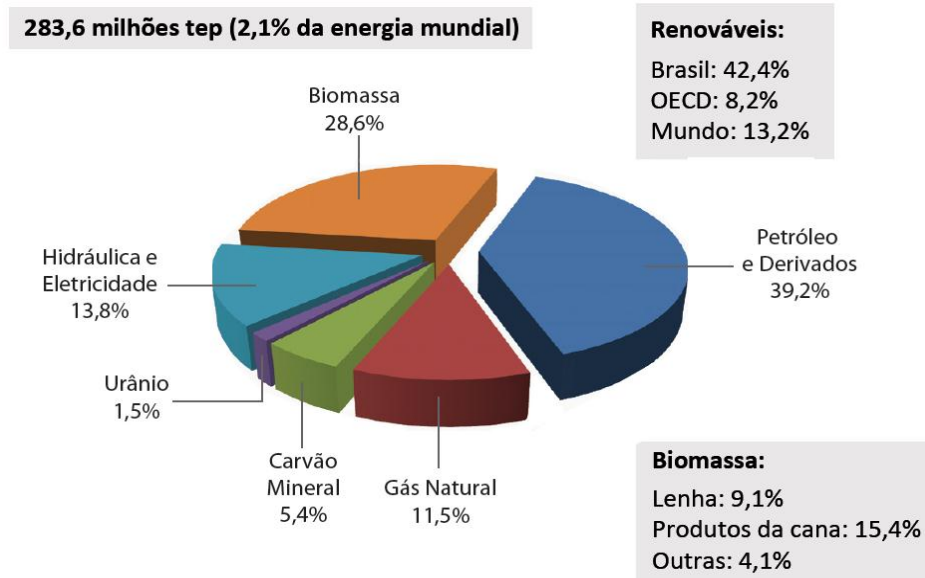
Atualmente, por conta dos elevados custos do Petróleo e seus derivados, os combustíveis alternativos passam a ser mais competitivos sob o ponto de vista econômico, devendo-se considerar, sobretudo, que as reservas de petróleo tendem à escassez. Assim, é de suma importância o desenvolvimento dos métodos de obtenção da matéria-prima e processamento de bases energéticas alternativas.

A Figura 2 mostra a Oferta Interna de Energia no Brasil (OIE) em 2012, segundo dados da Resenha Energética Brasileira, publicada pelo Ministério de Minas e Energia em 2013. Por meio desta, podem ser observadas as vantagens comparativas de 42,4% de fontes renováveis na matriz energética brasileira, contra apenas 8,2% nos países da OECD (*Organization for Economic Cooperation and Development*) e de 13,2% na média mundial.

A oferta total de bioenergia em 2012 foi de 79,5 milhões de toneladas equivalente de petróleo (tep), montante correspondente a 28,1% da matriz energética brasileira. Os produtos da cana (bagaço e etanol), com 43,6 milhões tep, responderam por 54,8% da biomassa e por 15,4% da matriz. A lenha, com 25,7 milhões tep, respondeu por 32,4% da biomassa e por

9,1% da matriz. Outras biomassas (lixívia, resíduos de madeira, resíduos da agroindústria e Biodiesel), com 10,2 milhões tep, responderam por 12,8% da biomassa e por 3,6% da matriz.

Figura 2. Oferta Interna de Energia no Brasil (OIE) em 2012.



Fonte: MME (2013).

Dentre as fontes de biomassa mais adequadas e disponíveis para a consolidação de programas de energia renovável estão os óleos vegetais, que podem ser obtidos a partir do óleo extraído de diversas plantas oleaginosas, dentre as quais se destacam: algodão, amendoim, babaçu, canola, dendê, frutos de palmeiras nativas, girassol, pinhão-mansão, mamona e soja. Deste modo, os óleos vegetais têm sido priorizados, não só pelas suas propriedades, mas, também, por representarem uma alternativa ao fortalecimento da agroindústria regional e à geração descentralizada de energia, podendo atuar como um apoio à agricultura familiar.

Os primeiros estudos no Brasil envolvendo a aplicação desses óleos vegetais em motores, originalmente movidos a Diesel, começaram em 1979 com o uso de óleo de canola. Desde então, diversos outros trabalhos foram realizados com o emprego de diferentes tipos de óleos vegetais puros ou misturados com o óleo Diesel.

Atualmente, tanto o óleo vegetal extraído de plantas oleaginosas quanto o óleo de origem animal, como também o óleo de cozinha residual tratado, podem ser usados para produção de Biodiesel pelo processo de transesterificação por meio de duas rotas: Etílica ou Metílica, dependendo da tecnologia empregada no processo em questão. Por fim, têm-se como produtos o Biodiesel e o Glicerol.

No Brasil, de acordo com o Balanço Energético Nacional apresentado em 2013 pelo Ministério de Minas e Energia, verifica-se que em 2012 o montante de B100 produzido atingiu 2.717.483 m³ contra 2.672.760 m³ do ano anterior. Com isto, verificou-se um aumento de 1,7% no Biodiesel disponibilizado no mercado interno. No mesmo ano, o percentual de B100 adicionado compulsoriamente ao Diesel mineral ficou constante em 5%, sendo que a principal matéria-prima utilizada para a sua produção foi o óleo de soja (69,6%), seguido do sebo bovino (14,7%), segundo o MME (2013).

A capacidade instalada das 57 unidades produtoras de Biodiesel existentes em dezembro de 2012 totalizou 6.853 mil m³/ano (571 milhões de litros/mês), sendo 45% delas localizada na região centro-oeste e 88% referentes a empresas detentoras do Selo Combustível Social (MME, 2013).

No sentido de aprimorar a experiência com a produção de Biodiesel, na Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP está sendo finalizada a montagem uma miniplanta com capacidade para produzir 300 litros de Biodiesel por dia, utilizando um reator doado pela empresa BIOCOM Biocombustível de Campo Grande (MS). Essa miniplanta tem por objetivo ser autossuficiente do ponto de vista energético, uma vez que o consumo de energia será suprido por um grupo gerador de eletricidade, alimentado pelo próprio Biodiesel produzido. Assim, a miniplanta poderá ser usada em diferentes locais onde houver disponibilidade de matéria prima, inclusive em regiões isoladas, produzindo Biodiesel para utilização em motores de combustão interna (automotivos e/ou estacionários).

1.3. Definição do Biodiesel

De acordo com a Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005, o Biodiesel pode ser classificado como qualquer combustível alternativo de natureza renovável que possa oferecer vantagens socioambientais ao ser empregado na substituição total ou parcial do Diesel de petróleo, em motores de combustão interna de ignição por compressão. Esta definição, bastante ampla, inclui diversas opções tecnológicas como o uso de: óleos vegetais *in natura*; misturas binárias envolvendo o Diesel e óleo ou álcool ou éster; micro emulsões; hidrocarbonetos derivados da pirólise de biomassa vegetal, como o bagaço de cana-de-açúcar; óleos vegetais craqueados (ou derivados do craqueamento termocatalítico); e misturas ternárias envolvendo álcool, Diesel e cossolventes.

Por outro lado, a Agência Nacional do Petróleo (ANP) define o Biodiesel como sendo um combustível composto de monoalquilésteres de ácidos graxos de cadeia longa, derivados de óleos vegetais ou gorduras animais designando-o como B100. Por sua vez, a Resolução ANP Nº 14 tem como finalidade regulamentar o conjunto de atividades econômicas relacionadas com produção, importação, exportação, transferência, transporte, armazenagem, comercialização, distribuição, avaliação de conformidade e certificação da qualidade de biocombustíveis (ANP, 2012).

Por enquanto, o único tipo de Biodiesel já regulamentado no território brasileiro corresponde aos ésteres alquílicos de óleos vegetais ou gordura animal, que são obtidos através de uma reação denominada transesterificação. Alternativamente, este produto também pode ser obtido pela reação de esterificação, que envolve o uso de ácidos graxos livres como matéria-prima.

Por ser biodegradável, não tóxico, livre de enxofre e de compostos aromáticos e ser perfeitamente miscível e físico-quimicamente semelhante ao Diesel convencional, misturas binárias Diesel-Biodiesel podem ser utilizadas em motores com ignição por compressão, sendo que, de acordo com os resultados obtidos no mercado, uma proporção de até 20% em volume de Biodiesel no Diesel não requer modificações ou onerosas adaptações nesses motores.

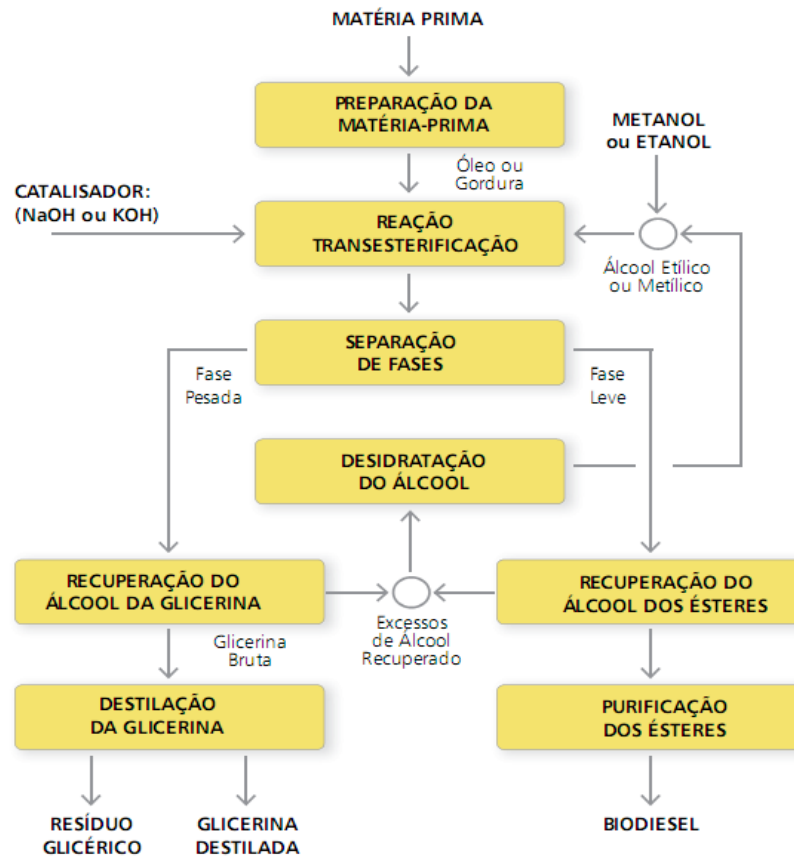
1.4. Processo de obtenção do Biodiesel

A Figura 3 apresenta as principais etapas envolvidas no processo de obtenção do Biodiesel por meio da transesterificação do óleo de origem vegetal ou animal, sendo estas detalhadas em seguida.

A preparação da matéria-prima, para a sua futura conversão em Biodiesel, visa criar as melhores condições para a reação do processo de transesterificação, com a máxima taxa de conversão.

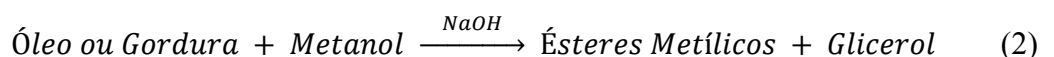
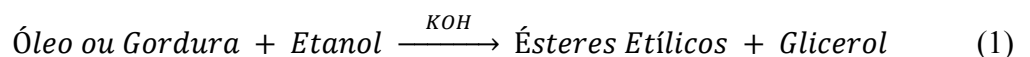
Deste modo, a matéria prima deve apresentar ao final do processo de preparação o mínimo de umidade e de acidez, o que é possível submetendo-a ao processo de neutralização, através de uma lavagem com uma solução alcalina de hidróxido de sódio ou de hidróxido de potássio, seguida de uma operação de secagem ou desumidificação.

Figura 3. Processo de obtenção do Biodiesel, por meio da transesterificação.



Fonte: Parente (2006) citado por SEBRAE (2014).

A reação química conhecida como transesterificação é a etapa de conversão do óleo ou da gordura, em ésteres etílicos de ácidos graxos, quando há adição de Etanol, ou metílicos de ácidos graxos, quando há adição de Metanol. Ambas as definições correspondem ao Biodiesel, diferindo apenas a rota de obtenção, sendo que as reações químicas podem ser representadas pelas equações a seguir:



As duas reações, apresentadas pelas Equações (1) e (2), ocorrem com a presença de um catalisador, o qual pode ser o Hidróxido de Sódio (NaOH) ou o Hidróxido de Potássio (KOH), respectivamente, aplicados às rotas metílica e etílica. Atualmente, no Brasil, o Hidróxido de Sódio apresenta um custo expressivamente mais baixo que o Hidróxido de Potássio, sendo, por isso, mais utilizado.

A massa reacional após o processo de transesterificação é constituída de duas fases, as quais são separáveis por decantação ou por centrifugação. Normalmente o processo de decantação é utilizado em plantas de produção de Biodiesel que operam em bateladas. Por outro lado, o processo de centrifugação é utilizado em sistemas que atuam de modo contínuo, visto comumente em plantas de elevada produção diária.

Deste modo, a fase mais pesada é composta de glicerina bruta, que contém o excesso de álcool adicionado no estágio inicial, água e impurezas inerentes à matéria-prima. Por outro lado, a fase menos densa é constituída de uma mistura de ésteres etílicos ou metílicos, conforme a rota inicialmente adotada, e impurezas, além de parte do excesso reacional do álcool em questão.

A glicerina bruta, contendo parte do álcool utilizado e da água, é submetida a um processo de evaporação controlada, extraindo-se da mesma esses constituintes voláteis, cujos vapores são liquefeitos em um condensador apropriado. Por meio de uma evaporação controlada, o álcool residual é extraído da fase menos densa, gerando os ésteres etílicos ou metílicos, dependendo da rota admitida.

Os excessos residuais de álcool, após os processos de recuperação, apresentam significativas proporções de água, necessitando de uma separação. A desidratação do álcool é feita normalmente por meio do processo de destilação.

No caso da desidratação do metanol, a destilação é bastante simples e fácil de ser conduzida, uma vez que a volatilidade relativa dos constituintes dessa mistura é muito grande, e, ademais, inexistente o fenômeno da azeotropia para dificultar a separação completa. Por outro lado, a desidratação do etanol é relativamente mais complicada, em função da azeotropia e da baixa volatilidade dos componentes desta mistura não serem tão expressivo como é o caso da separação da mistura da água com o metanol.

A purificação dos ésteres é realizada por meio do processo de lavagem por centrifugação seguido do processo de desumidificação resultando, finalmente, no Biodiesel, o qual deverá ter suas características enquadradas nas especificações das normas técnicas estabelecidas para seu emprego como combustível alternativo para uso em motores de combustão interna de ignição por compressão.

A glicerina bruta, conhecida como glicerol, resultante do processo de recuperação do álcool em excesso, mesmo apresentando impurezas, já seria um subproduto comercializável. No entanto, a rentabilidade da glicerina purificada é maior, o que justifica a realização deste processo. A purificação da glicerina bruta é feita por destilação a vácuo, resultando um produto límpido e transparente.

1.5. Objetivos do Trabalho

O principal objetivo do presente trabalho é a construção de uma bancada dinamométrica, composta por um freio eletromagnético TDB 500 controlado eletronicamente, o qual foi adquirido da empresa TopDyno de Curitiba (PR) pelo Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS/UNESP). Para isto, foram desenvolvidos e concebidos inúmeros componentes e sistemas periféricos para a montagem e operação da referida bancada.

Por meio desta bancada dinamométrica, será possível avaliar experimentalmente o desempenho de motores de combustão interna de até 500 hp de potência de eixo. Deste modo, é importante ressaltar a relevância deste equipamento para o Laboratório de Motores da FEIS/UNESP, pois poderão ser desenvolvidos trabalhos na área de desenvolvimento e aperfeiçoamento de motores de combustão interna operando com diversos tipos de combustíveis.

Com a finalidade de validar o funcionamento da bancada desenvolvida no decorrer do trabalho, foi proposto avaliar o desempenho do motor de ignição por compressão Mercedes-Benz OM-352, cuja reforma completa também foi objeto deste trabalho, com diversas proporções entre Diesel comum comercial (B5) e Biodiesel (B100).

2. Revisão Bibliográfica

Mundialmente, nos últimos anos tem se intensificado a quantidade de pesquisas voltadas à aplicação de biocombustíveis em motores de combustão interna alternativos, seja no âmbito numérico ou experimental. No Brasil, há um crescente volume de trabalhos publicados na área de avaliação do desempenho de motores com caráter científico, especialmente por meio da utilização de bancadas dinamométricas, e com aplicação desses combustíveis de origem renovável. Deste modo, a seguir serão apresentados trabalhos relacionados à utilização de Biodiesel e porções deste no Diesel comercial em motores de ignição por compressão em diversas aplicações.

Shumacher; Gerpen (2000), buscando avaliar misturas de Biodiesel em veículos, monitoraram o uso de 0, 1, 2 e 100% de metil ésteres, extraídos da Soja, em motores de combustão interna de ignição por compressão, fabricados pela Cummins, os quais apresentam 5,9 litros de cilindrada. O objetivo principal do trabalho foi avaliar o comportamento dos motores originais de fábrica com as misturas parciais de Biodiesel. Além disso, análises de espectrografia foram realizadas no lubrificante a fim de mensurar a quantidade de elementos presentes no mesmo.

Bueno (2003) realizou uma abordagem alternativa para o levantamento da taxa aparente de liberação de energia em motores Diesel, promovendo a separação entre a injeção e a queima do combustível, considerando-se a presença de combustível no fluido de trabalho. Os resultados obtidos para a massa total de combustível queimada, sob tal abordagem, mostraram-se realistas. Exemplos da aplicação desta abordagem durante o estudo da combustão de misturas entre óleo Diesel e Biodiesel em motores de ignição por compressão também foram reportados e discutidos neste trabalho.

Barbosa *et al.* (2006) avaliaram a eficiência térmica de um motor, de ignição por compressão, funcionando em momentos distintos com Diesel mineral e misturas deste com Biodiesel nas proporções B2, B5, B20 e B100. Para realização dos ensaios, foi utilizado um motor ciclo Diesel de um trator Valmet 85 id, modelo MWM-D225-4TVA, de quatro cursos, injeção direta, refrigerado à água, quatro cilindros em linha, cilindrada total de 3.778 cm³, taxa de compressão 18:1, com potência nominal segundo o fabricante de 78 cv (58,2 kW) a 2.300 rpm, seguindo-se a metodologia estabelecida pela norma NBR 5484 da ABNT, que se refere ao ensaio dinamométrico de motores de ciclo Otto e Diesel. Concluiu-se que a potência

do motor ao se utilizar Biodiesel foi pouco inferior àquela desempenhada pelo Diesel mineral, chegando a uma redução média de 1,31%.

Bueno (2006) analisou as consequências da adição de Biodiesel (éster etílico de soja) ao óleo Diesel e estabeleceu relações de causa e efeito entre o desempenho do motor e os processos de combustão e formação da mistura. Através do estudo, pôde ser observado que a adição de Biodiesel nas concentrações estudadas (B5, B10, B15 e B20) favorece a conversão de exergia do combustível em trabalho de expansão no interior do cilindro, proporcionando uma elevação na eficiência de conversão do combustível. Esta elevação de eficiência possui um impacto operacional relevante, proporcionando uma redução no consumo específico de combustível para as misturas estudadas e ganho de desempenho para a adição de Biodiesel em concentrações abaixo da mistura B10. Em patamares superiores ao B10, o impacto da eficiência de conversão é superado pelos efeitos da redução de influxo de energia com o combustível, obtendo-se desempenho ligeiramente inferior ao verificado com o óleo Diesel. Os resultados apresentados demonstraram a atratividade, sob o ponto de vista operacional, da adição de éster etílico de soja ao Diesel em forma de misturas parciais, sobretudo, a mistura B10, que ofereceu as melhores características quanto ao desempenho e ao consumo específico.

Juliato (2006) comparou o uso de proporções de Biodiesel no Diesel comercial, sendo estas de 2, 5, 10 e 20% em volume. O Biodiesel empregado foi o de origem vegetal, extraído do nabo forrageiro e da soja. Para os testes de desempenho, emissões de gases e consumo específico, foi utilizado um motor monocilindro de uso agrícola, com potência de eixo de 9 hp, fabricado pela Yanmar. Os resultados de torque, potência e emissões de gases não sofreram alterações significativas quando comparados com o uso de Diesel convencional. Por outro lado, o consumo específico foi alterado a partir do momento em que os níveis de adição de Biodiesel foram aumentados no Diesel convencional, sendo que, com a utilização do B20 observou-se um incremento no consumo de 5,92%.

Santos; Alves; Nóbrega (2006) realizaram uma análise comparativa do consumo específico de combustível e das emissões reguladas de CO₂, CO, NO_x, SO₂ e O₂, de um motor do ciclo de ignição por compressão estacionário, originalmente movido a Diesel, operando com Diesel e Biodiesel (B100), com rotação constante. De acordo com os resultados obtidos, foi observado que o desempenho do motor operando com os dois combustíveis é próximo. O Biodiesel testado mostrou uma pequena desvantagem em relação ao consumo específico com relação ao Diesel comercial. Este fato pode ser explicado, devido ao poder calorífico do Biodiesel ser inferior ao do Diesel comercial. Com relação às emissões, a concentração de

dióxido de carbono foi semelhante. Por outro lado, a concentração de monóxido de carbono para potência de até 3 kW, foi semelhante para os dois combustíveis, entretanto, para 4 kW, o valor da concentração aumentou consideravelmente.

Silva (2006) analisou três composições de combustíveis: Diesel puro, B10 de soja e de nabo forrageiro, analisando as influências dessa proporção de Biodiesel de duas origens, nas propriedades do óleo lubrificante. As propriedades analisadas são: viscosidade, contaminação por água e particulados. Em conjunto com os testes do óleo lubrificante, também foi montada uma bancada para realização de testes em um dinamômetro, com a finalidade de avaliar o desempenho do motor utilizando as misturas definidas previamente.

Barbosa (2007) avaliou o desempenho operacional e a opacidade da fumaça de um trator agrícola funcionando com proporções entre Diesel comercial e Biodiesel de mamona, em operação de preparo de solo. O ensaio foi conduzido no Departamento de Engenharia Rural da UNESP de Jaboticabal, em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 6x2, com quatro repetições. O primeiro fator representa as seis proporções de Biodiesel-Diesel: B0, B5, B15, B25, B50 e B75 e o segundo representa duas operações de preparo do solo: gradagem e escarificação. Ressalta-se que B75 foi a máxima proporção de mistura, testada devido ao alto índice de viscosidade do biocombustível, sendo tal característica limitadora para o funcionamento do motor Diesel. Os resultados evidenciaram aumento no consumo específico de 19% quando se utilizou B75 em relação a B0. A operação de gradagem teve consumo específico 16% maior em relação à operação de escarificação. Para a opacidade da fumaça, houve redução de 35% com o uso de B75 comparado com B0.

Morón-Villarreyes *et al.* (2007) apresentaram um breve resumo sobre a importância das propriedades físicas do combustível e as relações com combustão no interior do cilindro, sugerindo um método para determinar a proporção volumétrica de Biodiesel, para que ocorresse uma combustão eficiente em motores de ignição por compressão. As principais propriedades de injeção e atomização relacionadas à qualidade de ignição do Biodiesel foram mensuradas, tais como: densidade, viscosidade e tensão superficial para Diesel mineral (B0), Biodiesel (B100) e outras onze misturas envolvendo Diesel e Biodiesel. Através do método proposto, foi verificado que proporções entre Biodiesel etílico de óleo de soja e Diesel de B2 a B30 favorecem uma combustão interna satisfatória.

Pereira *et al.* (2007) realizaram experimentos para geração de eletricidade usando misturas de Diesel e Biodiesel de óleo de soja, produzido por processo de transesterificação, usando metanol e hidróxido de potássio (KOH) como catalisador. Foram determinadas as seguintes propriedades dos combustíveis: densidade, ponto de fulgor, viscosidade, ponto de

fluidez, índice de cetano, corrosividade, carbono residual e conteúdo de cinza. Os resultados mostraram que, para todas as misturas testadas, a geração de eletricidade foi assegurada. Também, foi observado que as emissões de CO, C_xH_y e SO_2 diminuem nos casos das misturas envolvendo o óleo Diesel e o Biodiesel, comparado com as emissões operando apenas com Diesel. As temperaturas dos gases de exaustão e as emissões de NO e NO_x foram similares ou menores que a do Diesel, variando conforme o teor de Biodiesel na mistura analisada durante os testes.

Corrêa *et al.* (2008) analisaram, em bancada dinamométrica, o desempenho de um motor de ignição por compressão e injeção direta funcionando com misturas entre óleo Diesel convencional e Biodiesel extraído do óleo de girassol nas seguintes proporções: B5, B10 e B20. Foram analisadas algumas características de funcionamento, tais como: o torque, o consumo de combustível e de óleo lubrificante, em regime de trabalho variável e rotação constante. Posteriormente, foi realizada uma análise do óleo lubrificante revelando que, com a utilização do combustível B100, tem-se um aumento da viscosidade e dos teores de água e ferro no mesmo.

Lopes *et al.* (2008) avaliaram o consumo de combustível de um trator, da marca Valtra (Modelo BM - 100), funcionando com dois tipos de Biodiesel etílico de óleo de soja residual: o filtrado e o destilado. Ambos os tipos foram misturados ao Diesel convencional nas seguintes proporções: B0, B5, B15, B25, B50, B75 e B100. Os resultados evidenciaram que a adição de até 25% de Biodiesel ao Diesel de petróleo não alterou o consumo específico de combustível, e não houve diferença entre a utilização do Biodiesel filtrado e o destilado.

Peres *et al.* (2008) analisaram o reaproveitamento do sebo bovino para produção de Biodiesel através das rotas metílica e etílica. As amostras de Biodiesel foram submetidas às análises de massa específica, viscosidade, ponto de fulgor, índice de acidez, teor de água, poder calorífico, além de cromatografia gasosa. Os resultados ficaram dentro dos limites estabelecidos pela Agência Nacional do Petróleo (ANP). O Biodiesel etílico se apresentou com maior potencial para geração de potência em motores, além de ser mais seguro por ter ponto de fulgor mais elevado. Por outro lado, o Biodiesel metílico demonstrou ser mais resistente à oxidação, além de atingir maior rendimento na sua produção.

Tabile (2008) comparou o desempenho operacional e a opacidade da fumaça do motor de um trator agrícola, operando com Diesel comercializado na capital e no interior, e estes misturados ao Biodiesel de mamona, em sete proporções. Os ensaios foram conduzidos no Departamento de Engenharia Rural da UNESP de Jaboticabal. Os resultados mostraram que o tipo de Diesel influenciou no consumo de combustível e na opacidade da fumaça, sendo o

Diesel metropolitano de melhor qualidade. Observou-se, também, que, à medida que a proporção de Biodiesel aumentou, o mesmo ocorreu para o consumo de combustível, entretanto, a opacidade da fumaça reduziu com acréscimo da proporção de Biodiesel até 75% (B75).

Bunce *et al.* (2009) propuseram encontrar o ponto ótimo de funcionamento de um motor operando com Biodiesel de soja, a fim de minimizar os efeitos por conta das diferenças físicas entre o Biodiesel e o Diesel convencional, por meio de um modelamento da relação ar-combustível, fração de recirculação dos gases de exaustão, pressão de injeção de combustível e diferentes combinações da pulsação das unidades injetoras de combustível. Primeiramente, realizaram-se testes utilizando Biodiesel sem alterar as configurações do motor e, com isso, obteve-se que a emissão de óxidos de nitrogênio (NO_x) aumentou cerca de 44%, o consumo de combustível aumentou entre 11 e 20% e o material particulado diminuiu 80%. Assim, buscou-se definir configurações ótimas para o motor operando com Biodiesel, na tentativa de equilibrar baixa emissão de NO_x e material particulado, otimizando a pressão interna no cilindro e diminuindo o consumo específico de combustível de eixo (*Brake Specific Fuel Consumption - BSFC*). Deste modo, concluiu-se que, em uma configuração ideal do motor, a relação ar-combustível diminuiu na maioria dos casos e a fração de recirculação dos gases de exaustão aumentaram para diminuir as emissões de NO_x .

Camara (2009) verificou o desempenho de um trator agrícola funcionando com Biodiesel de dendê, realizando a operação de preparo do solo com escarificador. Para isso, foram avaliadas a opacidade da fumaça, a densidade do combustível e a vazão da bomba de abastecimento. Os fatores analisados foram o tempo de armazenamento e a proporção de mistura entre Biodiesel e Diesel. O experimento foi conduzido no Departamento de Engenharia Rural, da UNESP de Jaboticabal, em parceria com o LADETEL da USP de Ribeirão Preto. Com relação ao tempo de armazenagem, foi utilizado um combustível recém-produzido, um com três e outro com seis meses de armazenagem. As proporções percentuais de Biodiesel + Diesel foram B0 (0+100), B5 (5+95), B50 (50+50) e B100 (100+0). Deste modo, foram avaliados o consumo de combustível, a força de tração na barra, a velocidade real de deslocamento, a patinagem das rodas, a potência na barra de tração, a densidade do combustível, a vazão da bomba de abastecimento e a opacidade da fumaça de combustão. Os resultados evidenciaram aumento no consumo específico a partir da mistura com 25% de Biodiesel, entretanto o tempo de armazenamento não influenciou no consumo. Com relação à opacidade da fumaça, houve redução, mesmo com apenas 5% de Biodiesel na mistura, sendo que o tempo de armazenamento não influenciou a opacidade.

Dib (2010) investigou técnicas de produção de Biodiesel a partir do óleo residual reciclado e do óleo de soja degomado. Primeiramente, foram realizados testes laboratoriais em pequena escala para produção de Biodiesel. Em seguida, a produção foi expandida para uma escala semipiloto, através da utilização de óleo residual reciclado num reator com capacidade de produzir de 75 a 80 litros de Biodiesel por batelada. Com isso, a partir da mistura entre o Biodiesel produzido (B100 residual) e Diesel convencional, foram geradas as seguintes proporções: B25, B50 e B75. Os ensaios foram realizados em um grupo-gerador, originalmente movido a Diesel, com potência nominal de 6 kVA. Para isto, variou-se a carga desde 0 a 3 kW e, com isso, pôde-se determinar o consumo específico e a temperatura dos gases de exaustão. Por meio do processo de caracterização do Biodiesel obtido, foi verificado que as propriedades físicas e químicas mensuradas se encontravam dentro dos limites aceitáveis encontrados na literatura. Além disso, nos ensaios do grupo-gerador, não foram verificadas variações significativas do consumo específico e temperatura dos gases de exaustão, para uma mesma carga, independentemente do combustível utilizado.

Fazal; Haseeb; Masjuki (2010) analisaram a durabilidade, as emissões e o desempenho de um motor Diesel operando com Biodiesel. Foi verificado que o Biodiesel possui melhor lubricidade que o Diesel convencional, porém, em longos períodos de ensaio, o mesmo perde parte da capacidade de lubrificação em função de sua natureza corrosiva. Foi observado, também, que o Biodiesel melhorou a combustão e proporcionou uma eficiência térmica maior que o Diesel, mas, em contrapartida, a potência de eixo do motor foi levemente menor e o consumo específico de combustível de eixo foi maior para compensar o menor poder calorífico. Com isso, as desvantagens poderiam diminuir caso a viscosidade do Biodiesel diminuísse. Quanto à emissão de poluentes, devido à grande presença de oxigênio (O_2) livre na composição química do Biodiesel, as emissões foram reduzidas, porém a quantidade de óxidos de nitrogênio (NO_x) aumentou levemente, sendo que tal fato pode aumentar o nível de corrosão no motor havendo, então, a necessidade de correção com aditivos. Por fim, foram destacadas as vantagens de se usar Biodiesel em relação ao Diesel convencional, a saber: número de cetano elevado, lubricidade elevada, ponto de ignição mais elevado, presença de O_2 livre, redução de emissões, além de não haver enxofre em sua composição.

Kimura (2010) utilizou a técnica de análise do óleo lubrificante, onde se busca averiguar as possíveis influências que o uso do Biodiesel pode ter sobre as propriedades físico-químicas do óleo lubrificante. Para a realização dos testes, foram utilizados três motores de ignição por compressão (marca Toyama, modelo T100 FE), geralmente utilizados para geração de energia elétrica e acionamento de motobombas e motocultivadores. Foram realizados os seguintes

ensaios: ferrografia analítica, espectrografia por absorção atômica, ponto de fulgor, filtragem por membrana de celulose e análise de viscosidade. Os resultados obtidos mostraram que a morfologia e a concentração de elementos encontrados no óleo lubrificante, via espectrografia por absorção atômica, foram considerados normais, e que uma técnica isolada de análise não traduz a real situação de um sistema.

Barbosa (2011) avaliou, em condições reais de campo, o desgaste de motores Diesel (AGCO Sisu Power, modelo 620DSR) da frota comercial de tratores de propriedade da Usina Catanduva. Para isso, foi utilizado Diesel, Biodiesel de óleo de mamona na proporção de 5% e Biodiesel de óleo de soja nas proporções de 5 e 20%, sendo estes últimos produzidos pelo LADETEL da USP de Ribeirão Preto. O tempo de avaliação foi de 18 meses, o que resultou, em média, 3.624 horas de trabalho efetivo de campo para cada trator avaliado, sendo os mesmos da marca Valtra, modelo BH180. Após os testes em campo, procedeu-se a retirada dos motores e o envio para o fabricante, onde se procedeu a abertura dos mesmos e foi feita uma criteriosa avaliação dos componentes. Os resultados evidenciaram que a condição de desgaste dos motores que funcionaram com Biodiesel de soja e de mamona não apresentou anormalidade em comparação aos motores que funcionaram com Diesel. Avaliando o sistema de alimentação, foram observados pequenos depósitos de coloração escura na bomba injetora dos motores testados com Biodiesel de soja e presença de desgastes severos na bomba injetora que equipava o motor testado com Biodiesel de mamona, o que poderia ocasionar o travamento e a quebra futura, em função de deficiência de lubrificação do combustível provocada pela contaminação com água.

Al-Dawody; Bhatti (2012) utilizaram Biodiesel, produzido através da reciclagem de óleo de cozinha, misturado ao Diesel convencional nas proporções: B10, B20, B30 e B50, e variaram a taxa de compressão do motor em: 14, 16 e 18:1. Para todas as misturas, ao aumentar a taxa de compressão, foi verificado que o torque aumenta e o consumo específico de combustível de eixo (*Brake Specific Fuel Consumption - BSFC*) diminui. Foi constatado, também, que, ao aumentar a porcentagem de Biodiesel na mistura, o *BSFC* também aumentou para todas as taxas de compressão ensaiadas. A variação da taxa de compressão de 14 para 18:1 resultou em um aumento de 18,39, 27,48, 18,5 e 19,82% na eficiência térmica, para as misturas B10, B20, B30 e B50, respectivamente. Na média, quando a taxa de compressão foi aumentada de 14 para 18:1, a emissão de CO₂ aumentou 14,28%, a emissão de hidrocarbonetos diminuiu 52%, a emissão de CO diminuiu 37,5% e a emissão de NO_x aumentou 36,84%. Devido à alta viscosidade e baixa volatilidade do Biodiesel, o avanço de ignição diminuiu em 13,95% quando a taxa de compressão foi de 14 para 18:1. Então,

concluiu-se que, ao aumentar a taxa de compressão, foram gerados mais benefícios utilizando misturas com Biodiesel do que para o Diesel comercial.

Oliveira (2012) avaliou desempenho operacional e a opacidade da fumaça de trator agrícola funcionando com Biodiesel de mamona, cujos fatores estudados foram o período de armazenamento e a proporção de mistura Diesel-Biodiesel. O experimento foi conduzido no Departamento de Engenharia Rural da UNESP de Jaboticabal, em parceria com o LADETEL da USP de Ribeirão Preto. O período de armazenamento do combustível foi de zero, três e seis meses após a data da fabricação, e as proporções de mistura Diesel-Biodiesel foram de 0% de Biodiesel (B0), 5% de Biodiesel (B5), 25% de Biodiesel (B25), 50% de Biodiesel (B50) e 100% de Biodiesel (B100). Os resultados evidenciaram aumento no consumo específico a partir da mistura com 25% de Biodiesel; entretanto, o período de armazenamento não influenciou no consumo. A opacidade da fumaça reduziu-se a partir da adição de 5% de Biodiesel, destacando-se que o período de armazenamento influenciou na referida variável.

Shahabuddin *et al.* (2012) fez uma revisão bibliográfica em motores de ciclo de ignição por compressão operando com Biodiesel, onde foram revisados mais de cem artigos publicados. Em sua investigação, ele concluiu que as características de um motor operando com Biodiesel são levemente diferentes do que as de um motor operando com Diesel derivado do petróleo. Na grande parte dos textos citados, o Biodiesel quando comparado ao Diesel, teve o início da combustão entre 1 a 5° mais cedo, e um tempo de ignição entre 0,25 a 1° menor. As justificativas encontradas para tal fato são: o número de cetano mais elevado, menor compressibilidade e a composição dos ácidos graxos do Biodiesel. Foi verificado também que a taxa de liberação de calor no Biodiesel é menor que no Diesel, devido ao menor poder calorífico, menor volatilidade, menor tempo de ignição e maior viscosidade.

Tesfa *et al.* (2012) utilizaram um motor de ignição por compressão de quatro cilindros, quatro cursos, injeção direta e turboalimentado. Os ensaios foram realizados utilizando Diesel e Biodiesel de diferentes origens: óleo residual, óleo de canola e óleo de milho. Quanto aos parâmetros de análise, foram medidos a pressão no cilindro, a taxa de liberação de calor e o consumo específico de combustível de eixo (*Brake Specific Fuel Consumption - BSFC*). Deste modo pôde-se verificar que os diferentes tipos de Biodiesel não apresentaram diferenças significantes quanto ao pico da pressão no interior do cilindro e ao *BSFC*. Por outro lado, constatou-se que o motor operando com Biodiesel apresentou uma pressão no cilindro e uma taxa de liberação de calor levemente maior que se operando com Diesel convencional. Observou-se, também, que o motor operando com Biodiesel puro apresentou um *BSFC* 15%

maior que se estivesse operando com Diesel. Portanto, foi concluído que as características físicas do Biodiesel afetam significativamente o desempenho do motor.

Hwang *et al.* (2014) utilizou um motor Diesel monocilíndrico de injeção direta operando com Biodiesel obtido através de óleo de cozinha usado e estudou os efeitos da pressão de injeção e o tempo de injeção na combustão e nas características de emissão. Os testes ocorreram utilizando duas pressões de injeção (80 e 160 MPa) e diferentes avanços da injeção (25 a 0° da árvore da manivelas), para duas cargas de operação. Os resultados mostraram que o consumo específico de combustível indicado (*Indicated Specific Fuel Consumption - ISFC*), em respeito aos diferentes avanços de injeção do Biodiesel, foram maiores em todas as condições de teste, se comparado com o Diesel. O pico da pressão no cilindro e o pico da taxa de liberação de calor do Biodiesel foram levemente menores. Para as emissões de poluentes, os benefícios da utilização do Biodiesel incluíram as reduções de fumaça, monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos (HC), especialmente com pressões de injeção mais altas. A emissão dos óxidos de nitrogênio (NO_x) com Biodiesel foi relativamente maior para todas condições do experimento.

Por meio de um estudo detalhado a respeito dos trabalhos descritos, podem ser expressos alguns parâmetros de funcionamento médios, os quais poderão ser confrontados com os resultados alcançados no decorrer do processo de validação da bancada dinamométrica.

Alguns estudos apresentam que, adições de Biodiesel nas concentrações até B30, favorecem a conversão de energia do combustível em trabalho de expansão no interior do cilindro, proporcionando uma elevação na eficiência de conversão do combustível.

Em contrapartida, operando com B100 há redução na potência de eixo de aproximadamente 1,3% quando comparado com o B5, pois, o Biodiesel apresenta menor poder calorífico, menor volatilidade e maior viscosidade, acarretando em uma menor taxa de liberação de calor.

3. Equipamentos e Desenvolvimento do Aparato Experimental

Neste capítulo serão apresentadas as principais características construtivas e funcionais do motor de combustão interna e do freio eletromagnético. Em seguida, será descrito todo o processo de desenvolvimento e concepção do aparato experimental.

3.1. Características dos Equipamentos

3.1.1. Características do Motor

O motor OM-352, produzido pela Mercedes-Benz, apresenta as características construtivas e funcionais mostradas na Tabela 1.

Tabela 1. Principais características construtivas e funcionais do Motor OM-352.

Motor Mercedes-Benz OM-352	
Número de cilindros	6
Disposição dos cilindros	Vertical em linha
Ciclo de funcionamento	Diesel de quatro cursos
Diâmetro do cilindro	97 mm
Curso	128 mm
Cilindrada total	5675 cm ³
Relação de compressão	17:1
Folga das válvulas de admissão	0,20 mm
Folga das válvulas de exaustão	0,30 mm
Rotação em marcha lenta	600 rpm
Sentido de rotação	horário
Compressão no interior do cilindro	22 a 24 bar (mínima de 20 bar)
Potência máxima	96 kW a 2800 rpm
Torque máximo	363 N.m a 1700 rpm
Tipo de injeção	Direta com bomba injetora Bosch em linha
Ordem de ignição	1 - 5 - 3 - 6 - 2-4
Pressão de abertura de bicos injetores	200 + 8 bar (mínima de 180 bar)
Tipo do sistema de arrefecimento	Bomba centrífuga
Temperatura de operação	80 a 95 °C
Tipo do sistema de lubrificação	Bomba de engrenagens
Pressão mínima do óleo lubrificante	0,5 bar em marcha lenta e 2,5 bar em rotação máxima

Fonte: Manual de manutenção do motor Mercedes-Benz OM-352.

O motor OM-352 trata-se de um modelo, dentre inúmeros motores da série 300 que foram desenvolvidos no decorrer e após a Segunda Guerra Mundial, que foi revelado apenas em meados de 1964. A partir daí, foi e ainda está sendo utilizado em uma variedade de setores, tais como: geração de energia elétrica, aplicação agrícola (tratores, colheitadeiras e sistemas de irrigação), setor de transporte de cargas e passageiros (principalmente em caminhões e ônibus da linha Mercedes-Benz fabricados a partir da década de 70), setor militar, dentre outros.

Esse motor pode apresentar diferentes níveis de acabamento e geração de potência de eixo, proporcionando designações como OM-352, quando naturalmente aspirado; OM-352A, variante equipada com um turbocompressor; ou como OM-352LA, quando é equipado com um turbocompressor e *intercooler*. Com essas configurações variadas, o mesmo pode oferecer de 92 a 141 kW (126 a 192 hp).

O motor OM-352, empregado nos ensaios de validação da bancada dinamométrica, foi concebido para aplicações agrícolas ou estacionárias. Deste modo, a bomba injetora é configurada para proporcionar uma rotação máxima da árvore de manivelas por volta de 2.200 rpm. A Figura 4 ilustra uma vista lateral do motor utilizado no presente trabalho.

Figura 4. Vista lateral do motor OM-352.



Fonte: Próprio autor.

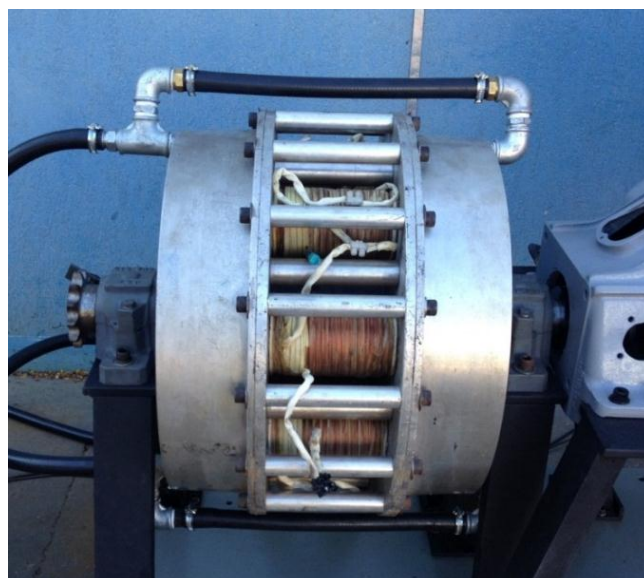
3.1.2. Características do Dinamômetro

O dinamômetro a ser utilizado nos experimentos se trata de um freio eletromagnético, cuja intensidade de frenagem, ou seja, o torque que o motor analisado deve vencer é controlado por um circuito eletrônico microprocessado, sendo que, deste modo, a carga pode ser alterada de maneira instantânea. Outra vantagem corresponde à questão de que não há contato ou atrito entre o disco e as bobinas e, portanto, não há desgaste do freio, prolongando a vida útil.

O princípio de funcionamento do freio eletromagnético é explicado por meio das Correntes de Foucault, também conhecidas como Correntes Parasitas. Um campo magnético, gerado pelas bobinas eletromagnéticas, atua sobre os discos, gerando um torque de reação contrário ao sentido de rotação do conjunto e, com isso, transformando a energia cinética em calor, o qual é dissipado pelo sistema de arrefecimento próprio do conjunto. O torque apresentado pelo freio é medido continuamente por uma célula de carga, com uma boa precisão.

A Figura 5 ilustra o freio eletromagnético junto da empresa TopDyno (Modelo TDB500), o qual será utilizado para na montagem da bancada dinamométrica para posterior teste de desempenho de motores, iniciando-se com os testes preliminares do motor OM-352.

Figura 5. Freio eletromagnético TDB500.



Fonte: Próprio autor.

Segundo o fabricante do freio eletromagnético e do sistema de aquisição de dados, a calibração do aparelho é feita calculando-se a inércia rotacional do conjunto a partir da massa específica do material e da geometria das peças. As perdas de potência, intrínsecas ao aparelho, também são medidas e compensadas. Deste modo, o sistema atinge precisão ao redor de 1% e repetibilidade na obtenção de resultados na ordem de 0,1%.

3.2. Desenvolvimento do Aparato

3.2.1. Confeção das Peças

A princípio, a bancada é composta basicamente pelos seguintes componentes: base inercial de ferro fundido cinzento, quatro pontos de sustentação com amortecimento de vibração da base, quatro pontos de sustentação do motor, dois pontos para sustentação do dinamômetro, freio eletromagnético TDB500, e acoplamento por meio de cruzeta.

Primeiramente, se deu início ao processo de desenvolvimento e concepção de componentes e equipamentos necessários para a montagem e operação da bancada dinamométrica, os quais serão descritos e especificados em seguida.

3.2.1.1. Base Inercial

Uma base de ferro fundido foi empregada como massa inercial, com a finalidade de diminuir os níveis de vibração no período de funcionamento do sistema. A base tem uma massa de aproximadamente 400 kg e as seguintes dimensões: 650 mm de largura, 1.300 mm de comprimento e 100 mm de altura.

A Figura 6 ilustra essa base na sua forma original, sendo que na mesma são fixados os pontos de sustentação da base, do motor e do dinamômetro. Para isto, foi optado por usar as roscas internas na base para a fixação, a invés de se utilizar parafusos passantes e porcas.

Figura 6. Base inercial original.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 7 mostra em detalhe uma rosca interna feita após a furação da base, com a finalidade de fixar os pontos de sustentação amortecidos e possibilitar o nivelamento do conjunto no local de instalação.

Figura 7. Rosca interna usinada na base inercial.



Fonte: Próprio autor.

Adicionalmente, para a fixação dos suportes do motor, do dinamômetro e da célula de carga, foram feitos 4 furos com uma broca de 8,5 mm de diâmetro e, em seguida, foram feitas as roscas M10 x 1,5 mm com o emprego de um conjunto de machos manuais apropriados. Os parafusos empregados são de cabeça cilíndrica com sextavado interno, fabricados a partir de aço ligado tratados por têmpera e revenido, e com classe de resistência 12.9.

3.2.1.2. Pontos de Sustentação da Base Inercial

Cada ponto de sustentação da base é composto por um tucho espaçador e um amortecedor, sendo que este último é fabricado pela empresa VIBRA-STOP e apresenta as características listadas na Tabela 2.

Tabela 2. Características do amortecedor utilizado na base.

VIBRA-STOP MINI	
Diâmetro externo	90 mm
Diâmetro no núcleo de borracha	80 mm
Carga estática por peça	500 kg
Carga dinâmica por peça	2.000 kg
Dureza da borracha	60 Shore A
Deflexão máxima	3,9 mm

Fonte: www.vibra-stop.com.br.

Por sua vez, as Figuras 8 e 9 ilustram, respectivamente, o tucho fabricado e acoplado ao sistema de amortecimento e o conjunto fixado na base inercial, ilustrando a possibilidade da variação de altura de cada ponto de sustentação, de maneira independente, garantindo nivelamento do sistema completo.

Figura 8. Conjunto de sustentação da base.



Fonte: Próprio autor.

Figura 9. Conjunto fixado na base inercial.



Fonte: Próprio autor.

Vale destacar que o tucho foi confeccionado a partir de um tarugo de aço SAE 1020 com 1¼” de diâmetro. Deste modo, a região central do tucho, a qual irá suportar as cargas estáticas e dinâmicas do sistema, apresenta as seguintes dimensões: diâmetro de 28 mm e comprimento de 80 mm. Por outro lado, ambas as pontas do tucho apresentam rosca externa, cujas características são: polegada padrão NC de ¾” com 10 fios por polegada, com variação apenas no comprimento das mesmas, sendo que, na interface com a base tem-se 40 mm e na interface com o amortecedor tem-se 25 mm.

3.2.1.3. Pontos de Sustentação do Motor, do Freio Eletromagnético e da Célula de Carga

Para a confecção dos quatro pontos de sustentação do motor e dos dois pontos de sustentação do dinamômetro foram utilizadas uma viga laminada de aço ASTM A36 com perfil U (para confecção dos pés); uma barra chata de aço carbono com espessura de 1/2” (para a confecção da base superior) e uma barra chata de aço carbono com espessura de 5/16” (para a confecção das bases inferiores).

Para os pontos de sustentação do motor e do freio eletromagnético, em cada base inferior foram feitos dois furos de 10,5 mm, com a finalidade de se passar os parafusos de fixação do mesmo e travá-los junto às roscas da base inercial. Por outro lado, em cada base superior foram feitos dois furos, espaçados adequadamente, com uma broca de 10,3 mm e, em seguida, foram feitas roscas M12 x 1,75 x 60 mm, com o auxílio de um conjunto de machos adequados. Essas roscas, dependendo do suporte, têm a finalidade de fixar os pontos de apoio do motor ou os mancais do freio eletromagnético.

Com respeito ao ponto de sustentação da célula de carga, em cada base inferior foi feito um furo de 10,5 mm para passar o parafuso M10 x 1,5 x 40 mm e fixá-la junto à base inercial. Na parte superior foi soldado o mecanismo articulado para fixação da célula de carga. Essa articulação foi projetada e concebida para garantir que ocorra deformação elástica apenas na célula de carga de modo a não influenciar nos resultados obtidos por meio do sistema.

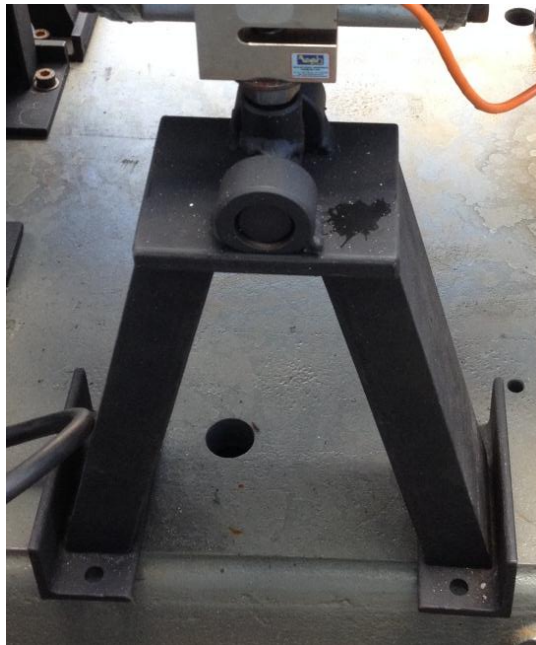
A Figura 10 representa um ponto de sustentação confeccionado a partir dos materiais descritos. Por sua vez, a Figura 11 ilustra o ponto de sustentação da célula de carga, o qual foi confeccionado seguindo os passos apresentados anteriormente.

Figura 10. Ponto de sustentação do motor e do dinamômetro.



Fonte: Próprio autor.

Figura 11. Ponto de sustentação da célula de carga.



Fonte: Próprio autor.

Maiores informações a respeito dos componentes empregados na confecção dos pontos de sustentação estão apresentadas, respectivamente, nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3. Parâmetros construtivos da viga laminada com perfil U.

Viga laminada com perfil U	
Largura da alma	76,20 mm
Espessura da alma	6,55 mm
Altura da aba	35,05 mm
Espessura da aba	6,93 mm
Área da seção transversal	9,48 cm ²
Massa específica	7,44 kg/m
Comprimento	6,0 m

Fonte: Catálogo de barras e perfis da GERDAU.

Tabela 4. Parâmetros construtivos das barras chatas empregadas.

Componente	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (pol)
Barra chata da base superior	1.500	100	1/2
Barra chata das bases inferiores	1.500	100	5/16

Fonte: Próprio autor.

3.2.1.4. Flange de Acoplamento do Freio Eletromagnético

O flange de acoplamento do freio eletromagnético foi desenvolvido a partir de um tarugo de Aço SAE 1020 como 6” de diâmetro e 120 mm de comprimento. Foram feitos oito furos com roscas M10 x 1,5 mm para a fixação do acoplamento elástico.

O travamento do flange no eixo, para sustentação do torque aplicado, foi realizado por meio de uma chaveta de aço SAE 8640, com 16 mm de largura, 14 mm de altura e 60 mm de comprimento. A Figura 12 ilustra esse componente mecânico.

Figura 12. Flange de acoplamento do freio eletromagnético.

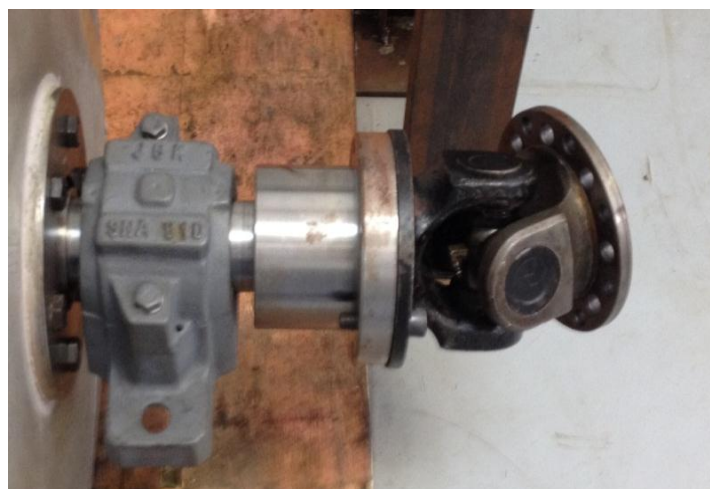


Fonte: Próprio autor.

3.2.1.5. Acoplamento

O acoplamento tem a finalidade de transmitir a potência do motor para o freio eletromagnético, tendo sido concebido a partir de peças automotivas empregadas no sistema de transmissão de caminhões. Deste modo, consiste em duas luvas-flange e uma cruzeta, as quais são utilizadas no eixo que transmite a potência do câmbio para o diferencial (eixo cardan) do caminhão da marca Mercedes-Benz, modelo 1113. A Figura 13 ilustra esse acoplamento tipo cruzeta.

Figura 13. Acoplamento do tipo cruzeta.



Fonte: Próprio autor.

3.2.1.6. Suporte do Radiador

O projeto do suporte do radiador visou a intercambiabilidade, ou seja, permitir que, com poucas alterações, possa se instalar facilmente outros modelos de radiadores em função da carga térmica requisitada para o motor em teste. Deste modo, o projeto consiste em dois suportes simétricos, fabricados por meio de um tubo de aço carbono com formato da seção transversal retangular 20x30 mm (Metalon). A Figura 14 ilustra o suporte do radiador montado junto ao mesmo.

Figura 14. Suporte do radiador.



Fonte: Próprio autor.

3.2.1.7. Suporte do Sensor de Rotação

O suporte do sensor de rotação foi confeccionado a partir de uma barra chata de 5 mm de espessura, 25 mm de largura e 120 mm de comprimento. Foi feita uma torção de 90°, para poder fixá-lo através do parafuso de fixação do mancal traseiro do freio eletromagnético. Deste modo, em uma extremidade foi feito um furo de 12,5 mm para poder passar o parafuso de fixação do mancal e na outra extremidade, um furo de 20 mm para inserir o sensor de rotação, e um de 4 mm para fixá-lo por meio de um parafuso M6, cuja rosca foi feita no próprio suporte. A Figura 15 ilustra o suporte do sensor de rotação.

Figura 15. Suporte do sensor de rotação.



Fonte: Próprio autor.

3.2.1.8. Travas de Fixação do Freio Eletromagnético ao Motor

As travas foram feitas com a finalidade de gerar mais rigidez ao sistema, fazendo com que o nível de vibração do conjunto diminuísse. Deste modo, projetaram-se duas travas simétricas para fixar o suporte dianteiro do freio eletromagnético à caixa-seca do motor ensaiado. As travas foram feitas a partir de uma cantoneira de aço carbono com abas de 2" e espessura $\frac{1}{4}$ e uma chapa de aço carbono de $\frac{1}{4}$ ", a qual foi soldada de topo em uma das seções transversais da cantoneira. Nesta chapa, foi feito um furo de 8,5 mm e em seguida uma rosca M10x1,5 mm para poder fixar o conjunto à caixa-seca. Na parte superior da cantoneira, foi feito um furo de 12,5 mm para poder passar o parafuso de fixação do mancal. A Figura 16 ilustra a trava de fixação.

Figura 16. Trava de fixação do mancal ao motor.



Fonte: Próprio autor.

3.2.1.9. Painel de Instrumentos do Motor

Foi confeccionado um painel de instrumentos para que o operador possa monitorar os

principais parâmetros de funcionamento do motor. Para tanto, foram utilizados uma barra de tubo de aço carbono com formato da seção transversal retangular 20x30 mm (Metalon) e uma placa de madeira, onde foram instalados inicialmente um indicador de temperatura do líquido de arrefecimento e de pressão do óleo de lubrificação, além de uma chave de ignição para dar a partida do motor. A Figura 17 ilustra o painel de instrumentos do motor.

Figura 17. Painel de instrumentos do motor.



Fonte: Próprio autor.

3.2.2. Revitalização do Motor

3.2.2.1. Sistema de Alimentação

Inicialmente foi desmontado o sistema de alimentação de combustível. Para este procedimento, foi necessário colocar o motor no ponto de início da injeção de combustível do primeiro cilindro. Deste modo, foi preciso rotacionar a árvore de manivelas até coincidir as marcações da polia da árvore de manivelas com a seta indicadora e a marcação da engrenagem da bomba injetora com a respectiva seta. A Figura 18 ilustra a marcação da engrenagem da bomba injetora e a seta indicadora. Não havia a seta de indicação para a polia

da árvore de manivelas. Em função disso, para prosseguir a retirada da bomba injetora, fez-se uma marcação na tampa de distribuição, com o intuito de se conferir, posteriormente, com a seta indicadora, a qual viria a ser adquirida.

Figura 18. Marcação de sincronismo da bomba injetora.



Fonte: Próprio autor.

A bomba injetora e os seis bicos injetores foram enviados para uma oficina especializada, onde foi feita a limpeza interna dos componentes e, posteriormente, a regulagem do tempo de injeção e volume injetado pela bomba injetora, assim como a equalização dos bicos injetores.

Paralelamente, foi realizada em campo a limpeza das tubulações de baixa e alta pressão do sistema de alimentação e dos suportes dos filtros de combustível, utilizando-se uma mistura de óleo Diesel e querosene na proporção de 50% em volume para cada componente.

Por fim, realizou-se a troca dos filtros de combustível, mangueiras de alimentação e retorno de combustível, além de todas as arruelas de vedação das junções dos tubos flexíveis de combustível, bem como do tubo flexível de lubrificação da bomba injetora.

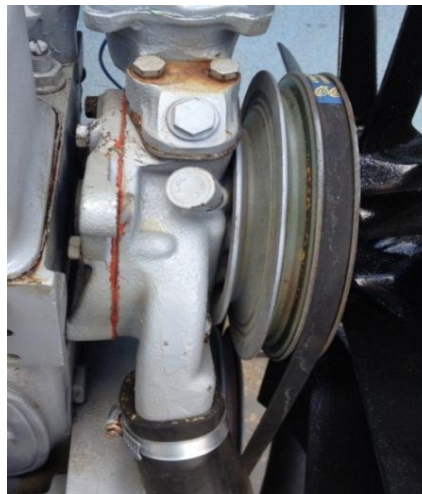
3.2.2.2. Sistema de Arrefecimento

Primeiramente foi efetuada a desmontagem parcial do sistema de arrefecimento, envolvendo a retirada e inspeção da bomba d'água, válvula termostática, interruptor de temperatura, mangueiras de envio e retorno ao radiador. Com isso, constatou-se a necessidade da troca do reparo da bomba d'água, visto que, como o motor ficou parado muito tempo, o selo perdeu a capacidade de vedação. O reparo é composto pelos seguintes componentes: eixo, rolamento, rotor centrífugo aberto, selo de vedação, anel de vedação e juntas. A Figura

19 representa a bomba d'água após a troca do reparo.

A válvula termostática foi testada, inserindo-a em um recipiente contendo água em aquecimento e monitorando-se a temperatura por meio de um termopar. Deste modo, foi verificada que a temperatura de início de abertura da mesma era de aproximadamente 80 °C, não sendo preciso realizar a troca da mesma por se tratar de um valor adequado. A Figura 20 ilustra o alojamento da válvula termostática.

Figura 19. Bomba d'água após troca do reparo.



Fonte: Próprio autor.

Figura 20. Alojamento da válvula termostática.



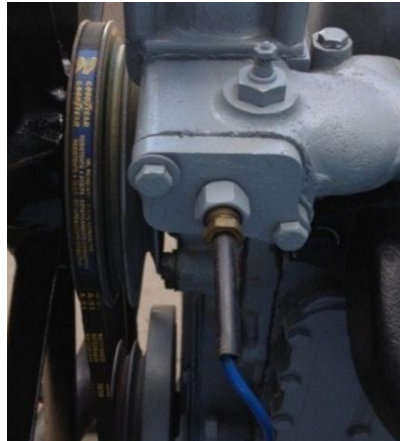
Fonte: Próprio autor.

O interruptor de temperatura foi testado e mantido no sistema para acionar uma lâmpada indicativa de superaquecimento, caso isso ocorra. Foi adicionado um sensor de temperatura com a finalidade de se aferir a temperatura instantânea. Para isso, foi preciso usar um tucho

de bronze para poder inserir o termômetro na galeria do sistema de arrefecimento. Com isso, o operador pode monitorar a temperatura por meio de um visor instalado no painel de instrumentos do motor, contendo a escala graduada do termômetro e a lâmpada de superaquecimento. A Figura 21 apresenta o sensor de temperatura do motor instalado no sistema de arrefecimento.

Por fim, o radiador foi testado e verificou-se que não havia vazamentos. Deste modo, realizou-se a pintura do mesmo, substituiu-se a tampa de enchimento do fluido de arrefecimento, bem como as mangueiras e abraçadeiras de fixação das mesmas. A Figura 22 ilustra as novas mangueiras instaladas no sistema de arrefecimento do motor.

Figura 21. Sensor de temperatura de arrefecimento do motor.



Fonte: Próprio autor.

Figura 22. Mangueiras instaladas no radiador.



Fonte: Próprio autor.

3.2.2.3. Sistema de Lubrificação

Foi adquirido e instalado um sistema de monitoramento manual para aferir o nível de óleo lubrificante no interior do motor, o qual é composto por: tucho, tubo guia e vareta do nível de óleo lubrificante, sendo o mesmo mostrado na Figura 23.

Deste modo, constatou-se um excesso significativo de óleo lubrificante, o que explica a reclamação dos alunos, que trabalhavam com o motor anteriormente, quanto ao elevado volume de fumaça despejada no ambiente quando o mesmo operava. Isso ocorria, pois, o óleo lubrificante em excesso faz com que os anéis raspadores de óleo não consigam eliminar a película excedente formada nas camisas. Esse volume excedente na película é gerado pela própria rotação da árvore de manivelas em contato com esse volume a mais de óleo lubrificante no cárter.

Para a realização dos testes, foi realizada a substituição do filtro e do óleo lubrificante. Foi utilizado um lubrificante mineral multiviscoso (LUBRAX Extra Turbo), com grau SAE 15W/40 e nível de desempenho API CG-4/SJ.

Figura 23. Sistema de monitoramento manual do nível de óleo lubrificante.



Fonte: Próprio autor.

Com a finalidade de se monitorar a pressão do óleo do sistema de lubrificação foram utilizados um interruptor de pressão eletromecânico ligado a uma lâmpada e uma tomada de

pressão do sistema para alimentar um manômetro, ambos instalados no painel de instrumentos do motor.

Por fim, foram substituídos o anel de vedação do tubo de respiro do bloco do motor e a junta da tampa de válvulas, a qual apresenta grande importância, pois é responsável pela vedação do coletor de admissão, além da vedação da parte superior do cabeçote, que abriga o sistema de acionamento das válvulas de admissão e escapamento e os bicos injetores de combustível.

3.2.2.4. Regulagem das Válvulas de Admissão e Escapamento

Para a realização da regulagem das válvulas de admissão e escape foi realizado o procedimento constituído pelos cinco passos listados a seguir:

1. Girar a árvore de manivelas em sentido de rotação até que o pistão do primeiro cilindro atinja o ponto morto superior (PMS) no curso de compressão. Para isto, basta fazer coincidir a marca da polia do motor com a seta existente na tampa de distribuição e verificar se as duas válvulas do primeiro cilindro estão fechadas. Caso não estejam, basta girar 360° a árvore de manivelas, garantindo que o primeiro cilindro esteja posicionado conforme o que foi descrito acima;
2. Nesta posição, podem ser reguladas as válvulas: 1, 2, 3, 5, 7 e 9, numeradas a partir da frente do motor;
3. Soltar a contraporca e o parafuso de regulagem da folga com uma chave adequada;
4. Introduzir uma lâmina de 0,2 mm para as válvulas de admissão e uma lâmina de 0,3 mm para as de escapamento entre o balancim e a haste da válvula e regular o parafuso de forma que a lâmina possa passar justa na folga;
5. Girar 360° a árvore de manivelas em sentido de rotação e realizar o mesmo procedimento para as válvulas: 4, 6, 8, 10, 11 e 12.

3.2.2.5. Adaptação do Filtro de Ar

Para a adaptação do filtro de ar, foi desenvolvida uma bucha de alumínio de ajuste para suprir a diferença entre o diâmetro interno do suporte do filtro de ar com o diâmetro externo do duto da tomada de ar da tampa de válvulas do motor. A Figura 24 mostra o local onde foi instalada a bucha de alumínio para a fixação do suporte do filtro de ar do motor.

Figura 24. Local onde foi instalada a bucha de alumínio.



Fonte: Próprio autor.

3.2.2.6. Tomada de Ar da Admissão para a Central Eletrônica

Foi desenvolvido um adaptador de engate rápido para se instalar uma mangueira rígida, com 8 mm de diâmetro interno, desde a admissão do motor até a central eletrônica de controle do freio eletromagnético. Esta tomada de ar tem por finalidade gerar a leitura da depressão instantânea no coletor de admissão, visto que se trata de um motor naturalmente aspirado. A Figura 25 representa o adaptador bem como o local onde foi instalado.

Figura 25. Adaptador para aferir a depressão no coletor de admissão.



Próprio autor.

3.2.2.7. Pintura do Motor e seus Componentes

Inicialmente o motor e seus componentes foram lavados com o auxílio de uma bomba d'água de alta pressão, produto químico comercialmente conhecido com LM e pincel para espalhar o produto. Esse processo foi realizado três vezes para garantir a retirada de óleos e graxas, que estavam impregnados nos componentes do motor.

Feito isso, foi realizada a pintura do motor e de seus componentes na oficina do Bloco de Ciências Térmicas do Departamento de Engenharia Mecânica. Foi utilizado um esmalte sintético automotivo, para garantir maior durabilidade, sendo o mesmo aplicado por meio de uma pistola de pintura a gravidade, a qual estava acoplada a um regulador de pressão para manter a pressão do ar comprimido entre 35 e 45 lbs/pol².

Além do resultado comprovado visualmente, pôde-se observar uma melhora no funcionamento do motor. Com a regulagem das válvulas de admissão e escapamento, o motor parou de falhar e opera de modo mais silencioso. Em função da instalação do medidor do nível, substituição do óleo lubrificante e do filtro, o mesmo parou de consumir óleo lubrificante e, conseqüentemente, de gerar excedente de fumaça. As Figuras 26 e 27 ilustram, respectivamente, o antes e o depois do processo de revitalização do motor utilizado neste trabalho.

Figura 26. Imagem do motor antes da revitalização.



Fonte: Próprio autor.

Figura 27. Imagem do motor depois da revitalização.



Fonte: Próprio autor.

3.2.3. Montagem da Bancada Dinamométrica

Durante o processo de montagem da bancada dinamométrica foi constatado um defeito no freio eletromagnético. Deste modo, o freio foi encaminhado para o fabricante TopDyno em Curitiba (PR) e constatou-se que se tratava de um defeito de fabricação na caixa de mancais de sustentação da carcaça.

Este componente foi produzido fora das tolerâncias dimensionais especificadas, acarretando, neste caso, em uma pré-carga insuficiente nos rolamentos cônicos de esfera, refletindo em uma folga axial e, consequentemente, radial no eixo do freio eletromagnético, gerando um nível de vibração excessivo quando em operação. Com isso, geraram-se atrasos e custos adicionais no desenvolvimento do presente trabalho.

3.2.3.1. Montagem dos Pontos de Sustentação da Base Inercial e Nivelamento

O processo de montagem da bancada dinamométrica se iniciou com instalação dos quatro pontos de sustentação da base inercial. Feito isso, com o auxílio de um nível de precisão da marca Mitutoyo, foi possível ajustar a altura de cada ponto, com o intuito de se deixar

nivelada a base nas direções longitudinal e transversal. A Figura 28 ilustra o ponto de sustentação com regulagem de altura para o nivelamento da base inercial.

Figura 28. Ponto de sustentação da base inercial.



Fonte: Próprio autor.

3.2.3.2. Montagem dos Pontos de Sustentação do Motor e do Freio Eletromagnético

Os quatro suportes do motor e os dois suportes do freio eletromagnético foram fixados junto à base inercial, por meio de parafusos com arruela previamente selecionados e descritos anteriormente. A Figura 29 ilustra os seis pontos de sustentação montados na base inercial.

Figura 29. Pontos de sustentação do motor e do freio eletromagnético.



Fonte: Próprio autor.

3.2.3.3. Montagem dos Mancais e do Flange do Freio Eletromagnético

Primeiramente foram instalados os dois rolamentos autocompensadores de esferas com o auxílio de uma ferramenta desenvolvida para este propósito e um martelo comum, uma vez que há uma leve interferência entre a pista interna e o eixo do freio eletromagnético e, em seguida, foram engraxados com graxa própria para rolamentos.

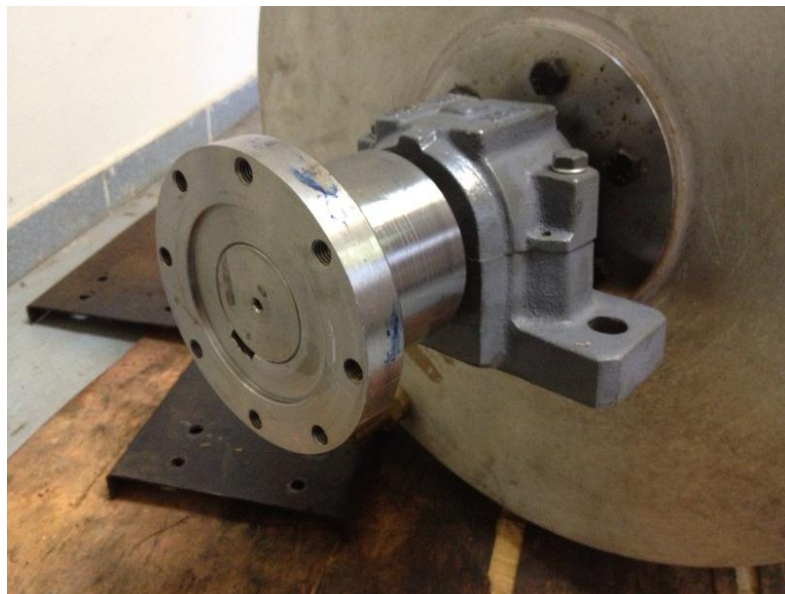
Feito isso, foram instalados os feltros nas cavas dos mancais, os quais têm a finalidade de não deixar as impurezas penetrarem no interior do mancal. Por fim, foram instalados os mancais junto aos rolamentos no eixo do freio eletromagnético.

Uma vez instalados os mancais dianteiro e traseiro, restou apenas a montagem do flange de acoplamento do freio eletromagnético. Para isso, iniciou-se com a instalação da chaveta e, em seguida, a introdução do flange no eixo.

Este processo foi realizado com auxílio de uma ferramenta confeccionada para e uma pequena marreta, visto que existe uma considerável interferência entre o eixo e o furo do acoplamento, bem como entre o rasgo da chaveta e a mesma.

As Figuras 30 e 31 representam, respectivamente, o mancal dianteiro em conjunto com o flange de acoplamento e o mancal traseiro.

Figura 30. Mancal dianteiro e acoplamento devidamente instalados.



Fonte: Próprio autor.

Figura 31. Mancal traseiro instalado.



Fonte: Próprio autor.

3.2.3.4. Montagem do Motor e do Freio Eletromagnético sobre a Base Inercial

Inicialmente foi instalado o motor sobre os quatro pontos de sustentação previamente montados à base inercial e, com isso, foram passados os parafusos e aplicado o torque de travamento requisitado em função das características construtivas do parafuso previamente selecionado. Em seguida, foi instalado o acoplamento, junto ao volante do motor, na árvore de manivelas. A Figura 32 ilustra o sistema de acoplamento.

Figura 32. Acoplamento do eixo do motor com o do freio.

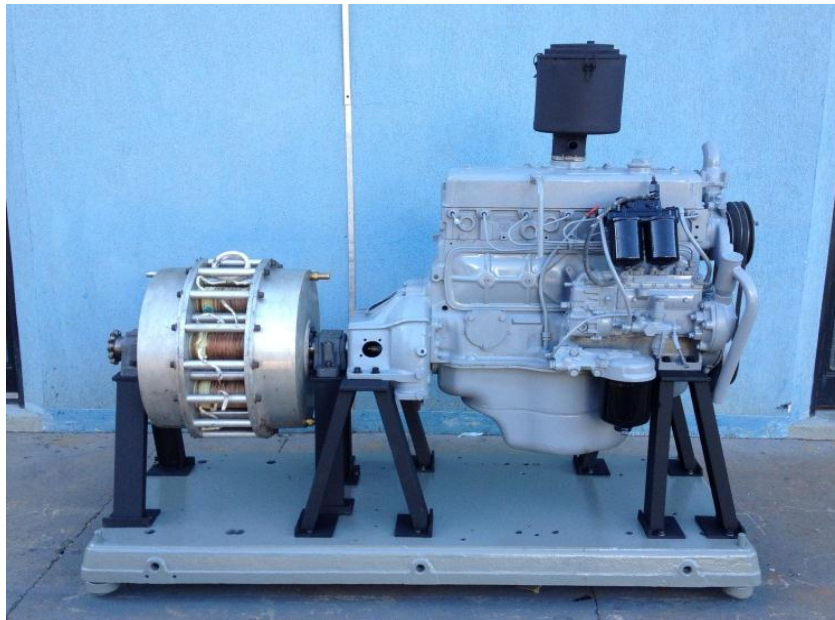


Fonte: Próprio autor.

Feito isso, o freio eletromagnético foi posicionado nos dois pontos de sustentação e os parafusos de fixação do mancal junto ao suporte foram colocados e dada uma pré-carga em cada um. Com isso, foram fixados os parafusos do flange de acoplamento do motor com o acoplamento do eixo do freio eletromagnético.

Por fim, foram instaladas as travas do suporte dianteiro do freio eletromagnético à caixa-seca do motor e aplicado o aperto necessário em todos os parafusos de fixação do motor e do freio eletromagnético junto aos seus respectivos suportes e, em seguida, foi conferido o aperto dos parafusos de fixação dos suportes junto à base inercial. A Figura 33 ilustra o motor e o freio eletromagnético montados sobre a base inercial.

Figura 33. Motor e freio eletromagnético montados.



Fonte: Próprio autor.

3.2.3.5. Montagem do Sistema de Arrefecimento do Freio Eletromagnético

O sistema de arrefecimento do freio eletromagnético é composto por uma torre de resfriamento e por mangueiras flexíveis de $\frac{3}{4}$ ", possibilitando a circulação do fluido de arrefecimento no interior do freio eletromagnético. A torre de resfriamento, por sua vez, é composta por um radiador, uma bomba d'água de $\frac{1}{4}$ hp e uma ventoinha. A Figura 34 ilustra a torre de resfriamento.

Figura 34. Torre de resfriamento do freio eletromagnético.



Fonte: Próprio autor.

O circuito de envio e retorno do fluido de arrefecimento do freio eletromagnético foi aprimorado, visto que, o descrito no manual do fabricante do dinamômetro se tratava de um modelo inferior. Deste modo, a Tabela 5 representa os materiais que foram utilizados para a confecção do circuito.

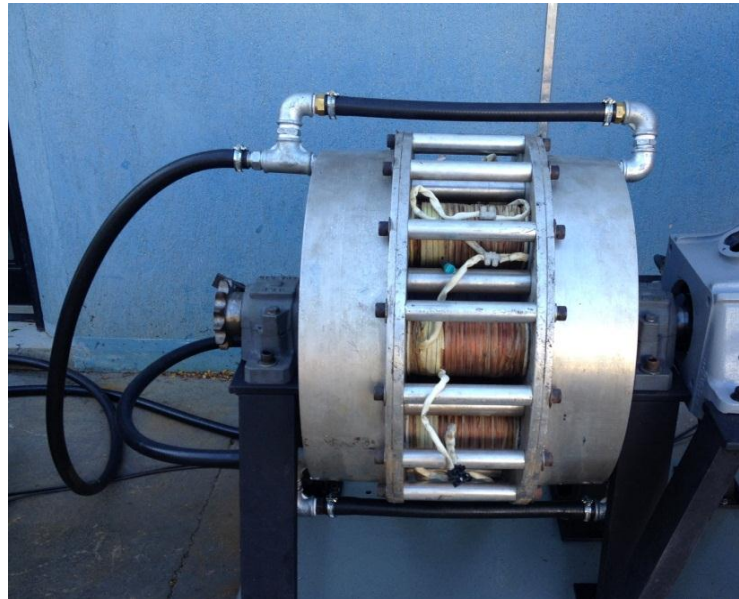
Tabela 5. Materiais utilizados para a confecção do circuito de resfriamento.

Quantidade	Descrição
08	Nipples - $\frac{3}{4}$ " galvanizado
06	Cotovelos 90° - $\frac{3}{4}$ " galvanizado
02	Tês - $\frac{3}{4}$ " galvanizado
06	Conexões espigão - $\frac{3}{4}$ "
08	Abraçadeiras
06	Metros de mangueira flexível de $\frac{3}{4}$ "

Fonte: Próprio autor.

A Figura 35 ilustra os circuitos de envio (posição inferior) e retorno (posição superior) do circuito de arrefecimento do freio eletromagnético.

Figura 35. Circuito de arrefecimento do freio eletromagnético.



Fonte: Próprio autor.

3.2.3.6. Instalação Eletrônica

O manual de instalação não previa, mas tomou-se o cuidado de passar o cabeamento de sinal dos sensores em um conduíte separado do cabeamento de energia de alimentação do freio e da torre de resfriamento, o qual, por sua vez, foi passado em uma tubulação a parte. Este cuidado foi tomado para evitar interferência nos sinais captados pelos sensores, devido ao campo magnético gerado em função da passagem da corrente elétrica nos cabos de alta tensão.

Instalou-se o sensor de rotação de acordo com o manual do fabricante do dinamômetro. Deste modo, foi desenvolvido um suporte para permitir que o sensor fosse instalado na direção horizontal e perpendicular à engrenagem fixada no eixo do freio eletromagnético, a qual, em conjunto com o sensor, é responsável pela leitura da velocidade angular do mesmo.

Para a célula de carga, foi desenvolvido um suporte com a finalidade de garantir o perfeito nivelamento do posicionamento do sensor com relação ao ponto de fixação no freio eletromagnético e à base inercial. Com isso, é possível garantir um ângulo de 90° entre a célula de carga e o braço de fixação da mesma no freio eletromagnético.

A Figura 36 ilustra o posicionamento do sensor de rotação junto à polia dentada. Por outro lado, a Figura 37 representa a célula de carga instalada junto ao suporte, o qual foi desenvolvido e confeccionado para este fim. Em seguida, a Figura 38 ilustra a ligação dos sensores junto à central eletrônica de controle do freio eletromagnético.

Figura 36. Posicionamento do sensor de rotação.



Fonte: Próprio autor.

Figura 37. Célula de carga instalada.



Fonte: Próprio autor.

Figura 38. Ligação dos sensores junto à central.



Fonte: Próprio autor.

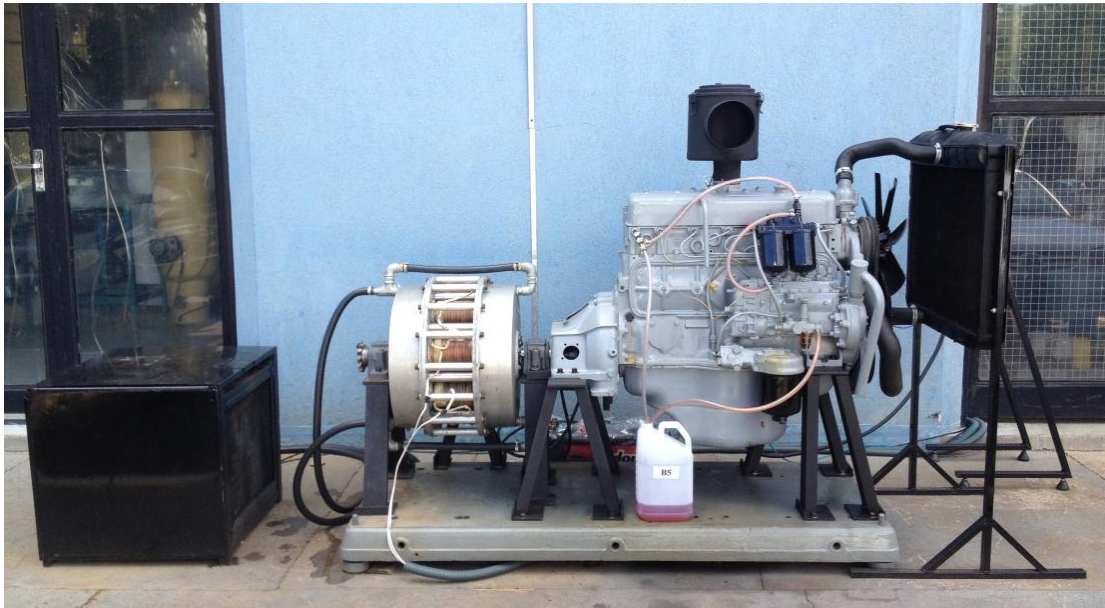
3.2.3.7. Instalação Elétrica

A instalação elétrica foi realizada seguindo o manual do fabricante. Para a central eletrônica é necessária uma rede bifásica (220 V) com capacidade para 50 A e, com isso, foi instalado um disjuntor bifásico duplo com essa capacidade no painel de energia e foram ligados os cabos do disjuntor à central eletrônica, passando-os por dentro de uma tubulação. Por sua vez, a torre de resfriamento requer uma rede bifásica (220 V) com capacidade para 10 A e, para isso, foi instalado um disjuntor bifásico duplo com essa capacidade e foram ligados os fios do disjuntor à torre de resfriamento, passando-os pela mesma tubulação supracitada. O cabeamento entre a central eletrônica e o freio eletromagnético, o qual, em função da corrente elétrica, controla a intensidade do campo magnético nos discos e, conseqüentemente o torque no eixo do motor, foi passado no interior de uma outra tubulação independente e instalado devidamente junto às bobinas do freio.

3.2.3.8. Bancada Dinamométrica

As Figuras 39 e 40 representam a bancada dinamométrica desenvolvida ao longo deste trabalho.

Figura 39. Vista frontal da bancada dinamométrica.



Fonte: Próprio autor.

Figura 40. Vista traseira da bancada dinamométrica.



Fonte: Próprio autor.

4. Procedimento Experimental para Teste Dinamométrico do Motor

Este capítulo é destinado ao detalhamento do procedimento experimental para teste preliminar do motor na bancada dinamométrica. Deste modo, serão apresentadas as definições das proporções e o processo para a obtenção das misturas dos combustíveis. Em seguida, serão definidas as metodologias em conjunto com os cuidados a se tomar durante os ensaios do motor na bancada dinamométrica.

4.1. Obtenção das Misturas

O B5 empregado no experimento foi adquirido diretamente de um posto da rede Ipiranga em Ilha Solteira (Posto Universitário). Por outro lado, o B100 utilizado foi uma doação da Empresa Cargill - Unidade Três Lagoas, sendo o mesmo produzido a partir do óleo de soja.

Inicialmente, foram analisadas, de acordo com a literatura, quais proporções seriam mais adequadas para avaliar o funcionamento do motor e, com isso, foram definidas as seguintes proporções: B5, B20, B50, B80 e B100.

O Diesel convencional atualmente comercializado (B5) possui em sua composição 5% em volume de Biodiesel (B100). Deste modo, para gerar as proporções B20, B50 e B80 a partir da mistura entre B5 e B100, é preciso contabilizar a influência dos 5% de Biodiesel na composição do Diesel convencional. Com a finalidade de se obter uma mistura contendo 5 litros no total, foram definidas as Equações (3) e (4) para representar qual a quantidade de B100 e B5 necessárias para compor a mistura desejada: BXX .

$$V_{B100} = \frac{XX - 5}{19} \quad (3)$$

$$V_{B5} = 5 - V_{B100} \quad (4)$$

Onde,

V_{B100} : Volume necessário de B100 [l];

V_{B5} : Volume necessário de B5 [l];

XX : Representa o teor de Biodiesel na composição desejada (BXX).

Deste modo, a Tabela 6 ilustra a proporção em volume de B5 e B100 necessária para que se obtivessem os cinco litros da mistura desejada.

Tabela 6. Proporções em volume em função da mistura desejada.

Biodiesel	V_{B5} [l]	V_{B100} [l]
B5	5,00	-
B20	4,21	0,79
B50	2,63	2,37
B80	1,05	3,95
B100	-	5,00

Fonte: Próprio autor.

Uma vez definidas as proporções em volume para cada componente em função do Biodiesel requerido, as misturas foram realizadas com o auxílio de: um Béquer de 1.000 ml com intervalos de 100 ml na escala, um Balão de Erlenmeyer de 500 ml com intervalos de 100 ml na escala e, por fim, uma Proveta de 50 ml com intervalos de 1 ml, com a finalidade de se buscar o refinamento das composições. A Figura 41 ilustra as vidrarias utilizadas para a obtenção das misturas.

Figura 41. Vidrarias utilizadas para a obtenção das misturas.

Fonte: Próprio autor.

Inicialmente foram realizadas as proporções do Diesel convencional (B5) e para cada composição, essa fração foi armazenada em um recipiente plástico de 5 litros, com auxílio de um funil. Feito isso, foram aferidas as proporções de Biodiesel (B100) e, com isso, foram despejadas junto às proporções previamente definidas de B5, gerando a composição em volume desejada. A Figura 42 apresenta todos os recipientes contendo as misturas obtidas para se avaliar o desempenho do motor, operando com cada uma delas.

Figura 42. Recipientes contendo as proporções de misturas Diesel-Biodiesel preparadas.



Fonte: Próprio autor.

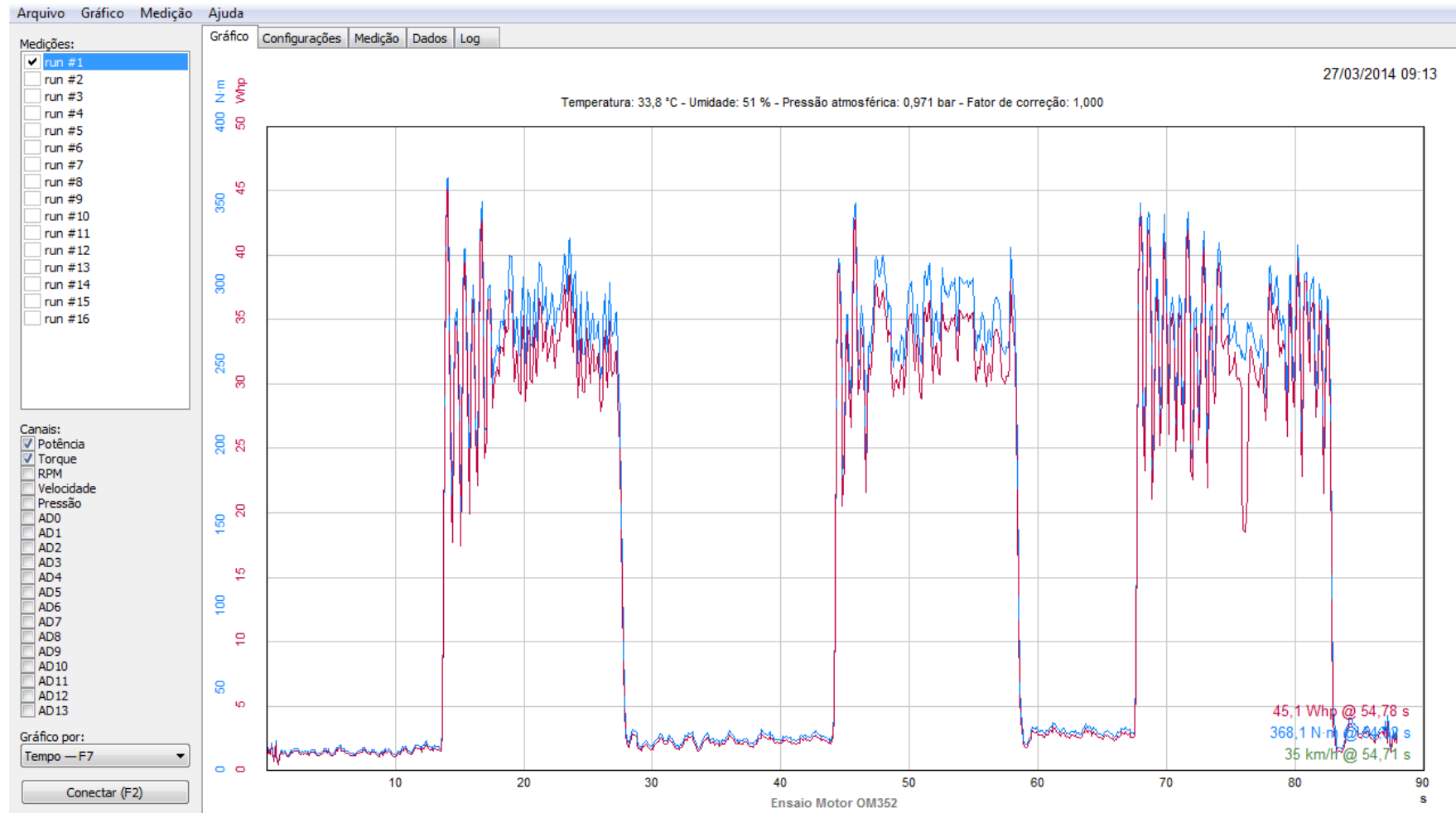
4.2. Metodologia Experimental

Antes de se iniciar qualquer teste, é necessário deixar o motor entrar em regime de funcionamento com o combustível proposto para o ensaio. Este processo dura cerca de 10 min e consiste em deixar o motor funcionando com o combustível em análise e sem aplicação de carga, até que se atinja a temperatura de regime de funcionamento, sendo, neste caso, 80 °C. Esta temperatura é monitorada por dois termopares, sendo um instalado no cabeçote e outro no bloco do motor, e um termômetro mecânico, cujo visor foi instalado no painel de instrumentos do motor.

A bomba injetora do motor utilizado é de aplicação agrícola ou estacionária, fazendo com que a rotação máxima do motor não exceda 2.300 rpm. Com isso, foi proposto iniciar os testes em 800 rpm, visto que a rotação da marcha lenta do motor em regime é de aproximadamente 750 rpm. Deste modo, foi definido um passo de 100 rpm para cada teste, até alcançar a rotação máxima de 2.200 rpm, contabilizando um total de quinze faixas de rotação ensaiadas.

As Figuras 43 e 44 ilustram as interfaces gráficas de aquisição de dados e de controle, respectivamente, através de um *software* desenvolvido pela própria empresa fornecedora do freio eletromagnético.

Figura 43. Interface gráfica de aquisição de dados.



Fonte: Próprio autor.

Figura 44. Interface gráfica de controle do dinamômetro.



Fonte: Próprio autor.

De acordo com o fabricante do freio eletromagnético, testes realizados em bancada dinamométrica, ou seja, nos casos em que o freio eletromagnético é acoplado diretamente à árvore de manivelas do motor, devem ser realizados selecionando-se uma rotação para a carga e, com isso, despejando toda a potência do motor para esta rotação em questão. Deste modo, se obtém os resultados para essa rotação previamente selecionada.

Com isso, no canto direito da tela pode-se visualizar que está selecionada a opção carga contínua e definida a frequência de rotação para atuação da carga do freio eletromagnético em 800 rpm. Deste modo, o ensaio consiste, basicamente, em posicionar a alavanca de controle da rotação do motor na posição de máxima rotação, porém, a partir do momento em que o motor atingir essa faixa de rotação, o mesmo não irá ultrapassá-la, pois o freio eletromagnético irá atuar gerando uma determinada carga no eixo, a qual é capaz de deixar estabilizada a rotação dentro dessa faixa.

O sistema de controle do freio vai atuar, variando a intensidade do campo magnético para que o motor, mesmo despejando toda a potência gerada nessa faixa de rotação, não consiga ultrapassar esse limite. Com isso, o sistema varia de modo dinâmico a corrente que passa nas bobinas eletromagnéticas e, conseqüentemente, a intensidade do torque de frenagem. Simultaneamente, a célula de carga informa à central a carga instantânea que está sendo exercida pelo freio eletromagnético sobre a árvore de manivelas.

A distância entre o centro do eixo do freio eletromagnético e o centro do ponto de fixação da célula de carga, corresponde ao braço de aplicação da força de reação, a qual é sentida pela própria célula. O braço é uma dimensão geométrica e, portanto, um parâmetro construtivo do equipamento.

O torque, em um determinado instante de tempo, é calculado pela central eletrônica multiplicando a carga informada pela célula de carga e o comprimento do braço. Por outro lado, para este instante de tempo, o sensor de rotação informa à central a frequência de rotação do conjunto e, com isso, o torque, que multiplicado à velocidade angular, resulta na potência instantânea do motor.

Como o motor passou pelo processo de revitalização, garantindo um condicionamento parcial do mesmo, optou-se, inicialmente, por deixá-lo funcionando com Diesel comercial (B5) por um intervalo de duas horas. Esta sistemática foi proposta com o intuito de fazer com que o motor entrasse em regime de funcionamento e que se ajustassem todos os componentes que foram trocados ou reparados.

Para cada combustível analisado, foram realizados três ensaios para cada faixa de rotação. Para isto, com o motor operando em regime com o combustível em questão,

seleciona-se o botão “Capturar”, com a finalidade de se armazenar os dados obtidos, e fixa-se a frequência de rotação para a “Carga Contínua”, ambos podem ser visualizados por meio da Figura 44. Feito isso, foram realizados três ensaios de 10 s cada um, espaçados por um intervalo de tempo de 5 s. Finalizado o teste para este patamar de rotação, é necessário fechar a interface gráfica de controle, por meio do botão “Fechar”, situado no canto inferior esquerdo, também visto na Figura 44.

Em seguida, por meio da interface de aquisição de dados, é necessário salvar os resultados obtidos por meio deste ensaio envolvendo os três testes em um mesmo arquivo. Para isto, basta selecionar o botão “Arquivo” visualizado por meio da Figura 43 e, posteriormente, “Salvar Como”. Feito isso, é necessário fechar o programa e, logo após, abri-lo novamente. Para iniciar a interface de controle, basta selecionar o botão “Conectar”, visto na Figura 43, e realizar os três testes seguindo a metodologia previamente descrita para a nova faixa de rotação a ser ensaiada.

Com isso, iniciou-se o ensaio do motor com o mesmo combustível, ou seja, B5, levantando as curvas de torque e potência para o mesmo. Em seguida, para garantir a substituição total do B5 para o B20 do sistema de alimentação, a mangueira de retorno do combustível foi inserida em um reservatório de descarte e a mangueira de sucção foi inserida no reservatório do combustível B20. Nesse processo de transição, o motor operou em regime de marcha lenta por cinco minutos para garantir que houvesse apenas B20 no sistema de alimentação. Passado esse intervalo de tempo, a mangueira de retorno foi inserida no reservatório de B20 e realizou-se o ensaio do motor. A Figura 45 ilustra o motor sendo ensaiado com o combustível B5.

Figura 45. Motor sendo ensaiado com a utilização do B5.



Fonte: Próprio autor.

Para cada combustível ensaiado, tomou-se o cuidado em realizar esse procedimento de transição de combustíveis, para que não ocorresse contaminação do combustível atual com o ensaiado anteriormente e, dessa forma, não influenciasse os resultados para cada versão do combustível. A Figura 46 ilustra a disposição dos reservatórios de combustível durante o processo de transição de um combustível para outro. É possível observar que a mangueira de retorno do combustível encontra-se despejando em um reservatório de descarte, para garantir a total transição dos combustíveis.

Figura 46. Esquema para a transição dos combustíveis.



Fonte: Próprio autor.

5. Resultados

Com o emprego do *software* TopDyno, o qual é disponibilizado em conjunto com o pacote do freio eletromagnético, é possível observar ao final do ensaio do motor, por meio de uma interface de aquisição de dados, o torque e a potência em função de suas respectivas velocidades angulares.

Os valores de torque e potência, em conjunto com as respectivas frequências de funcionamento, obtidos para cada ensaio, são expressos diretamente por meio da interface gráfica do *software*. Segundo a TopDyno, esses valores são calculados por meio de uma média de um certo número de valores máximos, os quais são selecionados automaticamente pelo sistema de aquisição e processamento de dados. Com isso, contatou-se o fabricante para se obter maiores informações a respeito da obtenção desses resultados, porém o mesmo se recusou a informar por motivos de sigilo do projeto.

Notou-se que os resultados para o torque e, conseqüentemente, a potência obtidos por essa via, são muito maiores do que os informados pelo fabricante do motor empregado nos ensaios. Deste modo, optou-se por levar em consideração uma segunda via para se alcançar os resultados e confrontá-los com os resultados preliminares obtidos via direta de resposta do programa.

Esse procedimento, designado como segunda via, foi possível devido ao fato do *software* de aquisição de dados da TopDyno permitir a exportação para o *software* Microsoft Excel[®] dos valores de torque, potência e rotação que foram armazenados no decorrer do experimento em função do tempo. Feito isso, realizou-se o pós-tratamento desses dados exportados e, com isso, conseguiu-se obter as médias de torque e de potência em função da rotação e do combustível empregado.

Com a finalidade de se obter essa média, foram selecionados os dados obtidos nos três ensaios para faixa de rotação e combustível analisado e, em seguida, foram calculadas as médias aritméticas para o torque e a potência. Sabe-se que ao selecionar o botão “Capturar”, o programa automaticamente inicia o armazenamento dos dados. Feito isso, é necessário um refinamento dos dados para, ao realizar o cálculo da média aritmética, levar em consideração apenas os resultados no decorrer dos testes de operação, desprezando-se os intervalos entre cada ensaio e o regime transiente tanto no processo de aceleração, quanto no de desaceleração do conjunto.

Para isto, supondo que se busca avaliar a média aritmética dos dados de torque e potência para um determinado ensaio, é preciso levar em consideração que os valores exportados contêm os resultados para os três testes, além de conter os intervalos e os instantes de início e final do ensaio. Para levar em consideração apenas os dados efetivos, representando os três ensaios, iniciou-se a seleção dos dados a partir da primeira frequência de rotação imediatamente maior que a faixa selecionada e finalizou-se com a mesma metodologia, ou seja, com uma rotação imediatamente maior que a faixa de ensaio. Com isso, por meio deste tratamento inicial dos dados, é possível garantir que os valores de torque e potência representam apenas o período dos ensaios, desprezando-se os dados referentes aos intervalos e o período transiente de início e final de cada ensaio.

A Figura 47 ilustra o método de obtenção dos resultados para o torque e potência diretamente da resposta da interface de aquisição de dados. A Figura 48 ilustra os dados exportados em forma de planilha, os quais receberam um pós-tratamento. As duas Figuras mencionadas representam o ensaio do motor operando com B5 para uma rotação de 800 rpm.

Justifica-se a necessidade de se alcançar os resultados por meio da segunda via, pela simples observação e interpretação das curvas de torque e potência em função do tempo, as quais são apresentadas em conjunto por meio da Figura 47. Avaliando-se apenas o torque, a resposta direta do *software* é 368,1 N.m, porém, por meio de uma avaliação visual do comportamento da curva de torque em função do tempo, é possível afirmar que o torque para este ensaio é algo em torno de 275,0 N.m. Consequentemente, a potência expressa diretamente pelo *software* é 45,1 hp, no entanto, por meio de uma avaliação visual da curva de potência, pode-se afirmar que a potência para este ensaio é aproximadamente 32,5 hp.

Figura 47. Torque e potência diretamente da resposta da interface de aquisição de dados.



Fonte: Próprio autor.

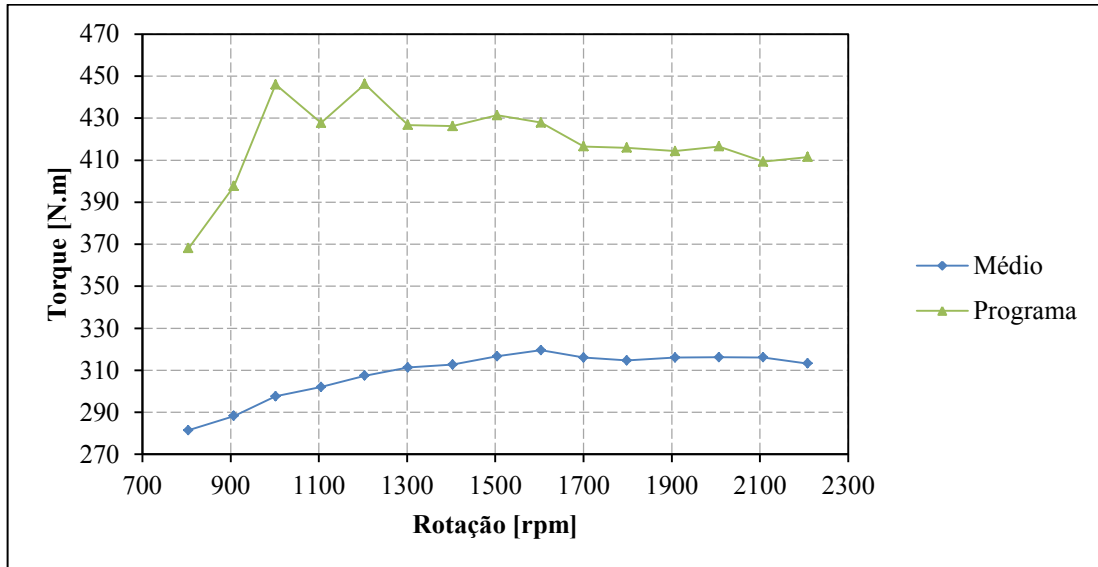
Figura 48. Dados capturados e exportados em forma de planilha.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	power	torque	speed	boost	adinput0	adinput1	adinput2	clock	rpm
2	2,82	25,38	32,11	1,062	3,147	0	0	54,36	792
3	0,69	6,24	31,89	0,94	3,168	0	0	54,43	787
4	1,74	15,61	32,19	0,938	3,168	0	0	54,57	794
5	8,47	73,25	33,36	0,938	3,137	0	0	54,64	823
6	58,82	468,39	36,24	1,064	3,168	0	0	54,71	894
7	75,92	570,63	38,4	0,934	3,126	0	0	54,78	947
8	58,66	485,09	34,9	1,02	3,163	0	0	54,92	861
9	23,66	234,11	29,17	1,062	3,137	0	0	54,99	720
10	7,74	82,24	27,15	1,031	3,126	0	0	55,13	670
11	4,16	40,41	29,7	0,936	3,168	0	0	55,27	733
12	9,94	87,4	32,84	1,06	3,158	0	0	55,34	810
13	43,11	340,55	36,53	1,048	3,121	0	0	55,41	901
14	74,78	584,83	36,9	1,031	3,158	0	0	55,55	911
15	39,96	346,37	33,29	1,035	3,147	0	0	55,62	821
16	7,59	75,78	28,92	1,06	3,158	0	0	55,76	714
17	5,48	54,2	29,18	1,06	3,163	0	0	55,83	720
18	7,73	71,26	31,29	1,06	3,126	0	0	55,97	772
19	26,56	222,16	34,49	1,06	3,173	0	0	56,04	851
20	66	512,59	37,16	1,062	3,158	0	0	56,11	917
21	73,3	588,38	35,95	1,062	3,116	0	0	56,18	887
22	23,24	218,96	30,63	0,938	3,126	0	0	56,32	756
23	7,85	79,68	28,45	1,06	3,106	0	0	56,46	702
24	5,67	55,59	29,44	1,06	3,147	0	0	56,53	726
25	14,93	132,28	32,58	1,06	3,153	0	0	56,67	804
26	47,71	387,3	35,55	1,06	3,387	0	0	56,74	877
27	73,67	570,49	37,27	0,938	3,158	0	0	56,81	920

Fonte: Próprio autor.

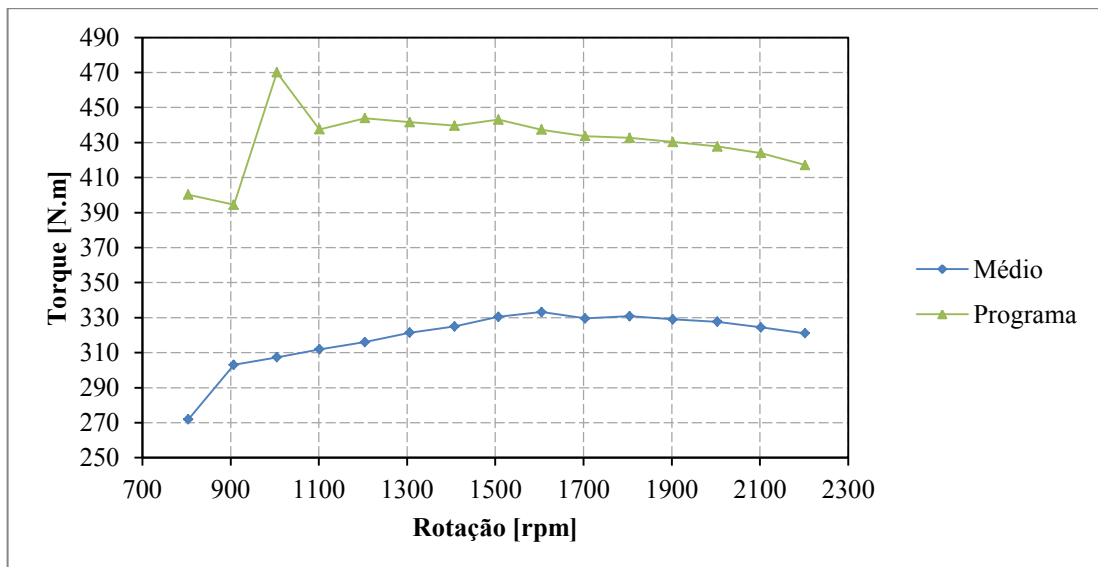
As Figuras de 49 a 53 representam graficamente a disparidade entre o torque expresso diretamente pelo programa do dinamômetro e torque médio calculado de acordo com o procedimento já mencionado, respectivamente, ambos em função da rotação. Cada gráfico representa essa diferença em função do combustível empregado no experimento.

Figura 49. Diferença entre o torque médio calculado e o obtido pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B5.



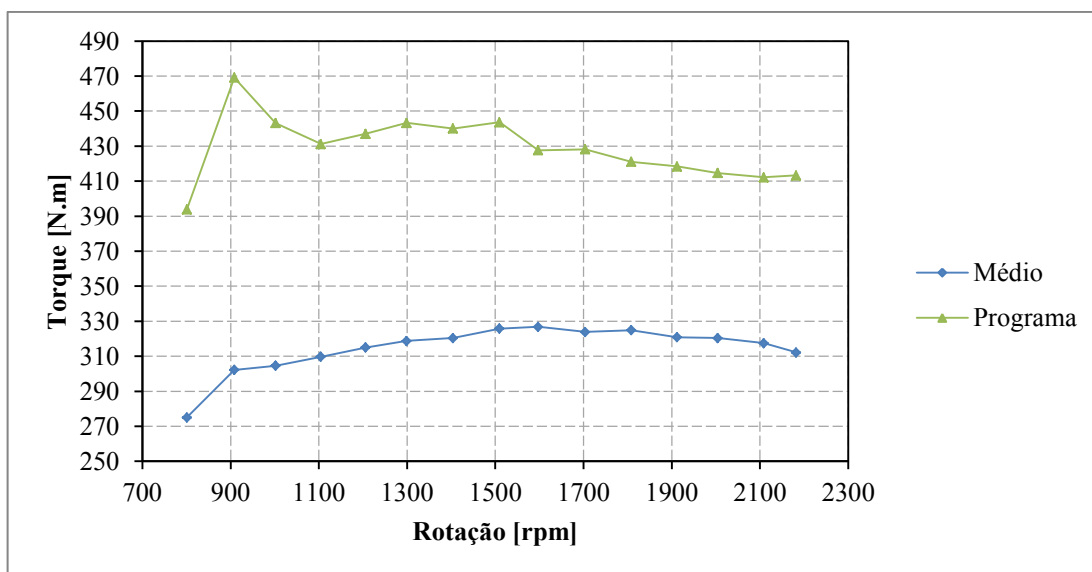
Fonte: Próprio autor.

Figura 50. Diferença entre o torque médio calculado e o obtido pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B20.



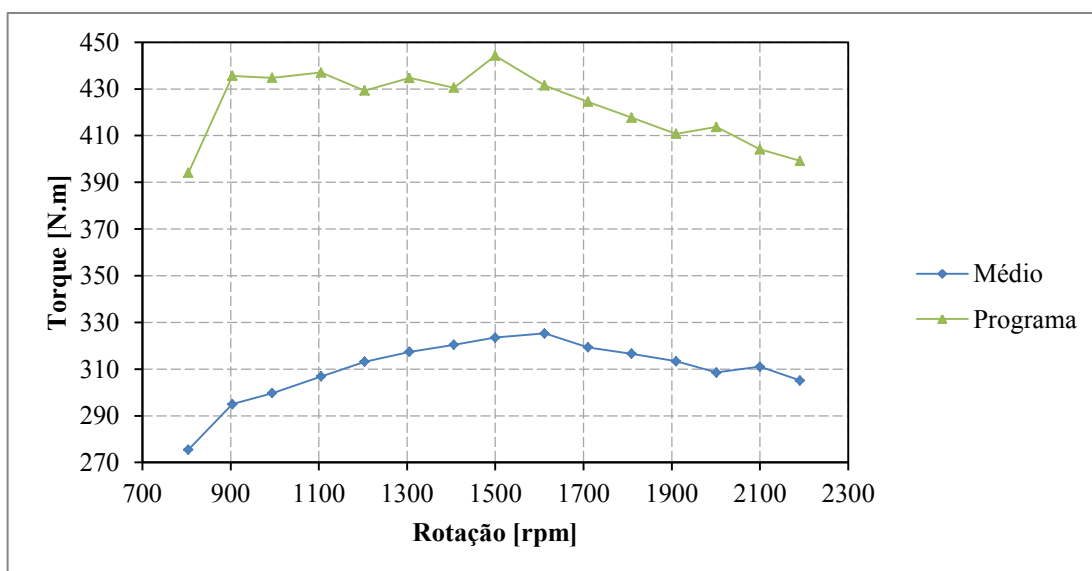
Fonte: Próprio autor.

Figura 51. Diferença entre o torque médio calculado e o obtido pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B50.



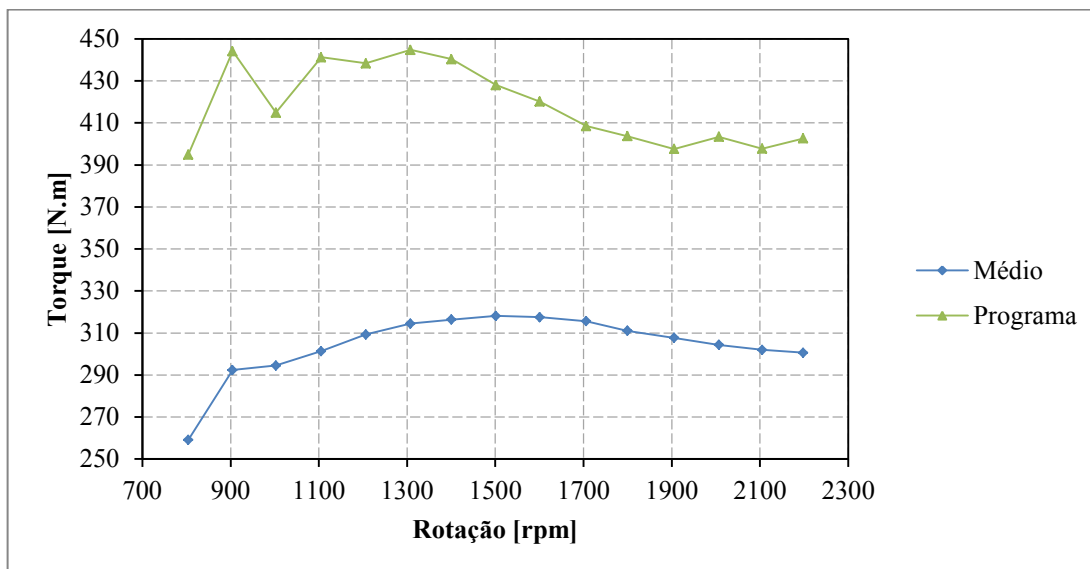
Fonte: Próprio autor.

Figura 52. Diferença entre o torque médio calculado e o obtido pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B80.



Fonte: Próprio autor.

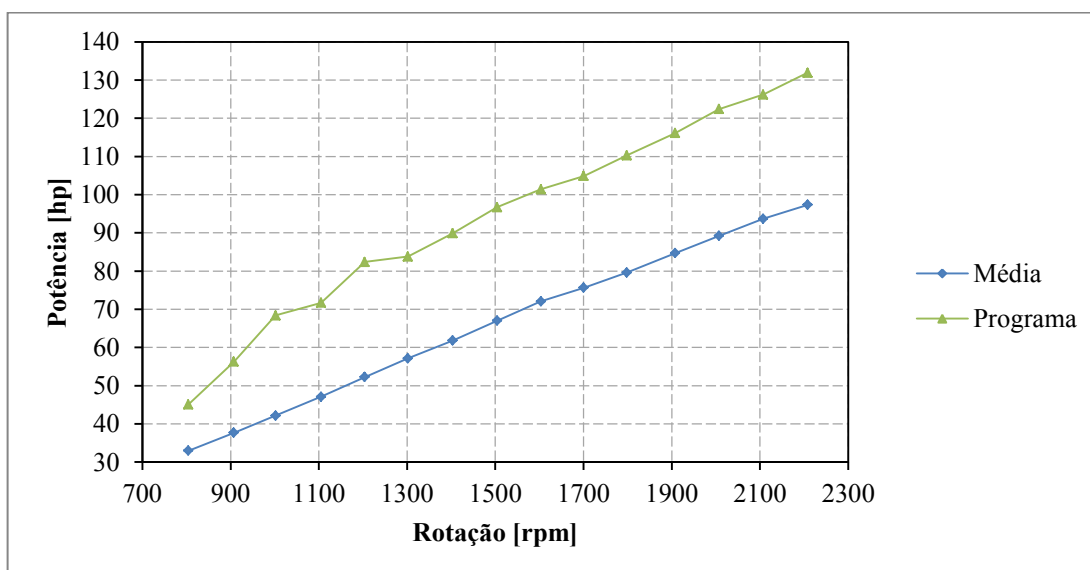
Figura 53. Diferença entre o torque médio calculado e o obtido pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B100.



Fonte: Próprio autor.

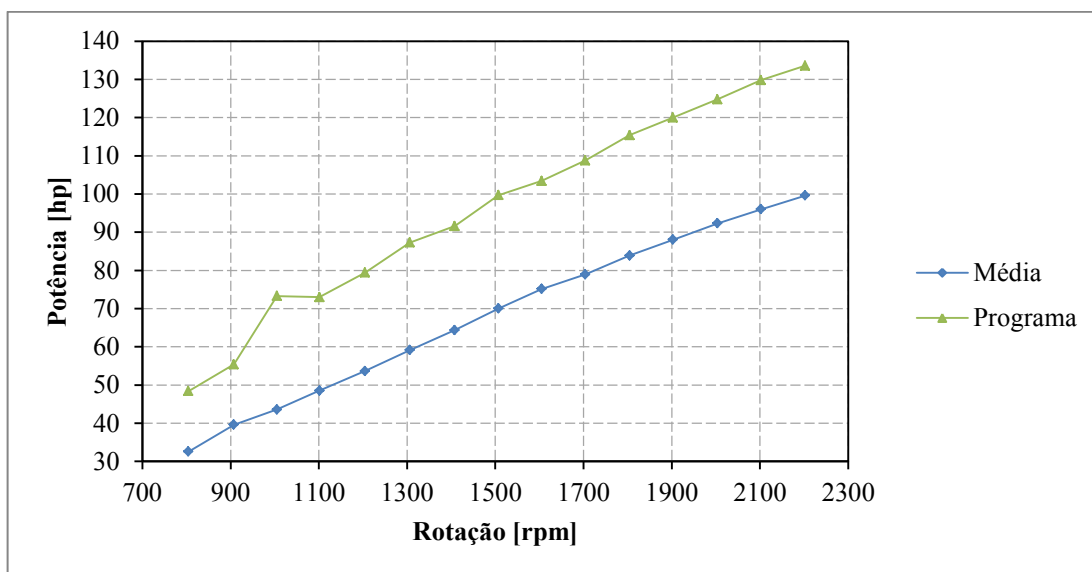
As Figuras de 54 a 58 representam graficamente a disparidade entre a potência expressa diretamente pelo programa do dinamômetro e a potência média calculada, ambas em função da velocidade angular. Cada gráfico representa essa diferença em função do combustível empregado no ensaio.

Figura 54. Diferença entre a potência média calculada e a obtida pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B5.



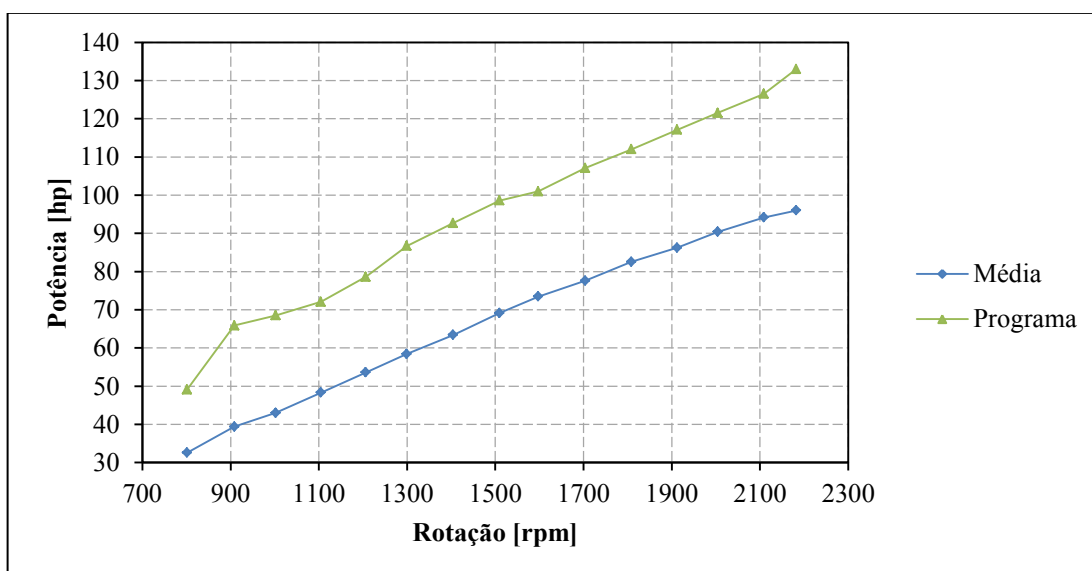
Fonte: Próprio autor.

Figura 55. Diferença entre a potência média calculada e a obtida pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B20.



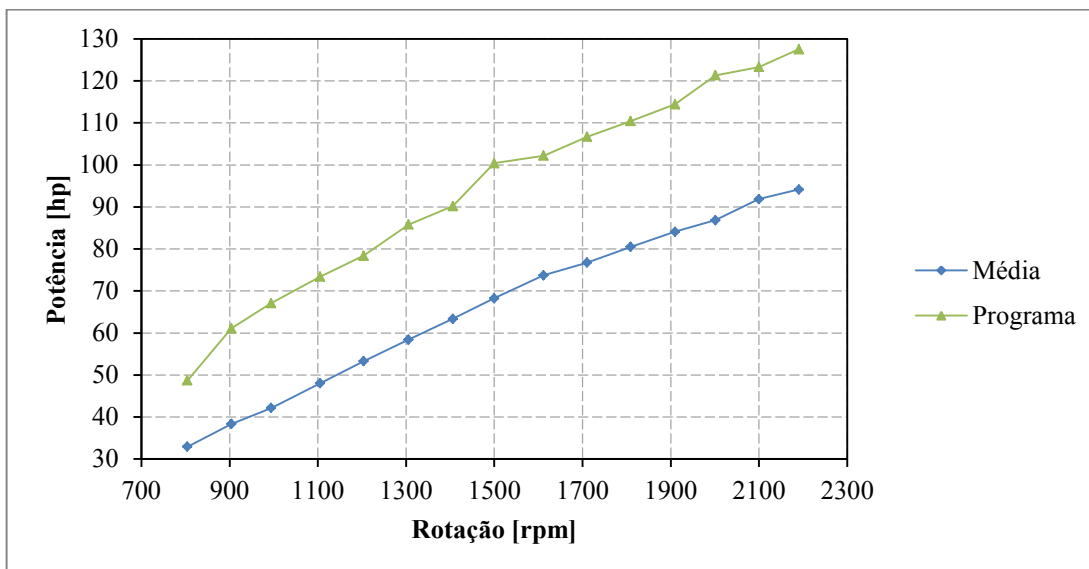
Fonte: Próprio autor.

Figura 56. Diferença entre a potência média calculada e a obtida pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B50.



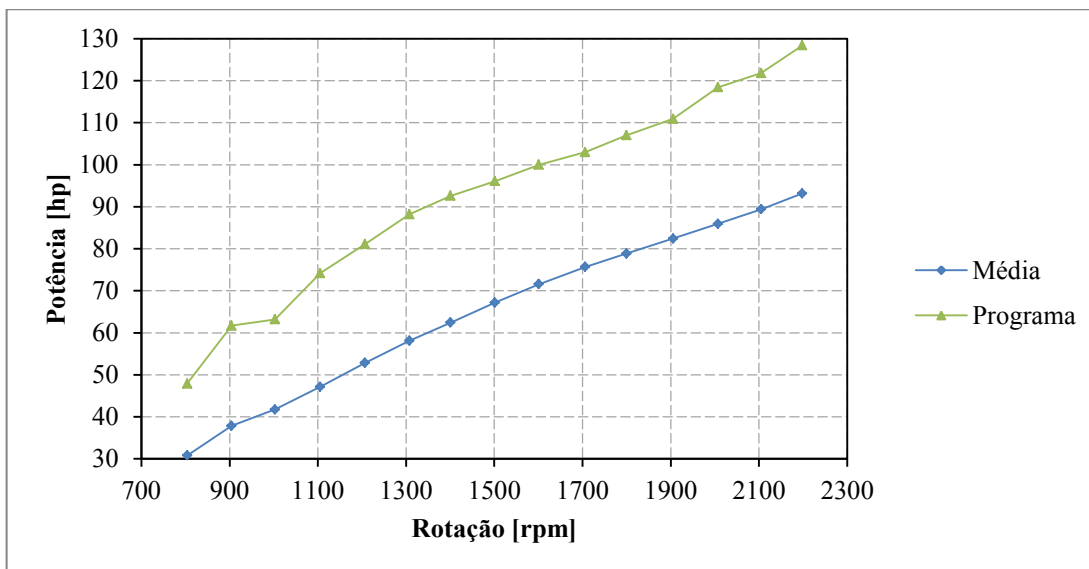
Fonte: Próprio autor.

Figura 57. Diferença entre a potência média calculada e a obtida pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B80.



Fonte: Próprio autor.

Figura 58. Diferença entre a potência média calculada e a obtida pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B100.

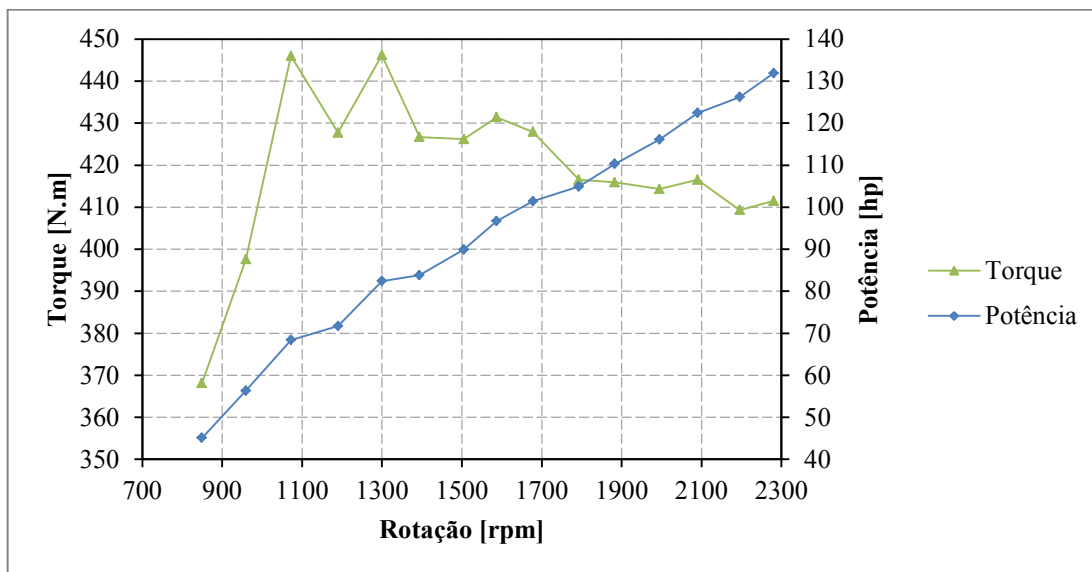


Fonte: Próprio autor.

As Figuras de 49 a 53 e, consequentemente, as Figuras de 54 a 58, mostram que as curvas traçadas por meio dos dados obtidos diretamente do programa estão sempre posicionadas acima das curvas obtidas por meio da média calculada, refletindo em uma disparidade de ordem escalar.

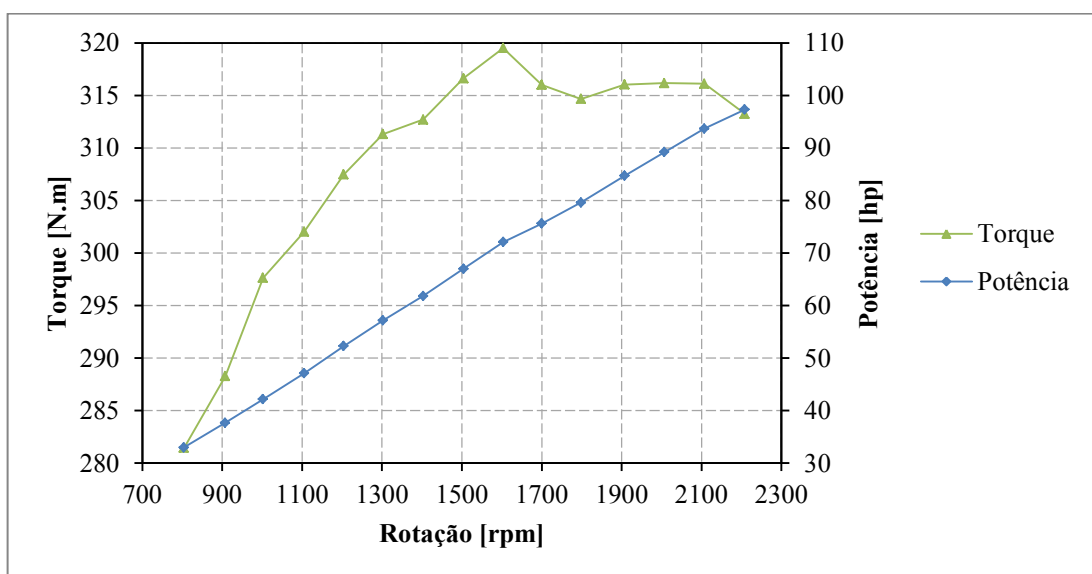
Em seguida, as Figuras de 59 a 68 representam graficamente o torque e a potência em função da rotação, obtidos, respectivamente, diretamente pelo programa do dinamômetro e pela média calculada de acordo com o procedimento já mencionado, e em função do combustível empregado no experimento.

Figura 59. Torque e potência obtidos pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B5.



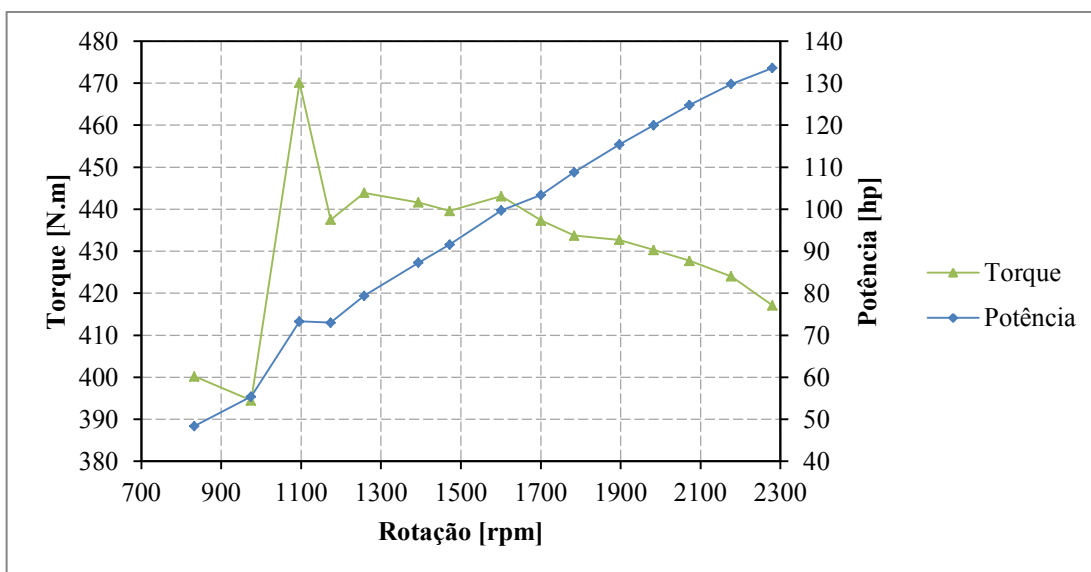
Fonte: Próprio autor.

Figura 60. Torque e potência médios calculados, em função da rotação e com a utilização do B5.



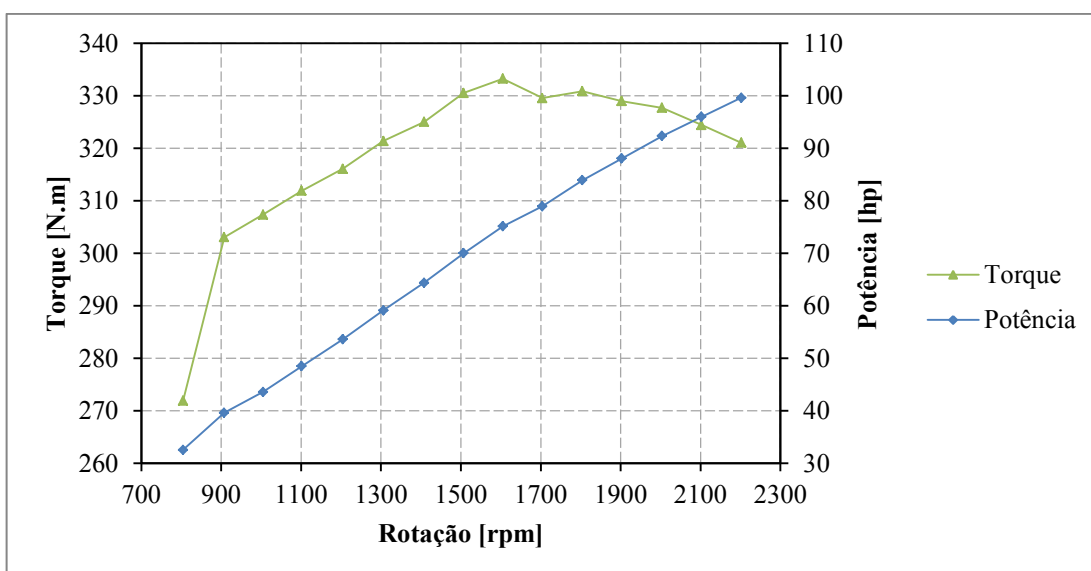
Fonte: Próprio autor.

Figura 61. Torque e potência obtidos pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B20.



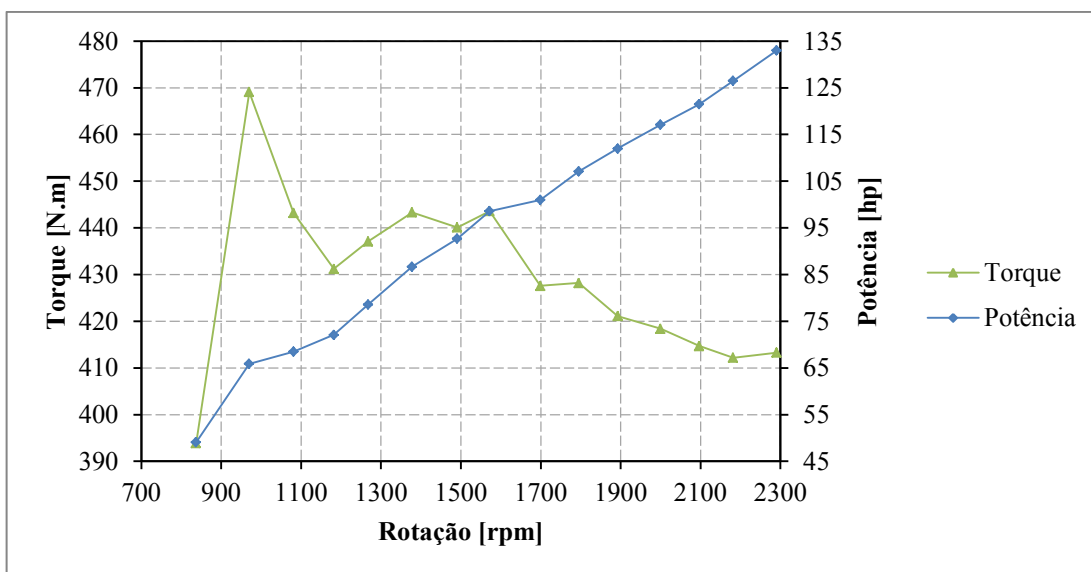
Fonte: Próprio autor.

Figura 62. Torque e potência médios calculados, em função da rotação e com a utilização do B20.



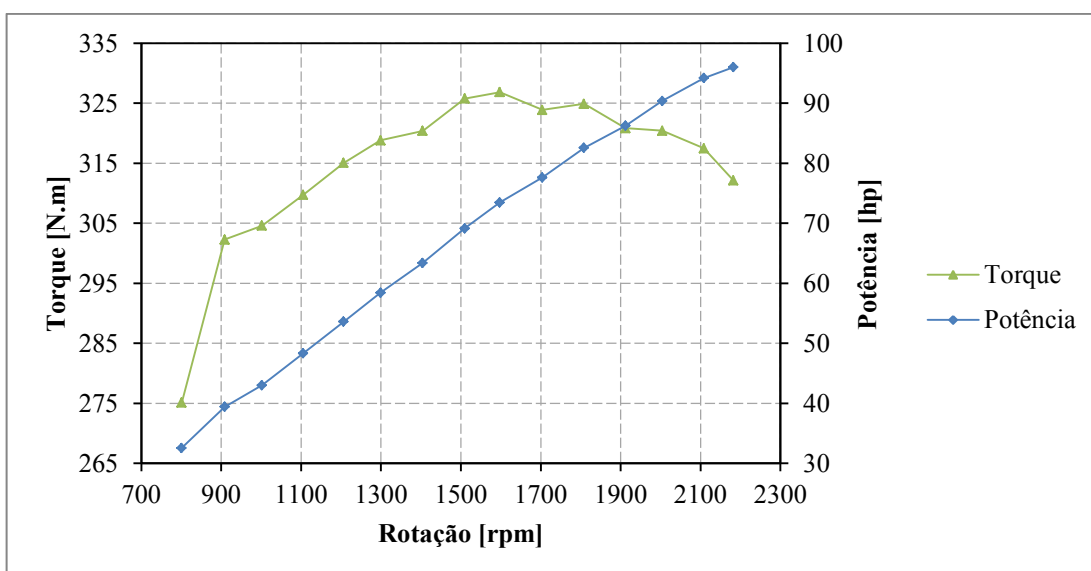
Fonte: Próprio autor.

Figura 63. Torque e potência obtidos pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B50.



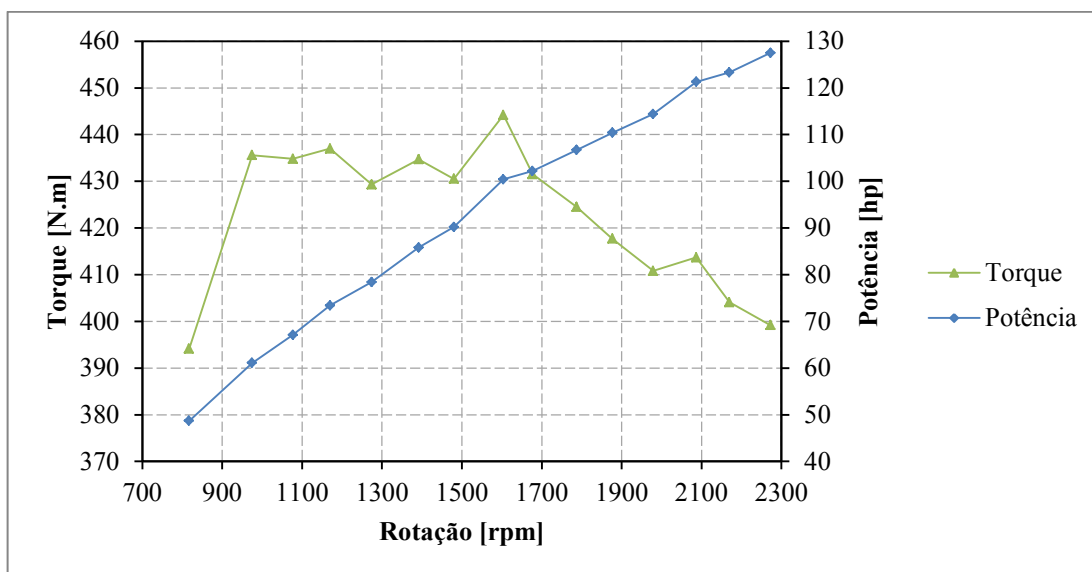
Fonte: Próprio autor.

Figura 64. Torque e potência médios calculados, em função da rotação e com a utilização do B50.



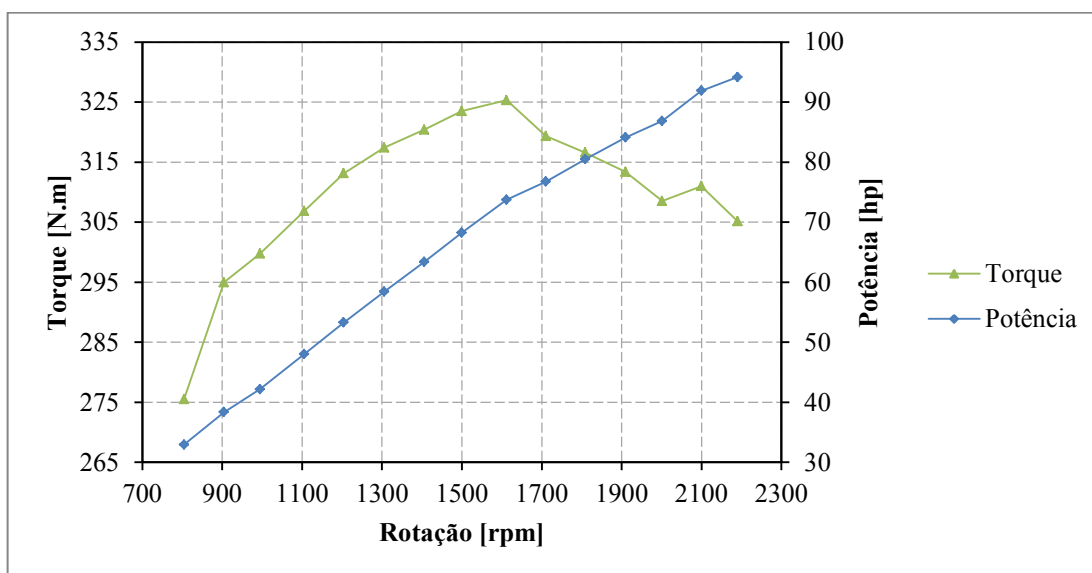
Fonte: Próprio autor.

Figura 65. Torque e potência obtidos pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B80.



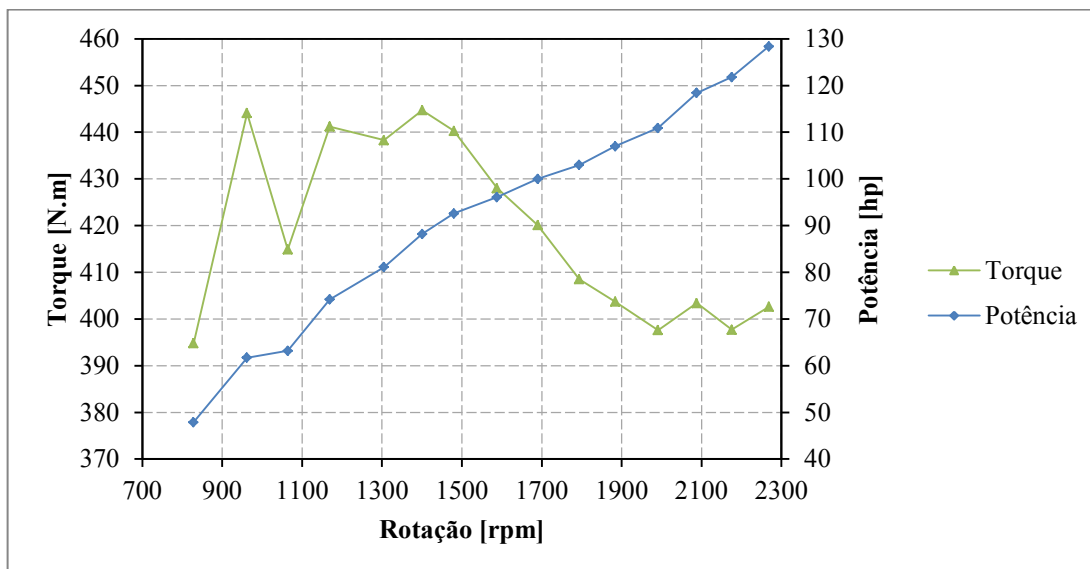
Fonte: Próprio autor.

Figura 66. Torque e potência médios calculados, em função da rotação e com a utilização do B80.



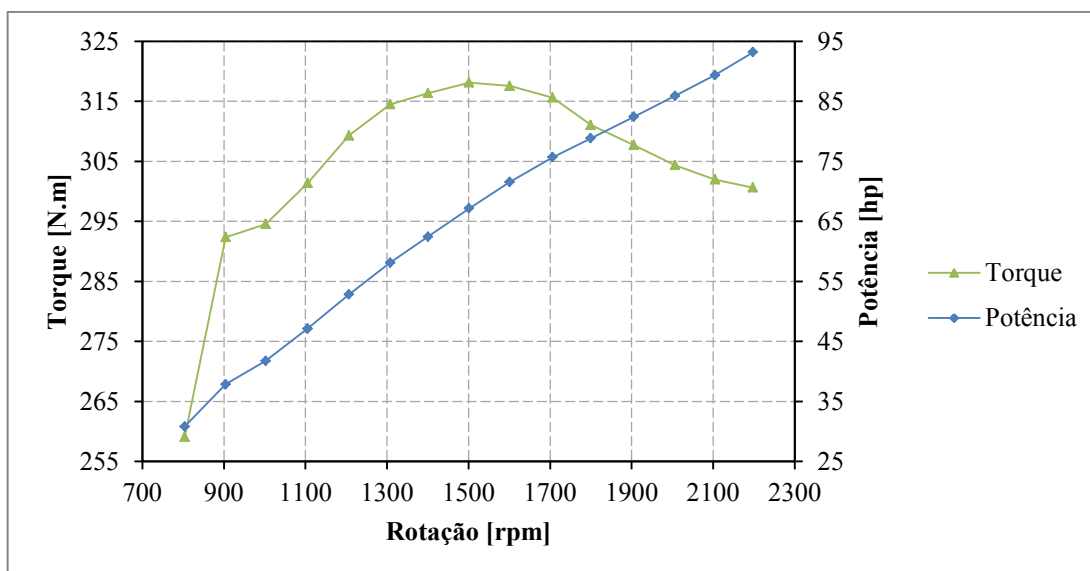
Fonte: Próprio autor.

Figura 67. Torque e potência obtidos pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B100.



Fonte: Próprio autor.

Figura 68. Torque e potência médios calculados, em função da rotação e com a utilização do B100.

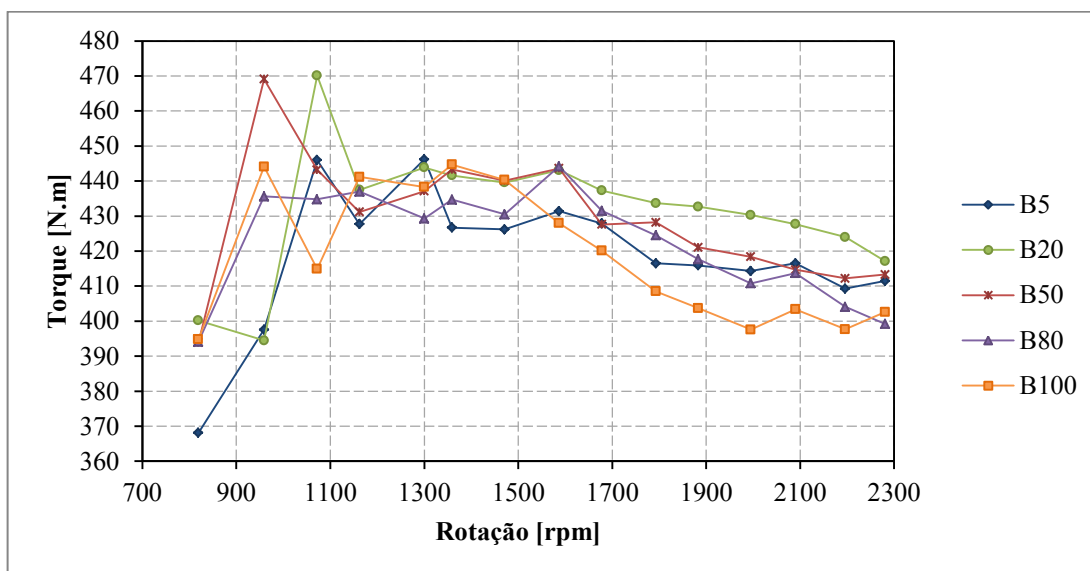


Fonte: Próprio autor.

Por meio das Figuras de 59 a 68 é possível visualizar que as curvas traçadas a partir dos dados obtidos pela média são mais suaves e com poucos picos. Por outro lado, as curvas traçadas por meio dos dados de resposta do programa apresentam grande quantidade de picos descontínuos.

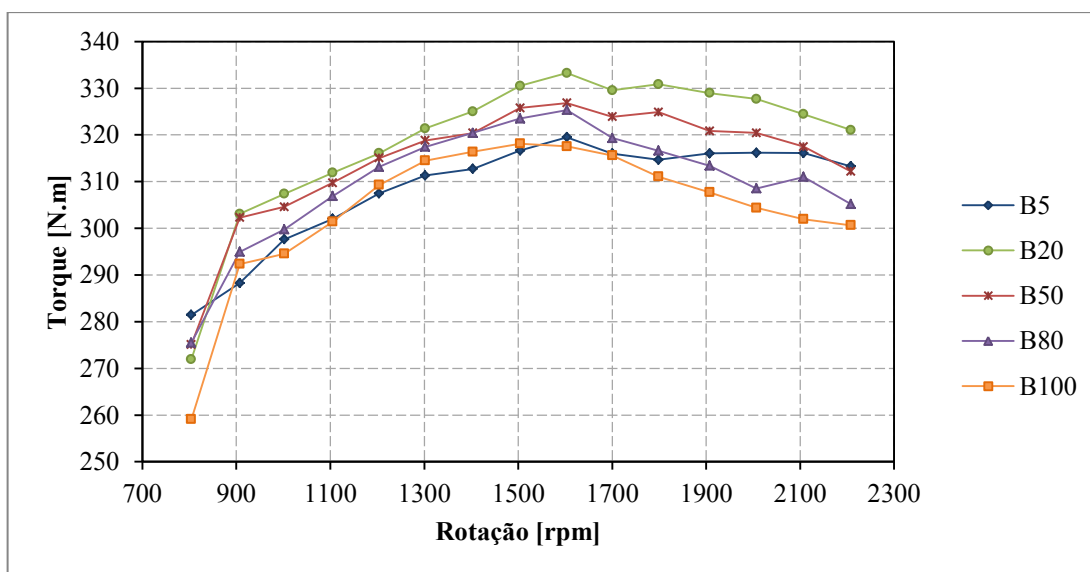
As Figuras 69 e 70 representam graficamente o comparativo do torque obtido diretamente pelo programa do dinamômetro e pela média calculada, respectivamente, em função da rotação e do combustível utilizado.

Figura 69. Comparativo do torque obtido diretamente do programa, em função da rotação e do combustível utilizado.



Fonte: Próprio autor.

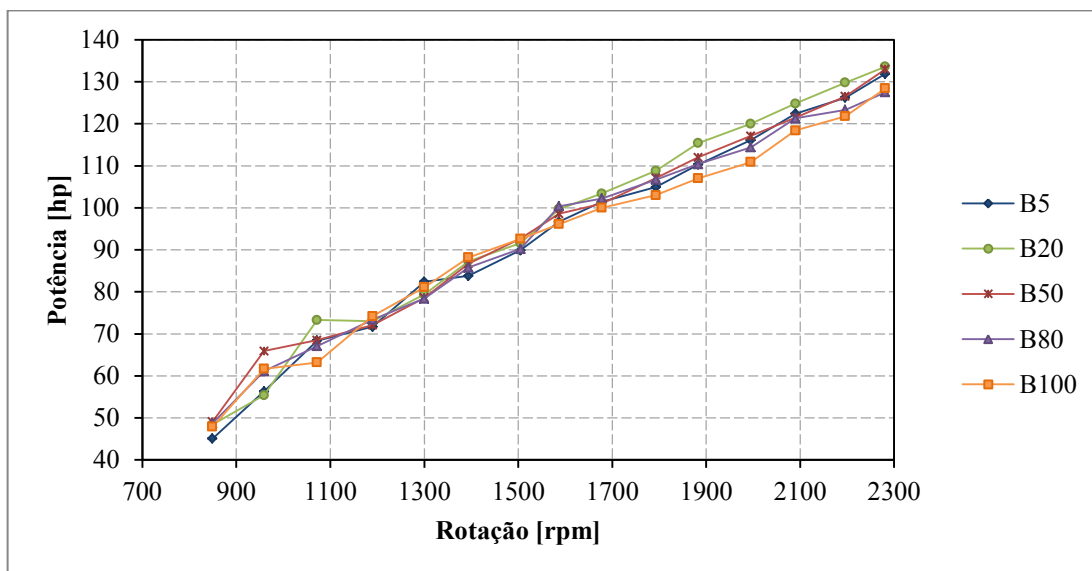
Figura 70. Comparativo do torque médio calculado, em função da rotação e do combustível utilizado.



Fonte: Próprio autor.

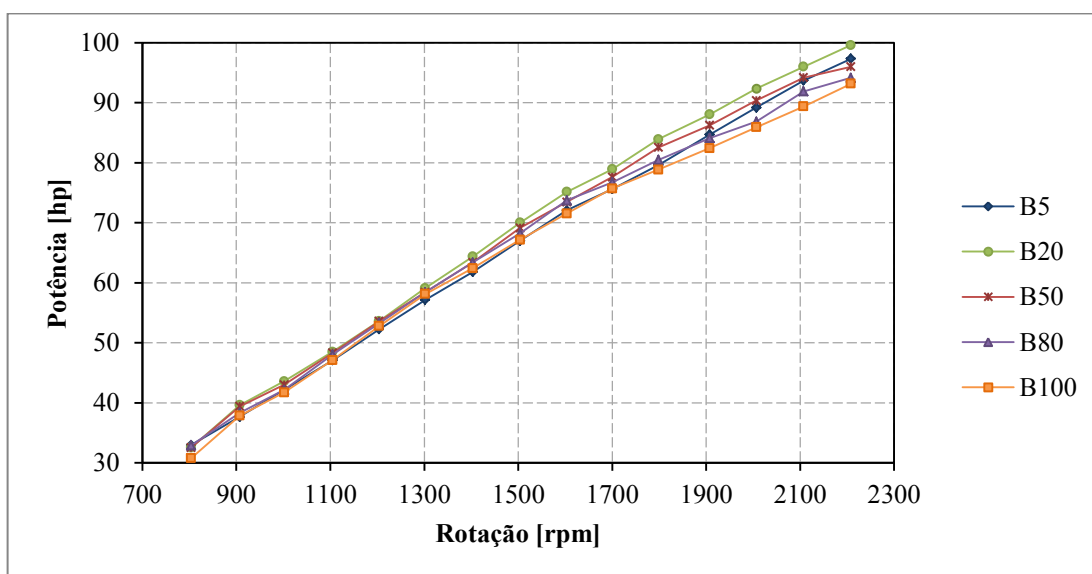
As Figuras 71 e 72 representam graficamente o comparativo da potência obtida diretamente pelo programa do dinamômetro e pela média calculada, de acordo com em função da rotação e do combustível utilizado.

Figura 71. Comparativo da potência obtida diretamente do programa, em função da rotação e do combustível utilizado.



Fonte: Próprio autor.

Figura 72. Comparativo da potência média calculada, em função da rotação e do combustível utilizado.



Fonte: Próprio autor.

As Figuras 69 e 70 e, conseqüentemente, as Figuras 71 e 72, mostram que, para a faixa de rotação por volta de 1.800 rpm, na qual o motor foi projetado para operar, é possível visualizar que o motor apresentou melhor desempenho operando com B20, seguido de B50, B5, B80 e B100. Deste modo, pode-se afirmar que o resultado mediano foi alcançado operando com B5 e o pior caso foi para o B100.

As curvas de potências obtidas, independentemente do tipo de combustível utilizado e da maneira de obtenção (diretamente do programa ou pela média calculada), não decaem a partir de uma determinada rotação. Isso porque os parâmetros geométricos do motor foram desenvolvidos para aplicação veicular com rotação máxima em torno de 3.200 rpm, mas, no caso específico, como o motor em análise foi concebido para aplicações agrícolas ou estacionárias, sua rotação máxima não ultrapassa 2.200 rpm, limitada pela bomba injetora de combustível.

Com a finalidade de se avaliar de modo comparativo a influência de certas composições de mistura neste trabalho é levado em consideração a base como sendo o B5 e a frequência de funcionamento de 1.800 rpm. Com isso, é possível observar um aumento da ordem de 4,5% na potência de eixo do motor, com o mesmo operando com B20. Por outro lado, operando com B100, tem-se uma redução da potência de eixo ao redor de 1,5%, pois a taxa de liberação de calor do Biodiesel é menor que a do Diesel, devido ao menor poder calorífico e à maior viscosidade.

Os resultados obtidos nos ensaios se aproximam do que se tem observado na literatura, onde alguns trabalhos mostram que a adição de Biodiesel, na proporção de até 30% em volume na mistura, favorece a conversão de energia do combustível em trabalho de expansão motora. Por outro lado, alguns trabalhos mostram que, operando com B100 há redução na potência de eixo de aproximadamente 1,3%, quando comparado com a operação com B5.

As Tabelas e Figuras contendo os resultados do torque e da potência em função da rotação e do combustível utilizado, obtidos diretamente do programa e através da média calculada estão disponíveis no Apêndice A.

Por fim, as principais características do Biodiesel utilizado nos ensaios podem ser observadas no Certificado de Qualidade do mesmo, o qual é apresentado no Apêndice B.

6. Conclusão

Os resultados para torque e potência alcançados por meio dos ensaios do motor de combustão interna na bancada dinamométrica, a qual foi desenvolvida e construída no decorrer deste trabalho, são próximos aos valores definidos pelo fabricante do motor.

No decorrer da análise dos dados, decidiu-se gerar as curvas de torque e potência de duas maneiras, sendo a primeira de acordo com o valor expresso diretamente pelo programa de controle do dinamômetro e a segunda sendo por meio do cálculo das médias de ambos, feita através de um pós-tratamento dos dados obtidos no decorrer dos ensaios.

Com isso, foi possível observar uma disparidade entre os resultados para torque e potência obtidos pelas duas vias. As curvas traçadas pelos dados obtidos diretamente do programa estão sempre posicionadas acima das curvas traçadas pelos dados obtidos pela média do pós-tratamento, refletindo uma diferença de ordem escalar.

Levando em consideração os valores de torque e potência teóricos obtidos por meio dos manuais consultados em oficinas especializadas, os valores de torque e potência obtidos via média por pós-tratamento são mais representativos e representam de modo mais seguro o comportamento do motor.

Por meio dos gráficos comparativos, é possível observar que as proporções B20 e B50 apresentam destaque. Os níveis de torque e potência para ambos são superiores ao longo de grande parte da faixa de rotação ensaiada e, em particular para a faixa ao redor de 1.800 rpm, na qual este motor foi projetado para operar. Isto é observado seja pelos valores obtidos diretamente pelo programa ou pelas médias calculadas.

Por outro lado, as proporções B80 e B100 apresentam queda de torque e potência principalmente em rotações mais elevadas. Por outro lado, o B5 é observado em uma posição média com relação aos demais.

A bancada dinamométrica desenvolvida e concebida no decorrer deste trabalho apresenta grande importância para a avaliação de desempenho de motores de combustão interna e, consequentemente, no desenvolvimento e aperfeiçoamento dos mesmos. Posteriormente, também será possível convalidar os resultados obtidos numericamente e, com isso, refinar os parâmetros de funcionamento com diferentes biocombustíveis.

Vale destacar que a bancada dinamométrica não foi montada no atual Laboratório de Motores por não existirem no mesmo as condições adequadas para operação (limitação do espaço físico, não existência de isolamento acústico e de vibração, dentre outros aspectos).

Futuramente, essa banca será aprimorada e montada num local adequado dentro dos 450 m² do Laboratório Associado do Instituto de Pesquisa em Bioenergia da UNESP (IPBEN-UNESP), o qual terá sua construção iniciada brevemente na Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira.

Como continuação imediata deste trabalho em nível de doutorado, foi proposto avaliar o funcionamento do motor operando com injeção direta de misturas Diesel-Biodiesel-Etanol. Posteriormente, além da injeção direta destas misturas, será integrado ao motor, um sistema de injeção eletrônica multiponto de etanol no coletor de admissão. Deste modo, além do torque e da potência de eixo, serão avaliados a composição dos produtos de combustão e o consumo específico de combustível.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-DAWODY, M. F.; BHATTI, S. K., Optimization strategies to reduce the biodiesel NO_x effect in diesel engine with experimental verification. Elsevier: **Energy Conversion and Management**, 2012.

ANP - Agência Nacional do Petróleo, **Resolução ANP N° 14, de 11/05/2012 - DOU 18/05/2012**, Especificações para o Biodiesel, 2012.

BARBOSA, A. L. P. B. F., **Biodiesel de mamona em trator agrícola na operação de preparo do solo**. 2007. 62 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2007.

BARBOSA, A. L. P. B. F., **Diesel, biodiesel de mamona e de soja: Desgaste do motor de trator agrícola em operações de preparo de solo**. 2011. 83 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2011.

BARBOSA, R. L.; SILVA, F. M.; SALVADOR, N.; CASTRO NETO, P., Eficiência de um motor à compressão utilizando diesel e misturas de biodiesel. 3º Congresso Brasileiro de Plantas Oleaginosas, Óleos, Gorduras e Biodiesel, Varginha. **Anais**. p. 1134-1139. 2006.

BUENO, A. V., **Análise da liberação de energia em motores diesel operando com combustíveis alternativos**. 2003. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2003.

BUENO, A. V., **Análise da operação de motores diesel com misturas parciais de biodiesel**. 2006. 103 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

BUNCE, M.; SNYDER, D.; ADI, G.; HALL, C.; KOEHLER, J.; DAVILA, B.; KUMAR, S.; GARIMELLA, P.; STANTON, D.; SHAVER, G., Optimization of soy-biodiesel combustion in a modern diesel engine. Elsevier: **Fuel**, 2009.

CAMARA, F. T., **Biodiesel de dendê em trator agrícola: desempenho em função do tempo de armazenamento e da proporção de mistura na operação de preparo do solo.** 2009. 92 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2009.

CORRÊA, I. M. *et al.*, Desempenho de motor diesel com misturas de biodiesel de óleo de girassol. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.32, p. 923-928. 2008.

DIB, F. H., **Produção de biodiesel a partir de óleo residual reciclado e realização de testes comparativos com outros tipos de biodiesel e proporções de mistura em um motor-generador.** 2010. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Ilha Solteira, 2010.

FAZAL, M. A.; HASEEB, A. S. M. A.; MASJUKI, H. H., Biodiesel feasibility study: An evaluation of material compatibility; performance; emission and engine durability. Elsevier: **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2010.

HWANG, J.; QI, D.; JUNG, Y.; BAE, C., Effect of injection parameters on the combustion and emission characteristics in a common-rail direct injection diesel engine fueled with waste cooking oil biodiesel. Elsevier: **Renewable Energy**, v. 63, p. 9-17, 2014.

JULIATO, A., **Análise da influência de diferentes misturas de biodiesel no desempenho e emissões de poluentes de um motor diesel agrícola.** 2006. 159 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

KIMURA, R. K., **Uso da técnica de análise de óleo lubrificante em motores diesel estacionários, utilizando-se misturas de biodiesel e diferentes níveis de contaminação do lubrificante.** 2010. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2010.

KNOTHE, G.; GERPEN, J. V.; KRAHL, J.; RAMOS, L. P., **Manual do Biodiesel.** São Paulo: Blücher, 352 p. 2006.

LOPES, A.; DABDOUB, M. J.; CAMARA, F. T.; FURLANI, C. E. A.; ZANOTTO, R. P. C.; CORTEZ, J. W.; GROTTA, D. C. C., Consumo de combustível de trator agrícola funcionando com biodiesel etílico de óleo residual. 5º Congresso Brasileiro de Plantas Oleaginosas, Óleos, Gorduras e Biodiesel, Lavras. **Anais**. p. 2150-2156. 2008.

MME - Ministério de Minas e Energia, **Balanço Energético Nacional 2013: Ano Base 2012**, Empresa de Pesquisa Energética - EPE, Rio de Janeiro, 284 p. 2013.

MORÓN-VILLAREYES, J. A.; SOLD, C.; AMORIM, A. M.; PIZZOLATTI, M. G.; MENDONÇA JUNIOR, A. P.; D'OCA, M. G. M., Diesel/biodiesel proportion for by-compression ignition engines. **Fuel**, v. 86, n. 12-13, p. 1977-1982. 2007.

OLIVEIRA, M. C. J., **Biodiesel de mamona em trator: desempenho em função do período de armazenamento e da proporção biodiesel/diesel em condição de preparo de solo**. 2012. 82 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2012.

PEREIRA, R. G.; OLIVEIRA, C. D.; OLIVEIRA, J. L.; OLIVEIRA, P. C. P; FELLOWSC, C. E.; PIAMBA, O. E., Exhaust emissions and electric energy generation in a stationary engine using blends of diesel and soybean biodiesel. **Renewable Energy**, v. 32, n. 14, p. 2453-2460, 2007.

PERES, S.; PAIVA, T. M. N.; MIRO, R. M. F.; FERREIRA, A. L.; CAMPOS, T. A. M., Caracterização do biodiesel de sebo bovino utilizando rotas metílicas e etílicas. 5º Congresso Brasileiro de Plantas Oleaginosas, Óleos, Gorduras e Biodiesel, Lavras. **Anais**. p. 1728-1740. 2008.

SANTOS, D. C.; ALVES, C. T.; NÓBREGA, S. D., Comparação de desempenho de um motor monocilindro do ciclo diesel operando com diesel e biodiesel (B100). 3º: Congresso Brasileiro de Plantas Oleaginosas, Óleos, Gorduras e Biodiesel, Varginha. **Anais**. p. 988-992. 2006.

SEBRAE, **Biodiesel**. Disponível em:

<[http://bis.sebrae.com.br/GestorRepositorio/ARQUIVOS_CHRONUS/bds/bds.nsf/D170D324C7521915832572B200470F63/\\$File/NT00035116.pdf](http://bis.sebrae.com.br/GestorRepositorio/ARQUIVOS_CHRONUS/bds/bds.nsf/D170D324C7521915832572B200470F63/$File/NT00035116.pdf)>. Acesso em: 20 jan. 2014.

SHAHABUDDIN, M.; LIAQUAT, A. M.; MASJUKI, H. H.; KALAM, M. A.; MOFIJUR, M., Ignition delay, combustion and emission characteristics of diesel engine fueled with biodiesel. Elsevier: **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2012.

SHUMACHER, L. G.; GERPEN, G. V., Engine oil analysis of diesel engines fueled with 0, 1, 2, 100 percent Biodiesel. **2000 Annual International Meeting ASAE**, Milwaukee, 2000.

SILVA, M. V., **Efeitos do uso do Biodiesel sobre propriedades do óleo lubrificante de um motor de ignição por compressão**. 2006. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

TABILE, R. A., **Efeito de biodiesel de mamona no diesel interior e metropolitano em trator agrícola**. 2008. 74 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2008.

TESFA, B.; MISHRA, R.; ZHANG, C.; GU, F.; BALL, A. D., Combustion and performance characteristics of CI (compression ignition) engine running with biodiesel. Elsevier: **Energy**, 2012.

Apêndice A – Tabelas e Gráficos de Resultados

As Tabelas 7 a 26 e as Figuras 73 a 92 representam, respectivamente, os valores e as curvas de torque e potência obtidos, pelo programa e pela média, em função do combustível.

Tabela 7. Torque obtido pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B5.

Rotação [rpm]	Torque [N.m]
819	368,1
959	397,6
1.072	446,0
1.162	427,7
1.300	446,2
1.359	426,7
1.471	426,2
1.587	431,4
1.678	427,9
1.793	416,5
1.883	415,9
1.995	414,3
2.090	416,5
2.196	409,3
2.281	411,5

Fonte: Próprio autor.

Tabela 8. Potência obtida pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B5.

Rotação [rpm]	Potência [hp]
849	45,1
959	56,3
1.072	68,4
1.190	71,7
1.300	82,4
1.394	83,8
1.505	89,9
1.587	96,7
1.678	101,4
1.793	104,9
1.883	110,3
1.995	116,1
2.090	122,4
2.196	126,2
2.281	131,9

Fonte: Próprio autor.

Tabela 9. Torque médio obtido, em função da rotação e com a utilização do B5.

Rotação [rpm]	Torque [N.m]
804,2	281,4
907,5	288,3
1.002,0	297,6
1.104,9	302,0
1.204,2	307,5
1.302,2	311,3
1.403,3	312,7
1.504,1	316,6
1.603,7	319,5
1.700,3	316,0
1.798,4	314,7
1.907,5	316,0
2.007,0	316,2
2.107,4	316,1
2.208,2	313,2

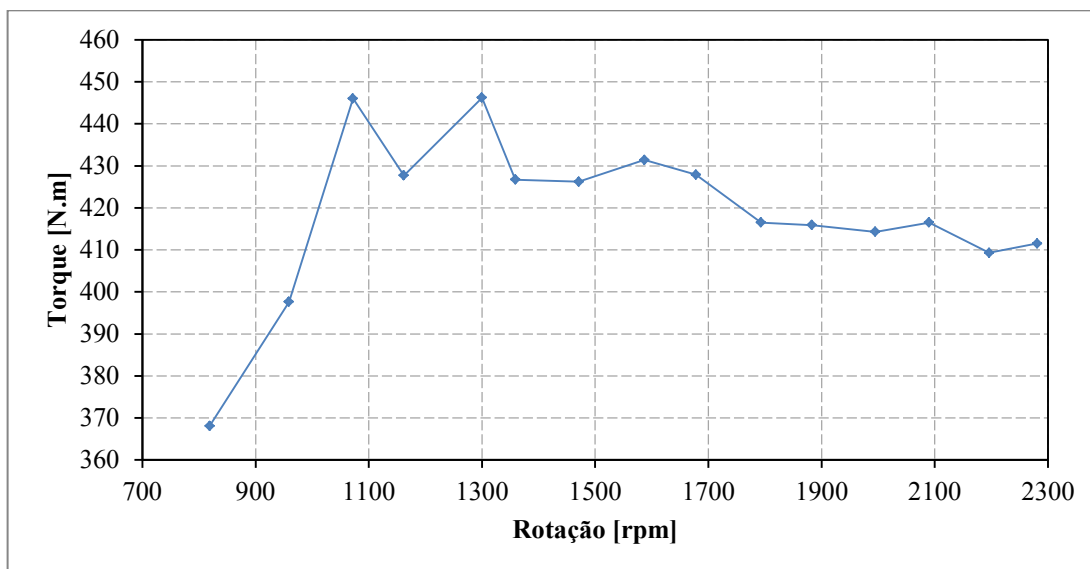
Fonte: Próprio autor.

Tabela 10. Potência média obtida, em função da rotação e com a utilização do B5.

Rotação [rpm]	Potência [hp]
804,2	32,9
907,5	37,7
1.002,0	42,2
1.104,9	47,1
1.204,2	52,3
1.302,2	57,2
1.403,3	61,8
1.504,1	67,0
1.603,7	72,0
1.700,3	75,6
1.798,4	79,6
1.907,6	84,7
2.007,0	89,2
2.107,4	93,7
2.208,2	97,3

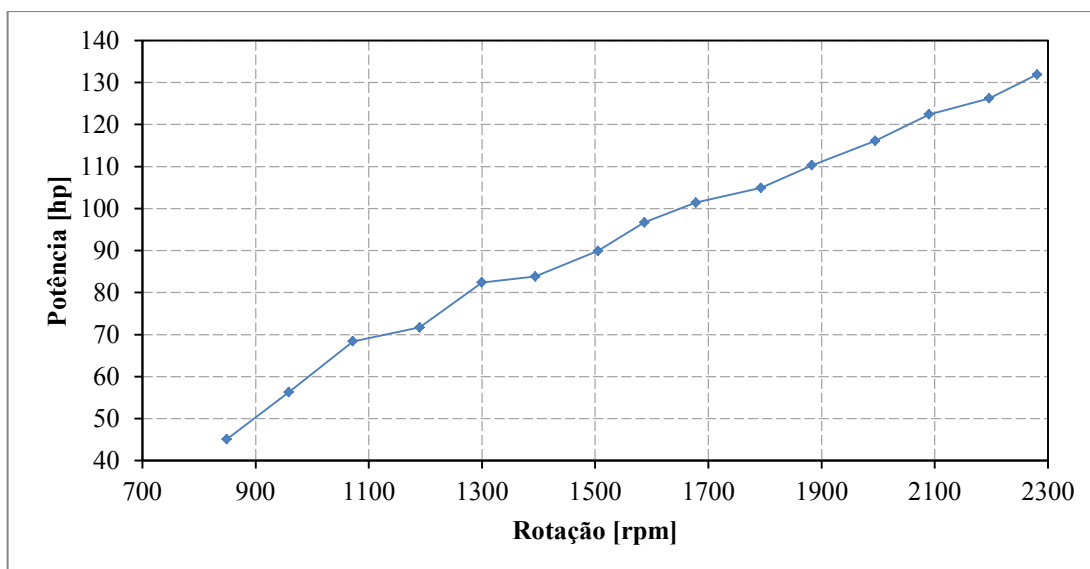
Fonte: Próprio autor.

Figura 73. Torque obtido pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B5.



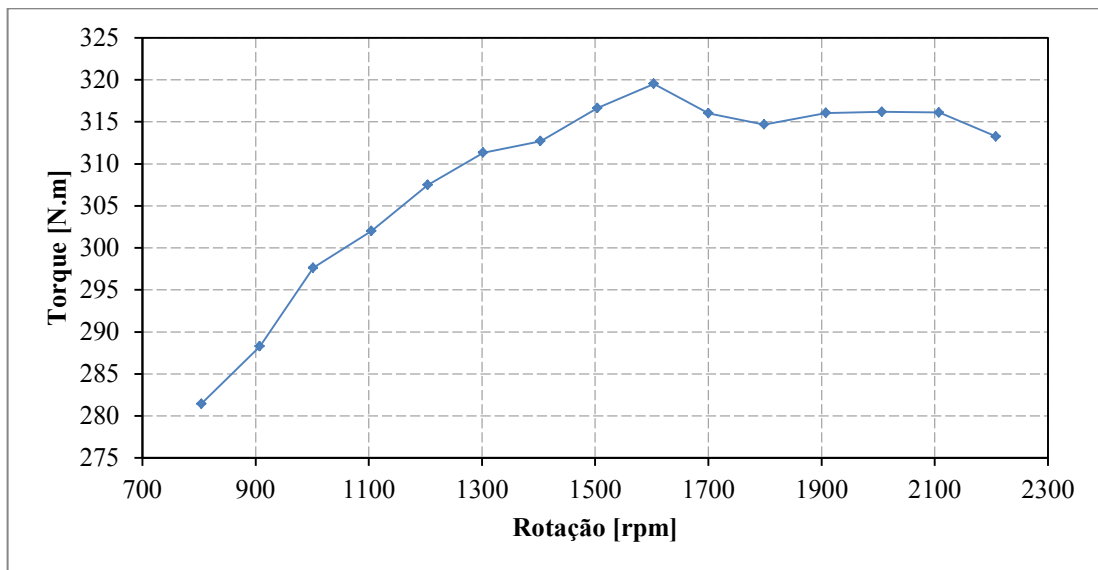
Fonte: Próprio autor.

Figura 74. Potência obtida pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B5.



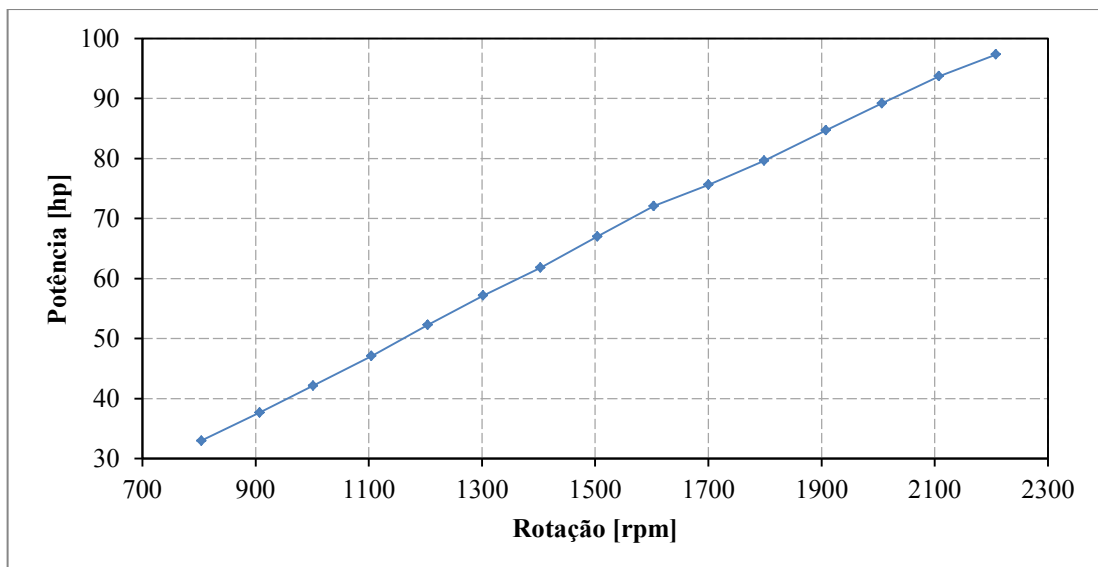
Fonte: Próprio autor.

Figura 75. Torque médio obtido, em função da rotação e com a utilização do B5.



Fonte: Próprio autor.

Figura 76. Potência média obtida, em função da rotação e com a utilização do B5.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 11. Torque obtido pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B20.

Rotação [rpm]	Torque [N.m]
833	400,2
965	394,5
1.096	470,1
1.174	437,5
1.258	443,9
1.394	441,6
1.472	439,6
1.601	443,1
1.662	437,3
1.784	433,7
1.897	432,7
1.983	430,3
2.073	427,7
2.177	424,0
2.280	417,1

Fonte: Próprio autor.

Tabela 12. Potência obtida pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B20.

Rotação [rpm]	Potência [hp]
833	48,4
975	55,4
1.096	73,3
1.174	73,0
1.258	79,4
1.394	87,3
1.472	91,6
1.601	99,7
1.701	103,4
1.784	108,8
1.897	115,4
1.983	120,0
2.073	124,8
2.177	129,8
2.280	133,6

Fonte: Próprio autor.

Tabela 13. Torque médio obtido, em função da rotação e com a utilização do B20.

Rotação [rpm]	Torque [N.m]
804,5	271,9
907,4	303,1
1.004,9	307,4
1.101,4	311,9
1.204,4	316,1
1.306,0	321,4
1.408,0	325,0
1.506,9	330,5
1.605,0	333,2
1.704,2	329,6
1.804,5	330,8
1.903,0	328,9
2.003,8	327,7
2.102,4	324,4
2.202,4	321,0

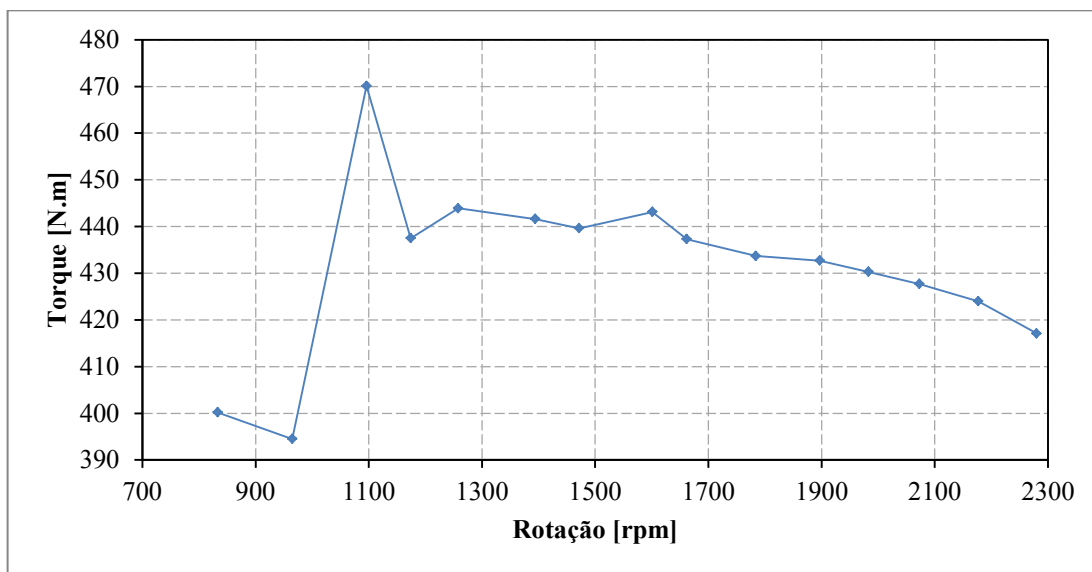
Fonte: Próprio autor.

Tabela 14. Potência média obtida, em função da rotação e com a utilização do B20.

Rotação [rpm]	Potência [hp]
804,5	32,6
907,4	39,7
1.004,9	43,6
1.101,4	48,5
1.204,4	53,6
1.306,1	59,1
1.408,0	64,4
1.506,9	70,0
1.605,0	75,1
1.704,2	78,9
1.804,5	83,9
1.903,1	88,1
2.003,8	92,3
2.102,4	95,9
2.202,4	99,6

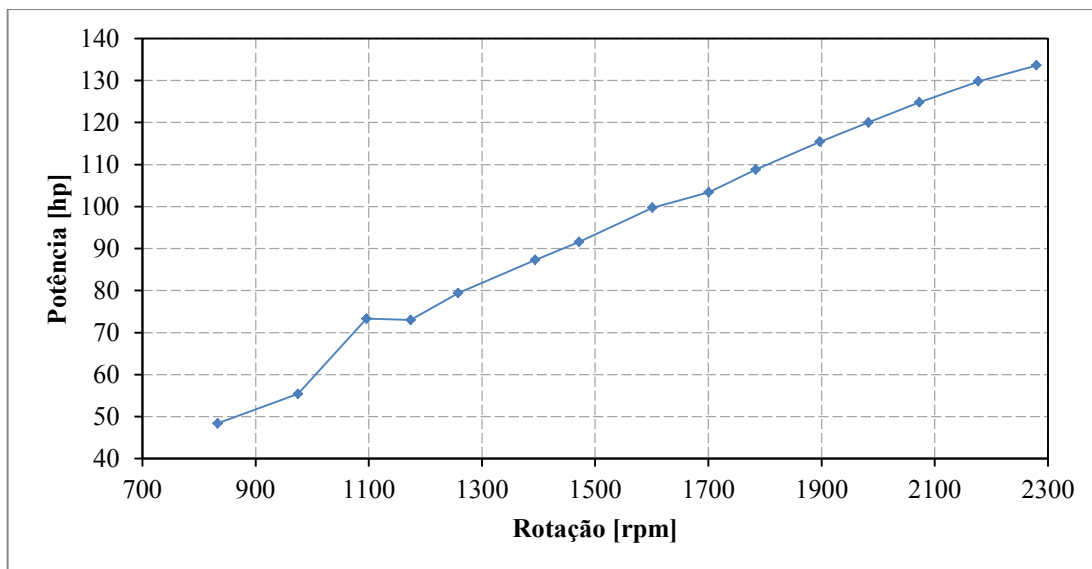
Fonte: Próprio autor.

Figura 77. Torque obtido pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B20.



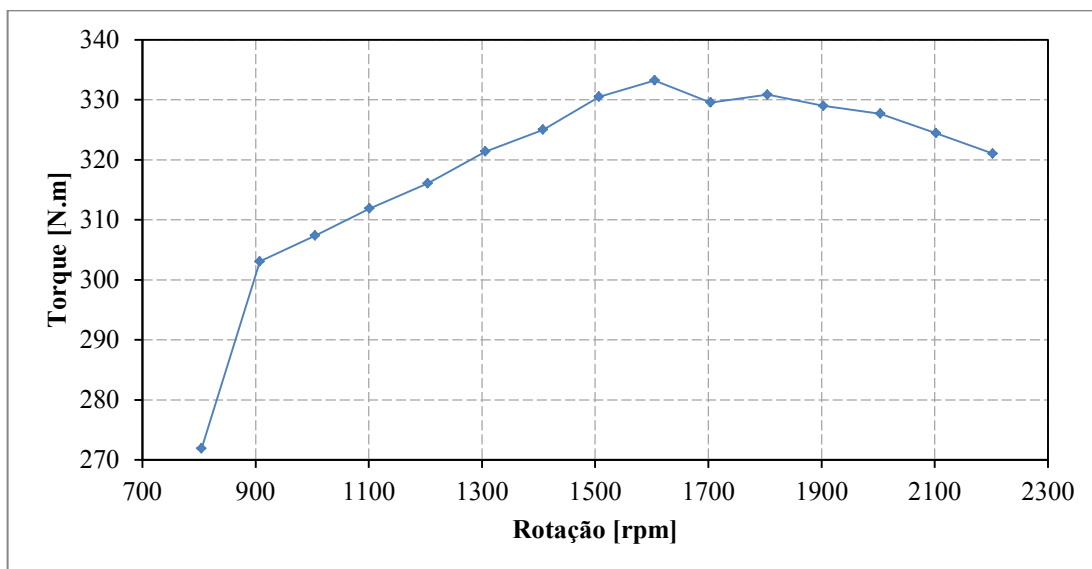
Fonte: Próprio autor.

Figura 78. Potência obtida pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B20.



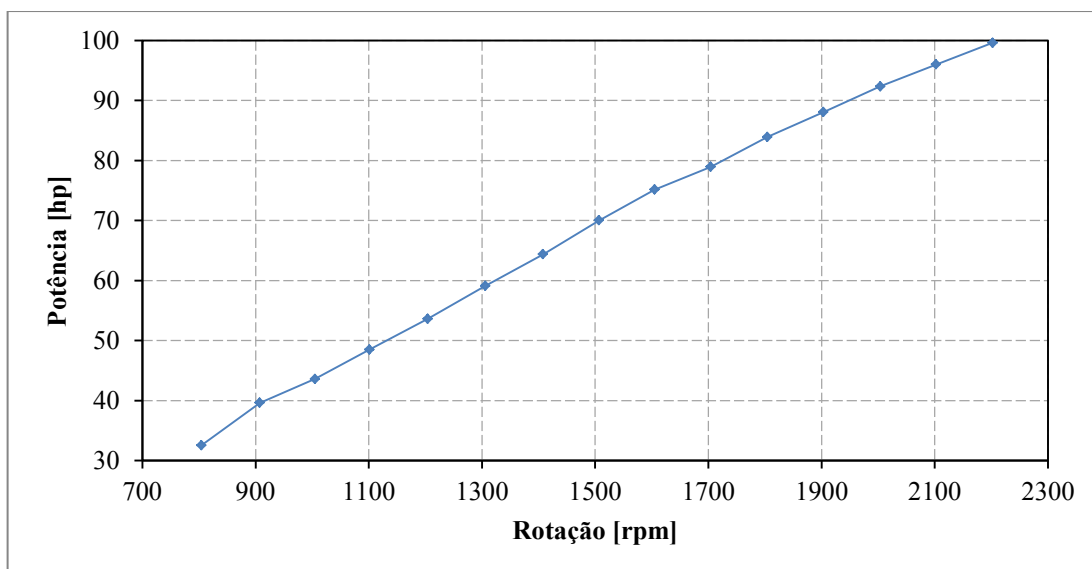
Fonte: Próprio autor.

Figura 79. Torque médio obtido, em função da rotação e com a utilização do B20.



Fonte: Próprio autor.

Figura 80. Potência média obtida, em função da rotação e com a utilização do B20.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 15. Torque obtido pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B50.

Rotação [rpm]	Torque [N.m]
837	393,9
970	469,1
1.081	443,2
1.182	431,2
1.268	437,1
1.378	443,3
1.491	440,1
1.572	443,6
1.675	427,6
1.776	428,2
1.893	421,1
1.966	418,4
2.066	414,7
2.182	412,2
2.291	413,3

Fonte: Próprio autor.

Tabela 16. Potência obtida pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B50.

Rotação [rpm]	Potência [hp]
837	49,1
970	65,9
1.081	68,5
1.182	72,1
1.268	78,6
1.378	86,7
1.491	92,7
1.572	98,6
1.699	101,0
1.795	107,1
1.893	112,0
2.000	117,1
2.097	121,5
2.182	126,5
2.291	133,0

Fonte: Próprio autor.

Tabela 17. Torque médio obtido, em função da rotação e com a utilização do B50.

Rotação [rpm]	Torque [N.m]
800,9	275,1
908,6	302,3
1.002,0	304,6
1.104,9	309,7
1.206,3	315,0
1.299,1	318,8
1.404,4	320,4
1.509,8	325,8
1.597,5	326,8
1.704,1	323,9
1.808,4	324,9
1.912,3	320,8
2.004,2	320,4
2.108,6	317,5
2.182,4	312,2

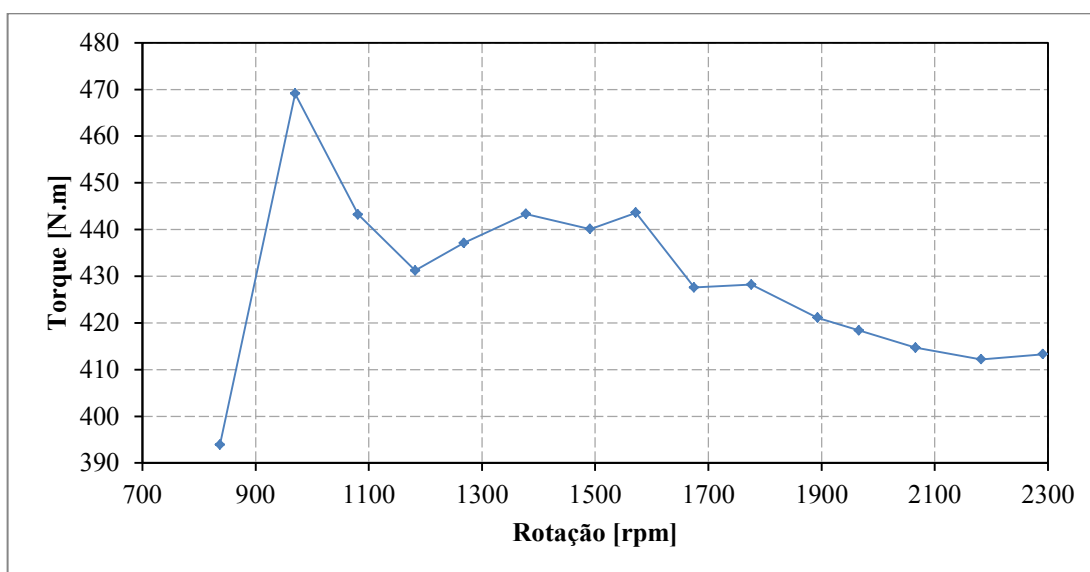
Fonte: Próprio autor.

Tabela 18. Potência média obtida, em função da rotação e com a utilização do B50.

Rotação [rpm]	Potência [hp]
800,9	32,6
908,6	39,4
1.002,0	43,0
1.104,9	48,3
1.206,3	53,6
1.299,1	58,4
1.404,4	63,4
1.509,8	69,2
1.597,5	73,5
1.704,1	77,6
1.808,4	82,5
1.912,3	86,2
2.004,2	90,4
2.108,6	94,2
2.182,4	96,0

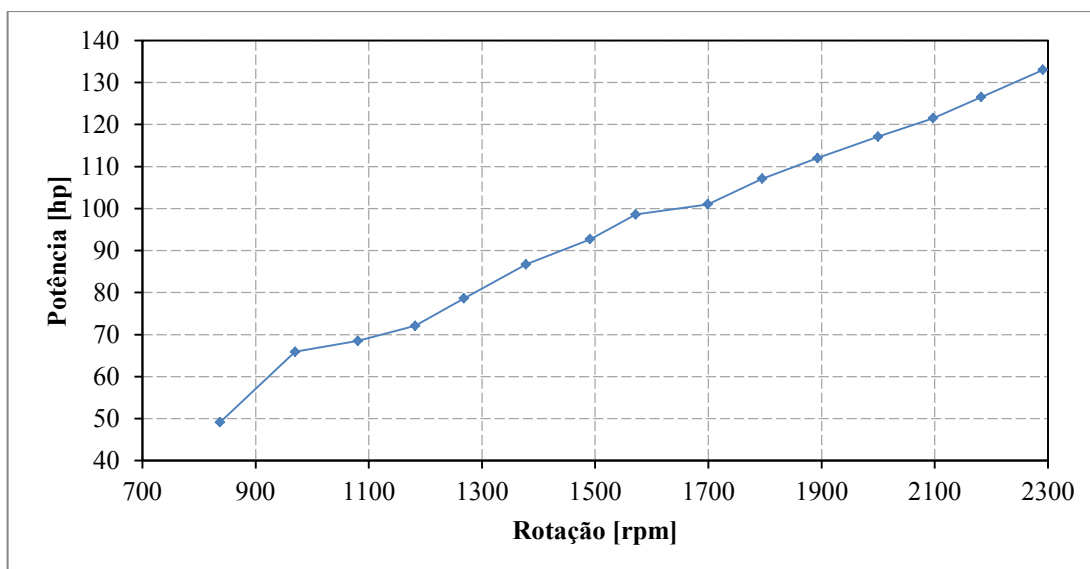
Fonte: Próprio autor.

Figura 81. Torque obtido pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B50.



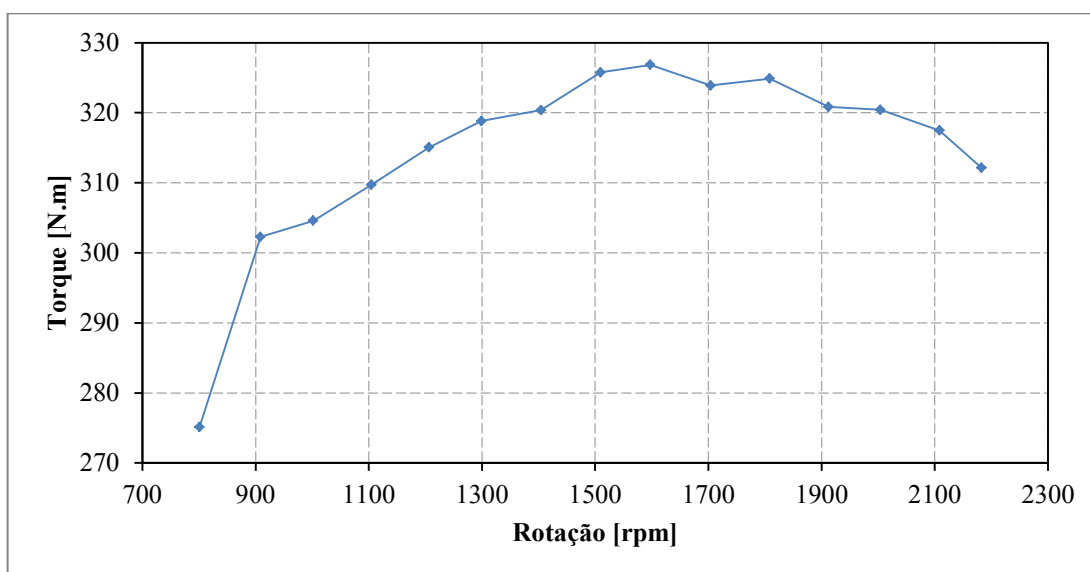
Fonte: Próprio autor.

Figura 82. Potência obtida pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B50.



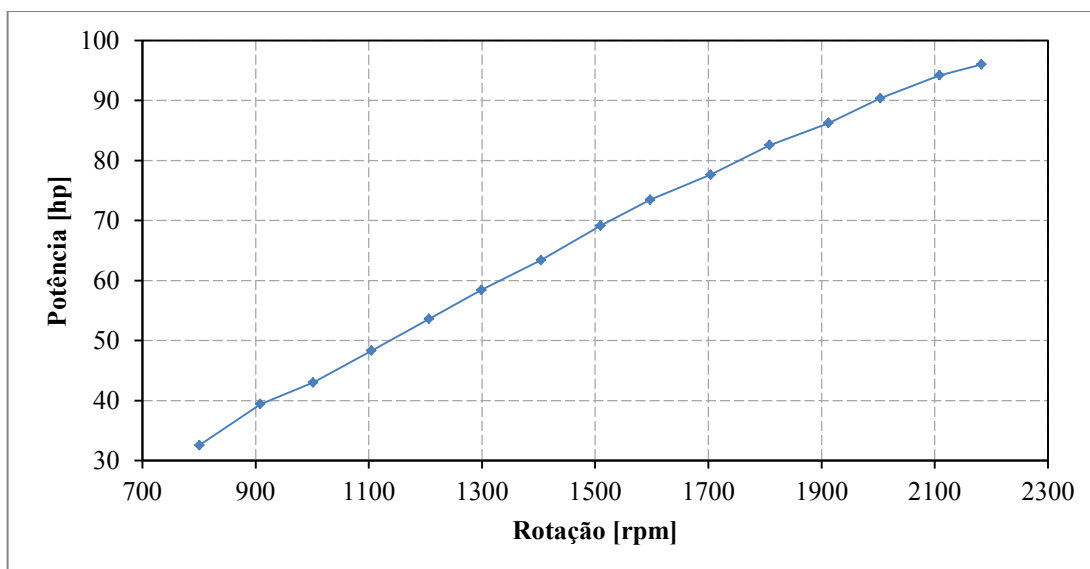
Fonte: Próprio autor.

Figura 83. Torque médio obtido, em função da rotação e com a utilização do B50.



Fonte: Próprio autor.

Figura 84. Potência média obtida, em função da rotação e com a utilização do B50.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 19. Torque obtido pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B80.

Rotação [rpm]	Torque [N.m]
817	394,1
975	435,6
1.077	434,8
1.170	437,0
1.274	429,3
1.392	434,7
1.480	430,5
1.604	444,2
1.677	431,5
1.787	424,5
1.877	417,7
1.979	410,8
2.087	413,7
2.170	404,1
2.273	399,2

Fonte: Próprio autor.

Tabela 20. Potência obtida pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B80.

Rotação [rpm]	Potência [hp]
817	48,7
975	61,1
1.077	67,1
1.170	73,4
1.274	78,4
1.392	85,8
1.480	90,2
1.604	100,4
1.677	102,2
1.787	106,7
1.877	110,4
1.979	114,4
2.087	121,3
2.170	123,3
2.273	127,5

Fonte: Próprio autor.

Tabela 21. Torque médio obtido, em função da rotação e com a utilização do B80.

Rotação [rpm]	Torque [N.m]
804,3	275,5
904,2	294,9
994,3	299,7
1.105,2	306,9
1.203,9	313,1
1.305,6	317,4
1.406,2	320,4
1.499,8	323,5
1.612,1	325,3
1.710,2	319,3
1.808,9	316,6
1.909,9	313,4
2.001,4	308,5
2.099,8	310,9
2.190,5	305,2

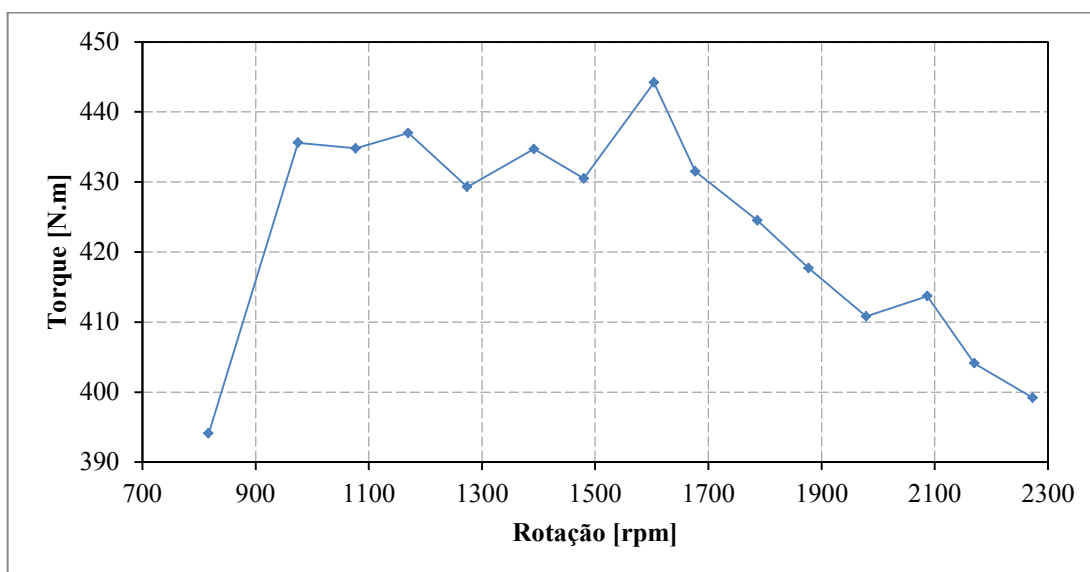
Fonte: Próprio autor.

Tabela 22. Potência média obtida, em função da rotação e com a utilização do B80.

Rotação [rpm]	Potência [hp]
804,3	32,9
904,2	38,4
994,3	42,2
1.105,2	48,0
1.203,9	53,3
1.305,6	58,4
1.406,2	63,4
1.499,8	68,2
1.612,1	73,7
1.710,2	76,8
1.808,9	80,5
1.909,9	84,1
2.001,4	86,9
2.099,8	91,9
2.190,5	94,2

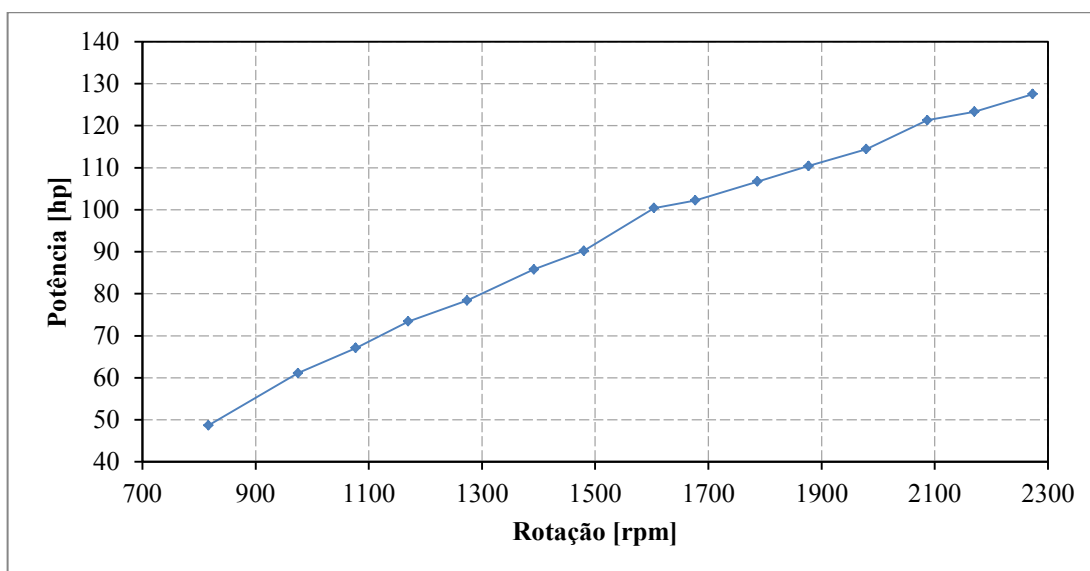
Fonte: Próprio autor.

Figura 85. Torque obtido pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B80.



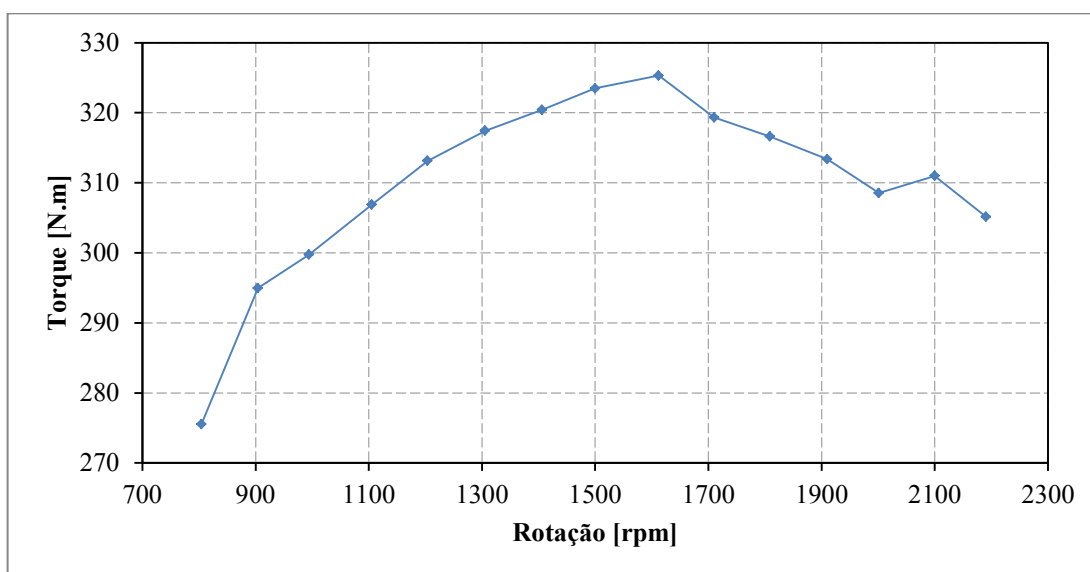
Fonte: Próprio autor.

Figura 86. Potência obtida pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B80.



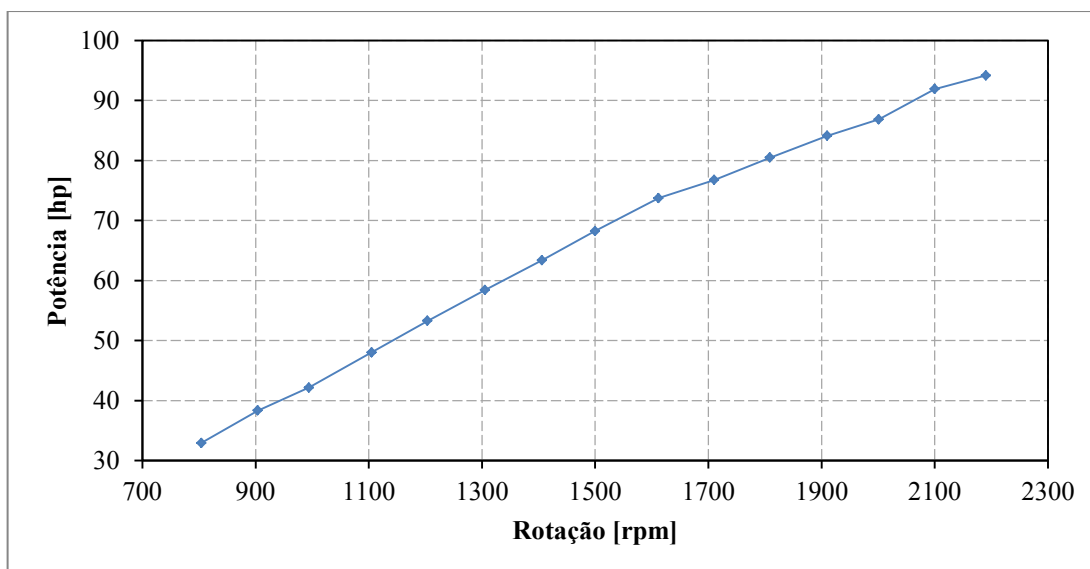
Fonte: Próprio autor.

Figura 87. Torque médio obtido, em função da rotação e com a utilização do B80.



Fonte: Próprio autor.

Figura 88. Potência média obtida, em função da rotação e com a utilização do B80.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 23. Torque obtido pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B100.

Rotação [rpm]	Torque [N.m]
828	394,8
962	444,1
1.064	414,9
1.169	441,2
1.305	438,3
1.401	444,7
1.480	440,3
1.588	428,0
1.690	420,1
1.794	408,5
1.884	403,7
1.965	397,6
2.088	403,4
2.176	397,7
2.269	402,6

Fonte: Próprio autor.

Tabela 24. Potência obtida pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B100.

Rotação [rpm]	Potência [hp]
828	47,9
962	61,7
1.064	63,2
1.169	74,2
1.305	81,1
1.401	88,2
1.480	92,6
1.588	96,1
1.690	100,0
1.794	103,0
1.884	107,0
1.991	110,9
2.088	118,4
2.176	121,8
2.269	128,4

Fonte: Próprio autor.

Tabela 25. Torque médio obtido, em função da rotação e com a utilização do B100.

Rotação [rpm]	Torque [N.m]
803,9	259,1
904,6	292,4
1.002,7	294,5
1.105,3	301,4
1.206,8	309,3
1.307,9	314,5
1.400,8	316,4
1.501,7	318,1
1.601,2	317,6
1.706,4	315,6
1.799,7	311,0
1.905,4	307,7
2.006,9	304,4
2.104,8	301,9
2.198,1	300,6

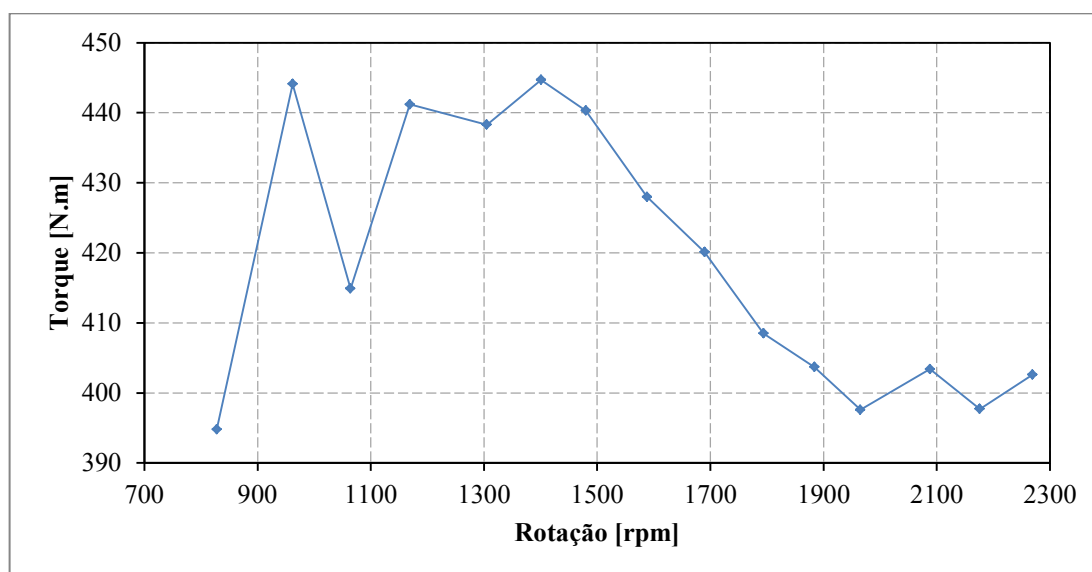
Fonte: Próprio autor.

Tabela 26. Potência média obtida, em função da rotação e com a utilização do B100.

Rotação [rpm]	Potência [hp]
803,9	30,8
904,6	37,9
1.002,7	41,7
1.105,3	47,1
1.206,8	52,8
1.307,9	58,1
1.400,8	62,4
1.501,7	67,2
1.601,2	71,6
1.706,4	75,7
1.799,7	78,8
1.905,4	82,4
2.006,9	85,9
2.104,8	89,4
2.198,1	93,2

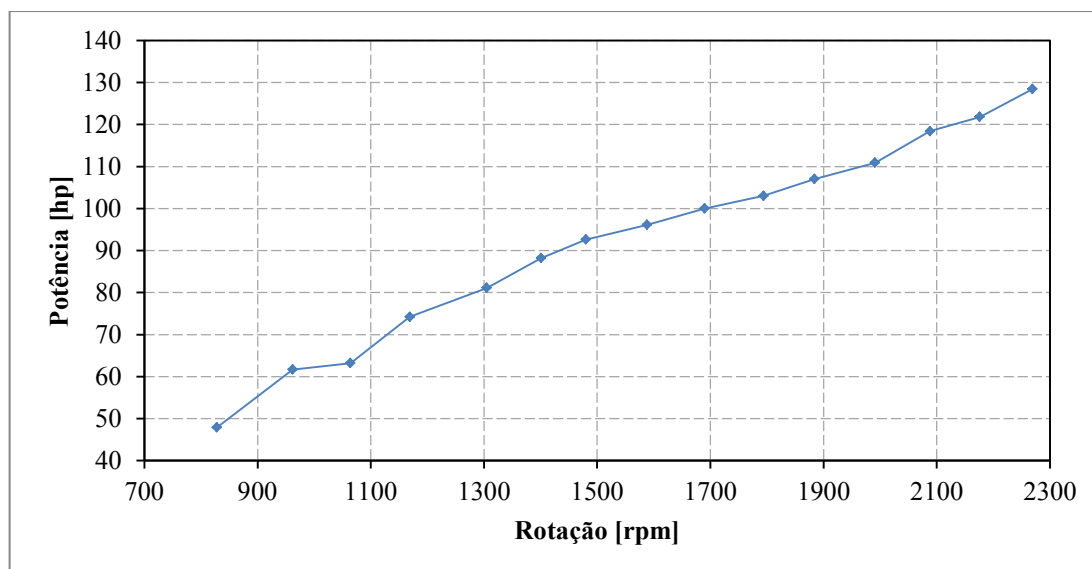
Fonte: Próprio autor.

Figura 89. Torque obtido pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B100.



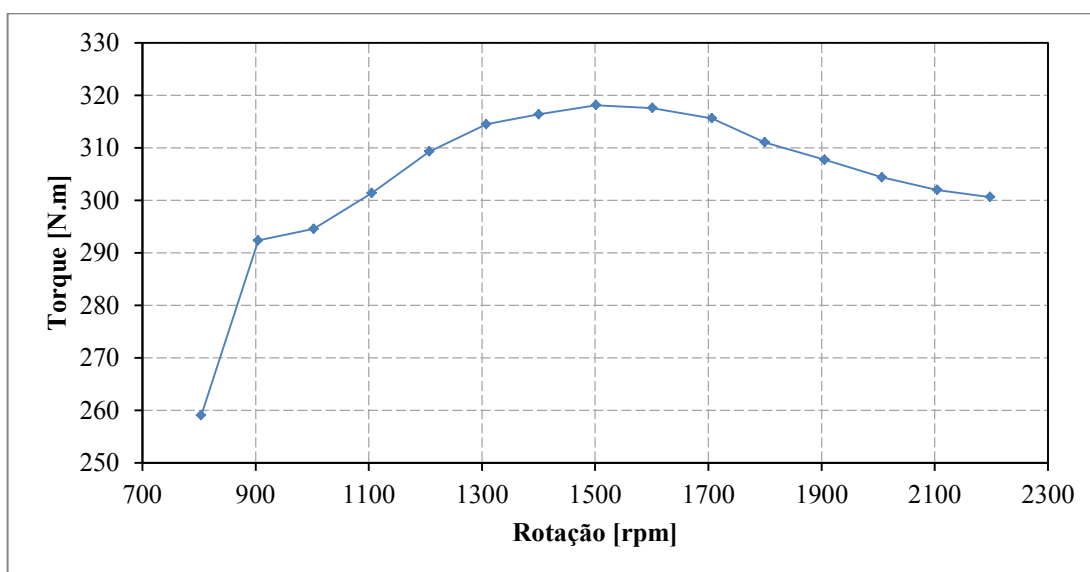
Fonte: Próprio autor.

Figura 90. Potência obtida pelo programa, em função da rotação e com a utilização do B100.



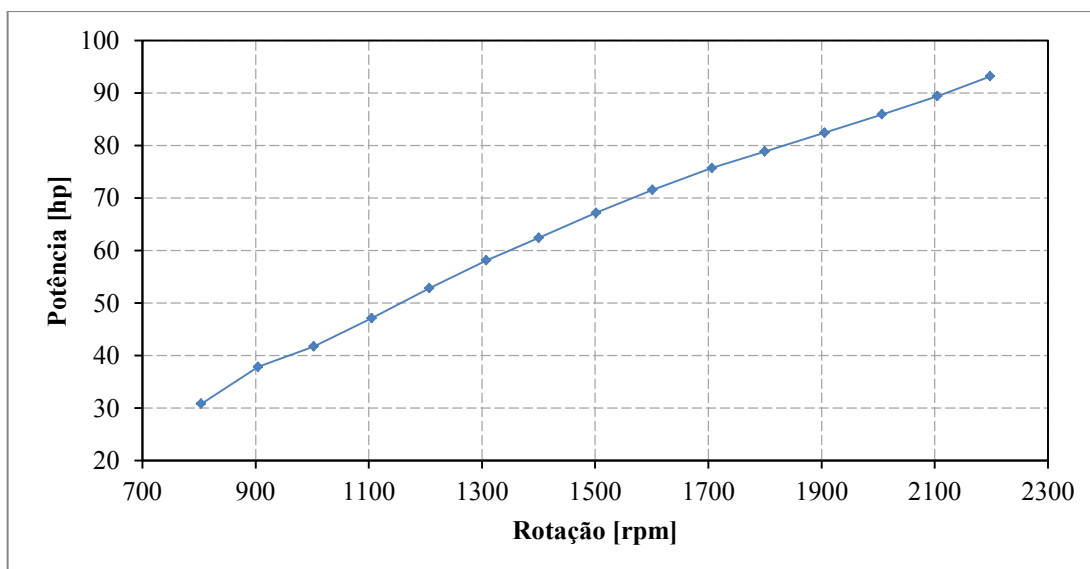
Fonte: Próprio autor.

Figura 91. Torque médio obtido, em função da rotação e com a utilização do B100.



Fonte: Próprio autor.

Figura 92. Potência média obtida, em função da rotação e com a utilização do B100.



Fonte: Próprio autor.

Apêndice B – Certificado de Qualidade do Biodiesel



CQ00061REG Rev 01
Data Rev:30/12/13

CERTIFICADO DE QUALIDADE Nº BIO 009_2014

PRODUTO: BIODIESEL – B100

FABRICAÇÃO: 27/01/2014

LOTE Nº: LB1270114TK05

DATA DE EMISSÃO: 28/01/2014

ADITIVO / COMPONENTE ATIVO: 25,20 ppm de Antioxidante / TBHQpuro

VOLUME: 2.444 m³

LACRES ENTRADA Nº: 56613 / 56618

LACRES SAÍDA Nº: 59784

MATÉRIAS PRIMAS UTILIZADAS: Óleo de Soja e Metanol

VALIDADE CERTIFICADO: 1 mês

CARACTERÍSTICAS	RESULTADOS	UNIDADES	MÉTODO	ESPECIFICAÇÃO (Res. ANP nº14, 11/05/2012)
Aspecto*	LII (22,5°C)	NA	Visual	LII (anotar temperatura de realização do teste)
Massa específica a 20°C*	881,12	kg/m³	NBR 14065	850 a 900
Viscosidade Cinemática a 40°C*	4,12	mm² / s	ASTM D 445	3,0 a 6,0
Teor de água*	159,05	mg/kg	EN 12937	Máximo 200
Contaminação Total*	8,58	mg/kg	EN 12662	Máximo 24
Ponto de Fulgor*	179,0	°C	ASTM D93	Mínimo 100
Teor de Éster*	98,86	% massa	EN 14103	Mínimo 96,5
Resíduo de carbono*	0,0063	% massa	ASTM D 4530	Máximo 0,050
Cinzas Sulfatadas*	0,0005	% massa	NBR 6294	Máximo 0,020
Enxofre Total*	1,81	mg/kg	NBR 15867	Máximo 10
Sódio + Potássio*	ND	mg/kg	NBR 15553	Máximo 5
Cálcio + Magnésio*	ND	mg/kg	NBR 15553	Máximo 5
Fósforo*	ND	mg/kg	NBR 15553	Máximo 10
Corrosividade ao Cobre, 3h a 50°C*	1	-	NBR 14359	1
Número de Cetano	-	-	ASTM D 6890	Anotar
Ponto de Entupimento de Filtro a Frio*	-3,0	°C	ASTM D 6371	Ver Tabela II da Res. nº14 (máximo 08 a 14°C)
Índice de Acidez*	0,3386	mg KOH/kg	ASTM D664	Máximo 0,50
Glicerol Livre*	0,0026	% massa	ASTM D 6584	Máximo 0,02
Glicerol Total*	0,1269	% massa	ASTM D 6584	Máximo 0,25
Monoacilglicerol*	0,3841	% massa	ASTM D 6584	Máximo 0,80
Diacilglicerol*	0,1455	% massa	ASTM D 6584	Máximo 0,20
Triacilglicerol*	0,0284	% massa	ASTM D 6584	Máximo 0,20
Metanol	-	% massa	EN 14110	Máximo 0,20
Índice de Iodo	-	g/100g	EN 14111	Anotar
Estabilidade à oxidação a 110°C*	8,39	h	EN 14112	Mínimo 6

*Análises realizadas no Laboratório Cargill TLG, cadastro ANP nº 055 – rua Egídio Thomé, 5700 Pq Industrial. Três Lagoas – MS. Relatório de Ensaio nº 009_2014.

Lacres amostra testemunha: 0017682 / 0017681

*ND: Não Detectado

*NA: Não Aplicável

Analista responsável:

Michelle M. da Silva

Michelle M. da Silva
Analista de Laboratório
CRQ 04473950
michelle_m_silva@cargill.com

Responsável técnico:

Caroline Oliveira Espíndola
Supervisora de Controle de Qualidade
CRQ 12300392
caroline_espindola@cargill.com