

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**DESEMPENHO EM DINAMÔMETRO E EMISSÕES
RESIDUAIS DE UM MOTOR DE TRATOR AGRÍCOLA
OPERANDO COM MISTURAS BINÁRIAS DE ÓLEO
DIESEL B5 E BIODIESEL DE ÓLEO DE FRANGO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Diego Augusto Fiorese

Santa Maria, RS, Brasil

2011

**DESEMPENHO EM DINAMÔMETRO E EMISSÕES
RESIDUAIS DE UM MOTOR DE TRATOR AGRÍCOLA
OPERANDO COM MISTURAS BINÁRIAS DE ÓLEO DIESEL
B5 E BIODIESEL DE ÓLEO DE FRANGO**

por

Diego Augusto Fiorese

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração em Mecanização Agrícola, Linha de Pesquisa de Projeto e Utilização de Máquinas Agrícolas, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Agrícola.**

Orientador: Prof. Arno Udo Dallmeyer, Dr. Agr.

Santa Maria, RS, Brasil

2011

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**DESEMPENHO EM DINAMÔMETRO E EMISSÕES RESIDUAIS DE UM
MOTOR DE TRATOR AGRÍCOLA OPERANDO COM MISTURAS
BINÁRIAS DE ÓLEO DIESEL B5 E BIODIESEL DE ÓLEO DE FRANGO**

elaborada por
Diego Augusto Fiorese

Como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Agrícola

COMISSÃO EXAMINADORA:

Arno Udo Dallmeyer, Dr. (UFSM)
(Presidente/orientador)

Paulo Romeu Moreira Machado, Dr. (UFSM)

Emerson Fey, Dr. (UNIOESTE)

Santa Maria, 28 de fevereiro de 2011

DEDICATÓRIA

Dedico com imensa gratidão à minha mãe, **Clarice Candiago Fiorese**, pelo insaciável apoio durante todas as etapas dedicadas ao trabalho e estudos, e pela imensa compreensão em manter-se distante dos membros de sua família, ao saber que o propósito de ambos, é tornarem-se pessoas com alto nível educacional.

Ao meu Pai, **Gelson Fiorese** (*in memoriam*)... Sua ausência forçada me fez refletir o quão bela é a vida, mesmo enfrentando as maiores dificuldades. Com certeza estás olhando por sua família, guiando-nos para o melhor caminho.

Aos irmãos **Flávia Fiorese, Flávio Henrique Fiorese e Eduarda Fiorese**, por sempre acreditarem que o primogênito da família, carrega no sangue a responsabilidade de traçar o melhor caminho, e pelo apoio dado durante todo tempo.

Ao colega e amigo **Hendriago Alberto Torshelsen da Silveira** (*in memoriam*)... Quando entre nós, nos inundou de companheirismo, amizade, sabedoria e gosto pela vida. Serás eternamente lembrado.

Dedico ainda, a todos que de forma direta ou indireta, participaram e colaboraram para a realização de cada uma das etapas deste estudo.

AGRADECIMENTOS

As forças divinas que fortalecem a vida no planeta Terra, e desta forma dão suporte à realização de todos os trabalhos técnicos e científicos.

Aos pais, amigos, parentes e colegas, pelo apoio e incentivo ao crescimento didático e profissional, especialmente minha mãe pela presença em diversos momentos, bem como sua compreensão pela ausência ao longo dos anos dedicados à evolução intelectual.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola-PPGEA, especialmente à área de concentração em Mecanização Agrícola, pela sempre transparente política a todos os alunos ingressantes, ingressos e egressos do curso. O programa que vos falo, junto a todos os profissionais que nele participam, faz do aprendizado sobre Máquinas e Mecanização Agrícola, algo especial e prazeroso, nos fazendo carregar o conhecimento ao longo de toda vida profissional.

À **Capes**, pela concessão da bolsa de estudos e apoio financeiro para publicações e participação de eventos.

A todos os orientadores, que de forma sucinta ou detalhada lançaram todas as diretrizes para o alcance do sucesso neste trabalho.

A todos os colegas do Laboratório de Projeto de Sistemas Técnicos - **LPST**, os quais sempre apoiaram e deram atenção as necessidades mútuas.

À uma distinta pessoa e profissional, chamado **Reginaldo Ferreira Santos**. Com certeza foi o maior depositário de confiança e o maior incentivador ao longo dos últimos 6 anos, para que neste momento eu pudesse estar ao final de uma Pós-Graduação de alto nível.

Agradeço de forma individual, ao meu Orientador e amigo, **Arno Udo Dallmeyer**, pela confiança depositada em todas as atividades decorrentes desta magnífica Pós-Graduação, pelas sábias orientações e por se fazer presente nos momentos de maior dificuldade.

Ao professor **Leonardo Nabaes Romano**, amigo que adotou as dificuldades de seus orientados e co-orientados, conduzindo-lhes, para o melhor caminho ético e profissional, prestando sempre a melhor orientação.

Ao professor e amigo **José Fernando Schlosser**, pela compreensão das dificuldades encontradas, orientações e apoio prestado ao que fosse necessário à realização dos estudos práticos.

Ao professor **Paulo Romeu Moreira Machado**, novo amigo que colaborou de forma significativa para a obtenção dos dados, empréstimo de equipamentos e em orientações técnicas e científicas.

Meu grande amigo e colega **André Bisognin**, que sempre foi capaz de colocar vossos conhecimentos e imensa força de vontade a disposição para os momentos que fossem necessários.

Ao colega **André Bender**, uma grande amizade formada pela ajuda mútua em grande parte da pesquisa realizada, especialmente na etapa prática.

Ao Colega e amigo **Roberto Begnis Hausen**, que de forma acolhedora, foi capaz de prestar imenso apoio a confecção de muitos dos equipamentos utilizados nos ensaios. Sabem vocês qual foi a moeda de troca cobrada para imensa ajuda? Um sincero aperto de mãos durante todas as manhãs em que nos reunimos no LPST, para estudarmos e tomar aquele bom chimarrão.

Ao colega **Thiago Guedez da Luz Martins**, aluno do Curso de Engenharia Mecânica que voluntariamente auxiliou a muitas das atividades decorrentes da pesquisa realizada.

A todos do NEMA, que de alguma forma auxiliaram nos ensaios realizados, em especial a **Gustavo Heller Nietiedt**, o qual acompanhou e prestou apoio em todas as etapas realizadas durante os ensaios em bancada dinâmométrica.

Ao amigo **Cornélio Primieri**, pela sempre dedicada colaboração para com os momentos necessários, não sendo diferente na ocasião em que necessitei adquirir matéria-prima para a produção do biocombustível utilizado.

À **Faculdade Assis Gurgacz**, especialmente aos profissionais que formam o quadro de funcionários, sempre apoiando e dando suporte aos egressos que retornam a vossa casa.

À **Farima**, Indústria e Comércio de Subproduto Animal LTDA., de Tupãssi-PR, pela doação do óleo de frango para produção do biodiesel utilizado, representado pelo Consultor Sênior Engº. Químico Me. **Rogério do Nascimento**.

EPÍGRAFE

“Nada façais por contenda ou vanglória, mas por humildade”

(Filipenses, 2:3)

Ética se constrói com transparência, e transparência se faz com humildade!

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola
Universidade Federal de Santa Maria

DESEMPENHO EM DINAMÔMETRO E EMISSÕES RESIDUAIS DE UM MOTOR DE TRATOR AGRÍCOLA OPERANDO COM MISTURAS BINÁRIAS DE ÓLEO DIESEL B5 E BIODIESEL DE ÓLEO DE FRANGO

Autor: Diego Augusto Fiorese
Orientador: Arno Udo Dallmeyer
Santa Maria, 28 de fevereiro de 2011

O Brasil, terceiro maior produtor de biodiesel do mundo, e também terceiro maior produtor mundial de frango, pode incrementar em algumas regiões do país, o uso de óleo oriundo de aves, como alternativa aos combustíveis fósseis. Com vistas ao aumento do leque de opções, a redução da dependência do óleo de soja para tal fim, e fomentando aspectos ambientais, é possível produzir biodiesel de óleo de frango, que no país, pode disponibilizar mais de 300 mil toneladas de óleo por ano. Considerando a aplicação dos combustíveis alternativos para os motores diesel, em máquinas agrícolas, o trabalho teve por objetivo avaliar o desempenho de um trator agrícola de 53 kW em bancada dinamométrica, e o nível de emissões de alguns gases residuais de combustão, operando com biodiesel metílico de óleo de frango e diversas misturas binárias com óleo diesel B5. Avaliou-se os valores de potência e torque produzidos, consumo de combustível, consumo de energia e a eficiência térmica do motor, bem como os teores de gases produzidos (dióxido de carbono, CO₂; monóxido de carbono, CO; hidrocarbonetos não queimados, HC; e oxigênio, O₂). Utilizaram-se seis misturas de óleo diesel com biodiesel: B5 (testemunha), B20, B40, B60, B80 e B100. O ensaio foi instalado com delineamento inteiramente casualizado (DIC) em esquema fatorial, sendo que após foi realizada a análise de variância e as médias ajustadas por equações de regressão. Integrando-se os dados, os resultados mais expressivos mostraram vantagens para o B20. Foram observadas perdas pouco significativas na geração de potência e torque, aumento no consumo específico, melhoria na eficiência térmica do motor, e redução do consumo energético com o aumento da proporção de biodiesel na mistura. Os melhores resultados das emissões mostraram uma redução nas emissões de CO, na ordem de 80%, quando operando com B100. O CO₂ teve redução pouco expressiva e o nível de HC não queimados foi superior ao da testemunha nas misturas B60, B80 e B100.

Palavras-chave: Biocombustível. Ensaio. Eficiência. Dinamometria. Gases Residuais.

ABSTRACT

Master Thesis
Graduate Program in Agricultural Engineering
University of Santa Maria

PERFORMANCE IN DYNAMOMETER AND EMISSIONS OF WASTE AN AGRICULTURAL TRACTOR ENGINES OPERATING WITH BINARY MIXTURES B5 DIESEL AND BIODIESEL OIL CHICKEN

Author: Diego Augusto Fiorese

Advisor: Arno Udo Dallmeyer

Santa Maria, February 28, 2011.

Brazil, the third largest producer of biodiesel in the world, and also the third largest producer of chicken, may increase in some regions, the use of oil derived from birds, as an alternative to fossil fuels. In order to increase the range of options to reduce dependence on soybean oil for that purpose, and fostering environmental aspects, it is possible to produce biodiesel from chicken oil, the country that can provide more than 300 thousand tons of oil per year. Considering the application of alternative fuels for diesel engines, agricultural machinery, the study aimed to evaluate the performance of a tractor of 53 kW in a dynamometer bench, and the level of emissions of certain waste gases of combustion, operating with biodiesel methyl chicken oil and various binary mixtures with diesel B5. We evaluated the values of torque and power produced, fuel consumption, power consumption and thermal efficiency of the engine, as well as the levels of gases (carbon dioxide, CO₂, carbon monoxide, CO, unburned hydrocarbons, HC; and oxygen, O₂). We used six blends of diesel with biodiesel B5 (control), B20, B40, B60, B80 and B100. The trial was conducted with a randomized design (CRD) in a factorial design, which was held after the analysis of variance and the average adjusted for regression equations. Integrating the data, the most significant results showed advantages for the B20. Minor losses were observed in the generation of power and torque, increase in specific fuel consumption, improved engine thermal efficiency and reduced energy consumption by increasing the proportion of biodiesel in the blend. The best emission results showed a reduction in emissions of CO, in the order of 80% when operating with B100. The CO₂ reduction was not significant and the level of unburned HC was higher than the control blends B60, B80 and B100.

Key Words: Biofuel. Test. Efficiency. Dynamometry. Waste Gas.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Matriz energética brasileira.....	26
Figura 2 - Matriz energética mundial.....	27
Figura 3 - Balanço de produção e vendas, para todos os derivados de petróleo e óleo diesel, volume e custo de importação e exportação de óleo diesel, do ano de 2000 a 2010	28
Figura 4 - Vendas internas de óleo diesel do ano de 2000 a 2010.....	28
Figura 5 - Distribuição percentual do consumo interno de óleo diesel por setor	29
Figura 6 - Predispostos da Lei 11.097/2005 para o abastecimento interno de biodiesel	32
Figura 7 - Produção de biodiesel no Brasil de 2005 a 2010.....	32
Figura 8 - Seqüência cronológica dos percentuais de biodiesel adicionado ao diesel.....	33
Figura 9 - Produção de biodiesel nos países Europeus de 1992 a 2005.....	34
Figura 10 - Principais oleaginosas para produção de biodiesel por região do Brasil	35
Figura 11 - Fluxograma do Processo de Produção de Biodiesel via transesterificação.....	37
Figura 12 - Esquema da reação química da transesterificação.....	38
Figura 13 - Esquema da molécula triglicéridica convertida em monoglicérides	38
Figura 14 - Efeito do uso de óleos vegetais não transesterificados em um motor diesel: (A) vista inferior ou pelo cárter do motor, (B) virabrequim	39
Figura 15 - Principais produtores mundiais de carne de frango em 2009.....	43
Figura 16 - Balanço do mercado de tratores de rodas no Brasil, do ano de 1960 a 2009	49
Figura 17 - Produção e vendas de tratores de rodas no Brasil do ano de 1999 a 2010.....	50
Figura 18 - Vendas de tratores no Brasil do ano de 1999 a 2010 por faixa de potência.....	51
Figura 19 - Análise da atuação de forças em um trator	54
Figura 20 - Aplicação indicada das normas ABNT/ISO nos tratores agrícolas de rodas	56
Figura 21 - Esquema do princípio de operação de um dinamômetro e dos principais componentes utilizados para mensuração e aquisição de dados	58
Figura 22 - Esquema de um trator acoplado a um dinamômetro mediante uso da TDP	59
Figura 23 - Resultados de consumo específico volumétrico de biodiesel, em ensaios realizados por Silva (2006), em um trator de 85 cv com cabine (Figura 25), utilizando ar condicionado ligado e desligado	61
Figura 24 - Esquema de ligação dos principais sensores utilizados para avaliação de tratores.....	66
Figura 25 - Trator instrumentado e ensaiado por Silva (2006), com tanques auxiliares para uso e substituição rápida de diferentes proporções de diesel e biodiesel.....	70
Figura 26 - Trator MF 275 submetido aos ensaios de dinamometria e emissões.....	76
Figura 27 - Visualização lateral do dinamômetro MWD NL 480 utilizado nos ensaios	77
Figura 28 - Dinamômetro NL 480, com visualização do sistema de refrigeração e acoplamento do trator utilizado por árvore cardã.....	78
Figura 29 - Tela de visualização do software Accudyno para controle do dinamômetro.....	80
Figura 30 - Medidor de fluxo utilizado na determinação do consumo horário de combustível	81

Figura 31 - Imagem dos dois tanques auxiliares utilizados	82
Figura 32 - Esquema de ligações do circuito de combustível	83
Figura 33 - Interface gráfica do software Discovery G4, utilizado para fornecimento e controle dos dados dos gases captados na exaustão	84
Figura 34 - Tela de visualização do programa registrador de dados na sala de controle.....	86
Figura 35 - Módulo de comando CT03F, para controle manual de carga/frenagem.....	87
Figura 36 - Variação do torque e potência máxima na TDP, de acordo com o combustível...	92
Figura 37 - Potência e torque na TDP em todas as faixas de rotação do motor com cada combustível utilizado	93
Figura 38 - Potência desenvolvida na TDP para B5, B20 e B100 entre 1200 e 2100 rpm.....	94
Figura 39 - Potência máxima para cada combustível avaliado (regressão)	95
Figura 40 - Torque desenvolvido na TDP para B5, B20 e B100 entre 1200 e 2100 rpm.....	96
Figura 41 - Torque desenvolvido na TDP em 1200 e 1300 rpm para todos os combustíveis..	97
Figura 42 - Curvas dos melhores resultados para torque máximo, nominal e reserva de torque de acordo com o combustível.....	98
Figura 43 - Torque máximo e reserva de torque para cada combustível avaliado (regressão)	99
Figura 44 - Consumo horário volumétrico e específico para B5, B20 e B100 por faixa de rotação.....	100
Figura 45 - Valores médios de consumo horário e específico e menor valor de consumo específico para cada combustível	101
Figura 46 - Médias de consumo horário volumétrico e específico para cada combustível (regressão).....	101
Figura 47 - Eficiência do motor considerando os dois extremos e B20	102
Figura 48 - Eficiência térmica do motor para cada combustível (regressão).....	103
Figura 49 - Consumo energético para B5, B20 e B100 em todas as rotações do motor.....	104
Figura 50 - Consumo energético de todos os combustíveis em 1900 e 2000 rpm	105
Figura 51 - Consumo energético do motor para cada combustível (regressão)	105
Figura 53 - Emissões de CO ₂ para cada combustível e rotação	107
Figura 54 - Presença de oxigênio nos gases de exaustão	108
Figura 55 - Hidrocarbonetos não queimados em cada rotação e combustível utilizado.....	109
Figura 56 - Polinômios representativos do comportamento de emissões de CO	110
Figura 57 – Tendências percentuais das emissões emitidas comparadas com a testemunha.	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Poder calorífico superior e densidades de diferentes biomassas.....	41
Tabela 2 - Poder calorífico superior de diferentes tipos de biodiesel (diversas fontes)	42
Tabela 3 - Composição percentual dos ácidos graxos presentes no óleo de frango	45
Tabela 4 - Potencial teórico de produção de biodiesel, com rendimento de 95%, a partir do óleo de frango produzido pelas Cooperativas do oeste do Paraná	46
Tabela 5 - Produção de cabeças de frango e potencial teórico de produção de óleo e biodiesel de frango no Brasil	47
Tabela 6 - Tratores existentes nos estabelecimentos agropecuários em 31/12/2006.....	49
Tabela 7 - Resultados dos ensaios de potência de um motor 4 cilindros (44 kW) acoplado em um dinamômetro (T1) e acoplado a um gerador (T2) (comparativo de potência entre T1 e T2).....	64
Tabela 8 - Custo da poluição evitados com o uso do biodiesel (R\$ milhões por ano)	72
Tabela 9 - Percentual de biodiesel, densidade e poder calorífico inferior das misturas utilizadas	91
Tabela 10 - Maiores valores e diferença percentual da geração de potência máxima na TDP para todos os combustíveis.....	95
Tabela 11- Diferenças percentuais para potência máxima, torque máximo, consumo específico, eficiência e consumo energético do motor, comparando-se cada combustível com a testemunha (B5).....	106

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Estados produtores de carne de frango, quantidade de cabeças abatidas, peso total e peso médio de abate em 2009	44
Quadro 2 - Principais órgãos e normas nacionais e internacionais utilizadas nos ensaios de tratores agrícolas para avaliação de desempenho	55
Quadro 3 - Principais parâmetros a serem avaliados em um trator agrícola e descrição do sensor usualmente empregado	67
Quadro 4 - Especificações técnicas do motor que equipa o trator avaliado	75
Quadro 5 - Especificações técnicas do dinamômetro NL 480	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- 29°43' - ° graus ' minutos (usado para informar localização geográfica)
- ABEF - Associação Brasileira dos Produtores e Exportadores de Frangos
- ABIOVE - Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- Agrotec - Laboratório de Agrotecnologia (da UFSM)
- ANFAVEA - Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores
- ANP - Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
- apud - Expressão latina que significa “citado por”
- ASABE - American Society of Agricultural and Biological Engineers: Sociedade Norte-Americana de Engenheiros Agrícolas e Biológicos
- ASAE - American Society of Agricultural Engineers: Sociedade Norte-Americana de Engenheiros Agrícolas
- BEN - Balanço Energético Nacional
- blend - Termo em inglês que significa mistura
- CD - Combustível diesel
- CEI - Comissão Executiva Interministerial
- C_{EN} - Sigla adotada no texto para representar consumo energético ($MJ.h^{-1}$)
- CERBIO - Centro de Referência de Biocombustíveis
- Chv - Consumo horário volumétrico ($l.h^{-1}$). Sigla adotada no texto
- CLP - Controlador Lógico Programável
- CO - Monóxido de carbono
- CO₂ - Dióxido de carbono
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento
- CPU - Unidade de processamento central
- C_s - Consumo específico de combustível, ($g.kWh^{-1}$). Sigla adotada no texto
- CSC - Capacidade de sustentação de conjugado em % (usado por Mialhe, (1996) como sinônimo de reserva de torque)
- cSt - CentiStokes (unidade de viscosidade cinemática)
- cv - Cavalo vapor
- DIC - Delineamento inteiramente casualizado
- DM1 - Diesel metropolitano (usado por Cunha, 2009)
- DOU - Diário Oficial da União
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
- et al. - Et alii (em Latin quer dizer “e outros”)
- EUA - Estado Unidos da América
- $g.kWh^{-1}$ - Gramas por quilowatt por hora (unidade de consumo específico)
- GG - Grupo gestor
- GPS - Sistema de Posicionamento Global
- H - Reação solo pneu
- ha - Hectare
- HC - Hidrocarbonetos não queimados

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ISO - International Standardization Organization. Organização Internacional de Normalização
kcal.kg⁻¹ - Quilocalorias por quilograma (quantidade de energia por massa)
kcal.mol⁻¹ - Quilocalorias por mol (quantidade de energia por mol)
kg - Quilograma (unidade de massa)
kg.ℓ⁻¹ - Quilogramas por litro (Massa específica ou densidade)
kg.m⁻³ - Quilogramas por metro cúbico (Massa específica ou densidade)
kgf - Quilograma força (unidade de força)
kgfm - Quilograma de força por metro (unidade de torque)
kgm - Quilograma de força por metro (usado como unidade de torque no manual de instruções do dinamômetro MWD NL 480, 2010)
km.h⁻¹ - Quilômetros por hora (unidade de velocidade)
kN - Quilonewton (unidade de força)
KOH - Hidróxido de potássio (catalisador utilizado na fabricação de biodiesel)
kW - Quilowatt (Unidade de potência no SI)
ℓ.h⁻¹ - Litros por hora (consumo horário volumétrico)
LTDA - Limitada (Para empresas com sociedade limite ou sem sócios anônimos)
m.s⁻¹ - Metros por segundo (unidade de velocidade no SI)
M₁ - Torque na roda motriz.
m³ - Metro cúbico (unidade de volume)
MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MDA - Ministério de Desenvolvimento Agrário
MJ - Megajoule (unidade de energia no SI)
MJ.h⁻¹ - Megajoule por hora (consumo de energia)
MJ.kg⁻¹ - Megajoule por quilograma. Unidade de poder calorífico do combustível (quantidade de energia por unidade de massa)
mℓ - Mililitro (Unidade volume)
mm - Milímetro (unidade de medida no SI)
mm².s⁻¹ - Milímetros quadrados por segundo. Unidade de viscosidade cinemática, o mesmo que CST
MMA - Ministério de Meio Ambiente
MME - Ministério de Minas de Energia
mol - Quantidade de matéria ou concentração de substâncias (unidade no SI)
N - Newton (unidade de força no SI)
n - Rotação do motor. Sigla adotada no texto (rpm)
n₁ - Rotação da roda motriz. Sigla adotada no texto (rpm)
NaOH - Hidróxido de sódio (catalisador utilizado na fabricação de biodiesel)
NBR - Norma Brasileira
NC - Número de cetano
NEMA - Núcleo de Ensaios de Máquinas Agrícolas (da UFSM)
Nm - Newton por metro linear. (Unidade de momento ou torque no SI)

NO_x - Óxidos de Nitrogênio
O₂ - Oxigênio
°C - Graus Celsius (unidade de temperatura no SI)
OECD - Organisation for Economic Co-operation and Development: Organização para a
Cooperação e Desenvolvimento Econômico
OH - Hidróxido ou hidroxila
OVEG - Óleos vegetais
P - Potência. Sigla adotada no texto
P&D - Pesquisa e Desenvolvimento
PB - Paraíba
PCI - Poder calorífico inferior
PCS - Poder calorífico superior
P_m - Potência máxima. Sigla adotada no texto.
PNPB - Plano Nacional de Produção e Utilização de Biodiesel
PR - Paraná
PROÁLCOOL - Programa Nacional do Álcool
PRONAF - Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar
Pul - Pulsos gerados pelo fluxômetro. Sigla adotada no texto
Q - Força de tração
Q_{HV} - Poder calorífico do combustível (usado por Heywood, 1988)
R\$ - Símbolo que representa a moeda brasileira “Real”
rpm - Rotações por minuto (velocidade angular)
RS - Rio Grande do Sul
SFC - Specific Fuel Consumption – Consumo específico de combustível (usado por Heywood,
1988)
SI - Sistema Internacional
SINDICOM - Sindicato Nacional das Empresas Distribuidoras de Combustíveis e de
Lubrificantes
SP - São Paulo
T - Torque. Sigla adotada no texto
tc - Tempo de captação dos pulsos. Sigla adotada no texto
TDA - Tração dianteira auxiliar
TDP - Tomada direta de potência
TECPAR - Instituto de Tecnologia do Paraná
tep - Toneladas equivalente de petróleo
T_m - Torque Máximo. Sigla adotada no texto
T_n - Torque a potência máxima. Sigla adotada no texto
UBA - União Brasileira de Avicultura
UBABEF - União Brasileira de Avicultura (Fusão da UBA - União Brasileira de Avicultura,
com a ABEF - Associação Brasileira dos Produtores e Exportadores de Frangos)
UE - Unidades experimentais

UE27 - União Européia, composta por 27 países
UFCG – Universidade Federal de Campina Grande
UFSM - Universidade Federal de Santa Maria
UNE - Norma espanhola
UNESP - Universidade Estadual Paulista
USP - Universidade de São Paulo
 V_t - Velocidade teórica. Sigla adotada no texto

LISTA DE SÍMBOLOS

Δ - Letra grega Delta: variação

ΔT - Reserva de torque (%). Símbolo adotado no texto

η - Letra grega Eta: eficiência do motor (%). Símbolo adotado no texto

η_f - Eficiência térmica do motor (%), usado por Heywood (1988)

π - Letra grega Pi: diâmetro dividido pelo comprimento da circunferência, equivalente a 3,1415926

ρ - Letra grega Rô: massa específica ou densidade

ρ_{B100} - Densidade medida do B100 ($\text{kg} \cdot \ell^{-1}$). Símbolo adotado no texto

ρ_{B5} - Densidade medida do B5 ($\text{kg} \cdot \ell^{-1}$). Símbolo adotado no texto

LISTA DE APÊNDICES

Apêndice A - Quadro de dados obtido do registrador de dados após exportados para o Microsoft Excel® onde se obteve o consumo de combustível.....	123
Apêndice B - Registrador de dados modelo CR 1000 com conexões ligadas aos sensores e o computador	124
Apêndice C - Gráfico de potência e torque gerado pelo software AccuDyno durante os ensaios no dinamômetro	125
Apêndice D - Potência desenvolvida na TDP entre 1200 e 2100 rpm, para todos os combustíveis	126
Apêndice E - Torque desenvolvido na TDP entre 1200 e 2100 rpm para todos os combustíveis	126
Apêndice F - Consumo horário volumétrico dos combustíveis por faixa de rotação.....	127
Apêndice G - Consumo horário volumétrico e específico dos combustíveis para todas as faixas de rotação	127
Apêndice H - Eficiência do motor com todos os combustíveis em todas as faixas de rotação	128
Apêndice I - Consumo energético do motor com todos os combustíveis para todas as faixas de rotação.....	128

LISTA DE ANEXOS

Anexo A - Especificações exigidas pela Resolução ANP N° 7, de 19/03/2008 - DOU 20/03/2008, que determina a qualidade do biodiesel comercializado no Brasil	129
Anexo B - Portfólio do óleo de aves disponibilizado pela indústria fornecedora da matéria-prima utilizada para produção do biodiesel	131
Anexo C - Vista do rotor no interior da carcaça do dinamômetro	132
Anexo D - Curvas de torque e potência do dinamômetro NL 480, como indicativo das limitações do equipamento	132
Anexo E - Detalhes dimensionais do medidor de fluxo utilizado	133
Anexo F - Desenho e dimensões do tanque auxiliar utilizado para armazenamento e substituição das misturas durante os ensaios	133

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	9
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE QUADROS	12
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	13
LISTA DE SÍMBOLOS.....	17
LISTA DE APÊNDICES.....	18
LISTA DE ANEXOS	19
1 INTRODUÇÃO.....	22
1.1 Objetivo Geral	25
2.1 Objetivos específicos	25
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1 Fontes energéticas e Agroenergia	26
2.2 Biodiesel	30
2.2.1 Matérias-primas para produção de biodiesel	34
2.2.2 Processo de transesterificação	36
2.2.3 Características físico-químicas do biodiesel	39
2.3 Produção de aves e o óleo de frango.....	42
2.4 Tratores agrícolas.....	48
2.5 Ensaio para desempenho de tratores agrícolas	52
2.5.1 Normas e Definições	54
2.5.2 O uso de dinamometria	56
2.5.3 Consumo de combustível	60
2.5.4 Desempenho de motores diesel	61
2.5.5 Instrumentação para aquisição de dados	65
2.6 Emissões residuais dos gases de exaustão	70
3 MATERIAL E MÉTODOS	73
3.1 Local do experimento.....	73
3.2 Combustíveis e misturas utilizadas.....	74
3.3 Trator e motor de testes.....	75
3.4 Bancada dinamométrica	76
3.5 Instrumentação utilizada	80
3.6 Tanques auxiliares de combustíveis	81
3.7 Analisador de gases.....	83
3.8 Delineamento experimental (tratamentos)	85
3.9 Dados obtidos	85

3.10	Procedimentos de cálculo para variáveis calculadas	89
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	91
4.1	Potência	93
4.2	Torque e reserva de torque	96
4.3	Consumo de combustível	99
4.4	Eficiência do motor	102
4.5	Consumo energético.....	103
4.6	Diferenças percentuais	106
4.7	Emissões	106
5	CONCLUSÕES	112
6	RECOMENDAÇÕES	114
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115
	APÊNDICES E ANEXOS	123

1 INTRODUÇÃO

O consumo mundial de energia é altamente dependente dos derivados de petróleo, seja para aplicação aérea, marítima ou terrestre. Essa dependência está fomentando a crescente busca por novas fontes de energia e o favorecimento da inserção de matérias-primas renováveis para a produção de biocombustíveis, incentivando maiores estudos para o desenvolvimento de novas tecnologias no setor agrícola, especialmente em países com larga produção vegetal e animal.

A necessidade de sucedâneos para os combustíveis fósseis é acentuada à medida que a oferta dos mesmos vem reduzindo, tendo em vista que essa é uma fonte finita, e por aspectos ambientais que devem ser considerados na cadeia produtiva de energia. Desta forma, há um alto interesse da sociedade pelas fontes renováveis de energia, e o Brasil está entre os países com maior potencialidade de produzi-las. O país já domina a tecnologia do etanol, um dos biocombustíveis mais utilizados no mundo, e está em escala ascendente de produção e domínio de tecnologia para a inserção do biodiesel na matriz energética nacional.

A energia fornecida na forma de combustíveis líquidos ou gasosos é largamente aplicada aos motores de combustão interna, responsáveis pela propulsão das diversas máquinas utilizadas no setor de transporte, agropecuário, geração de energia elétrica e demais setores que demandam destes. Predominantemente existem dois tipos de motores de combustão interna, sendo um denominado de motor de ciclo Otto e outro de ciclo Diesel. No primeiro utiliza-se como combustível convencional a gasolina ou o gás natural veicular (GNV), ou o biocombustível etanol, derivado de fontes renováveis. Para os motores de ciclo diesel, onde o princípio de funcionamento é diferenciado e a movimentação é gerada pela energia resultante da auto-ignição do combustível no momento de sua injeção na câmara de combustão, o combustível mais largamente utilizado é o óleo diesel, retirado na fase intermediária da destilação do petróleo, ou um biocombustível alternativo denominado de biodiesel, derivado de óleos e gorduras, vegetais ou animais, convertido a partir de processos químicos, apresentando grande similaridade com o diesel de petróleo.

O uso de derivados vegetais ou animais para produção, e conseqüente uso de biocombustíveis alternativos, já é realidade na indústria nacional, com grandes volumes de produção e utilização. O uso destes derivados é destacado pela ampla produção agrícola e agroindustrial, onde se percebe o uso diversificado de matérias-primas para produção de

biodiesel, porém com muitos aspectos químicos, biológicos, econômicos, sociais, ambientais e também energéticos que devem ser cada vez mais investigados, avaliados e desenvolvidos para o uso racional da energia em todos os setores de atividades.

As tecnologias voltadas à produção de biodiesel estão adiantadas no que diz respeito ao domínio do processo, principalmente por empresas multinacionais instaladas no país. No entanto, na questão de utilização em motores, ainda há uma forte necessidade de realização de pesquisas com intuito de efetivar soluções para obtenção de melhores resultados para desempenho dos mesmos.

Segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2010), em 2009 as vendas internas dos derivados combustíveis de petróleo foi de 92.331.906 m³, sendo que destes, 44.298.463 m³ foram óleo diesel. Esse volume é resultado da produção interna, mais 7,9% de origem externa (3.515.042 m³). Para entender melhor o que significam esses números, isso representa um dispêndio de mais de 1,5 bilhão de dólares ocasionados pela importação de óleo diesel, e que pode ser substituído por biocombustíveis homologados, como o biodiesel de soja, sebo bovino, girassol e também de óleo de frango, alvo de estudo neste trabalho.

O setor agropecuário é responsável pelo consumo de cerca de 15% de todo combustível diesel consumido internamente (BEN, 2009), o que gera uma movimentação de mais de 13 bilhões de reais. Dentro do setor agropecuário encontra-se uma frota de quase 800 mil tratores agrícolas, os quais são os principais precursores do desenvolvimento da mecanização agrícola e da redução do trabalho braçal no meio rural. Em sua concepção mais simples são constituídos de chassi, motor, transmissão, sistema direcional e elementos auxiliares. Na atualidade, 100% destas máquinas são comercializadas com motores a diesel, e o uso de biocombustíveis nestes, é fator relevante para o desenvolvimento tecnológico de novos motores e a manutenção da eficiência tratorial.

Pensando na diversificação da matriz energética global, devem-se considerar as potencialidades de cada país, a constituição de sua matriz energética, e as potencialidades de cada região e micro-região que o constitui. No Brasil, país com dimensões continentais, a disponibilização de opções que podem ser empregadas para produção de biodiesel, são variadas, tanto de origem vegetal quanto animal.

O Brasil é o terceiro maior produtor de carne de frango do mundo, sendo que em 2009 Segundo a União Brasileira de Avicultura (UBA, 2009), foram abatidos quase 4,8 bilhões de cabeças de frango, com 60% deste total concentrado na região Sul. De acordo com estudos

realizados por Gomes (2005); Gomes et al.(2008); Souza et al. (2006), cada ave abatida, tem potencial para produzir em média 67,80 g de óleo, o qual é extraído de carcaças, vísceras e restos resultantes do abate. Na teoria, extrapolando-se o cálculo, pode-se ter uma quantidade superior a 320 mil toneladas de óleo extraídas anualmente no Brasil.

O emprego do óleo resultante para produção de biodiesel pode diversificar as opções de matérias-primas no país, colocando em destaque a oferta desta matéria-prima e o uso difundido de biocombustíveis diesel na agricultura moderna e mecanizada, principalmente na região Sul. Ligado a oferta deste material, percebe-se que há a necessidade de pesquisas voltadas a utilização deste biocombustível em tratores agrícolas, onde deve ser verificado, consumo, desempenho, e o comportamento geral desta máquina quando utilizar o biodiesel de frango puro, ou mesclado com óleo diesel.

Outros aspectos importantes são os fatores ambientais, primordiais no desenvolvimento de novos combustíveis, especialmente aqueles empregados em motores de combustão interna. Os níveis de emissões residuais resultantes da combustão, monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrogênio (NOx) e hidrocarbonetos não queimados (HC), entre outros, devem ser reduzidos a cada novo projeto de motor colocado no mercado. Entretanto, para os milhares que estão em operação no mercado, incluindo-se os de longa data, o emprego dos biocombustíveis nestes, auxilia na redução dos gases prejudiciais ao meio ambiente.

Considerando-se a importância e a representatividade que os tratores agrícolas detêm junto ao setor agropecuário nacional e mundial, ressaltado pelas inúmeras funções que são capazes de realizar, e atrelado à necessidade de racionalização do uso de energia pelas máquinas motoras, e aplicação de novas alternativas de energia, este trabalho teve por objetivo ensaiar e avaliar um trator agrícola de 53 kW (72 cv), em bancada dinamométrica, operando com biodiesel de óleo de frango e misturas binárias com óleo diesel comercial B5. Pretendeu-se avaliar o consumo, potência, torque, eficiência térmica, consumo energético e emissões residuais dos gases gerados na combustão.

1.1 Objetivo Geral

Avaliar desempenho e emissões residuais de combustão de um motor de trator agrícola com 53 kW, acoplado pela TDP a um dinamômetro de correntes parasitas, utilizando biodiesel de óleo de frango puro (B100), óleo diesel comercial B5 (testemunha), e misturas binárias entre ambos, nas proporções de 20, 40, 60 e 80%, totalizando seis distintos combustíveis.

2.1 Objetivos específicos

- Avaliar o consumo horário ($\ell.h^{-1}$);
- Avaliar o consumo específico ($g.kWh^{-1}$);
- Avaliar a potência do motor na TDP (kW);
- Avaliar o torque do motor na TDP (Nm);
- Calcular e avaliar a reserva de torque (%);
- Calcular e avaliar o consumo energético ($MJ.h^{-1}$);
- Calcular e avaliar a eficiência do motor (%);
- Comparar o desempenho do motor com os diferentes combustíveis e com óleo diesel de petróleo.
- Avaliar as emissões residuais dos gases de exaustão, sendo: CO (% de volume) CO₂ (% de volume), O₂ (% de volume) e HC (ppm).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fontes energéticas e Agroenergia

De toda energia consumida no Brasil, 32% é originária da biomassa, valor este que é impulsionado pelos avançados programas de produção de etanol de cana-de-açúcar e as grandes áreas destinadas à produção de florestas energéticas. A hidroeletricidade também é destaque dentro da matriz, sendo responsável por 15,2% de toda energia utilizada (Figura 1). Ambas somadas representam o total da energia oriunda de fontes renováveis (47,2%), valor muito significativo se comparado com a média de 12,7% da matriz energética global, verificado na Figura 2 (10,5% biomassa mais 2,2% de hidroeletricidade), e 9,3% acima do consumo energético oriundo do petróleo na própria matriz energética brasileira.

Essas informações correspondem ao ano base 2008, e foram obtidas do Ministério de Minas de Energia (MME, 2009), que informou ainda, que toda a energia produzida no Brasil é equivalente a 243,7 milhões de toneladas equivalente de petróleo (tep), ou 2% de todo consumo do planeta.

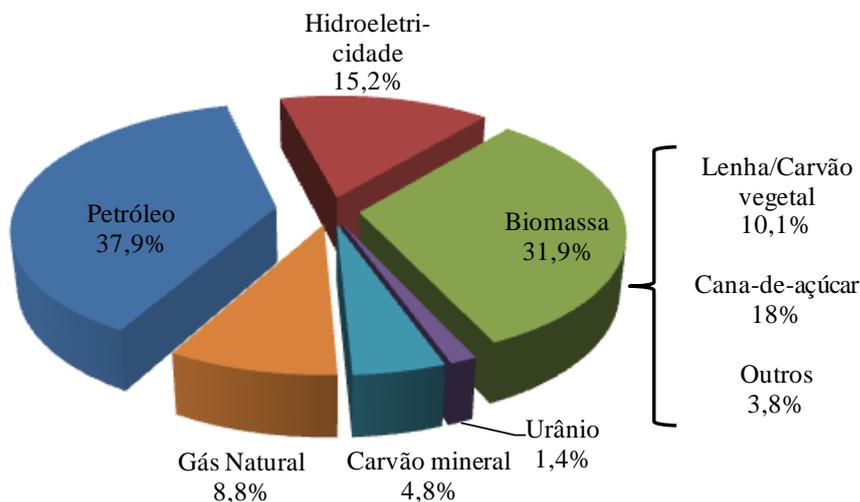


Figura 1 - Matriz energética brasileira
Fonte: MME (2009).

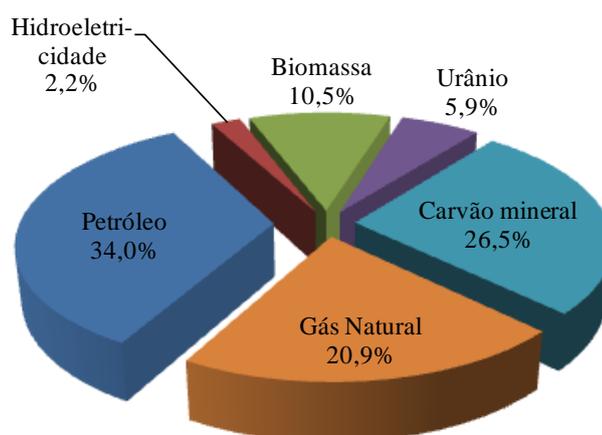


Figura 2 - Matriz energética mundial

Fonte: MME (2009).

Como verificado na matriz energética, o petróleo é a principal fonte de energia no planeta, e também muito importante na matriz brasileira, principalmente no que diz respeito à produção de óleo diesel. Essa importância se deve ao desenvolvimento de motores de combustão interna ao longo do último século, baseado predominantemente nos combustíveis derivados de petróleo, especialmente em países com alto potencial petrolífero e industrial.

De todo petróleo utilizado no Brasil, cerca de 45% é consumido na forma de óleo diesel. Ressalta-se que no período de 2000 a 2009, houve um aumento do consumo interno de óleo diesel de 33,18%, e uma estimativa de crescer mais de 8,5% em 2010. Com relação a produção interna de óleo diesel, do ano de 2000 a 2009 houve aumento expressivo (37,9%). Para o referido período essa diferença significou 7,5% abaixo do total consumido internamente, implicando na necessidade de importação de óleo diesel, acarretando um dispêndio de mais de 22,5 bilhões de Dólares. O custo com a importação de óleo diesel para o ano de 2009 foi de U\$S 476,00 o m³, e em 2010 nos primeiros 9 meses foi de U\$S 567,00 por m³ (ANP, 2010). A Figura 3 apresenta o balanço do petróleo e óleo diesel no Brasil.

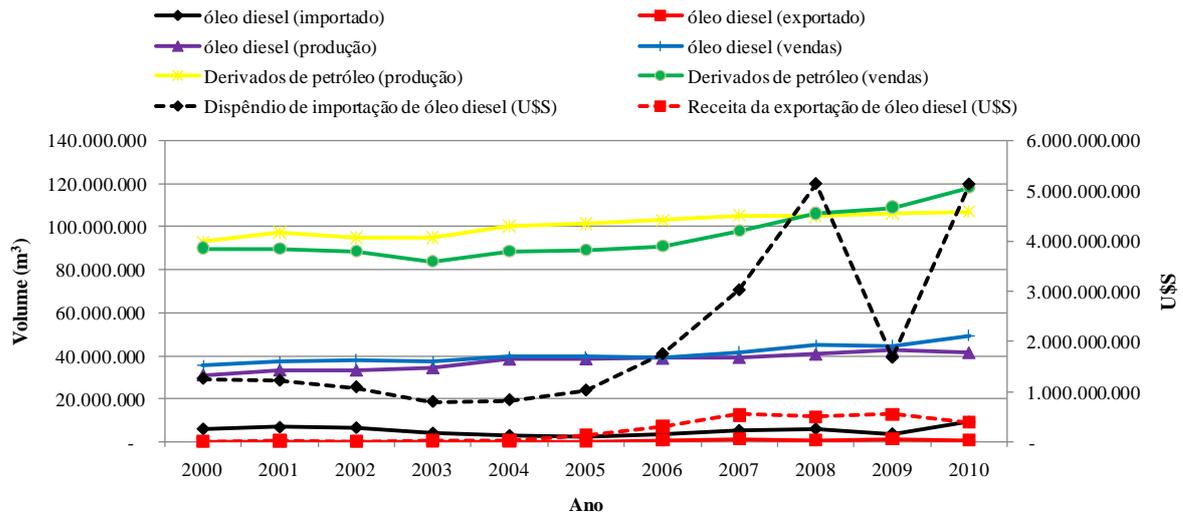


Figura 3 - Balanço de produção e vendas, para todos os derivados de petróleo e óleo diesel, volume e custo de importação e exportação de óleo diesel, do ano de 2000 a 2010
Fonte: ANP (2011).

Fazendo-se uma análise separadamente sobre a comercialização de óleo diesel no Brasil, verifica-se um aumento de 38,18% no consumo do ano de 2000 para 2010. A Figura 4 mostra a tendência do crescimento do consumo ao longo da última década. Projetando-se essa tendência, em 2020 serão necessário 67.115.384 m³ e em 2050, 122.748.587 m³. Os dados foram calculados a partir dos números informados pela ANP (2010).

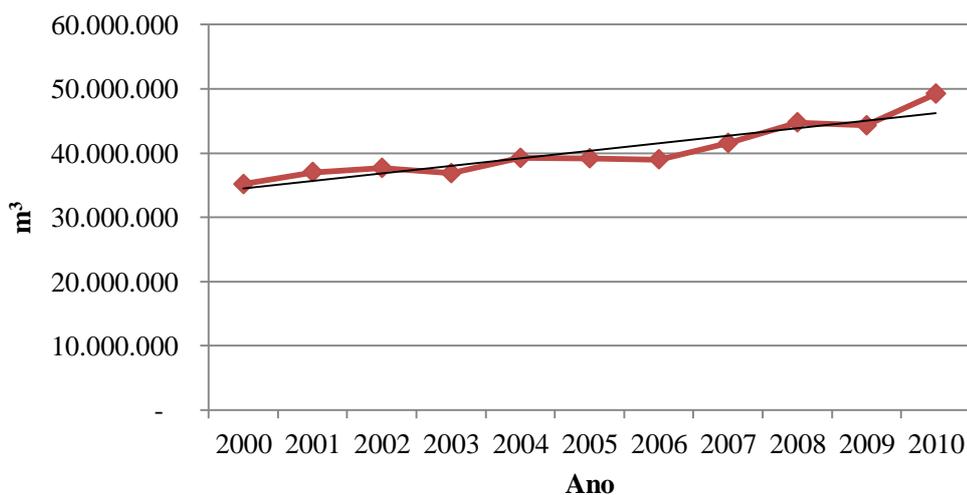


Figura 4 - Vendas internas de óleo diesel do ano de 2000 a 2010
Fonte: ANP (2011).

Segundo os dados do Balanço Energético Nacional (BEN, 2009) do MME, em 2008 o setor de transportes, maior consumidor de óleo diesel, absorveu 75% de todo petrodiesel consumido no país. O setor agropecuário foi responsável pelo consumo de 15%, posicionado em segundo lugar conforme a Figura 5.

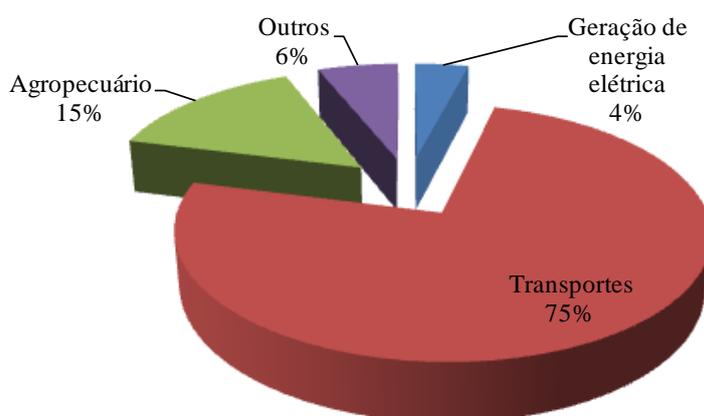


Figura 5 - Distribuição percentual do consumo interno de óleo diesel por setor
Fonte: BEN (2009).

Ao considerar fontes não petrolíferas, um dos principais casos de sucesso com o uso de biomassa foi o PROÁLCOOL, lançado no Brasil em 1975 com o objetivo de diminuir a dependência do petróleo importado pelo país. Atualmente, a cana-de-açúcar e seus derivados, constituem-se na segunda principal fonte de energia primária da matriz energética nacional, e o consumo de etanol já é superior ao da gasolina, colocando o Brasil em status referencial nessa área (MAPA, 2009).

Além do etanol, o Brasil também desenvolve outra importante iniciativa para expandir a produção de biocombustíveis, o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB). Este biocombustível se encontra em estágio de intensa pesquisa e desenvolvimento, e já conta com participação relevante na matriz de combustíveis, em mistura obrigatória ao diesel mineral em todo o país (MAPA, 2009).

2.2 Biodiesel

A ANP ao tratar do tema na Resolução ANP N° 42 de 2004, define o biodiesel como um combustível composto por álquil ésteres de ácidos graxos para motores a combustão interna com ignição por compressão, renovável e biodegradável, derivado de óleos vegetais ou de gorduras animais, que possa substituir parcial ou totalmente o óleo diesel de origem fóssil, e estabelece parâmetros de qualidade para os combustíveis a serem produzidos e comercializados no Brasil. O biodiesel apresenta características similares ao diesel de petróleo em praticamente todas as propriedades.

Segundo Parente (2003), denomina-se biodiesel ao combustível renovável e biodegradável, constituído de uma mistura de ésteres metílicos ou etílicos de ácidos graxos, obtidos a partir da reação química de transesterificação de qualquer triglicerídeo com um álcool de cadeia curta, normalmente o metanol ou o etanol.

O Brasil tem todas as condições para se tornar um grande produtor de biodiesel, pois o país tem um potencial incomparável para produção de biomassa para fins energéticos onde para o biodiesel tem-se mamona, o dendê, a soja, caroço de algodão, pinhão manso, canola, girassol entre outras, que também podem ser abundantes fontes de energia e de inclusão social (LIMA, 2004). Pode-se citar também, várias opções de origem animal, como o sebo bovino, a gordura suína, óleo de peixe e de frango além dos resíduos de abatedouros e frigoríficos.

O constante avanço do consumo de combustíveis fósseis, aliado à necessidade de sucedâneos ao óleo diesel, coloca o processo agroindustrial em destaque, pois tal processo químico de obtenção do biodiesel articula a necessidade de refino das matérias-primas adotadas em detrimento à retirada da glicerina, e similaridade as propriedades físico-químicas do óleo diesel (ABREU et al., 2004).

O biodiesel está ligado a processos menos impactantes, ecologicamente falando, e de certa forma mais simplificados, podendo ser empregados em diversos meios e escalas de produção, ainda tendo variadas fontes de matérias-primas, sendo os ácidos graxos de óleos e gorduras utilizados como matéria principal para a sua produção. Segundo o Sindicato Nacional das Empresas Distribuidoras de Combustíveis e de Lubrificantes (SINDICOM, 2008), o biodiesel está fortemente vinculado ao setor agropecuário, onde além de ser o grande fornecedor de matérias-primas para produção de oleaginosas e derivados animais, consome cerca de 15% dos combustíveis diesel (CD) de todo o Brasil.

Os marcos do desenvolvimento de biocombustíveis no Brasil, seguem uma ordem cronológica onde estão inseridos o programa PROÁLCOOL e as experiências de outros países na produção de biodiesel (PNPB, 2004):

- 1960/70: Registros de estudos sobre produção de biodiesel no mundo;
- 1970/80: Lançamento do PROÁLCOOL no Brasil;
- 1980: Depositada a 1ª Patente de Biodiesel no Brasil – Dr. Expedito Parente;
- 1988: Início da produção de biodiesel, Áustria e França;
- 1997: EUA - Congresso aprova biodiesel como combustível alternativo;
- 1998: Setores de P&D no Brasil retomam os projetos para uso do Biodiesel;
- 2002: Alemanha ultrapassa a marca de 1 milhão de ton./ano de produção de biodiesel;
- 2003: DECRETO do Governo Federal Institui a Comissão Executiva Interministerial; (CEI) e o Grupo Gestor (GG), encarregados da implantação das ações para produção e uso de biodiesel;
- 2004: Lançamento do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel – PNPB e instituindo o Marco Regulatório e metas físicas;
- 2005: Lei 11.097 – estabelece percentuais mínimos de misturas.

A busca por alternativas, bem como o avanço na produção de biodiesel, estão focados em uma menor dependência do petróleo, incentivo à agricultura e redução na emissão de gases poluentes, principais preceitos da lei número 11.097 de 2005 que estabelece os percentuais mínimos da mistura de biodiesel ao diesel, considerando a inserção gradativa deste biocombustível no país. A estimativa era alcançar a produção de 2,6 milhões de m³, suficientes para sustentar uma mistura com 5% de biodiesel (B5) a partir do ano de 2013, conforme ilustra a Figura 6.



Figura 6 - Predispostos da Lei 11.097/2005 para o abastecimento interno de biodiesel

O Brasil vem desde 2005, produzindo em escala comercial, ano em que foram produzidos apenas 736 m³ deste biocombustível. No ano de 2010, a produção superou 2,3 milhões de m³ (Figura 7).

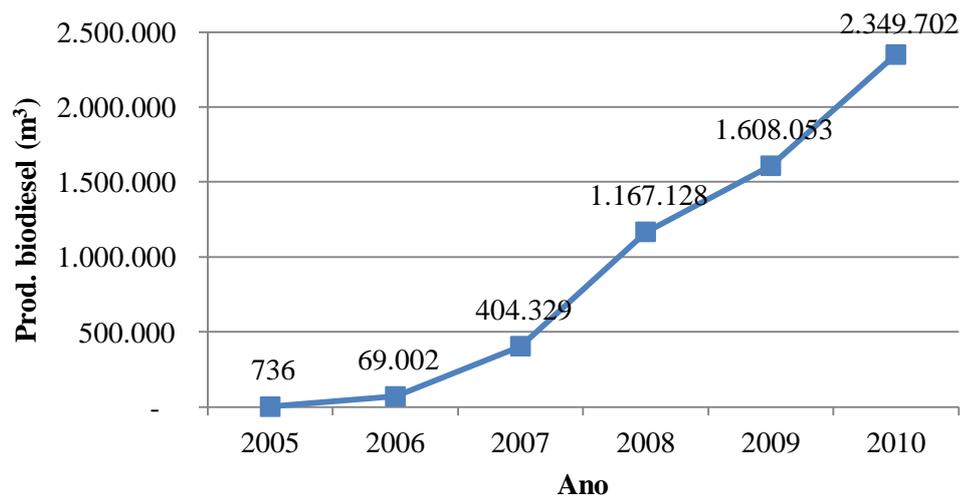


Figura 7 - Produção de biodiesel no Brasil de 2005 a 2010
Fonte: ANP (2011).

O aumento da produção foi gerado pelo PNPB, alavancado pela obrigatoriedade da adição de biodiesel no óleo diesel, que atualmente representa 5% de biodiesel na mistura (B5), e está com três anos de adiantamento (Figura 8).



Figura 8 - Seqüência cronológica dos percentuais de biodiesel adicionado ao diesel
Fonte: ANP (2010).

Em escala global, a União Européia é responsável por cerca de 80% da produção mundial de biodiesel, onde mais de vinte países são produtores com base na colza e sua “co-irmã” melhorada, a canola (PRATES et al., 2007). Nos países Europeus há incentivos fiscais aos produtores e a competitividade é garantida pela alta tributação dos combustíveis de petróleo. A Alemanha é o maior produtor e consumidor de biodiesel no mundo sendo que em 2007 foi responsável por cerca de 40% da produção mundial, em uma capacidade de produção de mais de 1,7 bilhões de litros ano⁻¹ (já superado pelo Brasil). Além da Alemanha, os países França, Itália, Espanha e Reino Unido são os principais países Europeus que já possuem produção de biodiesel em escala avançada (PENTEADO et al., 2007). Do início da produção em 1992 até 2005, tem se registros de grande avanço na produção de biodiesel na Europa, possível de entender ao se verificar os números registrados e incorporados de forma representativa na Figura 9.

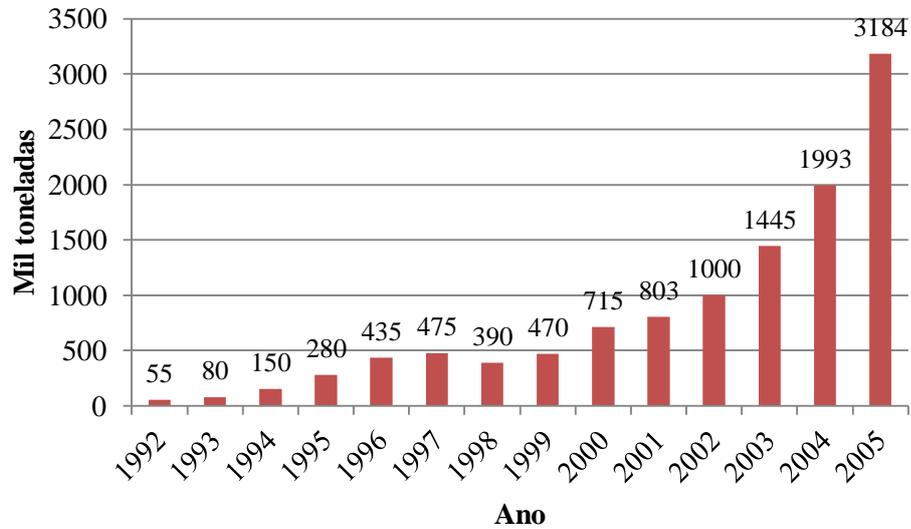


Figura 9 - Produção de biodiesel nos países Europeus de 1992 a 2005
Fonte: Nietiedt (2010).

Nos Estados Unidos da América, o avanço no desenvolvimento de trabalhos acerca desta área foi bastante rápido, e contínua a avançar, embora o começo de programas para produção de biodiesel tenham iniciado mais tarde. Em 2005, 35 usinas estavam em atividade no país, sendo que atualmente esse número já supera 100 unidades. A capacidade de produção estimada em 2007 era de até 1,5 bilhões de litros por ano, para uma demanda em torno de 600 milhões de litros. As principais matérias-primas utilizadas no Programa Americano de Biodiesel, provém da soja, seguida do girassol e canola (PRATES et al., 2007).

2.2.1 Matérias-primas para produção de biodiesel

Talvez uma das maiores vantagens do biodiesel seja o fato de que o fornecimento de matérias-primas é estritamente baseada em fontes renováveis, as quais são denominadas por NELSON & COX (2002) como ésteres de ácidos graxos e glicerol (triacilgliceróis), comumente conhecido como óleos ou gorduras. Separadamente os ácidos graxos são classificados em ácidos insaturados e saturados, em que para o primeiro pertencem apenas

óleos e gorduras vegetais. Já as gorduras animais são constituídas por ácidos graxos saturados em quantidades que podem chegar até 40% (BOBBIO & BOBBIO, 2003).

Em complemento as informações já citadas, Moretto & Fett (1998), definem que os óleos e gorduras, são substâncias insolúveis em água, formados predominantemente de produtos da condensação entre glicerol e os ditos ácidos graxos, e desta forma, são chamados de triglicerídeos ou triacilgliceróis.

No Brasil as principais matérias-primas, provém da soja, do sebo bovino, do caroço de algodão e de algumas palmáceas do Norte e Nordeste do país. A mamona e o girassol também fazem parte, porém com uma quantidade pouco significativa no momento.

O Plano Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB, 2004), inicialmente congregava um leque de seis alternativas de oleaginosas em todo o país, separados de acordo com o potencial de cada região, indicado na Figura 10. Sabe-se, no entanto, que algumas destas, ainda possuem pouco impacto, e que gorduras e óleos animais fazem parte do quadro produtivo, sendo o sebo bovino a 2ª matéria-prima mais utilizada, atrás apenas do óleo de soja.



Figura 10 - Principais oleaginosas para produção de biodiesel por região do Brasil
Fonte: PNPB (2004).

A soja, única oleaginosa de grande disponibilidade no Brasil, oferece apenas 20% de óleo ao ser processada (OSAVA, 2006). Contudo, as fontes para biodiesel podem ser diversificadas e tornar rentável a pequena agricultura em muitas regiões, promovendo desenvolvimento e inclusão social. O Brasil pode inclusive, converter-se em um grande exportador de combustíveis renováveis.

De acordo com o IBGE (2010), no ano de 2010, o Brasil produziu 68 milhões de toneladas de soja, e segundo a CONAB (2011), a estimativa para o ano de 2011 é superar 70 milhões de toneladas.

2.2.2 Processo de transesterificação

Hoje o processo químico mais utilizado nas reações, é denominado de transesterificação, e apenas ele leva a produtos comumente denominados biodiesel, isto é, ésteres alquílicos de óleos e gorduras. A transesterificação consiste em transformar um éster em um novo éster. Pela ação de um catalisador (hidróxido de sódio, NaOH, ou hidróxido de potássio, KOH) e um álcool, usualmente metanol ou etanol anidro, converte os triglicerídeos de alta viscosidade em monoglicerídeos de baixa viscosidade, extraindo assim a glicerina que é um subproduto do processo (KNOTHE et al., 2006). A Figura 11 mostra as principais entradas e saídas do processo de transesterificação.

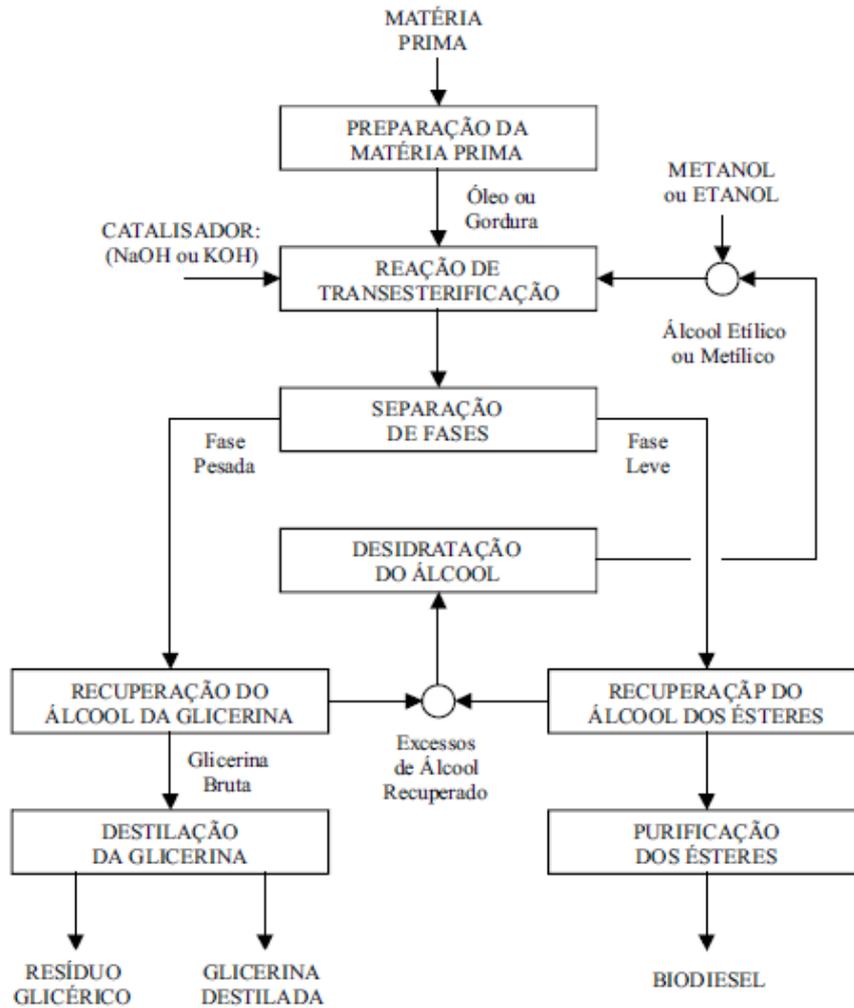


Figura 11 - Fluxograma do Processo de Produção de Biodiesel via transesterificação
 Fonte: Parente, 2003.

A Figura 12 esquematiza quimicamente como o processo de transesterificação ocorre, e a Figura 13 ilustra a quebra de moléculas junto aos triglicerídeos pela ação química ocasionada no processo reativo com a presença de catalisador e álcool.

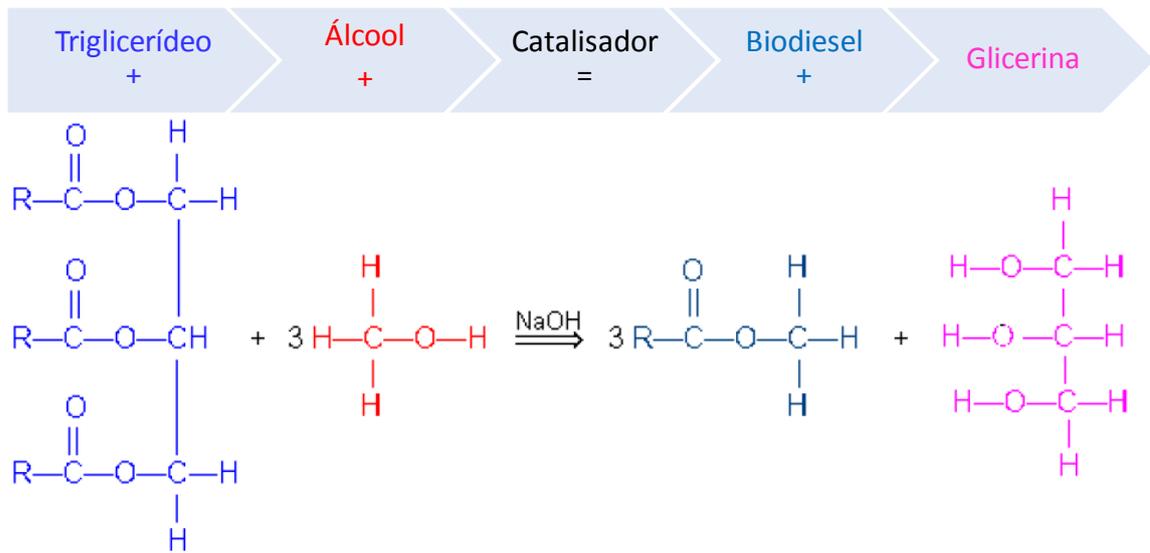


Figura 12 - Esquema da reação química da transesterificação

A necessidade de interferir na estrutura do óleo ou gordura, se deve ao fato de que originalmente não são combustíveis adequados para os motores de combustão interna, muito embora o princípio de funcionamento dos motores diesel permita que óleos em condições líquidas, principalmente os vegetais, possam entrar em combustão e realizar trabalho, porém, com um tempo de durabilidade abruptamente menor que originalmente registrado com os CD adequados.

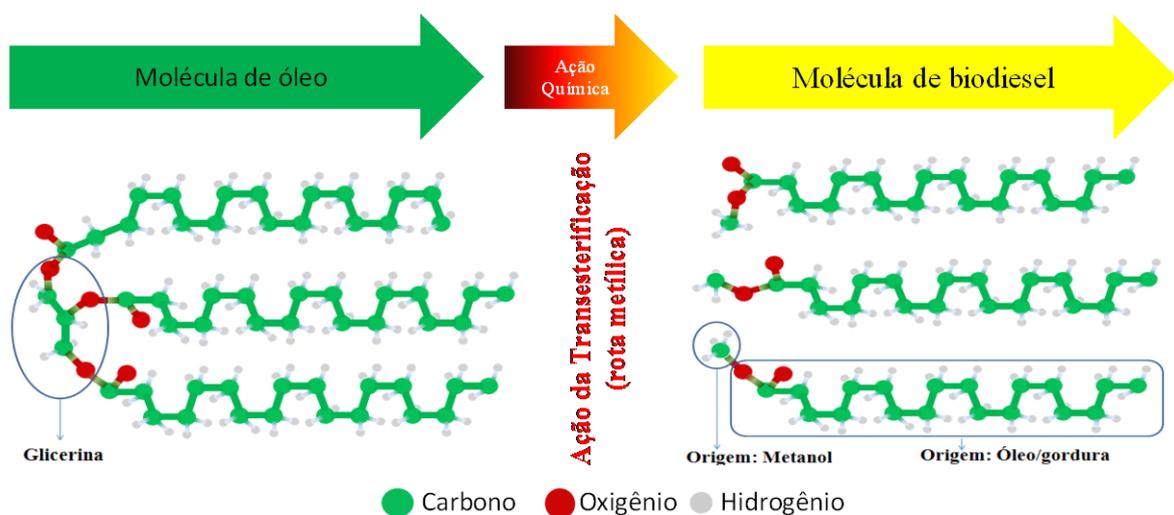


Figura 13 - Esquema da molécula triglicéridica convertida em monoglicérides

Os danos provocados ao se utilizar óleos *in natura*, são expressos em diversas ordens, interferindo desde o desempenho do motor até avarias mecânicas graves, resultantes principalmente do acúmulo interno de matéria carbonizada, originárias da queima ineficiente do óleo, e da glicerina presente nas moléculas. Imagens divulgada por Silva (2006) e Maziero et al. (2007), mostram os efeitos negativos (Figura 14).

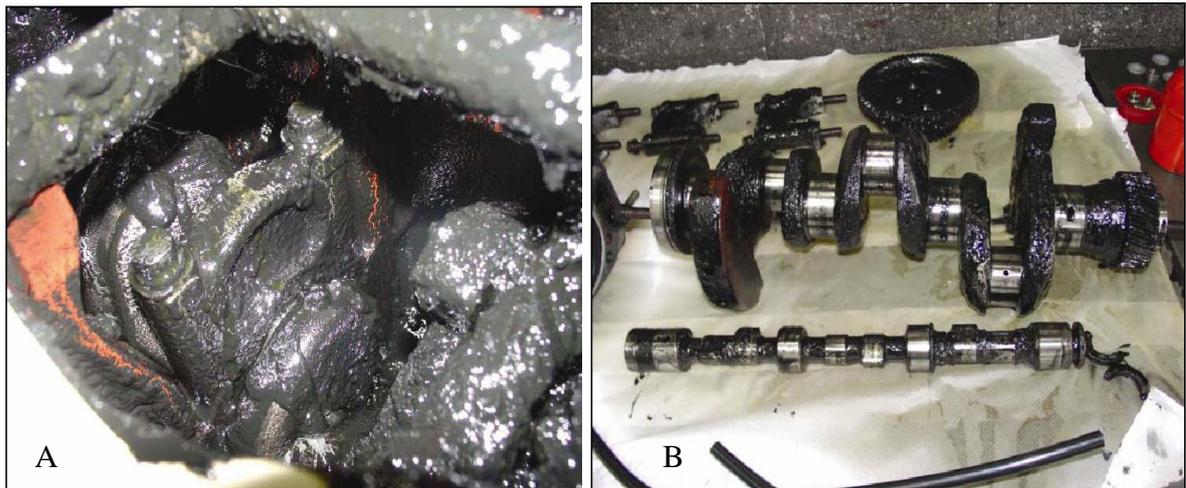


Figura 14 - Efeito do uso de óleos vegetais não transesterificados em um motor diesel: (A) vista inferior ou pelo cárter do motor, (B) virabrequim
Fonte: Maziero et al. (2007).

2.2.3 Características físico-químicas do biodiesel

O aspecto qualitativo é diretamente avaliado através das características físico-químicas dos combustíveis, pois expressa as condições em nível extra e intra-molecular. Não se pode aplicar o preceito que mensura a qualidade do combustível, se não houver normas para padronização dos valores máximos e mínimos. O Anexo A mostra de forma resumida, quais são as características, unidades, limites e os métodos adotados para realização de análises físico-químicas do biodiesel.

No contexto de utilização do biodiesel, uma escala denominada número de cetano (NC), conceitualmente similar a escala de octanagem utilizada para a gasolina, foi estabelecida para descrever a qualidade de ignição do petrodiesel e seus componentes, e desta

forma a escala de cetano esclarece o porquê de triacilgliceróis, como encontrados em óleos vegetais, gordura animal e seus derivados, serem alternativas adequadas para CD onde o segredo está na cadeia longa, linear e não ramificada dos ácidos graxos, que é quimicamente similar às existentes em *n*-alcanos de CD convencionais de boa qualidade (KNOTHE et al., 2006).

2.2.3.1 Densidade e Poder calorífico do combustível

Para Bosch (2005) existe uma correspondência razoavelmente constante entre o poder calorífico (ou calor de combustão) de um combustível e sua densidade. Combustíveis com densidade mais elevada apresentam um poder calorífico mais alto. Se os volumes de injeção são constantes, o uso de combustíveis com densidades diferentes em um dado sistema injetor, provoca variações nos coeficientes de mistura, derivando em flutuações do poder calorífico.

A densidade e a viscosidade do óleo, exercem grande influência na circulação e injeção do combustível. As propriedades fluidodinâmicas do biodiesel, independentemente de sua origem, assemelham-se as do óleo diesel. A norma exige uma massa específica de 850 a 900 kg.m⁻³.

Além do número de cetano (NC), o poder calorífico ou calor de combustão, é uma propriedade que demonstra a adequação dos vários tipos de compostos graxos para o uso como CD. O poder calorífico contido em óleos vegetais e seus respectivos ésteres alquílicos, corresponde a aproximadamente 90% daquele observado em alguns CD. O poder calorífico de ésteres graxos e triacilgliceróis estão na faixa de 5,439 a 14,644 MJ. mol⁻¹ (1300 a 3500 kcal. mol⁻¹) para ácidos graxos e ésteres de C₈ a C₂₂ (8 a 22 carbonos), sendo que o calor de combustão aumenta com o comprimento da cadeia (KNOTHE et al., 2006).

Normalmente, a determinação do poder calorífico é feita através do método da bomba calorimétrica e o resultado obtido é o poder calorífico superior. Neste método, certa quantidade de combustível é queimada em um sistema fechado, não havendo perda de calor na mudança de fase (ARONI, 2005).

O poder calorífico divide-se em superior (PCS) e inferior (PCI). O PCS é aquele em que a combustão se efetua a volume constante e considera o calor derivado da condensação da água. O poder calorífico inferior (PCI) é a energia efetivamente disponível por unidade de

massa de combustível após deduzir as perdas com a evaporação da água (JARA, 1989). Na Tabela 1 encontram-se informações sobre densidade e o PCS de diferentes biomassas.

Tabela 1 - Poder calorífico superior e densidades de diferentes biomassas

Biomassa	Densidade (kg. ℓ^{-1})	Poder calorífico superior (expresso em kcal)	Poder calorífico superior (expresso em MJ)
Biodiesel	8,5 a 9,0	9.400 a 10.000 kcal.kg ⁻¹	39,36 a 41,87 MJ.kg ⁻¹
Biogás	0,716 kg.m ⁻³	5.600 a 5.800 kcal.m ⁻³	23,45 a 24,28 MJ.kg ⁻¹
Óleo de dendê (palma)	8,6 a 9,5	9450 kcal.kg ⁻¹	39,57 MJ.kg ⁻¹
Madeira (florestas)	Var.	3.800 a 4500 kcal.kg ⁻¹	15,91 a 18,84 MJ.kg ⁻¹
Resíduo urbano	Var.	1500 kcal.kg ⁻¹	6,28 MJ.kg ⁻¹

Fonte: Adaptado de MME (2006).

Ao tratar do tema Peres et al. (2007), informam que o poder calorífico representa a quantidade de calor liberada na câmara durante a combustão e indica a energia contida no combustível. Dessa forma quanto maior for esse parâmetro, maior é a energia do combustível, o que coloca esse dado em patamares importantes, pois comparando com o óleo diesel, quanto menor for o poder calorífico, maior será o consumo de biodiesel para liberar a mesma quantidade de energia. Todavia, em um gradiente não linear, devido a melhor eficiência do motor operando com biodiesel.

Alguns autores como Costa & Oliveira (2006), dizem que o biodiesel possui um poder calorífico menor do que o diesel de petróleo, mas ressaltam que esse inconveniente é compensado pelo maior número de cetano. Essa característica, quer dizer que o biodiesel possui uma combustão mais fácil e aproveita melhor o seu conteúdo energético, de forma que os consumos específicos dos dois combustíveis se equivalem, e que não há redução significativa na potência e nem no torque do motor.

Segundo o Centro Brasileiro de Referências em Biocombustíveis (CERBIO, 2004), o biodiesel apresenta poder calorífico superior entre 39,4 e 41,8 MJ.kg⁻¹, enquanto que, o diesel apresenta poder calorífico superior acima de 45 MJ.kg⁻¹. Outros trabalhos evidenciam que alguns tipos de biodiesel partem de um PCS em torno de 37 MJ.kg⁻¹, a exemplo do originário

de óleo de fritura usado, indicado na Tabela 2.

Tabela 2 - Poder calorífico superior de diferentes tipos de biodiesel (diversas fontes)

Biodiesel	PCS (MJ.kg ⁻¹)	Fontes
----- Animais -----		
Óleo de frango	39 - 40,1 - 39 - 39,7 - 39,7	1, 2, 3, 4, 5
Sebo bovino	39,33	4, 5
Gordura suína	40,2	5
Óleo de peixe	39,5	5
----- Vegetais -----		
Óleo de fritura	37,51	1
Mamona	37,87 e 39	1 e 4
Babaçu	39,52	1
Dendê	39,9	1
Algodão	39,86	1
Piqui	40,15	1
Soja	39,11	4
Pinhão manso	39,08	4

Fontes: 1- Costa Neto et al. (2000); 2 - Camargos (2005); 3 - Souza et al. (2006); 4- Peres et al. (2007); 5 - Peres (2010).

Os estudos realizados pelos autores, indicaram que o poder calorífico superior (PCS) do biodiesel de óleo de frango foi de 39 a 40,1 MJ.kg⁻¹, o que indica uma diferença significativa em relação ao CD convencional (óleo diesel), que atinge valores acima de 45 MJ.kg⁻¹.

2.3 Produção de aves e o óleo de frango

O Frango é responsável por 31% da produção mundial de carne, valor bastante notório, quando comparado com a produção de carne suína (43%) e bovina (24%). As demais carnes, como a do peru, somam 2% (UBA, 2009).

De acordo com a UBABEF (Fusão da UBA - União Brasileira de Avicultura com a ABEF - Associação Brasileira dos Produtores e Exportadores Frangos, 2010), em 2009 os

Estados Unidos, foram os maiores produtores de carne de Frango, seguidos de China, Brasil, União Européia e México. Na Figura 15 são destacados os 5 maiores produtores de carne de frango, onde se verifica a terceira colocação do Brasil, que produz quase 11 milhões de toneladas por ano. Observa-se também, que em 2009 foram produzidos mais de 71 milhões de toneladas de carne de frango em todo mundo.

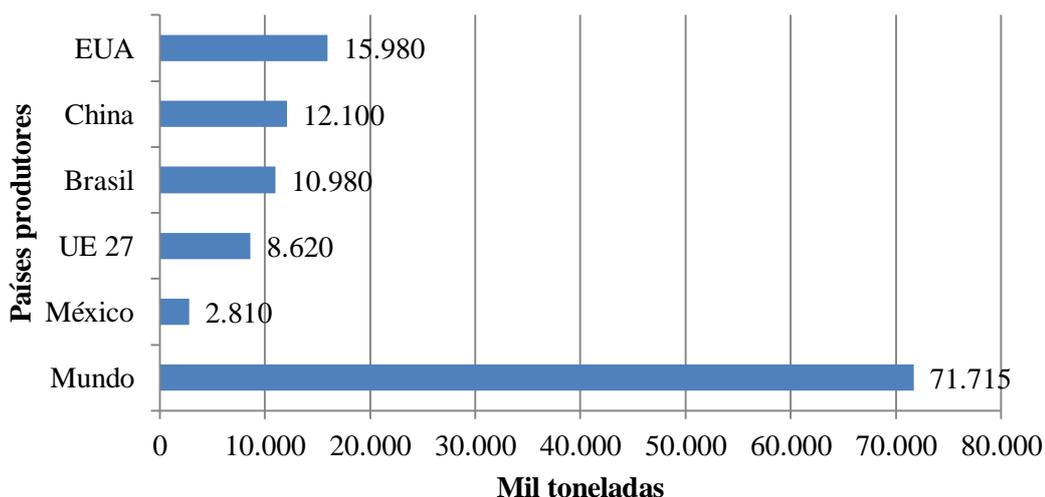


Figura 15 - Principais produtores mundiais de carne de frango em 2009
Fonte: UBABEF (2010).

Em nível de Brasil, verifica-se no Quadro 1, que a região Sul concentra a maior produção de frango, com destaque para o Paraná, que abateu em 2009, 1,2 bilhões de aves (UBA, 2009).

(continua)

Estado	Cabeças	Peso (kg)	Peso médio (kg/cabeça)
Paraná	1.243.245.043,00	2.492.085.952	2,00
Santa Catarina	871.156.163,00	1.921.455.783	2,21
Rio Grande do Sul	758.951.412,00	1.425.457.548	1,88
São Paulo	659.382.378,00	1.457.114.282	2,21
Minas Gerais	363.219.401,00	719.131.494	1,98
Goias	271.309.056,00	567.033.186	2,09
Mato Grosso	150.321.836,00	349.197.975	2,32
Mato Grosso do sul	128.614.492,00	299.132.228	2,33
Distrito Federal	72.513.727,00	132.527.682	1,83

(conclusão)

Estado	Cabeças	Peso (kg)	Peso médio (kg/cabeça)
Bahia	64.598.271,00	139.308.369	2,16
Pernambuco	51.644.059,00	123.746.788	2,40
Rio de Janeiro	40.173.259,00	75.586.284	1,88
Para	38.549.087,00	92.472.379	2,40
Espírito Santo	15.277.737,00	35.257.267	2,31
Tocantins	13.971.694,00	32.289.933	2,31
Paraíba	10.742.639,00	26.417.670	2,46
Rondônia	9.560.680,00	21.216.798	2,22
Ceará	5.439.872,00	13.265.619	2,44
Piauí	3.212.758,00	7.117.446	2,22
Sergipe	2.350.763,00	5.474.314	2,33
Acre	1.070.718,00	2.227.302	2,08
Rio Grande do Norte	535.419,00	1.250.036	2,33
Alagoas	393.573,00	1.024.954	2,60
Total	4.776.233.239,00	9.939.791.169	-
Média	-	-	2,22

Quadro 1 - Estados produtores de carne de frango, quantidade de cabeças abatidas, peso total e peso médio de abate em 2009

Fonte: UBA (2009).

Como o óleo é um subproduto da cadeia industrial do frango, sua produção é dependente e proporcional a escala de produção de cada país, região, e obviamente, de cada indústria. A extração é realizada por processos térmicos, nos próprios frigoríficos ou em graxarias independentes.

Para Farima (2010), “óleo de aves é o produto resultante de tecidos adiposos das aves, extraído por prensagem ou solvente após a cocção, centrifugado e filtrado, contendo no mínimo 90% de ácidos graxos totais e no máximo 3% de impurezas e insaponificáveis”. Outras informações sobre o óleo de aves utilizado na pesquisa estão disponibilizadas no Anexo B.

Com relação à classificação que diferencia uma gordura de um óleo, Forrest et al. (1979 apud GOMES et al., 2008, p. 58) cita que óleos devem ser assim chamados, se sua condição física se mantiver líquida em temperatura ambiente. Por outro lado, se na temperatura ambiente, a condição física for sólida, então denomina-se gordura.

As gorduras animais são geralmente classificadas como sebos, gorduras que apresentam estado sólido em temperatura ambiente, dada a sua composição percentual ser elevada em ácidos graxos saturados, principalmente o esteárico. A “gordura de frango” é exceção, sendo classificada como óleo de frango, por causa também da sua composição percentual, neste caso com valores baixos de ácido esteárico, ficando próximas a óleos como o de soja, apresentando-se em estado líquido a temperatura ambiente, (FORREST et al., 1979 apud GOMES et al., 2008, p. 58).

O óleo pode ser aproveitado como ingrediente na fabricação de rações e embutidos, pois apresenta altos teores de ácido oléico, palmítico e linoléico (CHIU & GIOIELLI, 2002) e também pode ser aplicado na fabricação de sabão e como alternativas energéticas (FRANÇA & WASZCZYNSKYJ, 2002). A Tabela 3 apresenta a composição dos ácidos graxos de óleo de frango.

Tabela 3 - Composição percentual dos ácidos graxos presentes no óleo de frango

Ácidos graxos	% em massa
16:0 - palmítico	18,4 - 19,3
18:0 - esteárico	7,5 - 8,9
18:1 - oléico	54,7 - 55,4
18:2 - linoléico	17,8 - 17,9

Fonte: Hilditch (1941) apud Centenaro et al. (2008).

O destino principal do óleo de frango é na indústria de rações, pois é uma fonte concentrada de energia, permitindo a formulação de dietas de elevado conteúdo energético para frangos de corte (RACANICCI et al., 2004). Os níveis energéticos recomendados para as dietas de frangos de corte, não são alcançados com matérias-primas habituais, como o milho e o farelo de soja. Neste sentido, para elevar os níveis de energia metabolizável, são adicionados às rações, subprodutos de origem animal e vegetal (FERNANDES et al., 2002), como uma alternativa de aproveitamento desses resíduos de baixo custo.

A principal vantagem da utilização de subprodutos de abatedouros adicionados às rações, como o óleo de vísceras de aves, além do alto conteúdo energético já mencionado, é o

baixo custo. Todavia, do ponto de vista nutricional, estudos mostram que nem sempre a utilização desses subprodutos é vantajosa.

O perfil de ácidos graxos deste óleo favorece o desenvolvimento da rancidez oxidativa devido à grande quantidade de ácidos graxos insaturados, principalmente os ácidos oléico e linoléico. Acredita-se que a redução do crescimento pode ser atribuída à presença dos produtos da oxidação, que levam a valores reduzidos de energia da dieta pelo decréscimo do valor biológico do ingrediente oxidado (RACANICCI et al., 2004).

O teor de gordura em uma carcaça de frango de corte pode ser influenciado por diversos fatores, como origem genética, idade da ave, sexo, sendo que as fêmeas apresentam uma maior quantidade de gordura que os machos. As linhagens modernas vêm sendo trabalhadas para um rápido ganho de peso e deposição protéica. A deposição de gordura abdominal é aumentada com o desbalanço no fornecimento dos nutrientes (RODRIGUES et al., 2005).

Nos estados do Sul, são abatidos 7,87 milhões de cabeças de frango por dia, com peso médio de 2 kg por ave. De acordo com estudos realizados por Gomes (2005); Gomes et al. (2008); Souza et al. (2006), cada ave abatida tem potencial para produzir em média 67,80 g de óleo (Tabela 4), o qual é extraído de carcaças, vísceras e restos resultantes do abate. Efetuando-se um cálculo simples, pode-se ter uma considerável quantidade de 533 toneladas de óleo extraídas por dia.

Tabela 4 - Potencial teórico de produção de biodiesel, com rendimento de 95%, a partir do óleo de frango produzido pelas Cooperativas do oeste do Paraná

Cooperativa – cidade	Capacidade de abate instalado (aves dia ⁻¹)	Potencial de produção de óleo de frango (kg dia ⁻¹)	Potencial de produção biodiesel (kg dia ⁻¹)
Lar – Matelândia	280.000	18.984,00	18.165,00
Copagrill – Marechal Cândido Rondon	140.000	9.492,00	9.082,89
C.Vale – Palotina	300.000	20.340,00	19.463,35
Coopavel – Cascavel	140.000	9.492,00	9.082,89
Copacol – Cafelândia	280.000	18.984,00	18.165,00
Total diário	1.140.000	77.292,00	73.959,13
Total anual	300.960.000	20.405.088,00	19.525.209,00

Fonte: (GOMES, 2005; GOMES et al., 2008, SOUZA et al., 2006).

Em nível regional, destaca-se o Oeste Paranaense que apresenta grandes avanços na produção avícola, gerando assim, expressivo movimento frigorífico por conta do abate das aves. O grande número de aves abatidas (mais de 1 milhão de aves por dia pelas cooperativas, mais a quantidade incerta por empresas privadas), gera uma substancial quantidade de descartes de partes constituintes do frango, as quais são submetidas à extração do óleo.

O óleo proveniente das aves apresenta também uma importante função na questão ambiental, pois a sua utilização para produção de biodiesel pode minimizar os impactos negativos ao meio ambiente (BONOMETO, 2009).

Se confrontar os dados da produção nacional de frango com a produção unitária de óleo, conforme os estudos de Gomes (2005); Gomes et al. (2008) e Souza et al. (2006), será atingido um montante aproximado de 323.828.614 kg.ano⁻¹ ou 355.425.984 l.ano⁻¹ de óleo, e 337.654.684 l.ano⁻¹ de biodiesel (Tabela 5). Esses números representam 5,49% da produção nacional de óleo de soja e 21% da produção nacional de biodiesel, conforme cálculo dos dados estatísticos de 2009, fornecidos pela Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais (ABIOVE, 2010a; 2010b) e ANP (2010), respectivamente.

Tabela 5 - Produção de cabeças de frango e potencial teórico de produção de óleo e biodiesel de frango no Brasil

Região	Cabeças	Potencial teórico de óleo de frango (kg)	Potencial teórico de óleo de frango (l*)	Potencial teórico de biodiesel (l**)
Sul	2.873.352.618	194.813.308	213.822.091	203.130.987
Sudeste	1.078.052.775	73.091.978	80.223.881	76.212.687
Centro Oeste	622.759.111	42.223.068	46.342.957	44.025.809
Nordeste	139.987.274	9.491.137	10.417.229	9.896.367
Norte	62.081.461	4.209.123	4.619.826	4.388.834
Total	4.776.233.239	323.828.614	355.425.984	337.654.684

Fonte: Adaptado de UBA (2009); Gomes (2005); Gomes et al. (2008) e Souza et al. (2006).

* Considerando a densidade do óleo de frango de 0,911 kg.l⁻¹. ** Considerando um rendimento da transesterificação de 95% em volume.

Em 2008, 2009 e 2010 foi registrada na ANP, a produção de aproximadamente 17, 40 e 58 m³ por ano, de biodiesel de óleo de frango pela empresa Big Frango, situada na cidade de

Rolandia-PR, a qual utiliza matéria-prima própria e após emprega em frota cativa. Esses dados são insignificantes frente aos 5.124.883 m³ de biodiesel produzido neste mesmo período (valor de produção com todas as matérias-primas existentes no Brasil), porém vale ressaltar da importância que isso representa no mercado, tendo em vista que mesmo em baixo volume, verifica-se a idoneidade deste combustível para ser aplicado em veículos com motores diesel. Não obstante, ressalta-se o alto potencial que pode ser explorado, fornecendo uma quantidade expressiva deste biocombustível.

Na região Sul onde há a maior produção de aves e o segundo maior consumo de óleo diesel do país, a quantidade teórica de biodiesel produzido de óleo de frango seria equivalente a apenas 2,35% do óleo diesel consumido nos 3 estados (8.627.412.351 ℓ). Por outro lado equivaleria a 18,64% do total de biodiesel produzido em 2009 na região. Somando-se os dados, o montante teórico influenciaria na mistura atual de 5%, movendo-a para 7% (B7) nos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul.

2.4 Tratores agrícolas

O trator é a principal fonte móvel de potência utilizada para realizar as diversas tarefas necessárias nos processos de produção agrícola. Se incrementados os conhecimentos acerca da capacidade de desempenho do trator, permite-se aos fabricantes desenvolverem produtos mais eficientes, de tal forma que os clientes finais obtenham melhor proveito das características operacionais dessa máquina (GABRIEL FILHO et al., 2008).

Os tratores agrícolas são veículos de baixa velocidade e alta tração, sendo que premissas construtivas devem priorizar a robustez e agilidade no trabalho. No desenvolvimento de máquinas agrícolas existem inúmeras avaliações e ensaios estáticos e de campo que devem ser realizados a fim de obter resultados de desempenho, e também verificar falhas e melhorias no sistema mecânico, eletro-eletrônico e demais.

Fazendo-se um balanço do mercado de tratores de rodas no Brasil, observa-se que o país apresentou três grandes picos de produção, um em 1976 com 64.175 unidades produzidas, sendo que 62.700 foram destinados ao mercado nacional, marcando o ano como o de maior vendas internas de toda história da indústria de tratores nacional. Outro em 2008 (66.504 unidades), e o último em 2010, ano em que historicamente mais se produziu tratores

no Brasil (71.763 unidades), visualizado na Figura 16.

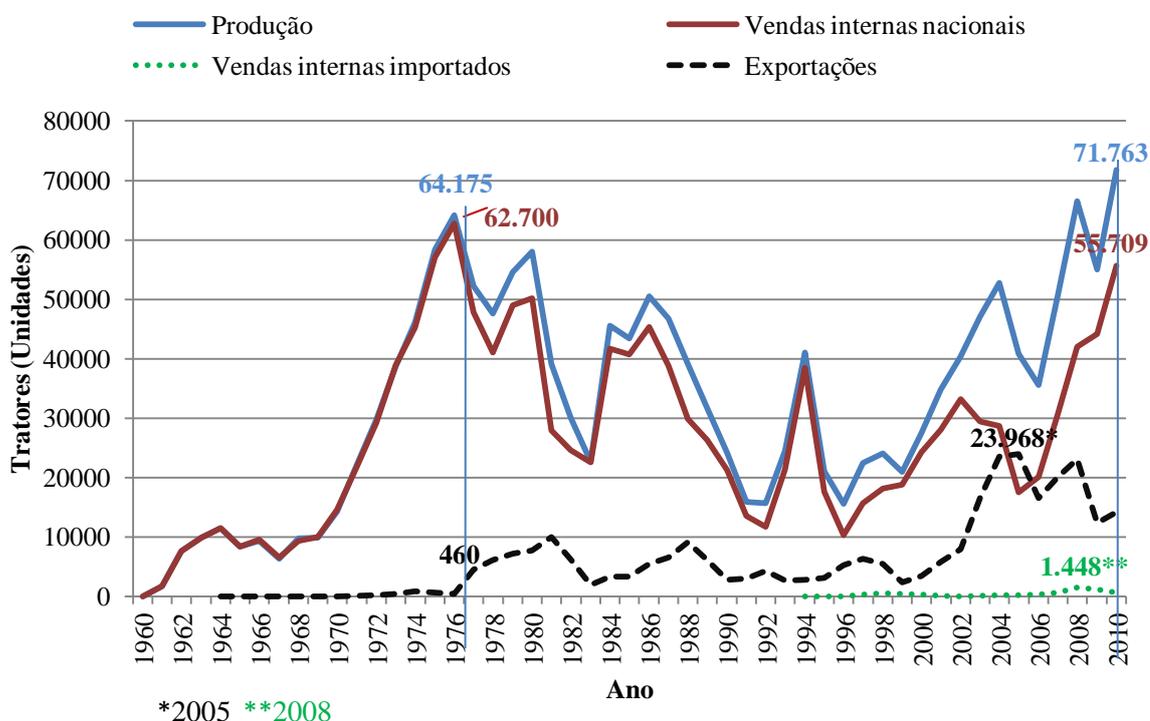


Figura 16 - Balanço do mercado de tratores de rodas no Brasil, do ano de 1960 a 2009
Fonte: (ANFAVEA, 2010a e 2011).

De acordo com o Censo Agropecuário Brasileiro (IBGE, 2006), a frota brasileira de tratores em 2006, era de 788.053 tratores, tendo a região Sul o maior número (Tabela 6).

Tabela 6 - Tratores existentes nos estabelecimentos agropecuários em 31/12/2006

Grandes Regiões	Total de estabelecimentos agrícolas	Tratores existentes em 31/12/2006	
		Estabelecimentos	Total
Norte	479.158	16.657	25.923
Nordeste	2.469.070	41.493	58.736
Sudeste	925.613	150.775	241.690
Sul	1.010.335	249.700	341.811
Centro-Oeste	319.954	60.677	119.893
Total	5.204.130	519.302	788.053

Fonte: IBGE, Censo Agropecuário 2006.

A Figura 17 evidencia os dados de produção e comercialização interna no Brasil. O país é grande produtor e exportador de máquinas agrícolas especialmente tratores de rodas.

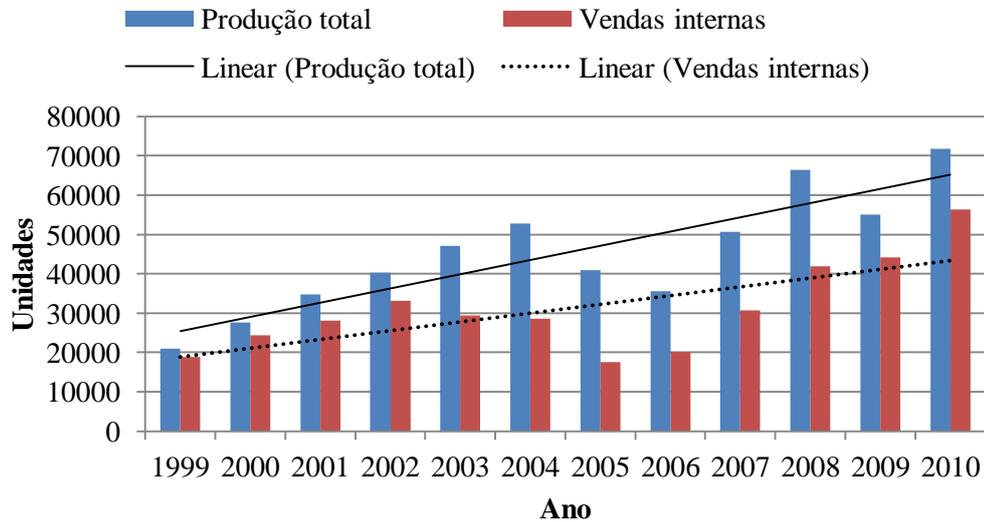


Figura 17 - Produção e vendas de tratores de rodas no Brasil do ano de 1999 a 2010
Fonte: Anfaeva (2010a, 2010b e 2011).

No Brasil de acordo com dados da Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA), a faixa de potência mais comercializada pelos fabricantes é 50 a 99 cv (36,78 a 72,81 kW) observado na Figura 18. O impulsionamento das vendas nos últimos três anos tem sido fomentado por programas governamentais de fornecimento de crédito, especialmente para agricultores da agricultura familiar.

Houve um forte aumento nas vendas internas de tratores nas faixas de potência de 50 a 99 cv. Do ano de 1999 para 2009, este aumento foi de 213%, passando de 10.269 para 32.230 unidades, com expectativa de chegar a quase 39.000 unidades em 2010.

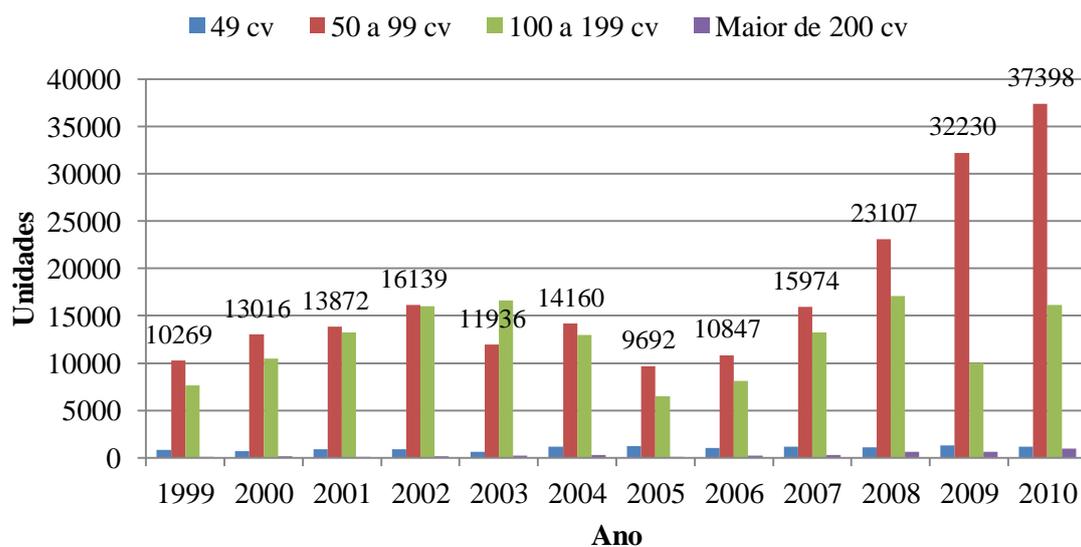


Figura 18 - Vendas de tratores no Brasil do ano de 1999 a 2010 por faixa de potência
Fonte: Anfavea (2010a, 2010b e 2011).

De acordo com o último Censo agropecuário (MDA, 2009), pequenas propriedades que englobam a mão-de-obra familiar representam 74,4% da ocupação de pessoal, e o número de estabelecimentos agrícolas destas é representado por 84,4% de todas as propriedades rurais. Ao todo no Brasil são 4.367.902 propriedades, sediadas em 80,25 milhões de hectares, sendo 91,2% menores que 200 hectares.

Melhorias da infraestrutura produtiva destas propriedades são fomentadas por incentivos financeiros oferecidos aos produtores pelo Governo Federal. Atualmente o principal financiamento utilizado, é o programa Mais Alimentos lançado no final de 2008, que é uma linha de crédito do PRONAF voltada a modernização da propriedade rural familiar. De acordo com o Ministério de Desenvolvimento Agrário (MDA, 2010), atualmente o agricultor familiar pode acessar financiamentos de até R\$ 130 mil, com taxa de juros de 2% ao ano, três anos de carência e prazo de pagamento de até dez anos, contando com mais de 230 empresas fabricantes parceiras.

Os principais itens adquiridos pelos agricultores são os tratores agrícolas, que em 2009, por meio do programa, foi responsável por 80,7% do total de vendas na faixa de potência de 11 a 78 cv (8,09 a 57,37 kW), incluindo motocultivadores, totalizando 17.410 unidades vendidas e entregues.

O Tema abordado nos cinco parágrafos anteriores, fora destacado no texto com intuito de dar ênfase para a categoria de 75 cv (55,16 kW), muito utilizada em pequenas propriedades, mas principalmente para salientar que o Brasil vem adotando políticas de estruturamento agrofamiliar com alguma tendência à renovação de frotas, a muito pouco tempo.

Os incentivos também objetivam a modernização gradativa, no entanto, tratores com tempo de uso superior a 20 anos, ainda são e serão muito utilizados no Brasil, fato compreendido pelo nível de desenvolvimento do país, e por não possuir programas específicos de renovação de frotas. Sendo assim, a exposição de tratores agrícolas com bastante uso a ensaios de desempenho e emissões, é perfeitamente válida.

2.5 Ensaios para desempenho de tratores agrícolas

Os ensaios constituem importantes etapas no desenvolvimento de máquinas agrícolas, tendo em vista principalmente os intensos esforços a que são submetidas. Na realização de ensaios são avaliadas inúmeras variáveis, as quais são expressas em valores e grandezas das mais diversas ordens resultantes de medidas e avaliações (MIALHE, 1996).

Para o autor, medida é o resultado da comparação de grandezas (fixa e ordens distintas) tomada como padrão de unidade, e ela constitui a mais precisa forma de informação a respeito dos vários fatores, de ordem física, temporal ou econômica, que intervêm numa tomada de decisão sobre mecanização agrícola. O autor cita que tomadas de decisão de maneira mais precisa contando com recursos da informática, vem impulsionando cada vez mais a demanda por informação na forma de medidas, tanto na área industrial como na agropecuária.

“O parâmetro de desempenho é uma grandeza, dimensional ou adimensional, inerente do comportamento da máquina, cujo valor numérico é uma medida do grau de qualidade, da intensidade, da precisão, da eficiência, etc, com que a máquina cumpre sua finalidade, sob dada condição padrão de operação (MIALHE, 1996)”.

De acordo com Wandel (1985 Apud MIALHE, 1996, p. 385) já em 1908 começaram a ser realizados testes de qualificação na Exposição Industrial de Winnipeg, EUA, com tratores a vapor e a gasolina, onde o desempenho era medido em aração e em tração. No ano seguinte (1909), a avaliação dos tratores passou a contar também com o ensaio de potência ao freio dinamométrico, sendo já na época considerado como mais importante.

Os ensaios de tratores foram primeiramente colocados em pauta como ação legislativa, no Estado de Nebraska, EUA. Os procedimentos, equipamentos, e resultados obtidos nos ensaios de Nebraska, passaram a constituir modelos de diretriz tecnológica a ser seguida nos demais países produtores e importadores de tratores (MIALHE, 1996).

Silva & Benez (1997) relatam que o monitoramento do desempenho do trator é algo de extremo interesse e que objetiva otimizar sua utilização para aumentar a eficiência de utilização do combustível no intuito de maximizar a quantidade de trabalho produzido por unidade de combustível consumido. Os tratores agrícolas têm seu desempenho avaliado pela força e potência desenvolvida na barra de tração, torque e potência desenvolvida na tomada de potência (TDP), eficiência de tração, patinagem das rodas motrizes e consumo de combustível.

Operações agrícolas, principal atividade a que são submetidos os tratores, impreterivelmente são executadas em superfícies com pouca aderência, geralmente em solos mobilizados ou com cobertura vegetal, sendo que em ambas as condições na interface solo-pneu há perdas de potência devido ao patinamento ou patinagem do rodado motriz (SCHLOSSER et al., 1992; MIALHE, 1996; SOUZA FILHO, 2001; GABRIEL FILHO et al., 2004; CORTEZ et al., 2009).

Para Louzada (2007), diversos são os fatores que afetam o desempenho dos tratores agrícolas em situações de campo, como por exemplo, o tipo de solo, tipo de preparo, tipo de cultivo (conservacionista, convencional e direto), implemento utilizado, patinagem, entre outros. Segundo Souza Filho (2001) o estudo de desempenho de tratores agrícolas a campo é uma tarefa bastante complexa, pois a quantidade de variáveis a serem controladas e analisadas é muito grande, sendo que o conjunto mecânico possui diversos pontos que devem ser monitorados, seja por instrumentação ou metodologias específicas de controle.

Nos ensaios dinâmicos existem muitas variáveis que interferem e que devem ser controladas, por outro lado, e nos ensaios estáticos, reduz-se a quantidade de variáveis, facilitando o controle, já que o trator mantém-se imóvel. Em muitos casos, os equipamentos utilizados, com o auxílio da informática, consideram as variáveis de interferências, corrigindo

os dados e fornecendo as informações de forma direta e precisa conforme específica e/ou exige as normas. Os ensaios vinculados ao desempenho do motor com o uso de dinamometria são de extrema importância, pois a partir destes se tem conhecimentos sobre a capacidade do motor em gerar torque e potência, atrelado ao fato de que quanto maior esta capacidade, maior poderá ser a capacidade de produzir tração.

Com alguns dados fornecidos pelos fabricantes ou medidos nos ensaios, como potência, torque e rotação do motor, além de outros valores de ordem ponderal e física, como diâmetro das rodas motrizes, permitem calcular algumas variáveis vinculadas à movimentação e atuação da máquina, como a velocidade teórica de deslocamento, e o torque nas rodas motrizes entre outros. Na Figura 19 observa-se de forma genérica a atuação de algumas variáveis junto ao conjunto motriz do trator, iniciando-se no motor, passando pela transmissão e concluindo-se na aplicação da força, tangencialmente à interface solo-roda.

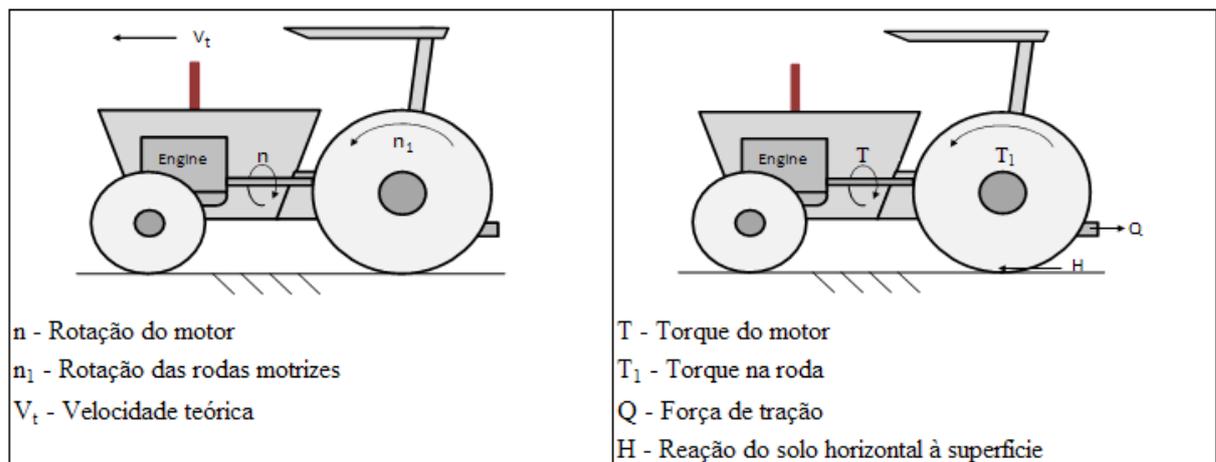


Figura 19 - Análise da atuação de forças em um trator

Fonte: (Adaptado de MACMILLAN, 2002).

2.5.1 Normas e Definições

No Brasil a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), baseando-se ou não em outras normas e órgãos internacionais, principalmente a ISO (International Standardization Organization), é o órgão responsável por reunir comissões de estudo de várias

áreas do conhecimento para assim elaborar as Normas Brasileiras (NBR), como balizadoras dos padrões que devem ser adotados.

No caso dos tratores agrícolas, é possível realizar ensaios estáticos e dinâmicos para avaliação do desempenho. Ambos são muito importantes, o primeiro por manter as condições praticamente inalteráveis, definindo os ensaios de forma padronizada, e o segundo por considerar todas as variáveis que um trator encontra no campo em condições de tração.

Ensaio dinâmico em pista de concreto, onde se encontra uma situação constante entre a interface superfície-pneu em todo trajeto de ensaio, são melhores definidos e especificados pela norma ABNT NBR 10400 (2007). Os ensaios em pista pavimentada têm sido pouco explorados pelos órgãos de pesquisa, universidades e empresas do setor, devido aos custos que estes remetem, em função da infra-estrutura necessária e principalmente pelos desgastes excessivos impostos aos componentes do trator.

Os ensaios para determinação do desempenho na TDP seguem a norma ABNT NBR 13400 (1995). Para avaliação do desempenho do motor diretamente no volante, utiliza-se a norma ABNT NBR ISO 1585 (1996), em substituição à norma NBR 5484 de 1985.

No Brasil mesmo tendo-se as normas da ABNT, específicas para cada avaliação dos tratores agrícolas, o leque de opções dos fabricantes e pesquisadores é bastante amplo, já que muitos preferem seguir normas internacionais (Quadro 2).

Internacionais	
Órgão/Norma	Descrição
ASAE/ASABE	American Society of Agricultural and Biological Engineers
UNE	Normas da Espanha
ISO	International Organization for Standardization
OECD	Organization for Economic Co-operation and Development.
Nacionais	
ABNT NBR ISO 1585:1996	Código de ensaio de motores - Potência líquida efetiva.
ABNT NBR 10400:1997	Determinação do desempenho na barra de tração.
ABNT NBR 7811:1993	Características e posição da barra de tração.
ABNT NBR 13400:1995	Determinação do desempenho na tomada de potência.
ABNT NBR ISO 3965:2009	Velocidades máximas - Método de determinação.
ABNT NBR ISO 789-3:2009	Procedimentos de ensaio Parte 3: Diâmetros de giro e do espaço de giro.

Quadro 2 - Principais órgãos e normas nacionais e internacionais utilizadas nos ensaios de tratores agrícolas para avaliação de desempenho

A Figura 20 resume a aplicação das normas ABNT/ISO, destinadas a avaliação de desempenho.

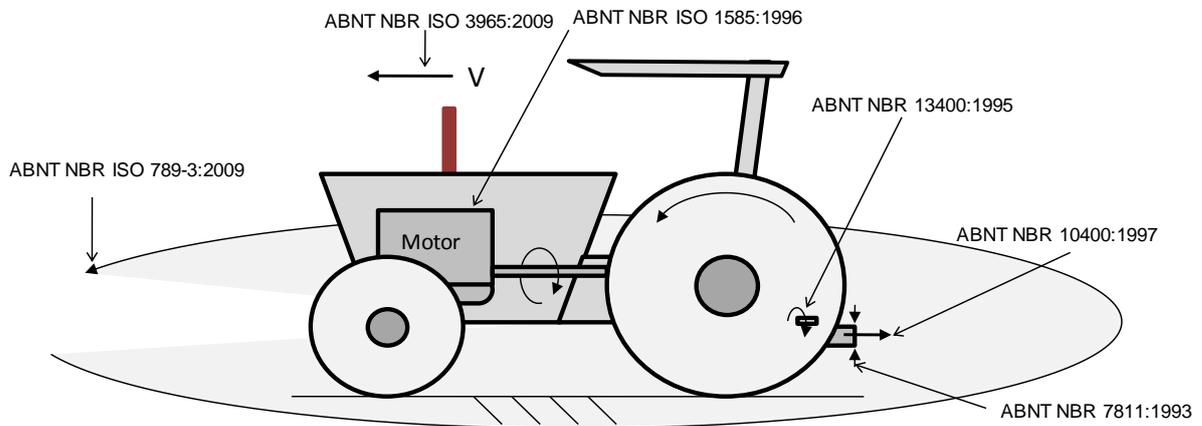


Figura 20 - Aplicação indicada das normas ABNT/ISO nos tratores agrícolas de rodas

Para ensaios de tratores instrumentados com equipamentos eletrônicos, não há normas específicas, porém os ensaios devem ser realizados dentro de padrões, nos quais os dados expressem confiabilidade e representam condições reais dos parâmetros avaliados (RUSSINI, 2009).

2.5.2 O uso de dinamometria

Não se pode falar de desempenho de motores, sem referenciar ao uso de dinamômetros. Estes importantes instrumentos são destinados a mensuração do momento de força ou torque, desenvolvido nos motores ou transmitido por árvores motrizes (MIALHE, 1996).

Os primeiros dados de registro sobre o uso de freio dinamométrico em tratores agrícolas, foi em 1909 na exposição Industrial de Winnipeg, EUA, com o intuito de complementar os ensaios realizados em aração e em tração, e já na época, foi considerado o

mais importante, para os até então, motores a vapor e a gasolina (WANDEL, 1985 apud MIALHE, 1996, p. 385).

O dinamômetro consiste em um equipamento que tem por função a geração de uma carga resistente para o motor utilizado. A execução do trabalho baseia-se em ensaios com rigor avaliativo, utilizando-se de métodos laboratoriais sobre bancada dinamométrica como instrumento principal na geração dos dados necessários (NIETIEDT, 2010).

De acordo com Stone (1999), o dinamômetro é o item mais importante num banco de provas de motores, e é utilizado para medir a potência, o torque e o consumo específico de combustível de um motor. Segundo o autor, a principal desvantagem de um dinamômetro elétrico é o seu custo inicial de aquisição e a limitação de rotação em cerca de 3000 rpm.

Para Mialhe (1996) os dinamômetros podem ser assim agrupados:

- Equipamentos primitivos:
 - Freio dinamométrico de corda
 - Freio de Prony
- Dinamômetros de absorção:
 - Dinamômetro eólico ou freio de ventoinha;
 - Dinamômetro hidráulico ou freio de Froude;
 - Dinamômetro elétrico ou gerador dinamométrico;
 - Dinamômetros de correntes parasitas ou freio de correntes de Foucault;
- Dinamômetro motor (“cradle dynamometer”);
- Dinamômetros de transmissão ou torciômetros:
 - Torciômetro de correias;
 - Torciômetro de mola;
 - Torciômetro eletrônico;

A escolha do tipo de dinamômetro depende da finalidade a que se destina o equipamento. Se a capacidade de absorção de potência for o fator principal, o dinamômetro de correntes parasita ou correntes de Foucault (elétrico) ou de Froude ou Vane (hidráulicos) deverão ser os preferenciais (MACHADO, 2008).

Os dinamômetros captam a informação de velocidade angular e força, para assim fornecer a potência desenvolvida. Na Figura 21 identifica-se os componentes de um dinamômetro de correntes parasitas de Foucault, os mais utilizados atualmente.

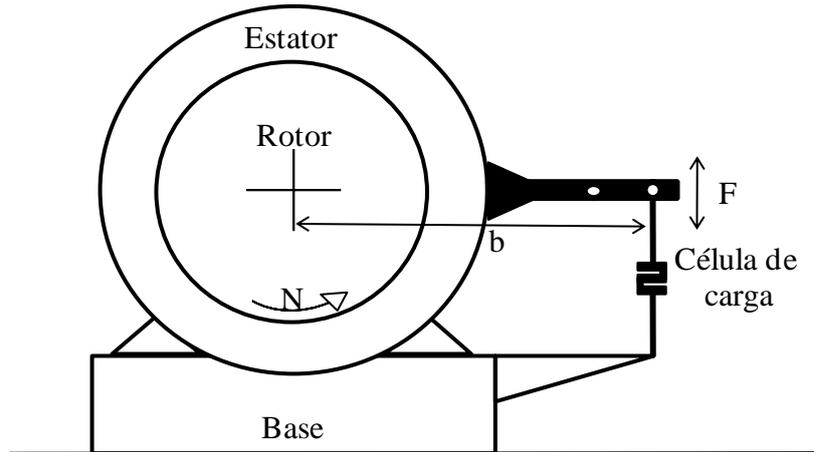


Figura 21 - Esquema do princípio de operação de um dinamômetro e dos principais componentes utilizados para mensuração e aquisição de dados

O torque é absorvido pelo dinamômetro conforme força e comprimento do braço, sendo então calculado pela Equação 1.

$$T = F * b \quad (1)$$

Onde:

T – Momento de força ou torque (Nm);

F – força aplicada no braço (N);

b – Comprimento do braço de alavanca, ou raio (r) do braço (m);

A potência absorvida pode ser expressa pelas Equações 2 (Heywood, 1988), ou 3 e 4 (adaptada de Mialhe, 1996) de acordo a unidade resultante desejada.

$$P = 2 * N * T * 10^{-3} \quad (2)$$

Onde:

P – Potência absorvida (kW);

N – Rotação (rpm);

T – Torque (Nm);

10^{-3} – Constante;

$$P = \frac{(L * W * n)}{716,2} \quad (3)$$

Onde:

P – Potência absorvida (cv);

L – Comprimento do braço de carga (m);

W – Carga na célula de carga (kgf);

n – Rotação (rpm);

716,2 – Constante de conversão de unidades para expressar potência em cv;

$$P = \frac{(L * W * n)}{973,76} \quad (4)$$

Onde:

P – Potência absorvida (kW);

973,76 – Fator de conversão para expressar potência em kW;

O uso de dinamômetros para avaliação de desempenho pode ser utilizado diretamente no volante do motor, ou com o uso da TDP dos tratores agrícolas (Figura 22). Atualmente as normas nacionais que devem ser seguidas são as NBR ISO 1585, e a NBR 13400 respectivamente.

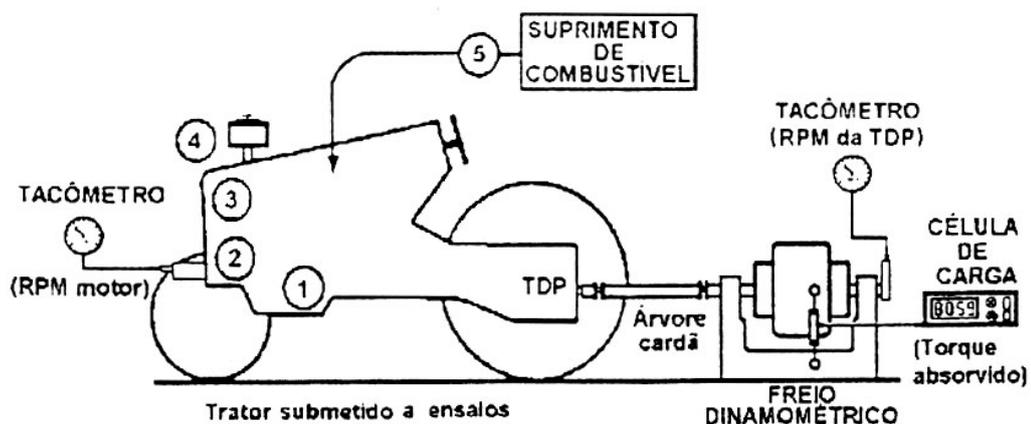


Figura 22 - Esquema de um trator acoplado a um dinamômetro mediante uso da TDP
Fonte: Mialhe (1996).

Um dos principais objetivos de se utilizar a dinamometria é analisar a eficiência da conversão energética química de combustíveis em energia mecânica na forma de potência. Para Soranso (2006), essa conversão de energia influi no rendimento global do trator, considerando inclusive todas as perdas no motor.

2.5.3 Consumo de combustível

O consumo de combustível pode ser apresentado como unidade de volume por unidade de tempo ($\ell.h^{-1}$), onde não se considera a influência da temperatura e não se relaciona com a potência gerada. Outra forma de apresentar o consumo de combustível é por meio da unidade de massa por unidade de tempo ($kg.h^{-1}$); nesta forma, apesar de considerar a influência da temperatura, também não contempla a potência; dessa forma a maneira mais técnica de expressar o consumo é unidade de massa por unidade de potência ($g.kWh^{-1}$), sendo que esta forma é conhecida como consumo específico e, pelo fato de considerar a massa e a potência, pode ser usada para comparar motores, tratores e equipamentos de tamanho e formas diferentes (LOPES et al., 2003; LOPES et al., 2004).

Lopes et al. (2003) ao montarem um protótipo de sistema instrumental para medição do consumo de combustível em tratores, verificaram que o mesmo apresentou praticidade para variar o tipo de combustível, simplicidade na instalação e operação, bem como manutenção do mesmo. Em seu protótipo montado em um trator Valtra modelo BM-100 4x2 TDA de 100 cv de potência, permitiu determinar o consumo horário ($\ell.h^{-1}$ ou $kg.h^{-1}$), possibilitando também determinar o consumo específico na forma estática com uso de dinamômetro ou de forma dinâmica mediante instalação de uma célula de carga para medição da força de tração.

De acordo com Santos et al. (2007), o consumo específico do motor tem uma relação direta com o poder calorífico do combustível, e desta forma, já que o diesel mineral apresenta um poder calorífico maior é evidente que a quantidade de combustível necessário é menor para se atingir a potência desejada. Ainda informado por Santos et al. (2007), ensaios indicaram que o uso do biodiesel em faixas de potência intermediárias aos limites de operação do motor, não afeta o regime de trabalho, no entanto, há uma tendência à instabilidade do

motor operando próximo dos limites de operação mínimos e máximos.

De acordo com Silva (2006), o uso do biodiesel em misturas com o óleo diesel em proporções de até 50% não apresenta diferença de consumo substancial, no entanto em testes realizados com 75% de biodiesel ou 100%, apresenta consumo superior na ordem de 10%. Ainda se tratando do tema, Silva (2006), ao realizar testes em bancada dinamoétrica verificou que o consumo horário ($\ell.h^{-1}$) do B100 atingiu consumo superior ao óleo diesel em 6 intervalos distintos de rotação do motor, variando de 1000 a 2500 rpm.

Outros ensaios realizados por Silva (2006) com biodiesel de soja e sebo bovino, utilizando um trator 4x2 TDA modelo 5285 da Massey Ferguson, com 9 combinações de combustível, mostraram um consumo específico volumétrico ($\ell.cv^{-1}$) favorável em condições intermediárias de misturas entre B5 e B50, conforme observa-se na Figura 23.

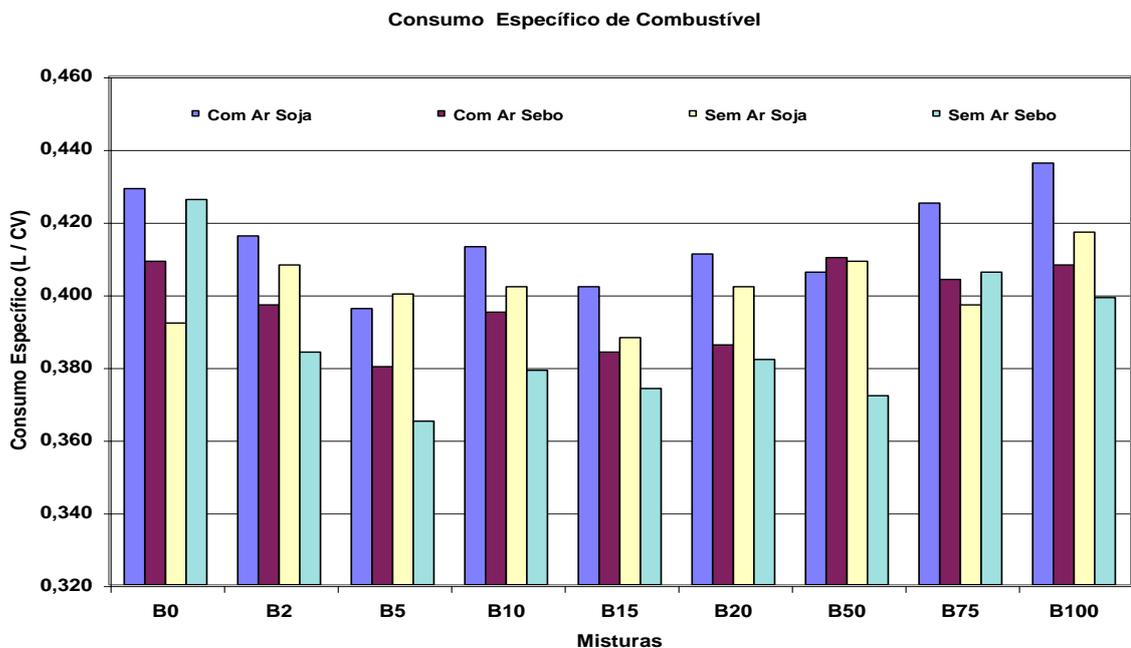


Figura 23 - Resultados de consumo específico volumétrico de biodiesel, em ensaios realizados por Silva (2006), em um trator de 85 cv com cabine (Figura 25), utilizando ar condicionado ligado e desligado

2.5.4 Desempenho de motores diesel

Potência, torque, rotação e consumo de combustível são as principais variáveis avaliadas nos ensaios de motores. Estes dados são diretamente ligados a sua capacidade em desenvolver trabalho útil, contabilizando todas as perdas de ordem térmica e mecânica.

Explica Mialhe (1996), que o rendimento do motor define a eficiência com que o calor é transformado em trabalho. Assim, sob esse conceito de indicador de eficiência, pode-se definir diversos rendimentos, a saber:

- Rendimento termo-mecânico ou global;
- Rendimento térmico;
- Rendimento mecânico;
- Rendimento volumétrico.

Explica que o rendimento global expressa a eficiência global do motor, como conversor da energia do combustível (potência teórica) em energia mecânica no volante (potência efetiva), calculada de acordo com a potência de entrada e saída, através da Equação 5.

$$\eta_g = \frac{H_e}{H_t} * 100 \quad (5)$$

Onde:

η_g – Rendimento global do motor (%);

H_e – Potência efetiva ou medida (cv);

H_t – Potência teórica (cv);

Para Heywood (1988) a eficiência do motor é calculada de acordo com o consumo específico e energia contida no combustível, representado pelo poder calorífico do mesmo, conforme Equação 6.

$$\eta_f = \frac{3600}{sfc * Q_{HV}} \quad (6)$$

Onde:

η_f – Eficiência do motor (%);

sfc – Consumo específico (Specific fuel consumption, g.kWh⁻¹);

Q_{HV} – Poder calorífico (MJ.kg^{-1});

3600 – Constante de conversão de unidades;

Para Stone (1999), os motores ciclo diesel apresentam eficiência térmica superior aos motores de ignição por centelha, pois usam taxas de compressão mais elevadas e durante a fase inicial da compressão, apenas o ar está presente no cilindro. A dosagem realizada pelo sistema injetor busca uma mistura mais fraca que a estequiométrica, como forma de alcançar a combustão mais completa possível. Outro fator que melhora a eficiência, é que o motor diesel é projetado para operar em baixas rotações reduzindo as perdas por atrito.

Para Soranso (2006), o uso de combustíveis de fontes renováveis em motores, busca a redução do consumo de combustíveis fósseis e a dependência dessa fonte finita. Portanto é importante que se realizem estudos para avaliação do desempenho dos motores usando combustíveis alternativos (fontes renováveis).

No caso dos tratores agrícolas, a potência do motor nos dá uma prévia de sua capacidade de trabalho (SOUZA FILHO, 2001). A potência do motor quando explorada de forma direta, aplicando-se uma força diretamente ao volante, mediante uso de um dinamômetro, pode fornecer valores diferentes da especificada pelo fabricante, implicando assim na necessidade de realização de ensaios nestes, principalmente quando se utilizar combustíveis alternativos. Utilizando um trator com motor de 78 cv (57,37 kW) 4x2 com mais de 20 anos de uso, em bancada dinamométrica, Barbosa et al. (2008) verificou que com o aumento da proporção de biodiesel de soja na mistura, a potência e o torque do motor diminuía. Entretanto, a eficiência térmica foi superior, e em média na rotação equivalente a 540 da TDP, apresentaram os melhores resultados. Observou também que o consumo energético obtido foi diminuindo seus valores, a medida que se aumentava a quantidade de biodiesel misturado ao diesel.

CUNHA (2009) ao ensaiar um motor com potência especificada de 44 kW utilizando óleo diesel metropolitano (denominado pelo autor como DM1) e três combustíveis alternativos incluindo biodiesel de óleo de frango, verificou que em carga máxima os valores de potência medidos para 4 diferentes misturas, DM1 e biodiesel puro (B100), foi ligeiramente superior a especificada pelo fabricante do motor (Tabela 7).

Tabela 7 - Resultados dos ensaios de potência de um motor 4 cilindros (44 kW) acoplado em um dinamômetro (T1) e acoplado a um gerador (T2) (comparativo de potência entre T1 e T2)

Biodiesel	Potência com carga máxima (kW)					
	DM1	B20	B30	B50	B80	B100
Frango T1	44,73	46,91	46,81	46,62	45,69	45,63
Frango T2	45,31	45,24	45,72	45,55	45,62	44,85
Soja T1	44,73	46,02	45,90	45,83	45,96	45,86
Soja T2	45,31	45,23	45,18	44,92	45,32	45,46
Palma T1	44,73	46,66	46,23	46,24	45,00	45,45
Palma T2	45,31	45,14	44,65	44,76	43,71	44,34

Fonte: Cunha (2009).

T1 - Motor novo acoplado em dinamômetro, T2 – motor com 1000 horas acoplado a um gerador elétrico. DM1 Diesel metropolitano

Machado (2008) relata que os ensaios para avaliar a influência do uso do B100 sobre as características de um motor sob plena carga, mostraram que o torque e a potência decrescem cerca de 5%, com consumo maior em 10%.

2.5.4.1 Demais parâmetros de avaliação

Além da eficiência do motor e consumo específico, calculados a partir de dados básicos medidos nos ensaios, é possível se determinar outros parâmetros como reserva de torque e consumo energético.

A reserva de torque é calculada pelos valores extremos de torque e de potência máxima, na chamada faixa de utilização do motor em plena carga. Nesta faixa o motor apresenta funcionamento estável, se auto-regulando. A reserva acima de 15% é considerado bom, entre 10 e 15% regular, e abaixo de 10% ruim (MIALHE, 1996).

O autor também denomina a reserva de torque como capacidade de sustentação de conjugado (CSC %), calculado pela Equação 7.

$$CSC = \left(\frac{T_{m\acute{a}x}}{T_{Hom}} - 1 \right) * 100 \quad (7)$$

Onde:

CSC – Capacidade de sustentação de conjugado ou mesmo que reserva de torque (%);

$T_{m\acute{a}x}$ – Torque máximo (Nm);

T_{Hom} – Torque a potência máxima (Nm);

O consumo energético, é expresso em unidade de energia por unidade de tempo ($MJ.h^{-1}$), e demonstra quanto de energia o motor está consumindo, ou seja, toda energia contida no combustível consumido multiplicado pelo tempo de utilização, sem levar em consideração a potência efetiva desenvolvida e as perdas do motor. Tem relação direta com a eficiência térmica do motor, pois se a potência e o consumo de combustível for similar ou próximo para diferentes tipos de combustíveis, obrigatoriamente o motor deverá ter maior eficiência a favor de combustíveis com menor conteúdo de energia.

O consumo energético pode ser determinado mediante uso da Equação 8.

$$C_{EN} = Chv * \rho * PCI \quad (8)$$

Onde:

C_{EN} - Consumo energético ($MJ.h^{-1}$);

Chv – Consumo horário volumétrico ($\ell.h^{-1}$);

ρ – Densidade do combustível/mistura ($kg.\ell^{-1}$);

PCI – Poder calorífico inferior ($MJ.kg^{-1}$);

2.5.5 Instrumentação para aquisição de dados

Com o emprego de máquinas e implementos agrícolas, tornou-se preocupação dos pesquisadores e empresas, a quantificação dos esforços atuantes nos tratores e implementos, além do consumo de combustível em função das características dos sistemas de produção. Desta forma o objetivo da instrumentação agrícola para realização de ensaios, é gerar

informações que possibilitem dimensionar e racionalizar o uso de conjuntos motomecanizados na agricultura (SILVA et al., 1999).

Mantovani (1999) enfatiza que o uso da instrumentação eletrônica, permite uma grande capacidade de trabalho em razão da facilidade de programação e operação da cadeia de medições. A partir dos dados coletados é possível obter curvas de desempenho operacional do conjunto, assim como um relatório de avaliação completo, o qual pode servir como recomendação para o usuário e para os fabricantes.

O desenvolvimento de uma instrumentação eletrônica através da instalação de sensores conectados a um sistema de aquisição, para determinar o desempenho do trator, fornece dados referentes ao desempenho do trator a cada dois segundos durante as operações, tendo-se assim dados suficientes para caracterizar o desempenho desta máquina (RUSSINI, 2009). Detalhes de instalação e ou localização, são melhor compreendidos ao visualizar a Figura 24.

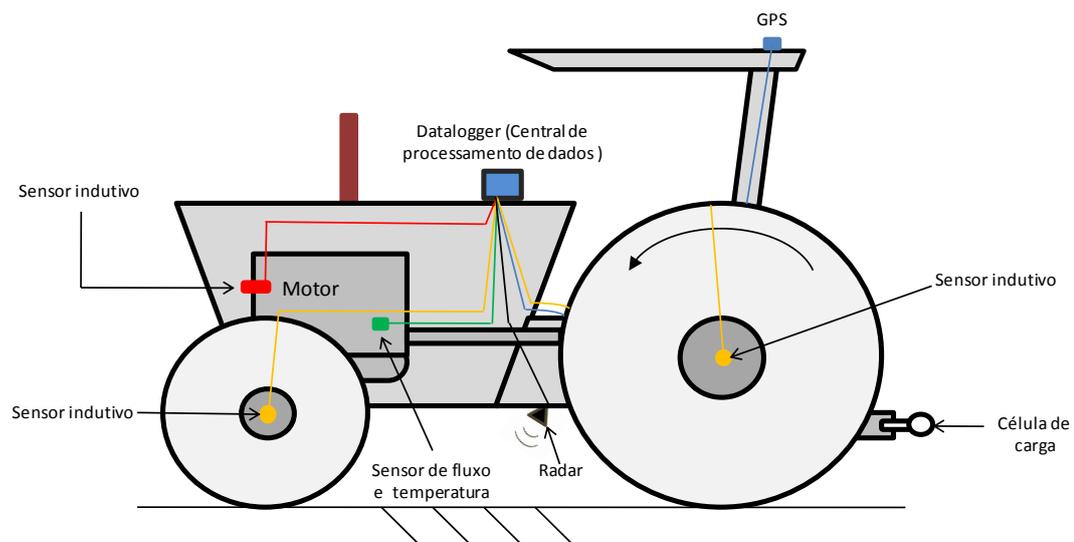


Figura 24 - Esquema de ligação dos principais sensores utilizados para avaliação de tratores

Na Figura 24, observa-se um esquema de uma série de sensores ligados ao trator, destinados a captação de dados que serão armazenados e convertidos em valores de cunho técnico e científico. Esses equipamentos são utilizados principalmente nos ensaios de campo, onde o número de variáveis a ser controlados é maior, entretanto, parte destes sensores também podem ser utilizados nos ensaios estáticos em dinamometria, como sensor de rotação

do motor e/ou da TDP, temperatura e consumo de combustível, temperatura dos gases de exaustão e do óleo do motor, além de outras variáveis, a depender da disponibilidade de sensores de medição.

No Quadro 3 observa-se a descrição dos principais sensores e equipamentos eletrônicos que podem ser utilizados bem como suas funções e localização junto a um trator agrícola. Após o quadro verifica-se maiores detalhes sobre estes.

Conjunto trator	Descrição	Função	Unidade
Motor	Sensor indutivo	Rotação do motor	rpm
TDP	Sensor indutivo	Rotação da TDP*	rpm
Motor/circuito de combustível	Medidor de fluxo	Consumo de combustível	$\ell.h^{-1}$
Motor/circuito de combustível	Sensor de temperatura	Temperatura do combustível (injeção e retorno)	$^{\circ}C$
Motor/cárter	Sensor de temperatura	Temperatura do óleo	$^{\circ}C$
Rodas motrizes	Sensor indutivo	Patinamento (velocidade teórica)	% ($km.h^{-1} / m.s^{-1}$)
Barra de tração	Célula de carga	Força de tração	kgf/kN
Conjunto trator	Radar	Velocidade real	$km.h^{-1} / m.s^{-1}$
	GPS		$km.h^{-1} / m.s^{-1}$
	Roda odométrica		$km.h^{-1} / m.s^{-1}$
Conjunto trator	Sistema de aquisição de dados (Datalogger/CLP)	Armazenamento e processamento de dados	Programável

Quadro 3 - Principais parâmetros a serem avaliados em um trator agrícola e descrição do sensor usualmente empregado

- Sensor indutivo: Os sensores indutivos são utilizados na detecção de peças metálicas junto as rodas motrizes e também no motor para medir a velocidade de ambos, a partir da realização de medições de posicionamento. A detecção ocorre sem que haja o contato físico entre o sensor e o acionador, que pode ser uma engrenagem, um disco com furos espaçados equidistantemente ou ainda uma saliência na roda ou volante do motor.

- Medidor de fluxo: Na medição do consumo de combustível, geralmente utilizam-se medidores ou sensores de fluxo (fluxômetros), os quais devem ser instalados junto ao circuito de injeção e retorno do combustível. Predominantemente são utilizados sensores de fluxo constituídos por duas engrenagens ovais onde a cada volta completa, deslocam 1 ml de fluido (neste caso combustível).
- Sensor de temperatura: Utilizado para aferir a temperatura do combustível, dado importante para a correção do volume deste. A variação de temperatura pode ser ocasionada por efeitos mecânicos ou do ambiente. Também é usado na verificação de temperatura dos gases de exaustão e do óleo do motor. Geralmente utiliza-se um sensor do tipo resistência de platina.
- Célula de carga: Para medir a força na barra de tração, resultante do esforço aplicado nesta por máquinas ou implementos acoplados ao trator em condições dinâmicas, utiliza-se uma célula de carga que funciona com extensômetros que são resistências elétricas sensíveis a deformação. Dinamômetros também utilizam para medir o momento de força aplicada ao braço. Com a aplicação de uma tração ou compressão na célula de carga, estas resistências saem do equilíbrio aparecendo um sinal de tensão proporcional a deformação gerada.
- Radar: Usualmente utiliza-se um radar de efeito doppler, muito utilizado para a medição de velocidade de algum alvo ou objeto, seu princípio de funcionamento baseia-se no eco e do efeito doppler. O radar irá emitir ondas que ao baterem em algum objeto ou o solo, serão refletidas com diferentes frequências, o que irá permitir o cálculo da velocidade do objeto emissor, como neste caso o trator.
- GPS: Velocidade, localização e posicionamento do trator; esta fabulosa ferramenta esta vastamente sendo aplicada aos principais sistemas instrumentais alocados em máquinas agrícolas, especialmente nas máquinas direcionadas a agricultura de precisão. Comunica-se através da comunicação de um receptor com um conjunto de satélites. Esse equipamento, quando munido de sinal de alta precisão pode perfeitamente ser utilizado como medidor da velocidade real de deslocamento.
- Roda odométrica: Também adotada para medição da velocidade real, esta é construída de forma a se ter uma roda auxiliar munida de sensor de proximidade, para captação de sinais, sem a interferência do patinamento e demais fatores.

- Datalogger: Trata-se de um registrador eletrônico de dados e baseia-se em um processador digital e memórias de armazenamento não volátil, para registrar dados mensuráveis ao longo de um tempo pré-determinado. A aquisição destes dados medidos pelos sensores pode ser obtido através de diferentes tipos de comunicação.
 - Possuem entradas e saídas digitais, analógicas ou específicas para outra determinada aplicação.
 - Possuem uma CPU (Unidade de Processamento Central) para o processamento dos dados.
 - Possuem memória com grande capacidade de armazenamento.
 - Possuem uma taxa de amostragem que permite definir se o intervalo de tempo em que os dados devem ser coletados e processados.
 - Grande precisão na coleta e armazenagem dos dados de entrada e saída, todos individualmente.
 - Diversas portas de comunicação, que permitem a comunicação com outros dispositivos, como um computador ou até mesmo outros registradores eletrônicos de dados.

Um sistema de medição de parâmetros físicos do desempenho de tratores agrícolas depende fundamentalmente, dos tipos de sensores que o constitui. Os sistemas mais habituais, de concepção relativamente simples e normalmente de custo reduzido, desenvolvidos à fácil adaptação em qualquer trator nas diversas condições de trabalho, têm como sensores: um radar, uma célula de carga, um medidor de fluxo e sensores magnéticos de proximidade (SERRANO, 2007).

Além dos sensores é importante que se utilize toda uma estrutura de suporte, incluindo tanques auxiliares para substituição de combustíveis e/ou misturas binárias de diesel com biodiesel. Os tanques além de facilitarem as trocas, ajudam a aumentar a confiabilidade dos dados, reduzindo assim o risco de contaminação entre combustíveis.

Figura 25, é um exemplo de trator instrumentado por pesquisadores das áreas de mecanização agrícola e agroenergia, destinados à avaliação de desempenho com monitoramento constante a campo, por sensores de distintas funções conforme esquema da

Figura 24 (p. 66) e Quadro 3. O objetivo principal da instalação dos equipamentos é monitorar as variáveis de campo, no entanto, ressalta-se que o uso de parte destes, pode perfeitamente ser aplicado em ensaios estáticos.



Figura 25 - Trator instrumentado e ensaiado por Silva (2006), com tanques auxiliares para uso e substituição rápida de diferentes proporções de diesel e biodiesel

2.6 Emissões residuais dos gases de exaustão

Heywood (1988), descreve que a combustão da mistura ar + combustível no interior do motor é um dos processos que controlam a potência, a eficiência e a produção de gases poluentes.

Manavella (2010), explica que os 5 gases mais importantes a nível de emissões e também para o diagnóstico de falhas são:

- HC, Hidrocarbonetos não queimados - Conforme relata, o HC é combustível não queimado na câmara e o nível excessivo de hidrocarbonetos não queimados é resultante de falhas de combustão, ou de mistura ar/combustível não apropriada.
- CO, Monóxido de carbono - É o resultado da combustão incompleta ou parcial do combustível na câmara de combustão, e seu nível é de aproximadamente 0,5% para mistura estequiométrica.

- O₂, Oxigênio - O percentual de oxigênio é um indicador da condição da mistura. Quando o motor está funcionando com pouco combustível a taxa de O₂ cresce, por outro lado, pode indicar ineficiência na combustão.
- CO₂, Dióxido de carbono - É utilizado para determinar o nível de eficiência de funcionamento do motor. Durante o processo de combustão, ocorre a combinação de uma molécula de carbono com duas de oxigênio, e quanto maior a eficiência na combustão, maior será os níveis de CO₂ formados, pois a formação de CO₂ depende da queima total ou não, do combustível.
- NO_x, Óxidos de nitrogênio – Há a formação de NO_x principalmente com motor em carga. Para formação de NO_x, necessita-se de O₂ em excesso e elevadas temperaturas.

Comparado ao óleo diesel derivado de petróleo, o biodiesel pode reduzir em 78% as emissões de gás carbônico, considerando-se a reabsorção pelas plantas. Além disso reduz em 90% as emissões de fumaça e praticamente elimina as emissões de óxido de enxofre (LIMA, 2004).

Como combustível, o biodiesel possui características vantajosas em relação aos combustíveis derivados do petróleo, podendo ser citada a condição de ser virtualmente livre de enxofre e de compostos aromáticos; alto número de cetano; teor médio de oxigênio; maior ponto de fulgor; menor emissão de partículas, HC, CO e de CO₂; caráter não tóxico e biodegradável, além de ser proveniente de fontes renováveis, permitindo que se estabeleça um ciclo fechado de carbono, no qual o CO₂ é absorvido quando a planta cresce, e é liberado quando o mesmo é queimado na combustão do motor. Estudo conjunto realizado pelos Departamentos de Energia e de Agricultura dos Estados Unidos mostra que o biodiesel reduz em 78% as emissões líquidas de CO₂ (YAMAOKA et al., 2003).

Sampaio (2003), comparando as emissões de gases entre o biodiesel e o óleo diesel, encontrou resultados satisfatórios a favor do biodiesel: redução de 58,9% de CO, 8,6% de CO₂, 32% de NO_x e também 57,7% de redução de dióxido de enxofre (SO₂).

De acordo com o Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2003), ao reduzir a poluição, o uso do biodiesel permitiria que se evitassem custos de variada ordem, relacionados principalmente à saúde. A substituição do diesel de origem fóssil pelo biodiesel puro (B100) proporcionaria redução desses custos da ordem de R\$ 192 milhões anuais, nas dez principais cidades brasileiras, e em aproximadamente R\$ 873 milhões, em nível nacional (Tabela 8).

Tabela 8 - Custo da poluição evitados com o uso do biodiesel (R\$ milhões por ano)

% de biodiesel	Dez principais cidades	Brasil
2% (B2)	5,9	27,3
5% (B5)	16,4	75,6
20% (B20)	65,5	302,3
100% (B100)	191,9	872,8

Fonte: MMA (2003).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Para atender aos objetivos deste trabalho, a metodologia pode ser agrupada em três grandes grupos:

Primeiro: Aquisição de dados das variáveis consideradas primárias, representado pela potência, torque, consumo horário de combustível e emissões residuais dos gases de exaustão.

Segundo: Determinação das variáveis secundárias, obtidas a partir da aplicação de fórmulas, onde se calculou a reserva de torque, consumo específico de combustível, eficiência térmica do motor e o consumo energético.

Terceiro: Caracterização energética do biodiesel, dado representado pelo poder calorífico que é empregado para obter os valores de eficiência térmica e consumo energético do motor.

Um ponto importante para avaliação do desempenho e consumo utilizando o biocombustível proposto foi comparar com o óleo diesel (testemunha), sendo que o parâmetro comparativo entre ambos e que lhes emprega característica similar de fornecimento de energia para o motor é o poder calorífico, o qual foi determinado pelo método da bomba calorimétrica, em laboratório terceirizado. Após a determinação, os valores foram comparados com os existentes na literatura, e houve coerência nas informações devido a proximidade dos dados, relatados por Costa Neto et al. (2000); Camargos (2005); Souza et al. (2006); Peres et al. (2009); Peres (2010).

3.1 Local do experimento

Os ensaios foram realizados no laboratório de Agrotecnologia – Agrotec, em anexo ao Núcleo de Ensaios de Máquinas Agrícolas - NEMA, da UFSM, situado às coordenadas geográficas: 29°43' de Latitude Sul e 53°43' de Longitude Oeste. O NEMA foi idealizado em 1986 e oficializado em 1991, com o intuito de realizar ensaios e certificação de máquinas agrícolas. Atualmente conta com uma excelente infraestrutura dinamométrica para avaliação de motores isoladamente, e também o conjunto motor-trator mediante uso da TDP.

3.2 Combustíveis e misturas utilizadas

O biodiesel de óleo de frango foi obtido na planta experimental do Centro de Desenvolvimento e Difusão de Tecnologias – CEDETEC, da Faculdade Assis Gurgacz em Cascavel-PR, obtido através do processo químico de transesterificação pela rota Metílica alcalina. A matéria-prima (óleo) foi doada pela FARIMA - Indústria e Comércio de Subproduto Animal LTDA., da cidade de Tupãssi-PR.

O óleo diesel utilizado foi adquirido no comércio de combustível de Santa Maria-RS, mais especificadamente em um posto da Rede Petrobrás. Na ocasião o combustível adquirido, era comercializado com a mistura compulsória de 5% de biodiesel, B5.

No símbolo que representa as misturas utilizadas, o B significa “*blend*” (mistura em inglês) e o nº representa a quantidade de biodiesel (%). Por exemplo B20, é uma mistura binária com 20% de biodiesel e 80% de óleo diesel.

Para realizar as misturas, considerou-se que os 5% contidos na mistura original do óleo diesel, fossem parte integrante da nova mistura. As misturas adotadas foram:

- B5 (testemunha)
- B20
- B40
- B60
- B80
- B100 (Biodiesel de óleo de frango puro)

A adoção das proporções utilizadas foram assim definidas, em função de se ter uma equidistância entre ambas, possibilitando uma melhor interpretação dos resultados. No texto, onde for possível, será adotado combustíveis como sinônimo de misturas.

Foi necessário determinar as densidades dos combustíveis para realizar os cálculos de consumo específico. Foi utilizado uma balança digital de precisão marca Bel Engineering modelo Mark 2200 (capacidade de pesagem entre 0,5 g e 2200 g), e uma proveta graduada de 1000 ml, tanto para determinação da densidade do biodiesel (B100), quanto o da testemunha, óleo diesel comercial (B5), em 3 repetições. Para calcular a densidade das demais misturas utilizou-se a Equação 9.

$$\rho = \left(\rho_{B5} * \left(\frac{100 - \%_{B100}}{100} \right) \right) + \left(\rho_{B100} * \left(\frac{\%_{B100}}{100} \right) \right) \quad (9)$$

Onde:

ρ - Densidade da mistura ($\text{kg} \cdot \ell^{-1}$);

ρ_{B5} - Densidade medida do B5 ($\text{kg} \cdot \ell^{-1}$);

$\%_{B100}$ - Percentual de B100 na mistura (%);

ρ_{B100} - Densidade medida do B100 ($\text{kg} \cdot \ell^{-1}$);

3.3 Trator e motor de testes

Utilizou-se um trator agrícola Massey Ferguson Modelo 275 4x2 ano 1986 (Figura 26), o qual possui motor quatro tempos, com aspiração natural e injeção direta de combustível (Quadro 4).

Especificações do motor ensaiado	
Marca	Perkins
Modelo	P4000
Número de cilindros	4
Capacidade volumétrica (cm^3)	4100
Aspiração	Natural
Potência máxima (kW)	53
Potência máxima na TDP (kW)	47
Torque máximo (Nm)	289
Rotação máxima (rpm)	2200
Rotação do motor a 540 na TDP (rpm)	1790

Quadro 4 - Especificações técnicas do motor que equipa o trator avaliado

A rotação do motor correspondente a 540 rpm na TDP é de 1790 rpm, em uma relação de transmissão de 3,31:1



Figura 26 - Trator MF 275 submetido aos ensaios de dinamometria e emissões

Embora com bastante uso e ano de fabricação antigo, o modelo faz parte de uma das categorias (75 cv) mais vendidas no Brasil, podendo ser considerado uma amostra dos inúmeros tratores com mais de 20 anos de uso, que ainda são utilizados e fazem parte da frota brasileira de tratores, que segundo o Censo Agropecuário Brasileiro de 2006 (IBGE, 2006; IBGE, 2006 apud ANFAVEA, 2010) é de 788.053 tratores.

3.4 Bancada dinamométrica

O dinamômetro utilizado é do tipo elétrico de correntes parasitas ou correntes de Foucault, fornecido pela fabricante Argentina MWD (Figura 27), modelo NL 480, cujo princípio de funcionamento consiste no acionamento de um rotor pelo motor/trator ensaiado.

O rotor gira imerso em campo magnético, que é controlado através de uma bobina alimentada por corrente contínua, que conforme a intensidade, varia a carga aplicada.



Figura 27 - Visualização lateral do dinamômetro MWD NL 480 utilizado nos ensaios

O manual do fabricante (MWD NL 480, 2010), informa o seguinte princípio de funcionamento: O dinamômetro contém um eixo rotor em aço, dentado (detalhes no Anexo C), que gira imerso em um campo magnético gerado por uma bobina cuja tensão é regulada por um módulo de controle. A potência de saída do motor é absorvida e convertida em calor, pela interação eletro-magnética gerada entre o eixo rotor e o estator (carcaça). O arraste resultante produz uma resistência a rotação, e tende com um esforço igual a girar a carcaça do dinamômetro. A carcaça está impedida de girar pelo sensor de reação de torque (célula de carga), que está fixado por um braço na superfície de apoio do dinamômetro. O equipamento está desenhado para absorver plena potência em qualquer direção de giro.

Em função da aplicação de carga ou frenagem aplicada ao sistema, ocorre o aumento de temperatura do freio, que deve ser atenuada pelo sistema de refrigeração, baseado no fluxo de água que circula no sistema, acionado por bombas hidráulicas. A troca de calor se

completa com a refrigeração da água na torre de resfriamento localizada na parte externa do laboratório.

A instalação do equipamento foi realizada, para ensaios de motores de tratores, mediante acoplamento por uma árvore cardã na TDP (Figura 28). Entretanto é possível ensaiar motores acoplados diretamente no volante, bastando-se instalar um berço para acomodação do motor.



Figura 28 - Dinamômetro NL 480, com visualização do sistema de refrigeração e acoplamento do trator utilizado por árvore cardã

A absorção da potência aplicada pelo motor é calculada pelo software Accudyno, que fornece os dados a partir da rotação do motor e força aplicada à célula de carga. O equipamento possui sensores que captam dados do ambiente e assim fornecem os valores de potência e torque corrigidos conforme norma ISO 1585. As Equações 10 e 11 são as aplicadas para o cálculo de potência. As especificações do modelo encontram-se no Quadro 5, e maiores detalhes nos Anexo C, e D.

$$P = \frac{(T * n)}{716,2} \quad (10)$$

$$P = \frac{(T * n)}{974} \quad (11)$$

Onde:

P – Potência

T – Torque (kgfm)

n – Rotação do motor (rpm)

716,2 - Fator de conversão, para expressar potência em cv

974 – Fator de conversão para expressar potência em kW

Especificações do dinamômetro	
Princípio de frenagem	Correntes parasitas
Potência máxima	750 cv @ 1800 rpm
Rotação máxima	4800 rpm
Torque máximo	300 kgm
Refrigeração	Circulação de água
Peso aproximado	1500 kg
Software	Accudyno
Controle de carga	Manual

Quadro 5 - Especificações técnicas do dinamômetro NL 480

Fonte: Manual do fabricante (MWD NL 480, 2010).

A Figura 29 mostra o software no vídeo do computador, e quais informações podem ser visualizadas pelo operador durante os ensaios.

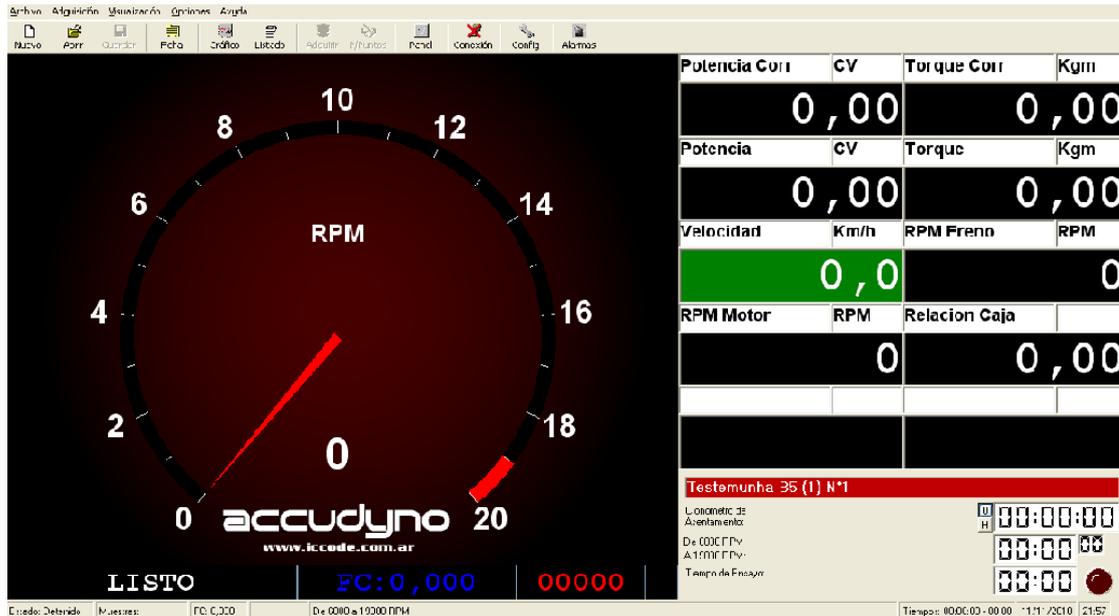


Figura 29 - Tela de visualização do software Accudyno para controle do dinamômetro

3.5 Instrumentação utilizada

Para determinação do consumo de combustível, utilizou-se um medidor de vazão da fabricante Japonesa Oval Corporation, modelo FLOWMATE OVAL M-III LSF41L0-M2, alimentado por corrente contínua (12~24 V), faixa de temperatura de trabalho entre -20 e 80°C e vazão permitida de 1 a 100 l.h^{-1} . O princípio de funcionamento consiste em contabilizar a quantidade de volume de combustível por unidade de tempo. Neste caso, o fluxômetro é munido de duas engrenagens ovais que ao completarem uma volta, deslocam 1 ml de combustível e gera um pulso elétrico. O fluxômetro foi instalado entre um filtro de malha 200 e uma válvula de retenção (Figura 30). Detalhes do dimensionamento do dispositivo estão apresentados no Anexo E.



Figura 30 - Medidor de fluxo utilizado na determinação do consumo horário de combustível

Os pulsos gerados durante os ensaios são enviados para um registrador de dados (datalogger ou central de aquisição de dados), onde os pulsos são convertidos em dados numéricos e posteriormente armazenados.

O equipamento utilizado consiste em um registrador eletrônico de dados marca Campbell Scientific, modelo CR 1000. Esse equipamento possui uma capacidade de armazenamento de 4 Mb, com 16 canais analógicos e 2 canais de pulso. O sistema de alimentação de energia varia de 9,6 a 16 volts, embora o indicado seja 12 volts, sem oscilação. O equipamento foi montado e programado por Russini (2009) e conta com uma instalação elétrica para recebimento de vários tipos de sensores, detalhado no Apêndice B. Os dados são transferidos para o computador em formato de planilha (Apêndice A).

Para uma melhor compreensão, utilizar-se-á o termo “registrador de dados” como sinônimo de datalogger, e assim favorecer a leitura e a adequação da língua estrangeira para a língua portuguesa.

3.6 Tanques auxiliares de combustíveis

Uma preocupação no tocante à precisão dos dados deteve atenção no quesito a “troca dos combustíveis”. Para não haver contaminação entre ambos, optou-se por utilizar dois

tanques auxiliares de 4 litros cada um (Anexo F), com sistema de esgotamento e de válvulas direcionadoras de fluxo, apresentado na (Figura 31). Foi confeccionado de forma a possibilitar trocas rápidas dos combustíveis, permitindo que as baterias de ensaios fossem feitas rapidamente, e todas no mesmo dia (05/10/2010).

Quando o fluxo estava aberto para o tanque auxiliar 1 (conforme esquema da Figura 32), esgotava-se o tanque 2 substituindo na seqüência pelo próximo combustível a ser posto em prova. Após substituição deixava-se o motor operando por 5 minutos em carga média, consumindo assim o combustível anterior que estava no circuito.

Ainda para que não ocorresse a contaminação entre misturas, optou-se por utilizar um filtro de combustível externo, permitindo, desta forma, o isolamento dos filtros originais do trator.



Figura 31 - Imagem dos dois tanques auxiliares utilizados

Para permitir que houvesse a instalação e ligação dos tanques auxiliares e também do medidor de fluxo, foi necessário alterar o circuito original de combustível. Assim sendo o

tanque original foi isolado e o retorno de combustível redirecionado em função da disponibilidade de apenas um medidor de fluxo.

O retorno do combustível oriundo da bomba injetora e dos bicos injetores não deve retornar aos tanques, sendo conduzido para ser novamente bombeado através de uma ligação realizada após o fluxômetro. Desta forma, o combustível é forçado a ser consumido, não passando novamente pelo medidor. Com essa modificação, a pressão interna do sistema de injeção aumenta e faz com que o combustível involuntariamente faça o caminho oposto em direção ao medidor de fluxo. O problema é solucionado colocando-se uma válvula anti-retorno e assim evitar o fluxo inverso. O esquema da Figura 32 melhor detalha as ligações.

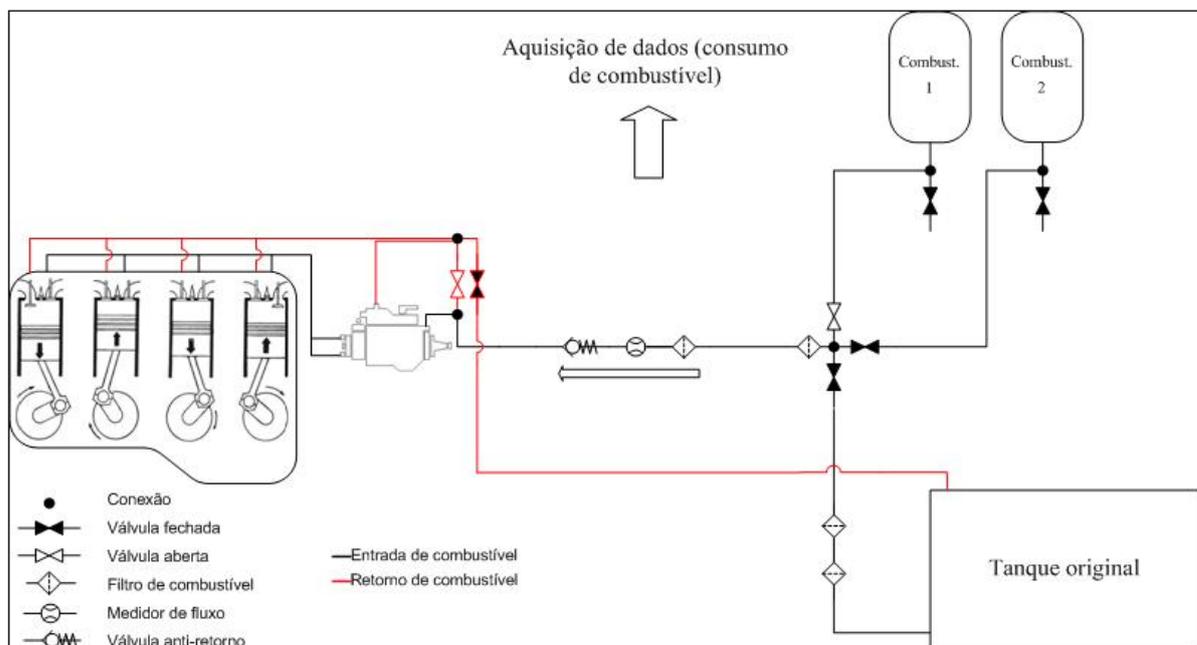


Figura 32 - Esquema de ligações do circuito de combustível

3.7 Analisador de gases

Utilizou-se o modelo Discovery G4 da Alfatest, o qual por meio de uma sonda introduzida na saída do escapamento do motor capta parte dos gases e conduz de forma forçada para o sistema de leituras.

Os gases captados são separados da água por meio de filtros, e são em seguida dirigidos ao banco de medição. Um fecho de luz de raios infravermelho, gerado por um transmissor, é enviado através dos filtros óticos para os elementos de medição (ALFATEST, 2010).

As variáveis analisadas foram monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), presença de oxigênio (O₂) e hidrocarbonetos não queimados (HC).

A avaliação de NOx, muito importante quando se trabalha com biodiesel, não foi realizada em função do equipamento não estar preparado para tal. O fabricante do medidor de gases utilizado oferece a medição de NOx como opcional, e não estava disponível no momento da utilização.

Antes da aquisição dos dados, o equipamento necessita ser preparado para registrar os valores correspondentes a cada variável, neste caso, cada mistura. Informa-se o grupo (ex. trator, motor, modelo...) e subgrupo (combustível, lubrificante...), os quais serão selecionados no momento nos ensaios e armazenados no banco de medições. A Figura 33 demonstra a interface gráfica do software Discovery utilizado para captação dos gases.



Figura 33 - Interface gráfica do software Discovery G4, utilizado para fornecimento e controle dos dados dos gases captados na exaustão

3.8 Delineamento experimental (tratamentos)

Adotou-se do método experimental em delineamento inteiramente casualizado (DIC), que de acordo com Storck et al. (2004), é utilizado quando as unidades experimentais (UE) são essencialmente uniformes ou homogêneas, isto é, a variação entre as UE é irrelevante. A homogeneidade é exigida no tocante ao material, ao ambiente, aos tratos culturais (no caso de ensaios com plantas) ou a qualquer operação realizada no experimento, o único componente que pode variar, deliberadamente, de uma UE para outra são os tratamentos.

Os tratamentos adotados foram:

- Variação da mistura de óleo diesel-biodiesel sendo os tratamentos: B5 (Testemunha), B20, B40, B60, B80 e B100 (biodiesel de óleo de frango puro).
- Variação da carga imposta ao motor pelo dinamômetro (de 1200 a 2100 rpm).

Os Fatores de avaliação nos ensaios foram:

- Fatores de avaliação direta (primários): Consumo horário, potência, torque e emissões residuais.
- Fatores de avaliação calculados (secundários): Reserva de torque, Consumo específico, eficiência do motor e consumo energético.

Estatisticamente as médias resultantes dos fatores avaliados, foram analisadas no programa estatístico Sisvar - Sistema de Análise de Variância versão 5.1, 2007. O Software em questão foi desenvolvido pelo Professor Dr. Daniel Furtado Ferreira, da Universidade Federal de Lavras (UFLA). Os dados foram submetidos à análise de variância, e as medias foram ajustadas por equações de regressão.

3.9 Dados obtidos

As principais variáveis obtidas foram torque e potência do motor em dinamômetro. O equipamento utilizado usa um fator de correção exigido pela norma ISO 1585, fator este,

baseado na temperatura, umidade e pressão ambiente que são obtidos por sensores ligados ao sistema de aquisição de dados do próprio dinamômetro.

A metodologia de ensaio adotada, contemplou uma faixa de rotação de 2200 (rotação máxima) a 1200 rpm, a qual é restringida pelas características do motor ensaiado, que tem seu torque máximo entre 1200 e 1300 rpm e potência máxima a 1900 rpm. Os dados de 2200 rpm não foram utilizados na interpretação dos resultados, por apresentarem valores pouco relevantes.

O software Accudyno é responsável por informar as condições das variáveis durante os ensaios, e registrar os dados para posterior tratamento. Uma interface gráfica é gerada pelo software permitindo ao operador a visualização no computador utilizado para controle (Figura 34).



Figura 34 - Tela de visualização do programa registrador de dados na sala de controle

A intensidade de carga aplicada é controlada de forma manual em dois potenciômetros localizados no módulo de controle, sendo um para ajustes mais grosseiros (iniciais) e outro para o ajuste fino de carga (Figura 35).



Figura 35 - Módulo de comando CT03F, para controle manual de carga/frenagem

O tempo de obtenção de dados foi em torno de 4 minutos por repetição, perfazendo um acúmulo de dados de aproximadamente 22 segundos por faixa de rotação, tempo suficiente para registrar de forma confiável uma grande quantidade de dados. A média de cada variável foi calculada posteriormente durante o tratamento dos dados no Microsoft Excel®.

Outro dado obtido, o consumo horário, foi adquirido de forma volumétrica utilizando o fluxômetro de engrenagens ovais, com coleta de dados de 2 em 2 segundos. Como já comentado, o deslocamento de combustível nas engrenagens é de 1 ml por volta, gerando um pulso elétrico que é enviado e armazenado no registrador de dados CR 1000. A programação para captação de pulsos e conversão em consumo horário foi realizada com a utilização da Equação 12.

$$\text{Chv} = \left(\frac{\text{Pul} * \left(\frac{60}{\text{tc}} \right) * 60}{1000} \right) \quad (12)$$

Onde:

Chv - Consumo horário volumétrico ($\ell \cdot h^{-1}$);

Pul – N° de pulsos gerados pelo fluxômetro na alimentação de combustível;

60 – Constante de conversão para minutos e horas;

t_c - Tempo de captação dos pulsos (s, neste caso 2 s);

1000 – Constante de conversão para transformação de ml h^{-1} em $\ell.\text{h}^{-1}$;

Russini (2009) utilizou a mesma metodologia e teve bons resultados na medição de consumo de combustível com a captação de pulsos programada para cada 2 segundos.

Os dados armazenados no registrador de dados foram transferidos para um computador portátil (que também é utilizado para a programação e acompanhamento da obtenção de dados quando necessário), e após exportados para uma planilha do Microsoft Excel[®], onde foram filtrados e tratados para determinação das médias. O tempo de cada repetição foi medido durante a obtenção de dados, e a separação do consumo em cada faixa de rotação, de acordo com a medição do tempo durante aplicação de carga no dinamômetro, que em média foi de 22 segundos por rotação.

Para melhor entender sobre a metodologia anteriormente citada, e também para facilitar a obtenção de dados durante os ensaios, elaborou-se um roteiro, para sincronização dos dados fornecidos pelo dinamômetro (torque e potência) e aqueles registrados para consumo.

1º - Anotou-se a hora em que se começou a aplicação de carga no dinamômetro, sendo esta sincronizada com o registrador de dados, que iniciava a captação de pulsos no mesmo instante;

2º - Mediu-se o tempo de carga em cada rotação (segundos), lembrando que o dinamômetro é operado de forma manual, não tendo programação prévia automática, para aplicação de carga, assim cada faixa de rotação não recebeu exatamente o mesmo tempo, sendo essa informação corrigida com aplicação do cálculo de médias.

3º - Anotou-se a hora em que terminou a repetição, encerrando-se a obtenção de dados;

4º - Armazenava-se no computador de controle do dinamômetro, os dados de forma separada para cada tratamento e cada repetição, e na memória do registrador de dados, estes eram armazenados de forma contínua, sendo separados posteriormente, utilizando-se como base para tal, os tempos de cronometragem.

É importante salientar que o controle de rotação foi realizado pelo próprio dinamômetro, iniciando-se em 2200 rpm, sendo reduzido pelo controle manual com a aplicação de carga, ou o mesmo que frenagem do motor, até 1200 rpm.

3.10 Procedimentos de cálculo para variáveis calculadas

Para a determinação do consumo específico utilizou-se a Equação 13.

$$C_s = \frac{\rho * Chv}{P} * 1000 \quad (13)$$

Onde:

C_s - Consumo específico ($g.kWh^{-1}$);

ρ - Densidade do combustível ($Kg.l^{-1}$);

Chv - Consumo horário volumétrico ($l.h^{-1}$);

P - Potência do motor (kW);

1000 - Fator de conversão de kg para g;

O cálculo da reserva de torque foi realizado pela Equação 14.

$$\Delta T = \frac{(T_m - T_n)}{T_n} * 100 \quad (14)$$

Onde:

ΔT - Reserva de torque (%);

T_m - Torque Máximo (Nm);

T_n - Torque a potência máxima (Nm);

Na análise do conteúdo energético do biodiesel (realizado por empresa terceirizada), encontrou-se um PCS de $39,97 MJ.kg^{-1}$ ($9553,03 kcal.kg^{-1}$), e um PCI de $39,30 MJ.kg^{-1}$ ($9386,64 kcal.kg^{-1}$).

O consumo energético foi determinado mediante uso da Equação 15.

$$C_{EN} = Chv * \rho * PCI \quad (15)$$

Onde:

C_{EN} - Consumo energético ($MJ.h^{-1}$);

Chv – Consumo horário volumétrico ($\ell.h^{-1}$);

ρ – Densidade do combustível ($Kg.\ell^{-1}$);

PCI – Poder calorífico inferior ($MJ.kg^{-1}$);

A eficiência térmica do motor é um fator que pode ser calculado de várias formas, porém adotou-se a Equação 16 adaptada de Heywood (1988), para obter os resultados.

$$\eta = \frac{3600}{C_s * PCI} * 100 \quad (16)$$

Onde:

η – Eficiência térmica do motor (%);

C_s – Consumo específico de combustível ($g.kWh^{-1}$);

PCI – Poder calorífico inferior ($MJ.kg^{-1}$);

3600 – Constante de conversão de unidades;

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi necessário determinar a densidade e o poder calorífico inferior dos combustíveis (Tabela 9), para na seqüência usar os valores encontrados para efetuar os cálculos referentes às variáveis secundárias ou indiretas.

Tabela 9 - Percentual de biodiesel, densidade e poder calorífico inferior das misturas utilizadas

Símbolo	% de biodiesel	Densidade (kg.ℓ ⁻¹)	PCI (MJ.kg ⁻¹)	Forma de determinação
B5	5	0,837	45,85	medido
B20	20	0,845	44,54	calculado
B40	40	0,854	43,23	calculado
B60	60	0,863	41,92	calculado
B80	80	0,871	40,61	calculado
B100	100	0,880	39,30	medido

Antes de discutir os dados separadamente, é necessário um comentário acerca das variáveis analisadas, de forma agrupada. Na Figura 36 estão alocados os dados de potência máxima (P_m) e torque máximo (T_m). Com apenas uma exceção (B40 melhor que B20 para T_m), o incremento do teor de biodiesel na mistura foi desfavorável para geração de torque máximo, tendo o maior valor (245,33 Nm) com a testemunha B5. A potência máxima foi afetada com menos intensidade, sendo que até a proporção B40, os valores se mantiveram praticamente estáveis tendo os melhores resultados com B20, (44,10 kW). A rotação de potência máxima se manteve em 1900 rpm com todas as misturas utilizadas e em todas as repetições.

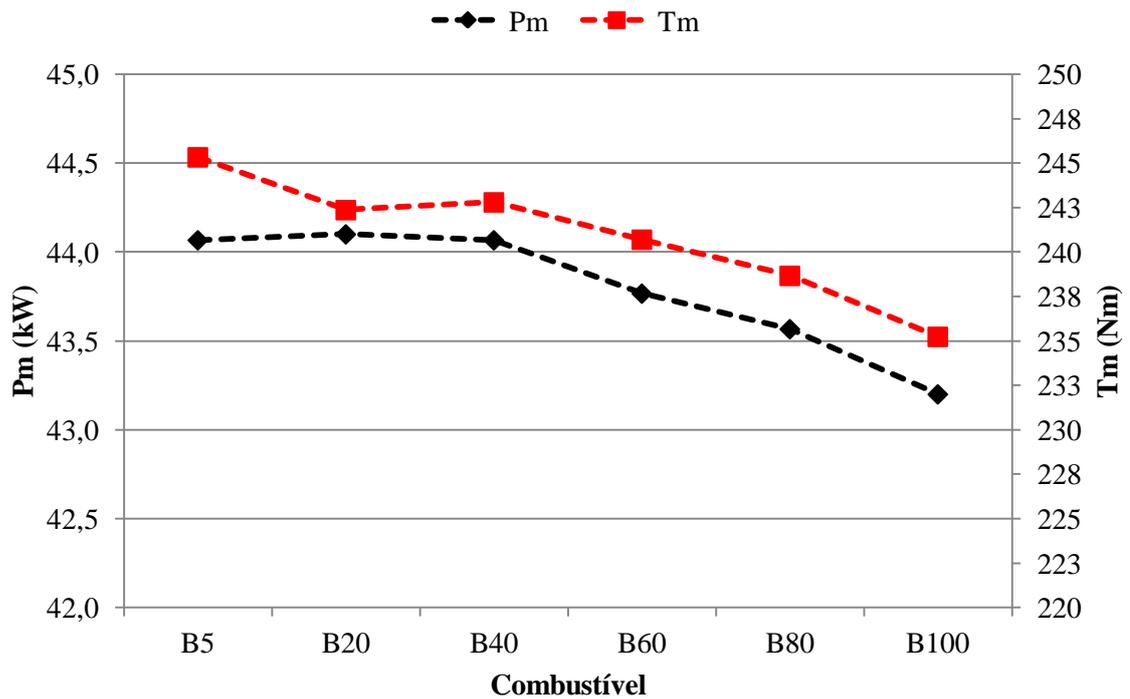


Figura 36 - Variação do torque e potência máxima na TDP, de acordo com o combustível

Na Figura 37 estão concentrados os dados médios de potência e torque em todas as faixas de rotação, onde é possível verificar o comportamento das curvas com cada Combustível. Examinando-se os as curvas, nota-se que o torque máximo se encontra próximo a 1200 e 1300 rpm, tendendo a cair a partir de 1400 rpm. Já a potência máxima concentrou-se em 1900 rpm. No Apêndice C consta um dos gráficos originais de potência e torque, gerado pelo software AccuDyno durante os ensaios no dinamômetro.

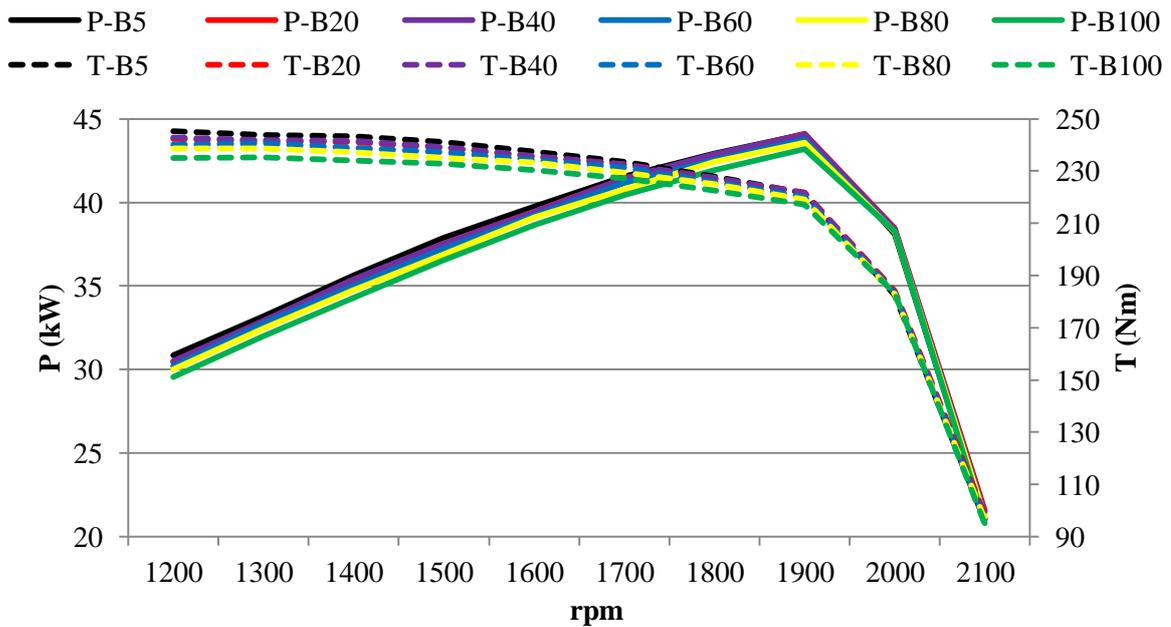


Figura 37 - Potência e torque na TDP em todas as faixas de rotação do motor com cada combustível utilizado

Os resultados mais satisfatórios no que diz respeito ao desempenho e emissões foram constatados com o uso do B20, estando o B100 com os piores resultados. Assim sendo e também para facilitar a leitura tendo uma melhor compreensão dos dados, a análise isolada de cada variável de estudo, será feita comparando os dois extremos, testemunha (B5) e o biodiesel na forma pura (B100), mais o B20.

4.1 Potência

Considerada uma das informações mais importantes de um motor, principalmente em situações comerciais, onde um dos requisitos que norteia o valor de aquisição da máquina é justamente a potência do motor.

O melhor resultado de potência máxima foi com B20 (44,10 kW). O B5 está praticamente igual ao B20 com 44,07 kW, e operando com B100 a potência máxima foi de 43,20 kW.

O maior afastamento das curvas, está entre 1200 e 1900 rpm, sendo que em 2000 rpm a potência é praticamente a mesma para os três combustíveis, aproximadamente 38 kW (Figura 38). Para os demais combustíveis, as curvas tiveram o mesmo comportamento, perdendo potência na medida em que se foi incrementado biodiesel, sendo menos afetado em 2000 rpm (Apêndice D).

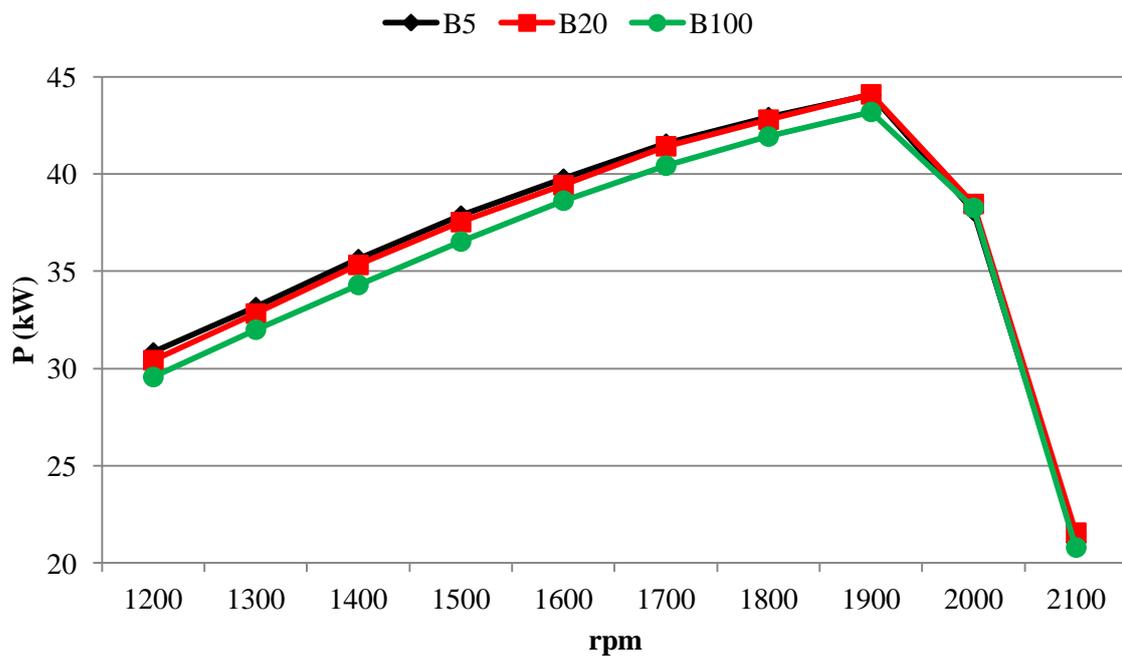


Figura 38 - Potência desenvolvida na TDP para B5, B20 e B100 entre 1200 e 2100 rpm

Considerando as médias de cada combustível, nas rotações de 1200 a 2100 rpm, observou-se significância ($P < 0,01$), com ajuste linear decrescente de B5 a B100, para o desenvolvimento de potência máxima, de acordo com a Figura 39.

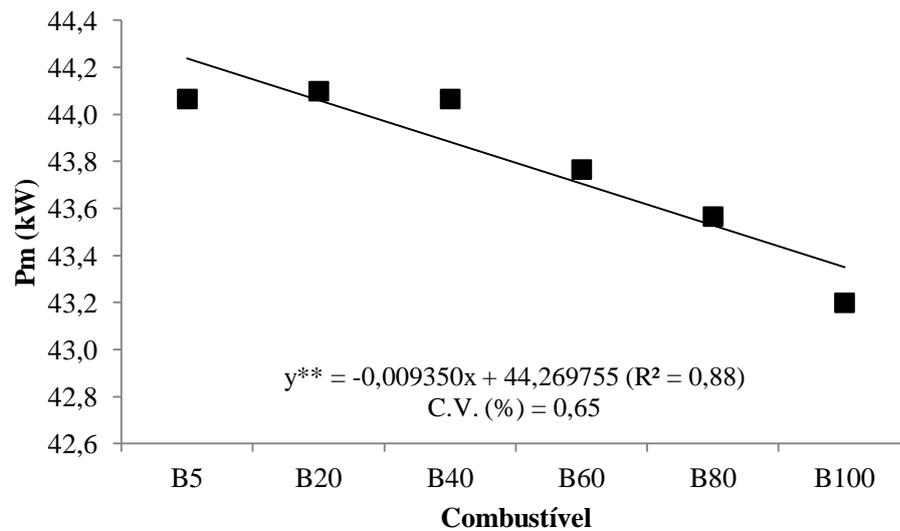


Figura 39 - Potência máxima para cada combustível avaliado (regressão)

** $P < 0,01$

Embora os dados da potência máxima com cada combustível, já tenham sido mostrados na figura anterior, foi necessário expô-los novamente na Tabela 10, onde se verifica os dados numéricos da potência máxima em kW e cv, e a diferença percentual de cada combustível, comparados com a testemunha. Com B100 o motor teve menor desenvolvimento de potência, estando apenas 2,01% abaixo da testemunha.

Tabela 10 - Maiores valores e diferença percentual da geração de potência máxima na TDP para todos os combustíveis

Combustível	Nm (kW)	Diferença (%)*	Nm (cv)
B5	44,07	0,00	59,92
B20	44,10	0,07	59,96
B40	44,07	0,00	59,92
B60	43,77	-0,69	59,51
B80	43,57	-1,15	59,24
B100	43,20	-2,01	58,74

* Calculado com relação à testemunha ($Nm_{B5}/Nm_{Bxx} * 100$)

Alguns autores (COSTA & OLIVEIRA, 2006; SILVA, 2006; MACHADO, 2008; CUNHA, 2009) citam que não há perda significativa de potência em função do uso de biodiesel e que a maior alteração é o consumo. Cunha (2009) utilizando um motor 4 cilindros de 44 kW, acoplado a um dinamômetro com biodiesel de óleo de frango, também encontrou o melhor resultado para B20 e verificou que a geração de potência não foi afetada pela adição de biodiesel, independente da proporção.

4.2 Torque e reserva de torque

O Torque é uma premissa para se calcular a potência do motor, desta forma o afastamento ou proximidade das curvas em cada ponto (torque x rotação) foi similar e possui a mesma interpretação do item anterior, podendo ser verificado na Figura 40 e Apêndice E.

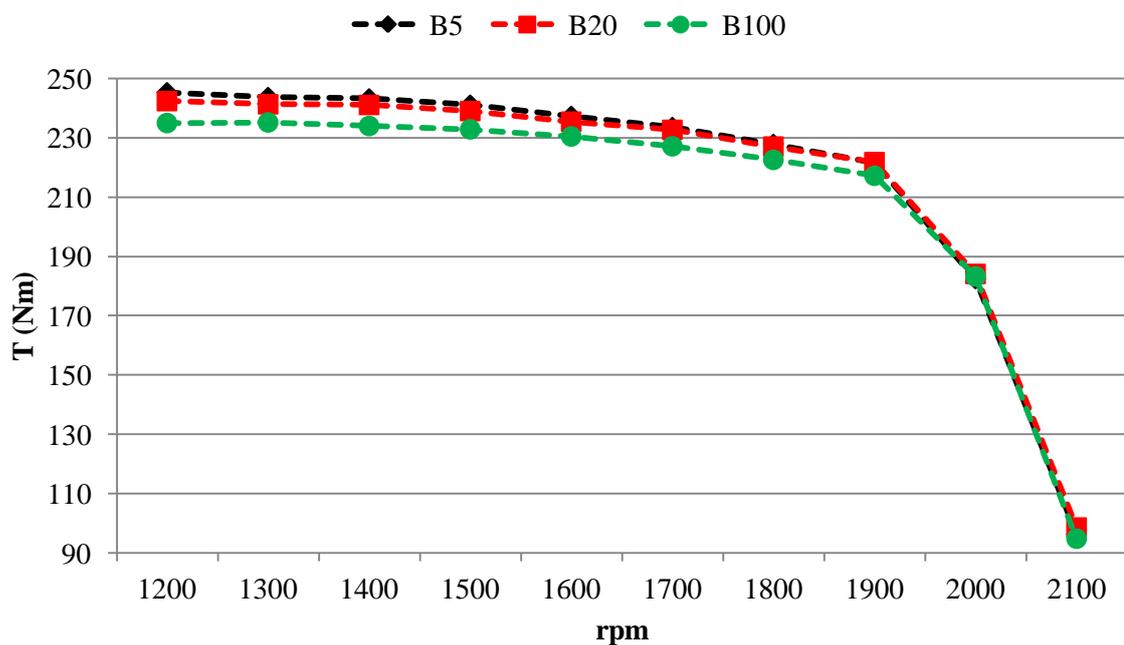


Figura 40 - Torque desenvolvido na TDP para B5, B20 e B100 entre 1200 e 2100 rpm

Analisando-se os melhores resultados de torque máximo e nominal para todos os combustíveis utilizados, verifica-se que o aumento da proporção de biodiesel de óleo de

frango é prejudicial para o desenvolvimento de torque no motor. O maior decréscimo se dá principalmente a partir da mistura proporcional a 60% de biodiesel, de acordo com as Figura 41 e Figura 42.

As misturas B60, B80 e B100, tiveram uma maior estabilidade do torque nas duas menores rotações, havendo inclusive o deslocamento do torque máximo para 1300 rpm (Figura 41). O torque máximo é desenvolvido em rotações onde há uma melhor combinação entre o escoamento de ar (comburente), injeção de combustível, e tempo de combustão, favorecendo a liberação de energia e conseqüentemente, desenvolvendo maior força sobre o pistão, e maior torque no eixo/volante do motor. Uma característica dos combustíveis diesel que está relacionado com eficiência de queima dos mesmos é o N° de cetano (NC). Quanto maior o valor do NC, maior é a qualidade de ignição do combustível, favorecendo a combustão na câmara do motor.

Os resultados encontrados, onde verificou-se que a partir de B60 o torque máximo se deslocou de 1200 para 1300 rpm, se deve justamente ao fato de que o biodiesel possui um NC maior que o óleo diesel, permitindo assim, que se consiga obter maior desenvolvimento de torque em rotações mais altas.

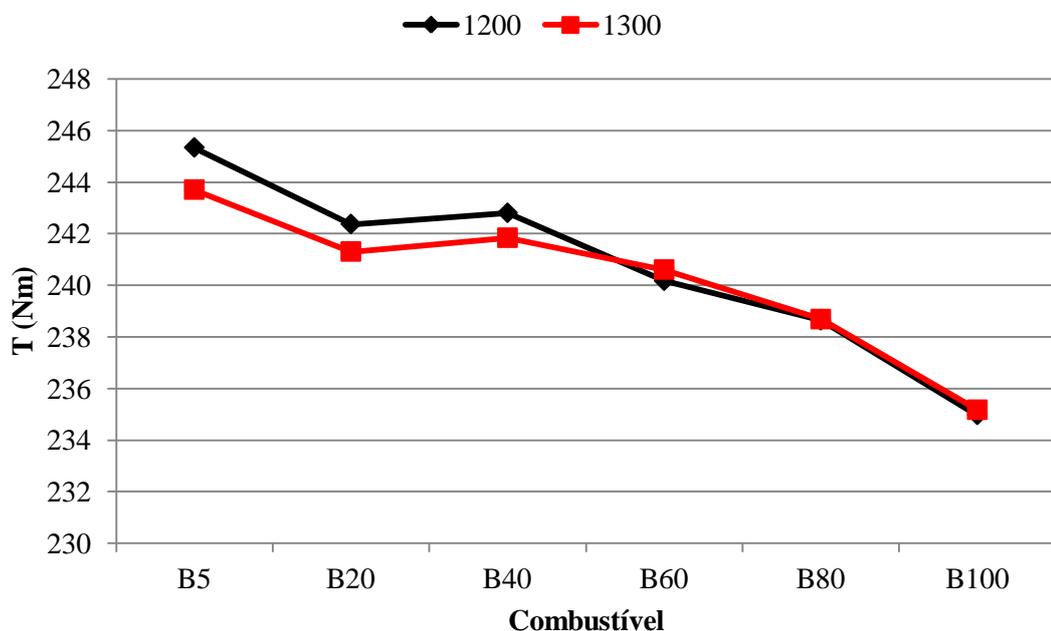


Figura 41 - Torque desenvolvido na TDP em 1200 e 1300 rpm para todos os combustíveis

Para um motor ter no mínimo uma reserva de torque razoável, deve estar entre 10 e 15% conforme relatado por Mialhe (1996). Os resultados médios resultaram em valores que somente operando com óleo diesel B5 é que foi possível manter dentro da classificação sugerida por Mialhe, com um valor de 10,69%. Com as demais misturas, todas ficaram abaixo de 10% tendendo a uma redução de reserva de torque pelo motor, conforme o aumento da proporção de biodiesel de óleo de frango na mistura (Figura 42).

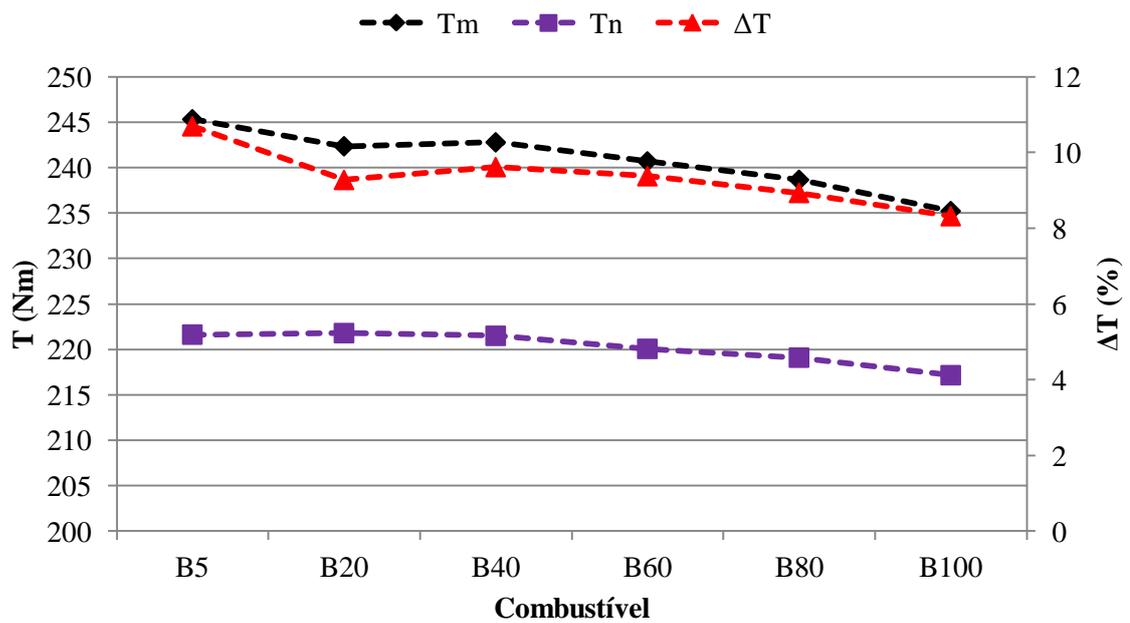


Figura 42 - Curvas dos melhores resultados para torque máximo, nominal e reserva de torque de acordo com o combustível

Como era esperado, o comportamento do torque máximo teve a mesma tendência da potência máxima, ou seja, observou-se ajuste linear decrescente ($P < 0,01$), desenvolvendo menos torque conforme aumento da proporção de biodiesel. O mesmo acontece com a reserva de torque, que é um fator calculado de acordo com torque máximo e nominal do motor (Figura 43).

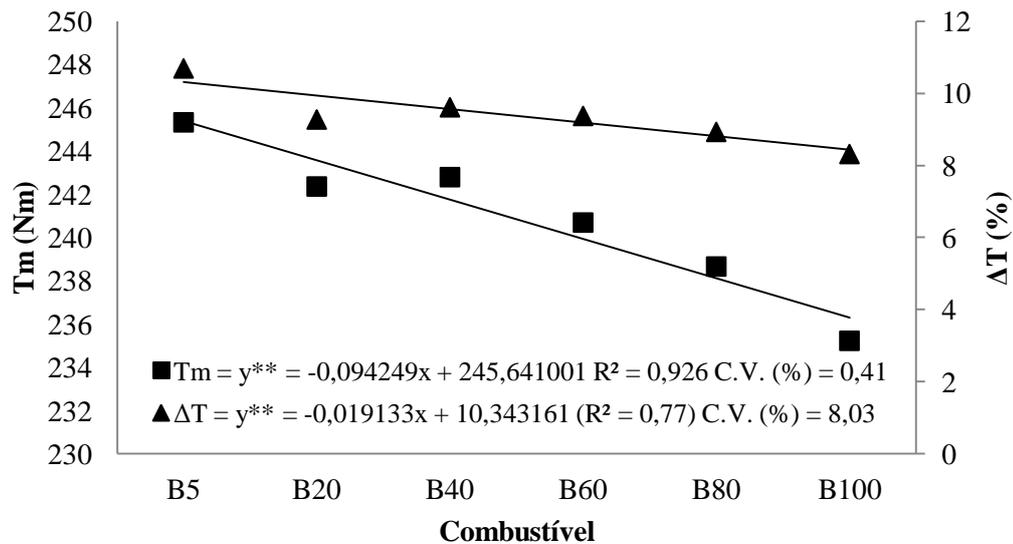


Figura 43 - Torque máximo e reserva de torque para cada combustível avaliado (regressão)
 ** $P < 0,01$

A queda do torque máximo é similar aos resultados encontrados por Machado (2008), Volpato (2009) e Costa & Oliveira (2006), os quais relatam a redução em função do uso de biodiesel.

4.3 Consumo de combustível

Talvez uma das principais variáveis a ser analisada, o consumo de combustível, horário e específico, representa um fator que é balizador de muitas tomadas de decisão. Uma tomada de decisão que muito é buscada quando se avalia misturas de dois combustíveis, é justamente qual mistura representa o melhor consumo, ou em muitos casos o melhor custo benefício.

Na Figura 44 têm-se o gráfico que representa o consumo horário volumétrico (Ch_v) e específico (C_s) das misturas B5, B20 e B100, onde verifica-se desvantagens para o uso de biodiesel puro. Disponível para visualização do comportamento de todas as misturas no Apêndice F e Apêndice G.

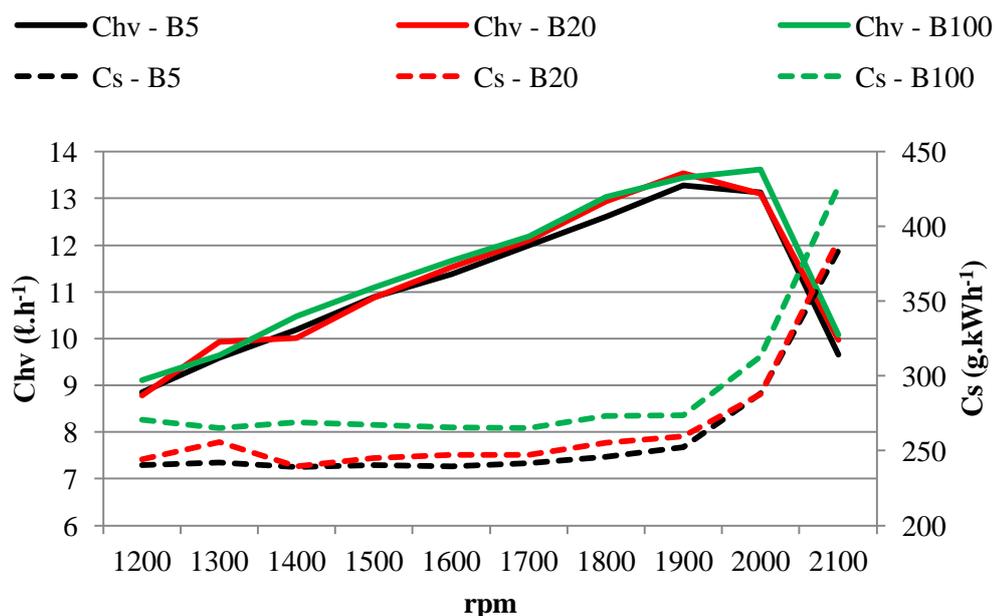


Figura 44 - Consumo horário volumétrico e específico para B5, B20 e B100 por faixa de rotação

O Chv com B100 foi maior em praticamente todas as rotações, no entanto um valor controverso foi identificado justamente na rotação de potência máxima (1900 rpm), rotação que é muito empregada em diversas operações agrícolas. Como era esperado o Chv do B5 teve os melhores resultados sendo levemente acompanhado pelo B20, que principalmente nas faixas intermediárias de rotação teve resultados piores que o B5.

Outra hipótese comprovada foi o aumento do consumo específico de combustível, com o aumento da proporção de biodiesel na mistura, voltando a apresentar resultados negativos para o biodiesel, quando utilizado de forma pura (B100). A diferença de C_s entre o B5 e o B100 foi de $27,64 \text{ g.kWh}^{-1}$, ou o mesmo que 9,56% a mais, concordando com os estudos de Machado (2008) e Nietiedt (2010), que detectaram um consumo específico superior do B100 de 10% e 11,32% respectivamente.

O C_s teve a mesma tendência em ser prejudicado com a utilização do B100, assim como o B20 que embora tenha apenas 20% de teor de biodiesel, ficou igual ou em desvantagem quando comparado com o B5.

Na Figura 45 estão alocadas as médias de consumo horário e específico, bem como os menores valores deste último, onde pode-se verificar a tendência ao aumento do consumo com o aumento da proporção de biodiesel.

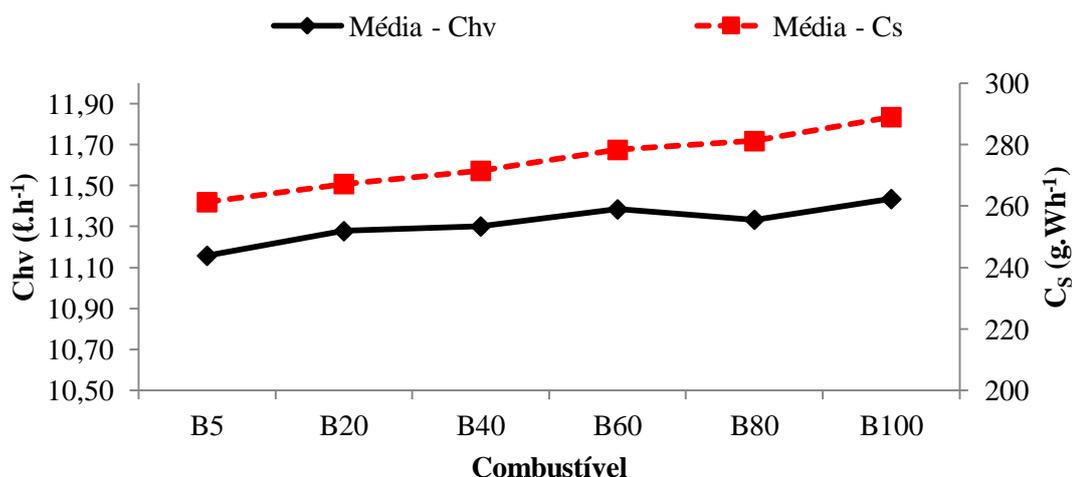


Figura 45 - Valores médios de consumo horário e específico e menor valor de consumo específico para cada combustível

O comportamento do consumo se apresenta de forma oposta a redução do poder calorífico, ou seja, maior é o consumo de combustível, volumétrico e específico, quanto menor for o conteúdo de energia no combustível. Confirmando o pressuposto, observou-se efeito linear crescente ($P < 0,01$) em sentido ao aumento de biodiesel na mistura, identificado na Figura 46.

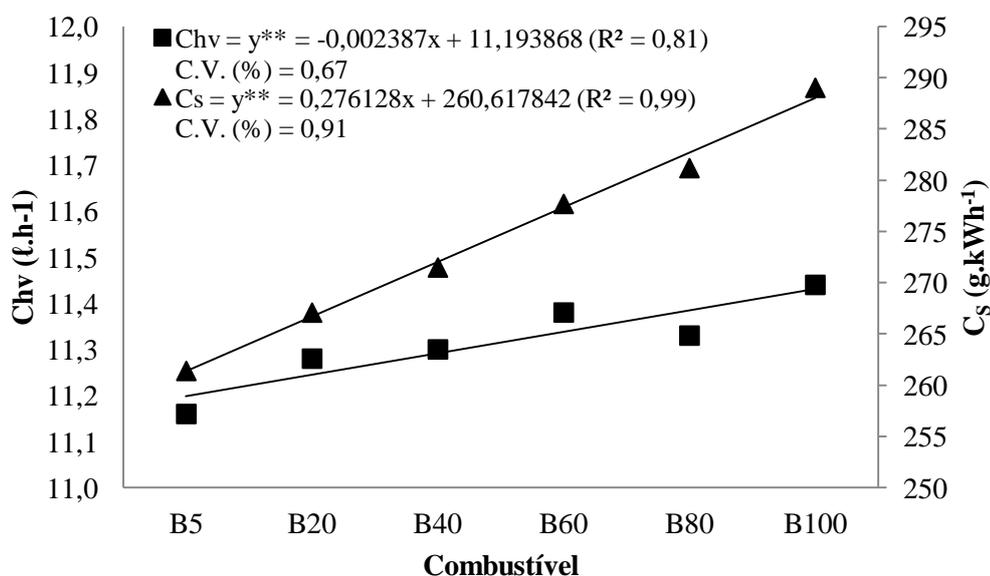


Figura 46 - Médias de consumo horário e específico para cada combustível (regressão)
** $P < 0,01$

4.4 Eficiência do motor

Ao considerar-se que o conteúdo energético dos combustíveis é diferente e tendem a diminuir em função do aumento de biodiesel na mistura, e que este dado é uma premissa para se calcular a eficiência do motor, obteve-se nos ensaios os seguintes resultados:

- Aumento da eficiência do motor em função do aumento da proporção de biodiesel na mistura, semelhante aos estudos de Barbosa (2008);
- Acréscimo na eficiência do motor de 5,19%;
- A máxima eficiência foi obtida nas faixas de rotação entre 1200 e 1700 rpm;

As curvas que representam a eficiência térmica do motor em cada rotação estão na Figura 47 (B5, B20 e B100) e no Apêndice H.

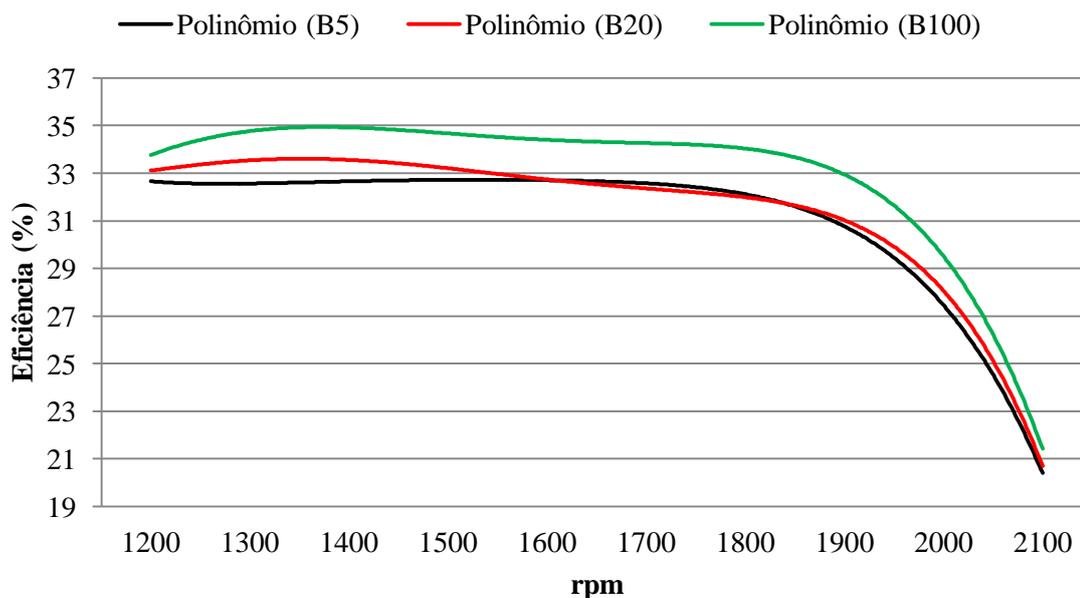


Figura 47 - Eficiência do motor considerando os dois extremos e B20

Como se observa na Figura 48, o aumento da eficiência do motor no sentido em que se tem maiores teores de biodiesel, apresentou efeito linear crescente ($P < 0,01$). O motor partiu de 30,67% com a testemunha (B5) para 32,35% com B100.

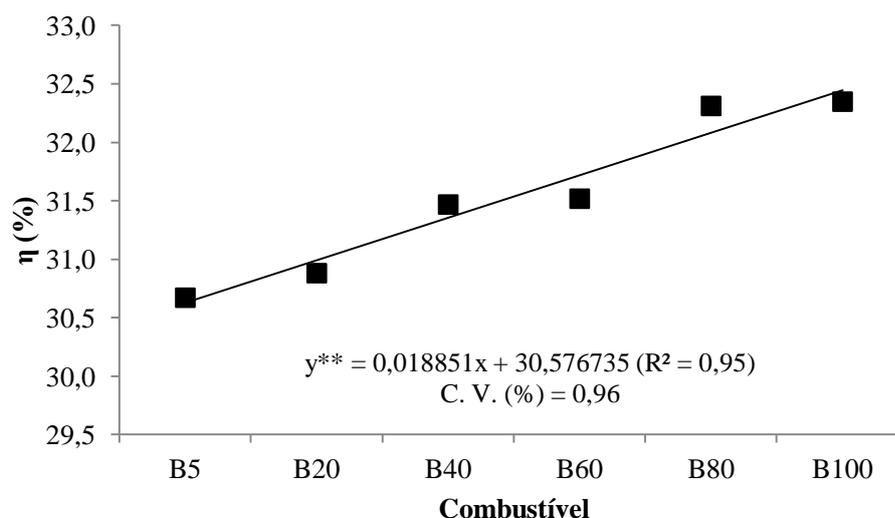


Figura 48 - Eficiência térmica do motor para cada combustível (regressão)

** P<0.01

4.5 Consumo energético

O consumo energético é um parâmetro de avaliação que permite informar a quantidade de energia que o motor está consumindo por unidade de tempo ($\text{MJ}\cdot\text{h}^{-1}$) ou, quantidade de energia contida no combustível por unidade de energia útil liberada, ou gerada (MJ kWh^{-1}). Esse parâmetro expressa resultados que por si só, explicam o comportamento do motor com cada combustível no quesito eficiência térmica.

O tópico anterior foi calculado para verificar a eficiência térmica do motor, que está diretamente ligado ao conteúdo energético do combustível ou como em questão, o conteúdo de cada mistura utilizada. Verificou-se que a eficiência foi superior quando operando com B100 e o aumento da proporção foi favorável ao rendimento térmico do motor. A Figura 49 mostra que o B100 onde se tem menor quantidade de energia, o consumo desta é menor, sendo então mais eficiente. A indicação para todas as misturas está no Apêndice I.

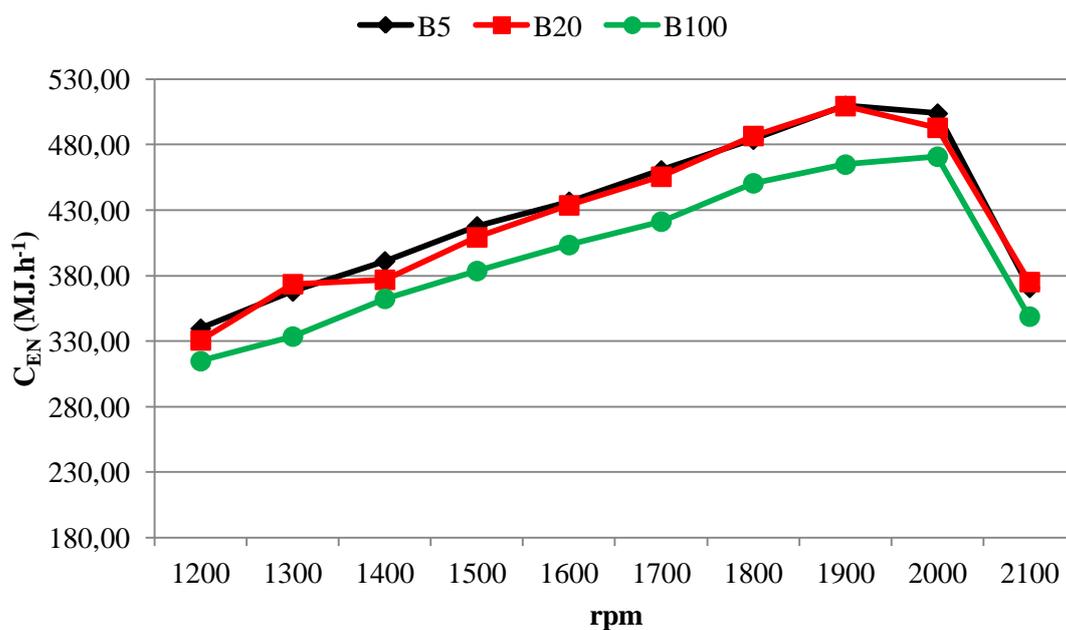


Figura 49 - Consumo energético para B5, B20 e B100 em todas as rotações do motor

Em todos os casos a potência máxima foi desenvolvida em 1900 rpm, o que implica em um maior consumo de energia para tal, no entanto, observou-se que o C_{EN} também foi alto em 2000 rpm, onde o desenvolvimento de potência é bastante menor, sendo que a partir de 40% de biodiesel, o C_{EN} maior passa para essa rotação. Esses valores expressados nas curvas da Figura 50, corroboram com os dados de baixo desenvolvimento de potência em 2000 rpm (Figura 38 p. 94, junto com Apêndice D) aliado a baixa eficiência térmica verificado na Figura 47 do tópico anterior (4.4), ou no Apêndice H.

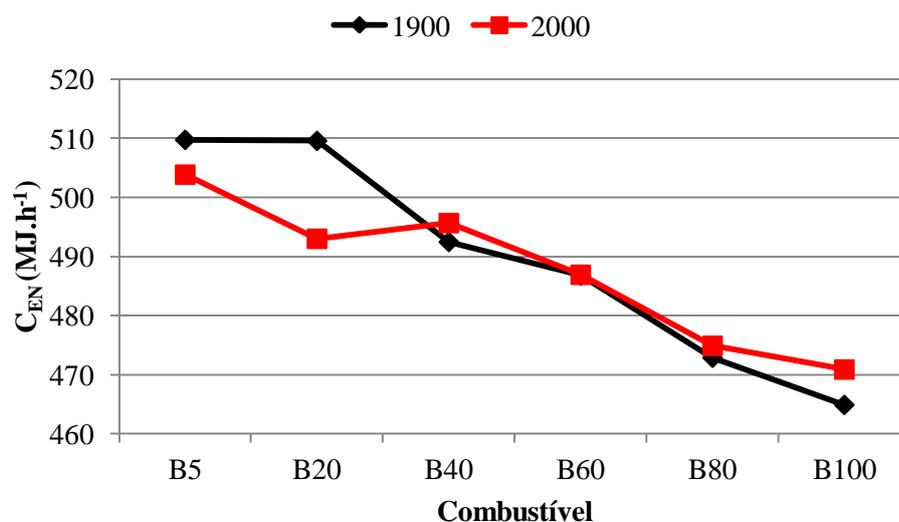


Figura 50 - Consumo energético de todos os combustíveis em 1900 e 2000 rpm

O percentual de diferença do consumo energético reduziu 8,28%, quando utilizando B100, permitindo concluir, que para cada 20% de biodiesel adicionado, o motor tende a consumir entre 1 e 3% menos energia.

Os resultados da regressão linear ($P < 0,01$) comprovaram que com biodiesel o motor apresentou melhor aproveitamento da energia contida, proporcionando um comportamento decrescente de B5 a B100 (Figura 51).

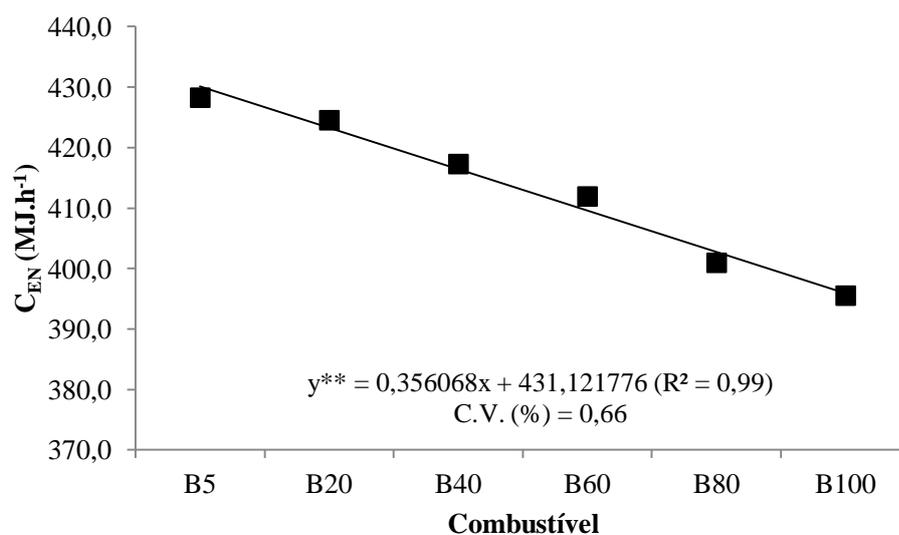


Figura 51 - Consumo energético do motor para cada combustível (regressão)

** $P < 0,01$

Barbosa et al. (2008), realizou estudos em um trator com motor de 78 cv, utilizando biodiesel de óleo de soja nas misturas B2, B5, B20, B100 e óleo diesel 100% (B0), e seus resultados apresentaram a mesma tendência dos encontrados nesta pesquisa.

4.6 Diferenças percentuais

A Tabela 11 disponibiliza de forma numérica, as diferenças percentuais do desempenho e/ou comportamento das principais variáveis avaliadas nos ensaios. Os cálculos foram realizados comparando-se com a testemunha (B5).

Tabela 11- Diferenças percentuais para potência máxima, torque máximo, consumo específico, eficiência e consumo energético do motor, comparando-se cada combustível com a testemunha (B5)

Combustível	Pm	Tm	C _s	η	C _{EN}
B5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B20	0,07	-1,22	2,13	0,68	-0,88
B40	0,00	-1,04	3,72	2,23	-2,63
B60	-0,69	-1,92	5,87	2,70	-3,97
B80	-1,15	-2,79	7,04	5,08	-6,81
B100	-2,01	-4,29	9,56	5,19	-8,28

4.7 Emissões

Os dados relacionados a emissões residuais de combustão interna foram tratados e disponibilizados de forma gráfica conforme a intensidade de carga aplicada, o que implica em maiores quantidades/percentuais de gases emitidos conforme a redução da rotação do motor. Por esse motivo a forma gráfica será expressa colocando-se os valores de rotação em ordem inversa (decrecente).

Para o dióxido de carbono (CO_2), os valores mais altos foram com B20, mistura que emitiu maior quantidade percentual em 9 das 10 rotações avaliadas, melhorando nas rotações de torque máximo (1300 e 1200 rpm). Houve uma tendência do B5 emitir mais CO_2 que as demais misturas (Exceto B20) em rotações até 1900 rpm. Com exceção do B20, e uma leve vantagem do B100, as demais misturas apresentaram tendências de emitir praticamente o mesmo percentual em rotações abaixo de 1900 rpm (Figura 52). O maior nível de CO_2 indica que o B20 teve uma queima mais eficiente dentro da câmara de combustão do motor, conforme relatado por Manavella (2010), o que pode ser atribuído ao número de cetano favorável.

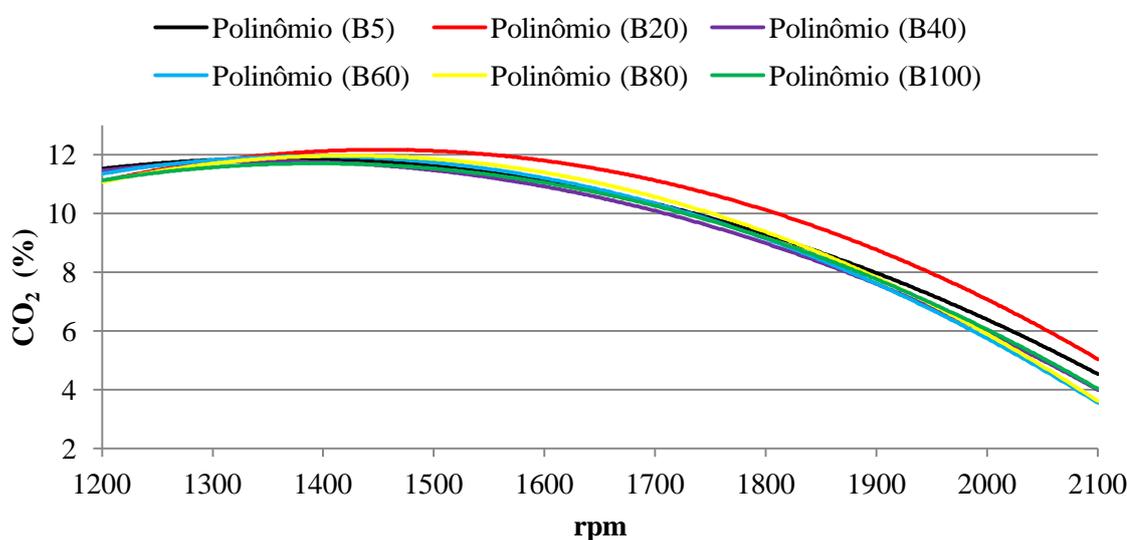


Figura 52 - Emissões de CO_2 para cada combustível e rotação

Por outro lado, a presença de oxigênio nos gases de exaustão durante a aplicação de cargas no dinamômetro, apresentou tendência oposta aos dados de CO_2 , com menores valores para B20 e maiores para o B100, conforme a Figura 53. A explicação para o ocorrido se deve ao fato de que quanto maior a emissão de CO_2 , melhor está sendo a queima de combustível e conseqüentemente maior o aproveitamento do oxigênio que entra na câmara de combustão, havendo assim um menor percentual de O_2 liberado no escapamento.

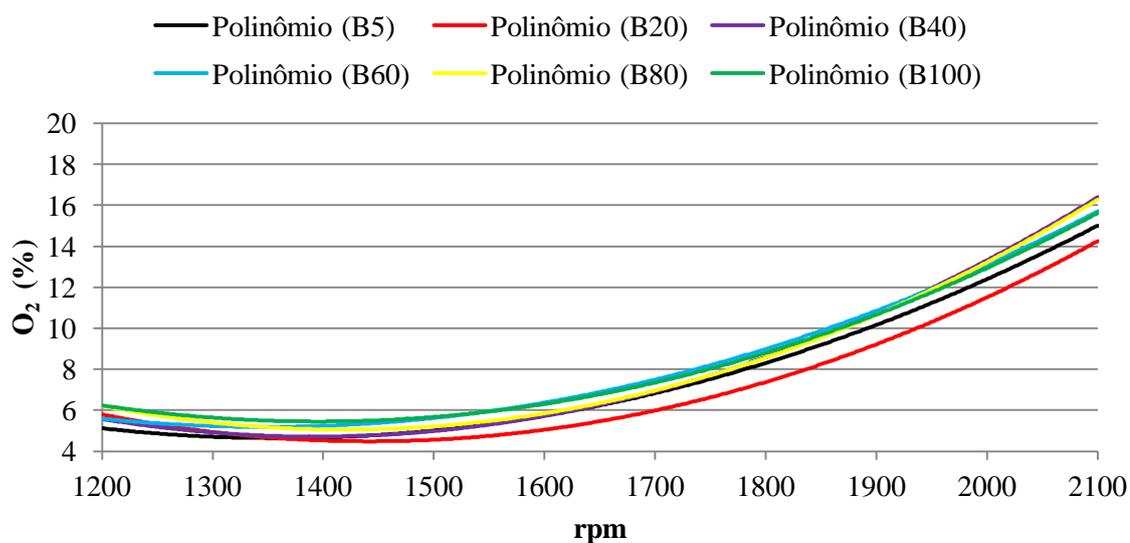


Figura 53 - Presença de oxigênio nos gases de exaustão

Os hidrocarbonetos não queimados apresentaram os dados com um comportamento variado, sendo que até a proporção de B40 onde se teve os melhores resultados, quanto maior o teor de biodiesel menor a quantidade de HC emitido (Figura 54), indicando que até a proporção de 40% de biodiesel, há um favorecimento da queima dos hidrocarbonetos. Nas maiores proporções de biodiesel (B60, B80 e B100), houve uma mudança nas curvas da regressão, mostrando que em rotações abaixo de 1900 rpm, é tendenciável que se aumente os prejuízos ao meio, por conta do maior número de HC emitido.

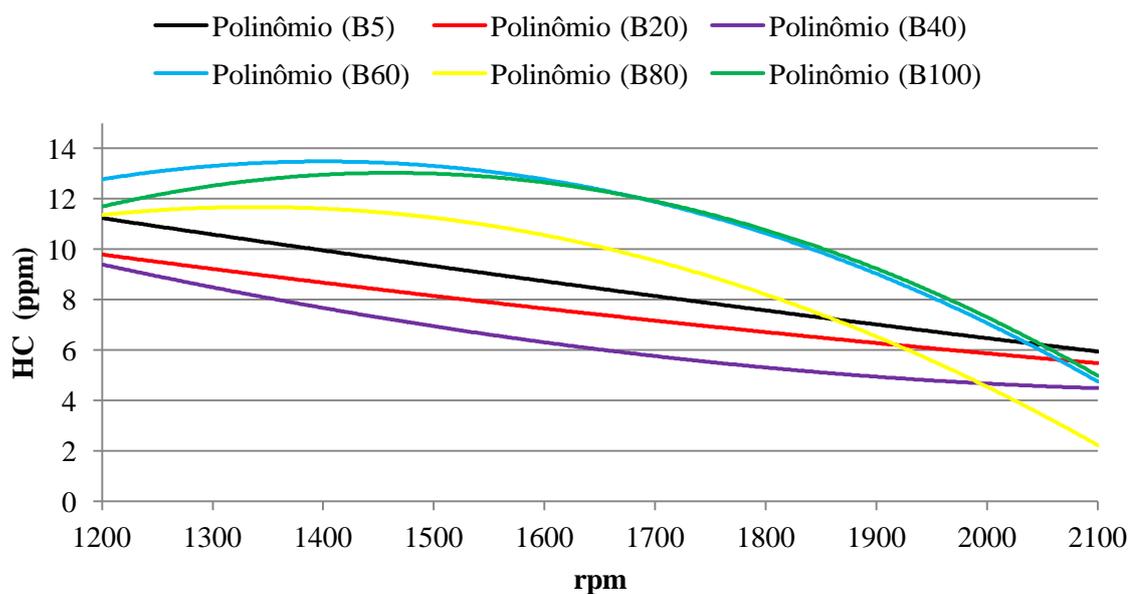


Figura 54 - Hidrocarbonetos não queimados em cada rotação e combustível utilizado

Para o comportamento do monóxido de carbono (Figura 55), mais uma vez destaque-se o B20, com maiores níveis emitidos, porém em rotações abaixo de 1500 rpm o B5 teve o mesmo segmento na curva. Nas rotações de 1200 a 1600 rpm, o incremento de biodiesel na mistura reduz as emissões de CO, com exceção do B20 que tende a emitir mais ou igual ao B5. Como foi verificado nos dados de CO₂, com B20 o combustível tem melhor eficiência na queima e desta forma parte do combustível também pode sofrer queima parcial e assim emitir mais CO.

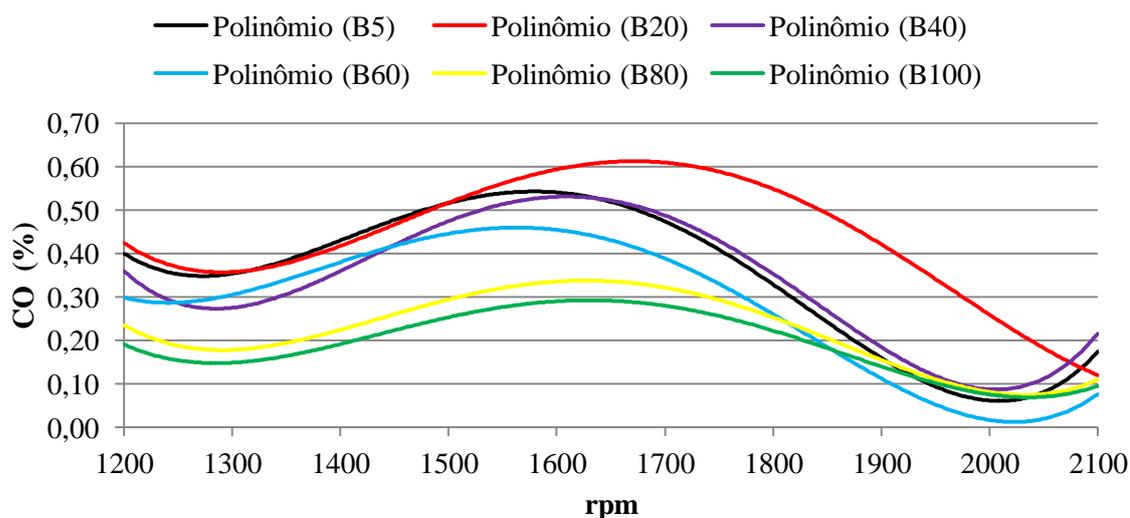


Figura 55 - Polinômios representativos do comportamento de emissões de CO

Observando-se a Figura 56, onde há correspondência do percentual de emissões das cinco misturas utilizadas comparado com a testemunha, é possível verificar que com o B100 as emissões de CO foram reduzidas em mais de 80%. O aumento de HC não queimados está sujeito de ser encontrado em proporções superiores a 60%. Esperava-se que o CO₂ tivesse uma redução mais significativa, em função do aumento da proporção, inclusive com B20, no entanto verificou-se que a redução foi entre 2% e 3% apenas e o B20 foi o maior emitente de CO₂.

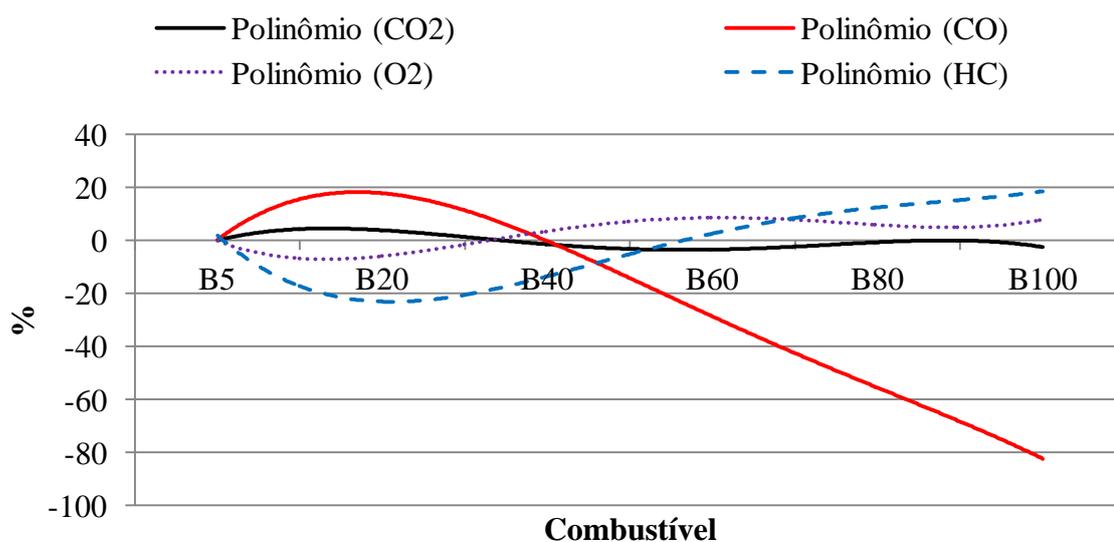


Figura 56 – Tendências percentuais das emissões emitidas comparadas com a testemunha

De modo geral percebeu-se que o B20 apresentou um perfil mais favorável a queima do combustível, demonstrando maior eficiência na combustão e provocando um maior desenvolvimento de potência.

5 CONCLUSÕES

Operacionalmente, percebeu-se que o biodiesel metílico de óleo de frango pode ser empregado em motores de tratores agrícolas, desde misturas com baixo teor até na condição pura (B100), sem apresentar mudanças elevadas no desempenho destes.

A potência e o torque não foram afetados substancialmente pela adição de biodiesel, podendo-se constatar, ao compararmos as misturas extremas, que houve uma redução de 2,01% na potência máxima e 4,29% no torque máximo. A potência máxima foi identificada com B20 e o torque máximo com B40. A partir de B60 verificou-se um deslocamento do torque máximo de 1200 para 1300 rpm, e em misturas acima de B20 tende a prejudicar a reserva de torque do motor.

Para a variável consumo horário volumétrico, as médias apesar de serem crescentes, não apresentaram diferenças expressivas, já o consumo específico teve um comportamento desfavorável a alternativa proposta, apresentando diferença de valores superiores de até 9,56%, quando comparado com a testemunha.

A máxima eficiência do motor foi encontrada em rotações entre 1200 e 1700 rpm, e a adição de biodiesel melhorou a eficiência térmica do motor, passando de 30,67% com a testemunha para 32,35% com biodiesel de óleo de frango puro.

O consumo energético foi reduzido consideravelmente, conforme o aumento da proporção de biodiesel, de forma que o motor tende a consumir de 1 a 3 % menos energia, a cada 20% de biodiesel adicionado na mistura. Com B100 o consumo energético foi reduzido em 8,28%, passando de 428,20 MJ.h⁻¹ (B5) para 395,47 MJ.h⁻¹ (B100).

Com B20 o nível das emissões de CO₂ e CO emitido pelo motor, foram os mais altos encontrados, com valores 4,55% e 19,44% superior ao óleo diesel comercial, respectivamente. Justamente com B20, houve um menor volume emitido de O₂. Esses resultados por si só, são auto-coerentes, visto que, quanto maior a emissão de CO₂ (combinação de uma molécula de carbono com duas de oxigênio) menor é a quantidade de O₂. Nessas condições houve maior eficiência na queima do combustível, tendo em vista ainda que combustão incompleta (parte do combustível foi queimado, indicando início de combustão), resulta em níveis mais altos de CO, como constatado. Outro dado que também expressa coerência é que justamente com B20 o motor desempenhou maior potência (44,10 kW).

Em parte, o resultado acima descrito, contempla a informação de menores valores de hidrocarbonetos não queimados (HC), pois houve uma tendência de misturas com proporção de até 40% apresentarem menores quantidades de HC não queimados.

De B40 até B100, houve redução nas emissões de CO, chegando a 82,01% menos monóxido de carbono com o uso de B100.

O uso do método dinamométrico para avaliar o desempenho do motor foi bastante eficaz, expressando bons resultados de ordem técnica e científica. O desempenho do motor fornece uma prévia do desempenho do trator a campo, desta forma pode-se afirmar que com biodiesel de óleo de frango o trator não irá perder eficiência no trabalho, independente da proporção de biodiesel utilizada. Integrando-se os dados, conclui-se que, utilizando biodiesel de óleo de frango na proporção de 20%, apresenta os melhores benefícios, respectivo ao desempenho, consumo e emissões residuais dos gases da combustão.

6 RECOMENDAÇÕES

Para próximos ensaios com biodiesel de óleo de frango, o ideal é utilizar um número maior de misturas variando de 10 em 10% (B10, B20, B30...).

Recomenda-se avaliar motores com distintos anos de fabricação e quantidade de horas trabalhadas, a fim de avaliar as diferenças que o tempo de uso pode ocasionar no desempenho e nas emissões.

Ensaio de campo com uso de instrumentação eletrônica, também devem ser realizados, a fim de verificar o comportamento do desempenho e quais alterações podem acarretar o aumento da adição de biodiesel de óleo de frango na mistura.

Ensaio para verificação da durabilidade também devem ser adotados no caso de utilizar o combustível proposto em larga escala, incluindo condições de baixa temperatura ambiente.

A gama de variáveis a ser estudadas ao se introduzir uma nova opção de energia na matriz energética de um país ou de uma região, é bastante ampla, desta forma recomenda-se que além dos requisitos mínimos de avaliação de desempenho e emissões residuais dos motores de combustão interna de ciclo diesel, que sejam realizados baterias de testes incluindo obtenção avançada de dados, aproveitando-se de recursos da eletrônica e informática para avaliar os distintos motores existentes no mercado. Para entender melhor, podemos citar como exemplo, o trabalho realizado por colegas, como avanço e/ou retardo na injeção de combustível pela bomba injetora, adição de aditivos químicos para melhoria do desempenho, comparação de motores mecânicos e eletrônicos, comparação de motores com injeção direta e indireta, entre outros.

Como complemento, lança-se uma questão de difícil resposta, tendo em vista as drásticas mudanças que isso acarretaria na logística de produção de alimentos e combustíveis. “Seria possível dar um destino menos nobre para o óleo de frango, destinando-o totalmente para a produção de biodiesel, e na contramão daríamos um destino mais nobre para o óleo de soja, ou seja, parte deste seria utilizado na formulação de ração animal, especialmente ração para aves?”

O trabalho não teve por objetivo responder esse questionamento, mas com certeza se um dia tivermos um estudo logístico, técnico, econômico e até de cunho político e social, sobre o tema, certamente os resultados do estudo aqui proposto serão melhor aproveitados.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIOVE. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE ÓLEOS VEGETAIS. **Complexo Soja - Estatística Mensal Ano Safra 2008/09**. 2010a. Disponível em: <http://www.abiove.com.br/estatistica_br_0809.html>. Acesso em: 06 jan. 2011.

_____. **Complexo Soja - Estatística Mensal Ano Safra 2009/10**. 2010b. Disponível em: <http://www.abiove.com.br/estatistica_br_0910.html>. Acesso em: 06 jan. 2011.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Tratores Agrícolas – Determinação do desempenho na tomada de potência**. Método de ensaio NBR 13400. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **Tratores Agrícolas – Determinação do desempenho na barra de tração**. Método de ensaio NBR 10400. Rio de Janeiro, 1997. 8p.

ABREU, R. F. et al. Utilization of metal complexes as catalysts in the transesterification of brazilian vegetable oils with differentialcohols. **Journal of Molecular Catalysis**, v. 209, n. 1-2, p. 29-33, feb. 2004.

ALFATEST. **Discovery G4. Analisador de gases**: Manual de operação. São Paulo: Alfatest, 2010. 44 p.

ANP. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS (Brasil). **Resolução ANP N° 42** de 24 de novembro de 2004. Com base na Lei n° 9.478, de 6 de agosto de 1997 e na Resolução de Diretoria n° 499, de 18 de novembro de 2004. Diário Oficial da União, Brasília, Brasil. 19 abril de 2005.

_____. **Resolução ANP N° 7, de 19.3.2008 - DOU 20.3.2008. 2008**. Brasília, 2008. Disponível em: <[http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2008/mar%C3%A7o/ranp%207%20-%202008.xml?f=templates\\$fn=document-frame.htm\\$3.0\\$q=\\$x=\\$nc=6637](http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2008/mar%C3%A7o/ranp%207%20-%202008.xml?f=templates$fn=document-frame.htm$3.0$q=$x=$nc=6637)>. Accessed>. Acesso em: 28 jan. 2010

_____. **Dados estatísticos mensais**. Brasília, 2010. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/?pg=37675&m=&t1=&t2=&t3=&t4=&ar=&ps=&cachebust=1291049592468>>. Acesso em: 29 nov. 2010.

ANFAVEA. ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES. **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira**. São Paulo, 2010a. 186p. Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br/anuario.html>>. Acesso em: 03 dez. 2010.

_____. **Tabelas Estatísticas**. São Paulo, 2010b. Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br/tabelas.html>>. Acesso em: 10 out. 2010.

_____. **Tabelas Estatísticas.** São Paulo, 2011. Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br/tabelas2010.html>>. Acesso em: 01 fev. 2011.

ARONI, A. S. **Avaliação da biomassa e qualidade da madeira do híbrido *Pinus tecunumanni* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis* pela técnica de atenuação da radiação gama.** 2005. 137 f. Tese (Doutorado em Agronomia, ênfase em Energia na Agricultura) Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2005.

BARBOSA, R. L. et al. Desempenho comparativo de um motor de ciclo diesel utilizando diesel e misturas de biodiesel. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1588-1593, set./out., 2008.

BEN - **Balanco Energético Nacional 2009 ano base 2008.** Ministério de Minas de Energia. 2009. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/publicacoes/BEN/2_-_BEN_-_Ano_Base/1_-_BEN_2009_Portugues_-_Inglxs_-_Completo.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2010.

BOBBIO, F. O.; BOBBIO, P. A. **Química de alimentos.** 3. ed., São Paulo: Varela, 2003.

BOSCH, R. **Manual de Tecnologia Automotiva.** 25. ed., São Paulo: E. Blücher, 2005.

BONOMETO, R. P. **Análise energética do processo experimental de produção de biodiesel a partir de óleo de frango.** 2009. 45 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Energia na Agricultura) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2009.

CAMARGOS, R. B. S. **Avaliação da viabilidade de se produzir biodiesel através da transesterificação de óleo de grãos de café defeituosos.** 2005. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

CENTENARO, G. S.; FURLAN, V. J. M. SOUZA-SOARES, L. A. Gordura de frango: alternativas tecnológicas e nutricionais. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 29, n.3, p. 619-630, jul./set. 2008.

CERBIO. Centro Brasileiro de Referência em Biocombustíveis. **Boletim técnico 3.** 2004. Disponível em: <<http://www.tecpar.br/cerbio/>>. Acesso em: 10 out. 2009.

CHIU, M. C.; GIOIELLI, L. A. Conteúdo de gordura sólida da gordura abdominal de frango, de suas estearinas e de suas misturas binárias com toucinho. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 22, n. 2, p. 151-157, mai./ago. 2002.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (Brasil). **Safra de grãos atinge novo recorde e chega a 154 milhões de toneladas.** Brasília, 2011. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/imprensa-noticia.php?id=21471>>. Acesso em: 11 mar. 2011.

CORTEZ, J. W. et al. Desempenho do trator agrícola no manejo da cultura de cobertura e pressão de inflação do pneu da semeadora. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.29, n.1, p.72-80, jan./mar. 2009.

COSTA, B. J.; OLIVEIRA, S. M. M. de. **Produção de biodiesel**. Dossiê técnico: TECPAR, 27 p., 2006. Disponível em: <<http://www.sbrt.ibict.br/dossies-tecnicos>>. Acesso em: 10 dez. 2010.

COSTA NETO, P. R. et al. Produção de biocombustível alternativo ao óleo diesel através da transesterificação de óleo de soja usado em frituras. **Química Nova**, v.23, n.4, p. 531-537, jul./ago. 2000.

CUNHA, R. B. C. **Avaliação técnico-ambiental do uso de biodiesel de palma, soja e óleo de frango em grupo-gerador acionado por motor de ciclo diesel**. 2009. 137 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de tecnologia) – LACTEC, Curitiba, 2009.

FARIMA – Indústria e Comércio de Sub Produto Animal LTDA. **Home Page**. Tupãssi, 2010. Disponível em: <<http://www.farima.com.br/>>. Acesso em: 06 nov. 2010.

FERNANDES, J. I. M. et al. Resíduo gorduroso da indústria de óleos vegetais em substituição ao óleo de soja em rações para frangos de corte. **Archives of Veterinary Science**, Curitiba, v. 7, n. 2, p. 135-141, 2002.

FRANÇA, J. M.; WASZCZYNSKYJ, N. Teor de hidroxiprolina em peles de frango submetidas à tratamento térmico. **Boletim do CEPPA**, Curitiba, v. 20, n. 1, p. 19-28, jan./jun. 2002.

GABRIEL FILHO, A. et al. Desempenho de um trator operando em solo com diferentes tipos de cobertura vegetal. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.24, n.3, p.781-789, set./dez. 2004.

GABRIEL FILHO, A. et al. UMEB - Unidade Móvel Para Ensaio da Barra de Tração. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.28, n.4, p.782-789, out/dez. 2008.

GOMES, L. F. S. **Potencial de produção de Biodiesel a partir de óleo de frango nas Cooperativas do Oeste do Paraná**. 2005. 64 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2005.

GOMES, L. F. S.; SOUZA, S. N. M.; BARICCATTI, R. A. Biodiesel produzido com óleo de frango. **Acta Scientiarum Technology**. Maringá, v. 30, n. 1, p. 57-62, 2008

HEYWOOD, J. B. **Internal combustion engines Fundamentals**. 2.ed., New York: McGraw-Hill, 1988. 897 p.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Agropecuário 2006**. Tabela 5.1 - Tratores existentes nos estabelecimentos agropecuários em 31.12, segundo as Grandes Regiões e Unidades da Federação – 2006. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/agropecuaria/censoagro/2006/tabela5_1.pdf> Acesso em: 03 dez. 2010.

_____. **Sala de Imprensa: Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://www1.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=1665&id_pagina=1>. Acesso em: 20 dez. 2010.

JARA, E. R. P. **O poder calorífico de algumas madeiras que ocorrem no Brasil**. São Paulo: IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1989.

KNOTHE, G.; GERPEN, J. V.; KRAHL, J.; RAMOS, L. P. **Manual de biodiesel**. Curitiba: Edgard Blücher, 2006. 340 p.

NELSON, D. L.; COX, M. M. **Lehninger: Princípios de Bioquímica**. 3. ed., São Paulo: Sarvier, 2002. 975 p.

LIMA, P. C. R., **O Biodiesel e a inclusão social**. Estudos Consultoria Legislativa. Brasília, DF. 2004.

LOPES, A.; FURLANI, C. E. A.; MELLO, J. G. S.; Protótipo de sistema instrumental para medição do consumo de combustível em tratores. In: CONGRESSO BRASILEIRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE INFORMÁTICA APLICADA À AGROPECUÁRIA E À AGROINDÚSTRIA, 4., 2004, Porto Seguro. **Anais...** Porto Seguro: Sociedade Brasileira de Informática Aplicada à Agropecuária e Agroindústria/SBI-AGRO, 2004. p. 1-4.

LOPES, A. et al. Consumo de combustível de um trator em função do tipo de pneu, da lastragem e da velocidade de trabalho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.7, n.2, p.382-386, maio/ago. 2003.

LOUZADA, R. S. et al. Comparação de três métodos de avaliação do percentual de patinação de tratores agrícolas. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 16., 2007, Pelotas. **Anais eletrônicos...** Pelotas: UFPel, 2007. Disponível em: <http://www.ufpel.tche.br/cic/2007/cd/pdf/CA/CA_01172.pdf>. Acesso em: 30 abr. 2010.

MACHADO, P. R. M., **Ésteres combustíveis em motor de ciclo diesel sob condições de pré-aquecimento e variação no avanço de injeção**. 2008. 142f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

MACMILLAN, R. H. **The Mechanics of Tractor - Implement Performance: Theory and Worked Examples**. Melbourne: University of Melbourne, 2002. 165 p.

MANAVELLA, H. J. **Análise de emissões no escape**. 2010. Hm Autotrônica. Disponível em: <<http://www.hmautotron.eng.br/artigos/Gases&EmissoesPM.pdf>>. Acesso em: 24 jan. 2010.

MANTOVANI, E. Automação do processo de avaliação do desempenho de tratores e implementos em campo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 7, p. 1241-46, jul.1999.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Brasil). **Açúcar e Alcool no Brasil**. 2009. Departamento da Cana-de-açúcar e Agroenergia - Secretaria de Produção e Agroenergia, Brasília, DF. 2009.

MDA. MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO AGRÁRIO (Brasil). **Agricultura Familiar no Brasil e o Censo Agropecuário 2006**. Brasília-DF. 2009. Publicações. 14p. (Versão eletrônica). Disponível em: <<http://www.mda.gov.br/arquivos/2246122211.pdf>>. Acesso em: 12 nov. 2009.

_____. **Programa Mais Alimentos.** 2010. Disponível em: <http://comunidades.mda.gov.br/principal/programa_mais_alimentos> Acesso em 23 ago. 2010.

MAZIERO, J. V. G. et al. Desempenho de um motor diesel com óleo bruto de girassol. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 13, n. 2, p. 249-255, abr-jun, 2007.

MIALHE, L. G. **Máquinas agrícolas: ensaios & certificações.** Piracicaba: CNPq-PADCT/TIB-FEALQ, 1996. 722 p.

MMA - Ministério do Meio Ambiente (Brasil). **Relatório. A viabilidade de utilização de óleo vegetal – biodiesel como fonte alternativa de energia.** 2003. Disponível em: <<http://www.biodiesel.gov.br/docs/relatoriofinal.pdf>>. Acesso em 12 dez. 2010.

MME. MINISTÉRIO DE MINAS DE ENERGIA (Brasil). **Matrizes energéticas Brasil.** 2009. Disponível em: < <http://www.mme.gov.br/spe/menu/publicacoes.html>>. Acesso em 15 nov. 2010.

_____. **Plano Nacional de Energia 2030.** 2006 – 2007. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/publicacoes/pne_2030/11_EficienciaEnergetica.pdf>. Acesso em: 17 jan. 2011.

MORETTO, E.; FETT, R. **Tecnologia de óleos e gorduras vegetais na indústria de alimentos.** São Paulo: Varela, 1998. 150 p.

MWD - **Manual de instrucciones. Dinamómetro de corrientes parasitas: Modelo NL 480 serie NL 2010 .** N° Serie: 51034. Cordoba: Mwdynoweb, 2010. 39 p.

NIETIEDT, G. H. **Utilização de diferentes misturas de biodiesel sob condições de aditivação e variação no avanço da injeção em motores de injeção direta.** 2010. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

OSAVA, M. **Arrancam as locomotivas a biodiesel.** 2006. Disponível em: <<http://www.tierramerica.net/2003/1222/pacentos.shtml>>. Acesso em: 08 jan. 2011.

PARENTE, E. J. S de. **Biodiesel: Uma aventura tecnológica num país engraçado.** Fortaleza: Tecbio, 2003. 66 p.

PENTEADO, R. A. N., CUNHA, R. B. C., PENTEADO, A. P., Biodiesel – Uma Sinopse das Conjunturas Brasileira e Mundial. In: CONGRESSO DA REDE BRASILEIRA DE TECNOLOGIA DO BIODIESEL, 2., 2007, Brasília. **Anais eletrônicos...** Brasília. Eletronorte: 2007. p. 1-6.

PERES, S. Aproveitamento de Resíduos de Animais para Produção de Biodiesel. In: SEMINÁRIO BIODIESEL, 2., 2010, Recife [**Palestra**]. Recife: Universidade de Pernambuco, 2010. Disponível em:

<<http://www.apcagronomica.org.br/seminario2010/PALESTRAS/Painel2-Palestra3.pdf>>. Acesso em: 16 nov. 2010.

PERES, S.; SCHULER, A.; ALMEIDA, C. H. T.; SOARES, M. B.; CAMPOS, R.; LUCENA, A.; **Caracterização e Determinação do Poder Calorífico e do Número de Cetano de Vários Tipos de Biodiesel Através da Cromatografia**. Recife: Universidade de Pernambuco. 2007. 6p. Disponível em: <<http://www.biodiesel.gov.br/congresso2007/caracterizacao/.pdf>>. Acesso em: 16 nov. 2009.

PNPB. PLANO NACIONAL DE PRODUÇÃO E UTILIZAÇÃO DE BIODIESEL (Brasil). **Biodiesel. O novo combustível do Brasil**, 2004, Brasília. 2004. Disponível em: <http://www.biodiesel.gov.br/docs/Apres_MinistraME_06-12-04.pdf>. Acesso em: 02 set. 2010.

PRATES, C. P. T., PIEROBON, E. C., COSTA, R. C., **Formação do Mercado de Biodiesel no Brasil**. Rio de Janeiro, n. 25, p. 39-64, 2007.

RACANICCI, A. M. C. et al. LONGO, F. A.; PEDROSO, A. A.; SORBARA, J. O. B. Oxidação lipídica do óleo de vísceras de aves para redução de seu conteúdo de energia metabolizável para frangos de corte na fase de crescimento. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 33, n. 4, p. 919-923, jul./ago. 2004.

RODRIGUES, K. F. et al. Potencialidade da gordura de frango para a produção de biodiesel. Biodiesel: o novo combustível do Brasil. In: CONGRESSO DA REDE BRASILEIRA DE TECNOLOGIA DO BIODIESEL, 1., 2005, Brasília. **Anais...** Brasília: ABIPTI, 2005. p. 129-132.

RUSSINI, A. **Projeto, construção e teste de instrumentação eletrônica para avaliação do desempenho de tratores agrícolas**. 2009. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

SAMPAIO, L. A. G. **Reaproveitamento de óleos e gorduras residuais de frituras: tratamento da matéria-prima para produção de biodiesel**. 2003. 59 f. Dissertação (Mestrado em desenvolvimento regional e meio ambiente)-Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, 2003.

SANTOS, D. C.; PEIXOTO, L. B.; TORRES, E. A., **Análise de Emissões e de Consumo específico de um Motor Diesel Operando com Biodiesel de Soja e de Óleos e Gorduras Residuais**. Salvador: UFB. 2007. 4p. Disponível em: <<http://www.biodiesel.gov.br/congresso2007/uso/pdf>>. Acesso em 20 out. 2009.

SCHLOSSER, J. F. et al. Equalização da patinagem provocada pela diferenciação de lastros no trabalho do trator em aração a duas velocidades. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 21., 1992, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1992. p. 1535-1546.

SERRANO, J. M. P. R. Desempenho de tratores agrícolas em tração. **Pesquisa agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, n.7, p.1021-1027, jul. 2007.

SINDICOM. SINDICATO NACIONAL DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE COMBUSTÍVEIS E DE LUBRIFICANTES. **Consumo de combustível no Brasil**. 2008. Disponível em: <http://www.sindicom.com.br/pub_sind/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?sid=19>. Acesso em: 12 jan. 2010.

SILVA, F. A. S e. **Assistat – Assistência Estatística**. Versão 7.6 beta. 2011, registro no INPI 0004152-2. Disponível em: <<http://www.assistat.com>>. Acesso em: 10 jan. 2011.

SILVA, S. L. **Uso de biodiesel em máquinas agrícolas**. Santa Helena: Unioeste. 2006. Disponível em: <<http://www.iapar.br/arquivos/File/biodiesel/unioeste.pdf>>. Acesso em: 05 mai. 2010.

SILVA, S. L.; BENEZ, S. H. Construção de um sistema de aquisição de dados para avaliação do desempenho energético de máquinas e implementos agrícolas em ensaios de campo. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 10, p. 10-18, 1997.

SILVA, S. L.; BENEZ, S. H.; LEVIEN, R.; SIQUEIRA, R. Força de obtida com integrador de força e sistema computadorizado, operando um rolo faca, In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola – CONBEA, 28, 1999. Pelotas – RS. **Anais...** pelotas: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1999. CD – ROM.

SORANSO, A. M. **Desempenho de um trator agrícola utilizando biodiesel destilado etílico e metílico**. 2006. 68 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Paraná –UNIOESTE, Cascavel.

SOUZA FILHO, E. G. **Avaliação de teorias de predição do comportamento de tratores agrícolas**. 2001. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2001.

SOUZA, S. N. M. et al. **Potencial de produção de Biodiesel a partir do óleo de frango nas Cooperativas do oeste do Paraná**. 2006. Disponível em: <<http://paginas.agr.unicamp.br/energia/agre2006/pdf/20.pdf>>. Acesso em: 02 nov. 2009.

STONE, R. **Introduction to Internal Combustion Engines**. 6th ed. United States of America: Ed. of SAE, 1999. 574 p.

STORCK, L.; LOPES, S. J.; LÚCIO, A. D. **Experimentação II**. 3. ed. Santa Maria: Ed. da UFSM, 2004.

UBA. UNIÃO BRASILEIRA DE AVICULTURA. **Relatório Anual 2009**. 2009. Disponível em: <http://www.abef.com.br/noticias_portal/exibenoticia.php?notcodigo=2041>. Acesso em: 22 ago. 2010.

UBABEF. UNIÃO BRASILEIRA DE AVICULTURA. **Relatório anual 2009/2010**. 2010. Disponível em: <<http://www.brazilianchicken.com.br/publicacoes/relatorio-anual-2010.pdf>><http://www.abef.com.br/noticias_portal/exibenoticia.php?notcodigo=2041>. Acesso em: 20 nov. 2010.

VOLPATO, C. E. S. et al. Desempenho de motor diesel quatro tempos alimentado com biodiesel de óleo de soja (B100). **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 4, p. 1125-1130, jul./ago. 2009.

YAMAOKA, R. S. et al. **Programa Paranaense de bioenergia “PR – bioenergia”**. 2003. IAPAR, SEAB, Governo do Paraná. Disponível em: <<http://www.iapar.br/arquivos/File/bioenergia.pdf>>. Acesso em: 25 jan. 2011.

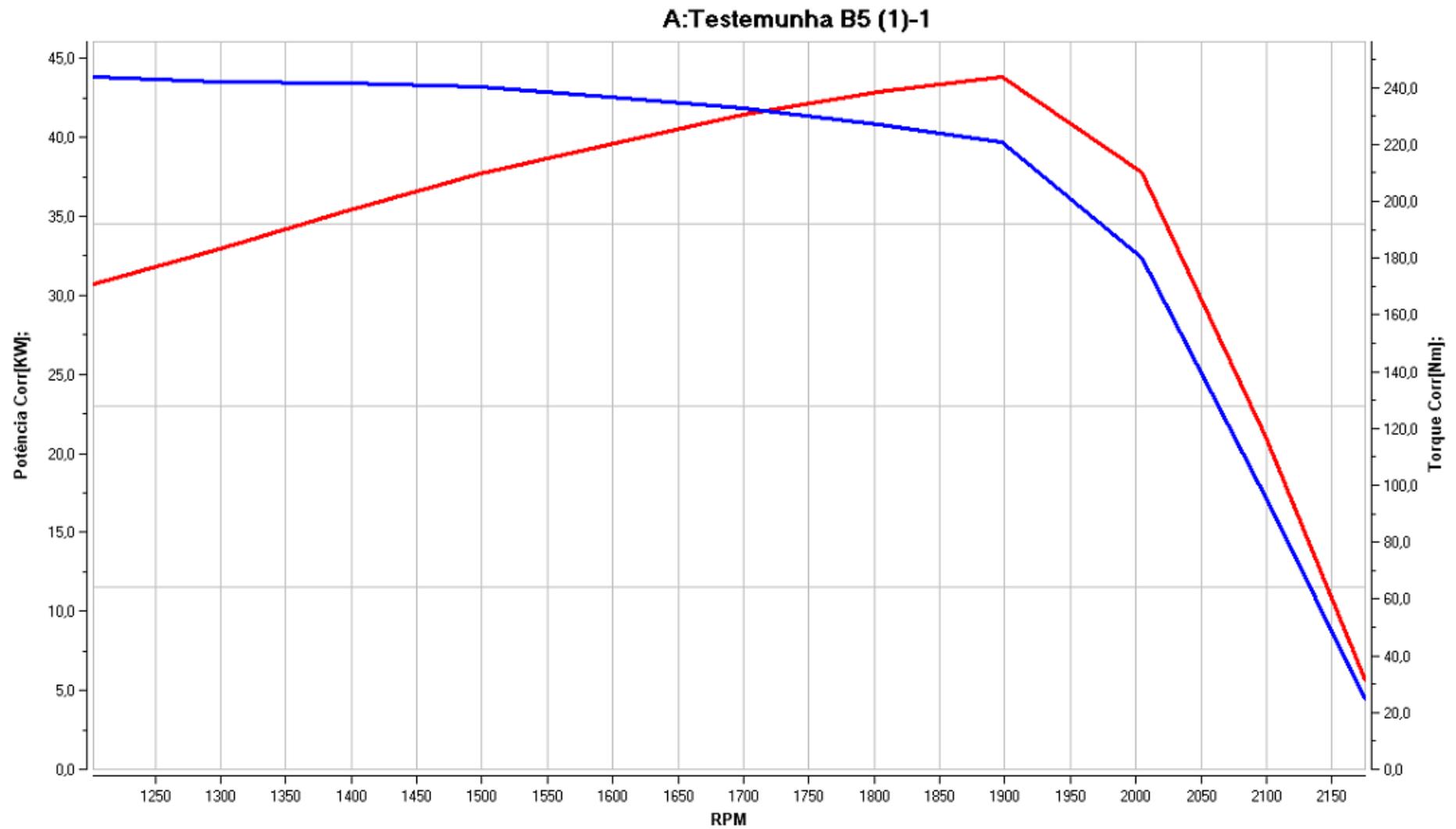
APÊNDICES E ANEXOS

Apêndice A - Quadro de dados obtido do registrador de dados após exportados para o Microsoft Excel® onde se obteve o consumo de combustível

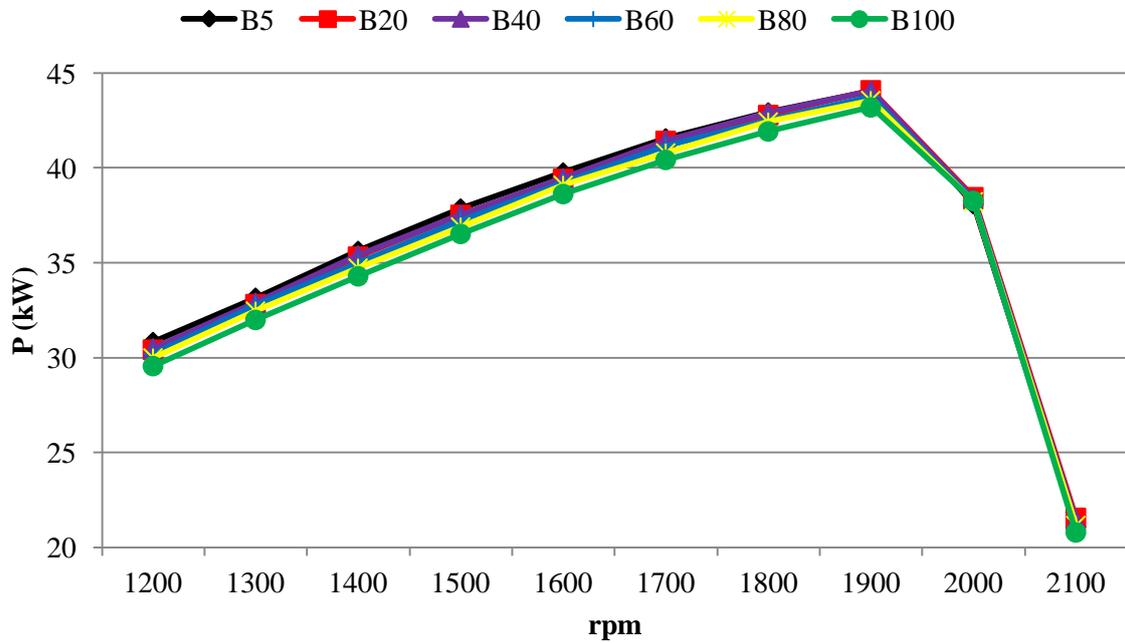
TIMESTAMP	RECORD	Bateria	Cel,Carga	Força	Pulsos	Consumo
TOA5	CR1000	CR1000	18700	CR1000,Std,15	CPU:	6536
TIMESTAMP	RECORD	Bateria	Cel,Carga	Força	Pulsos	Consumo
TS	RN	Volts	mV	Kgf	Counts	L/h
		Smp	Smp	Avg	Smp	Smp
5/10/2010 14:19	5341	12,68	0,327	-12,16	2	3,6
5/10/2010 14:19	5342	12,67	0,328	-11,11	3	5,4
5/10/2010 14:19	5343	12,67	0,326	-13,26	2	3,6
5/10/2010 14:19	5344	12,67	0,325	-14,31	2	3,6
5/10/2010 14:19	5345	12,67	0,327	-12,16	3	5,4
5/10/2010 14:19	5346	12,67	0,326	-13,21	2	3,6
5/10/2010 14:19	5347	12,67	0,326	-13,21	3	5,4
5/10/2010 14:19	5348	12,67	0,326	-13,26	3	5,4
5/10/2010 14:19	5349	12,67	0,325	-14,26	3	5,4
5/10/2010 14:19	5350	12,67	0,327	-12,16	4	7,2
5/10/2010 14:19	5351	12,67	0,325	-14,26	4	7,2
5/10/2010 14:19	5352	12,67	0,327	-12,21	5	9
5/10/2010 14:19	5353	12,67	0,33	-9,07	4	7,2
5/10/2010 14:19	5354	12,66	0,327	-12,21	5	9
5/10/2010 14:19	5355	12,67	0,327	-12,16	5	9
5/10/2010 14:19	5356	12,67	0,327	-12,16	6	10,8
5/10/2010 14:19	5357	12,67	0,329	-10,06	5	9
5/10/2010 14:19	5358	12,67	0,328	-11,11	6	10,80
5/10/2010 14:19	5359	12,66	0,33	-9,07	6	10,80
5/10/2010 14:20	5360	12,66	0,325	-14,26	5	9
5/10/2010 14:20	5361	12,66	0,325	-14,26	6	10,80
5/10/2010 14:20	5362	12,67	0,325	-14,31	7	12,60
5/10/2010 14:20	5363	12,66	0,325	-14,26	6	10,80
5/10/2010 14:20	5364	12,66	0,329	-10,06	7	12,6
5/10/2010 14:20	5365	12,65	0,327	-12,16	7	12,6
5/10/2010 14:20	5366	12,66	0,324	-15,3	7	12,6
5/10/2010 14:20	5367	12,66	0,327	-12,21	7	12,6
5/10/2010 14:20	5368	12,65	0,328	-11,11	8	14,4
5/10/2010 14:20	5369	12,65	0,328	-11,11	8	14,4
5/10/2010 14:20	5370	12,66	0,327	-12,16	8	14,4
5/10/2010 14:20	5371	12,66	0,327	-12,16	7	12,6
5/10/2010 14:20	5372	12,66	0,329	-10,06	8	14,4

Apêndice B - Registrador de dados modelo CR 1000 com conexões ligadas aos sensores e o computador

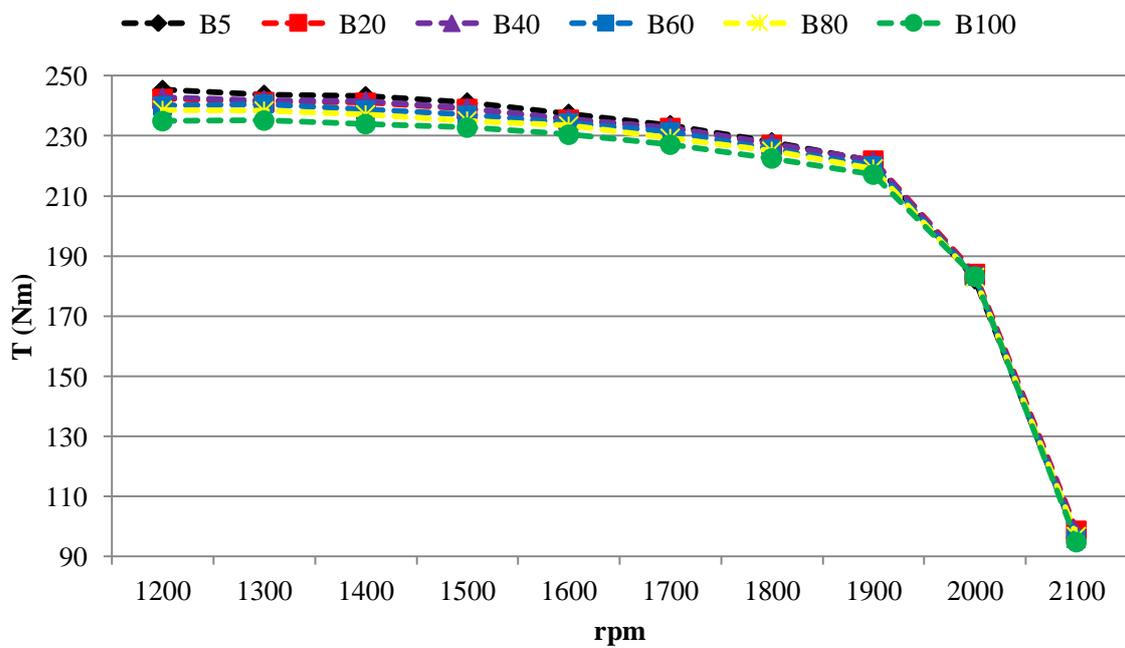


Apêndice C - Gráfico de potência e torque gerado pelo software AccuDyno durante os ensaios no dinamômetro

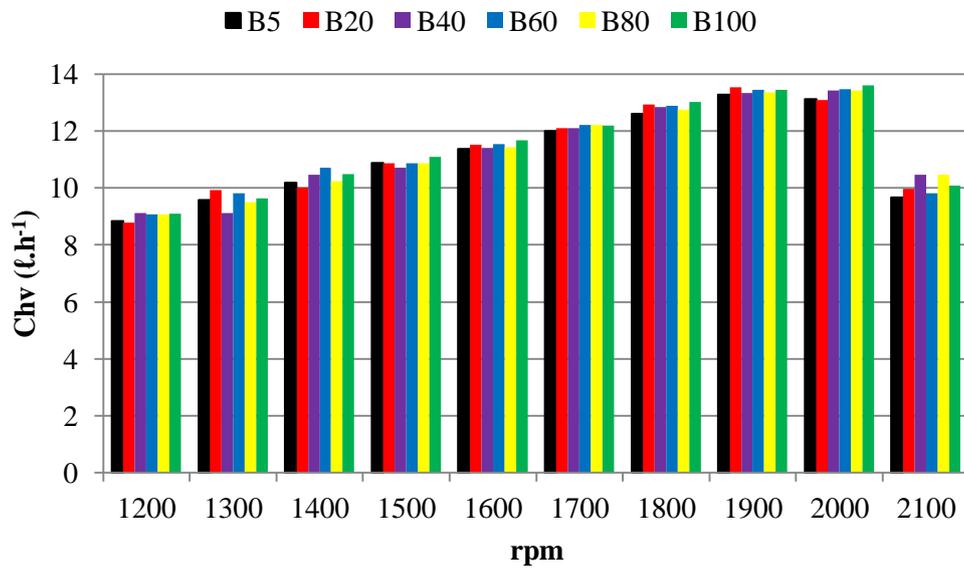
Apêndice D - Potência desenvolvida na TDP entre 1200 e 2100 rpm, para todos os combustíveis



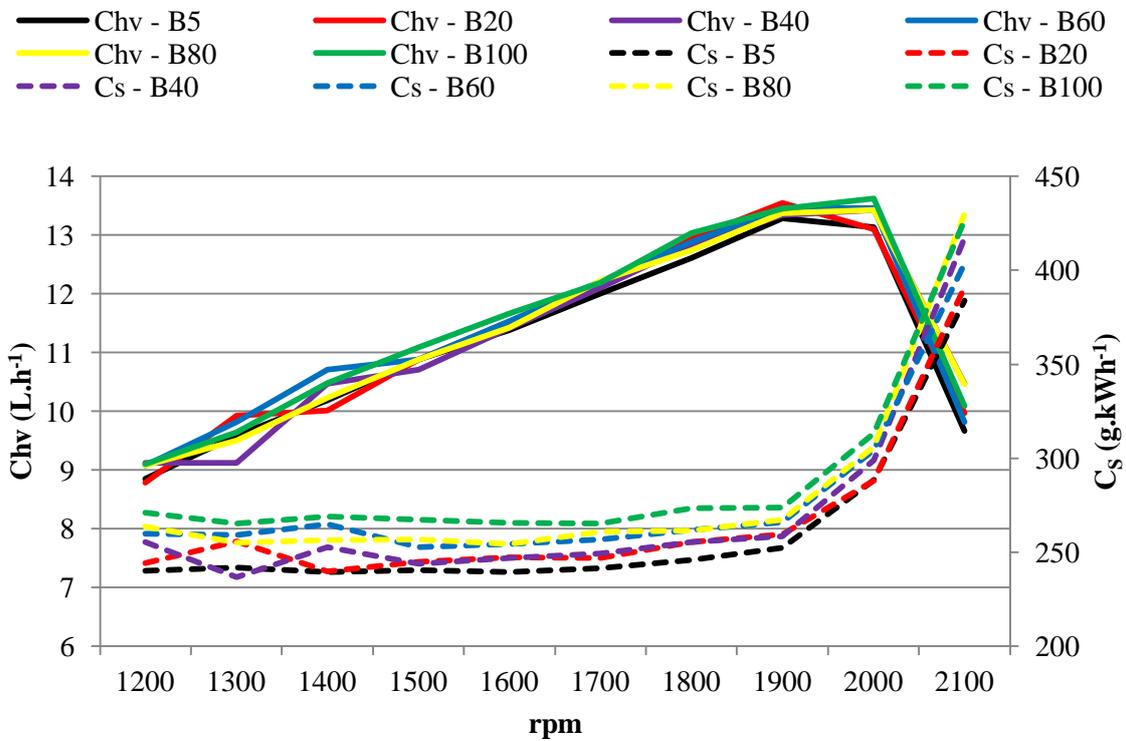
Apêndice E - Torque desenvolvido na TDP entre 1200 e 2100 rpm para todos os combustíveis



Apêndice F - Consumo horário volumétrico dos combustíveis por faixa de rotação



Apêndice G - Consumo horário volumétrico e específico dos combustíveis para todas as faixas de rotação



Anexo A - Especificações exigidas pela Resolução ANP N° 7, de 19/03/2008 - DOU 20/03/2008, que determina a qualidade do biodiesel comercializado no Brasil

(Continua)

Característica	Unidade	Limite	Método		
			ABNT NBR	ASTM D	EN/ISO
Aspecto	-	LII (1)	-	-	-
Massa específica a 20° C	k/m3	850-900	7148	1298	3675
			14065	4052	-
					12185
Viscosidade Cinemática a 40°C	mm2/s	3,0-6,0	10441	445	3104
Teor de Água, máx. (2)	mg/kg	500	-	6304	12937
Contaminação Total, máx.	mg/kg	24	-	-	12662
Ponto de fulgor, mín. (3)	°C	100	14598	93	3679
Teor de éster, mín	% massa	96,5	15764	-	14103
Resíduo de carbono (4)	% massa	0,05	15586	4530	-
Cinzas sulfatadas, máx.	% massa	0,02	6294	874	3987
Enxofre total, máx.	mg/kg	50	-	5453	-
			-		20846
					20884
Sódio + Potássio, máx.	mg/kg	5	15554	-	14108
			15555		14109
			15553		14538
			15556		
Cálcio + Magnésio, máx.	mg/kg	5	15553	-	14538
			15556		
Fósforo, máx.	mg/kg	10	15553	4951	14107
Corrosividade ao cobre, 3h a 50 °C, máx.	-	1	14359	130	2160
Número de Cetano (5)	-	Anotar	-	613	5165
				6890 (6)	
Ponto de entupimento de filtro a frio, máx.	°C	19 (7)	14737	6371	116
Índice de acidez, máx.	mg KOH/g	0,5	14448	664	-
			-	-	14104 (8)
Glicerol livre, máx.	% massa	0,02	15341	6584 (8)	-
			15771		
			-	-	14105 (8)
			-		14106 (8)
Glicerol total, máx.	% massa	0,25	15344	6584 (8)	-
			-	-	14105 (10)
Mono, di, triacilglicerol (5)	% massa	Anotar	15342	6584 (8)	-

(conclusão)

Característica	Unidade	Limite	Método		
			ABNT NBR	ASTM D	EN/ISO
Mono, di, triacilglicerol (5)	% massa	Anotar	15342	6584 (8)	-
			15344		-
					14105 (8)
Metanol ou Etanol, máx.	% massa	0,2	15343	-	14110
Índice de Iodo (5)	g/100g	Anotar	-	-	14111
Estabilidade à oxidação a 110°C, mín.(2)	h	6	-	-	14112 (8)

Fonte: ANP (2008).

Nota fornecida pela ANP, em complemento as informações contidas no Anexo A.

(1) Límpido e isento de impurezas com anotação da temperatura de ensaio.

(2) O limite indicado deve ser atendido na certificação do biodiesel pelo produtor ou importador.

(3) Quando a análise de ponto de fulgor resultar em valor superior a 130°C, fica dispensada a análise de teor de metanol ou etanol.

(4) O resíduo deve ser avaliado em 100% da amostra.

(5) Estas características devem ser analisadas em conjunto com as demais constantes da tabela de especificação a cada trimestre civil. Os resultados devem ser enviados pelo produtor de biodiesel à ANP, tomando uma amostra do biodiesel comercializado no trimestre e, em caso de neste período haver mudança de tipo de matéria-prima, o produtor deverá analisar número de amostras correspondente ao número de tipos de matérias-primas utilizadas.

(6) Poderá ser utilizado como método alternativo o método ASTM D6890 para número de cetano.

(7) O limite máximo de 19°C é válido para as regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste e Bahia, devendo ser anotado para as demais regiões. O biodiesel poderá ser entregue com temperaturas superiores ao limite supramencionado, caso haja acordo entre as partes envolvidas. Os métodos de análise indicados não podem ser empregados para biodiesel oriundo apenas de mamona.

(8) Os métodos referenciados demandam validação para as matérias-primas não previstas no método e rota de produção etílica.

Anexo B - Portfólio do óleo de aves disponibilizado pela indústria fornecedora da matéria-prima utilizada para produção do biodiesel

ÓLEO DE AVES

INGREDIENTES PARA ALIMENTAÇÃO ANIMAL



Ind. e Com. de Sub Produto Animal LTDA.

FARIMA INDUSTRIA E COMÉRCIO DE SUBPRODUTO ANIMAL LTDA - FABRICA DE PRODUTOS NÃO COMESTÍVEIS
 ROD. BR 581, KM 01 - SN - LOTE 20, GLEBA LAMBARI - TUPÁSSI - PR
 INDÚSTRIA BRASILEIRA - CNPJ 05.825.083/0001-71 - INSCR. ESTADUAL 9028.8144-00

BRASIL
INSPECIONADO
PR-4435
S.I.F

PRAZO DE VALIDADE: 30 DIAS APÓS A DATA DE FABRICAÇÃO
 RÓTULO REGISTRADO NO MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E DO
 ABASTECIMENTO SOB Nº PR-4435/03001

COMPOSIÇÃO BÁSICA - Resíduos de Abatedouros de Aves

PESO LÍQUIDO: _____

NÍVEIS DE GARANTIA

UNIDADE (máximo)	2 %
ÍNDICE DE IODO (Mín.)	70 %
ÁCIDOS GRAXOS SATURADOS (Mín.)	95 %
ACIDEZ(Máximo) Expresso em Meq de NaOH/100g	8 %

**DATA DE
FABRICAÇÃO**

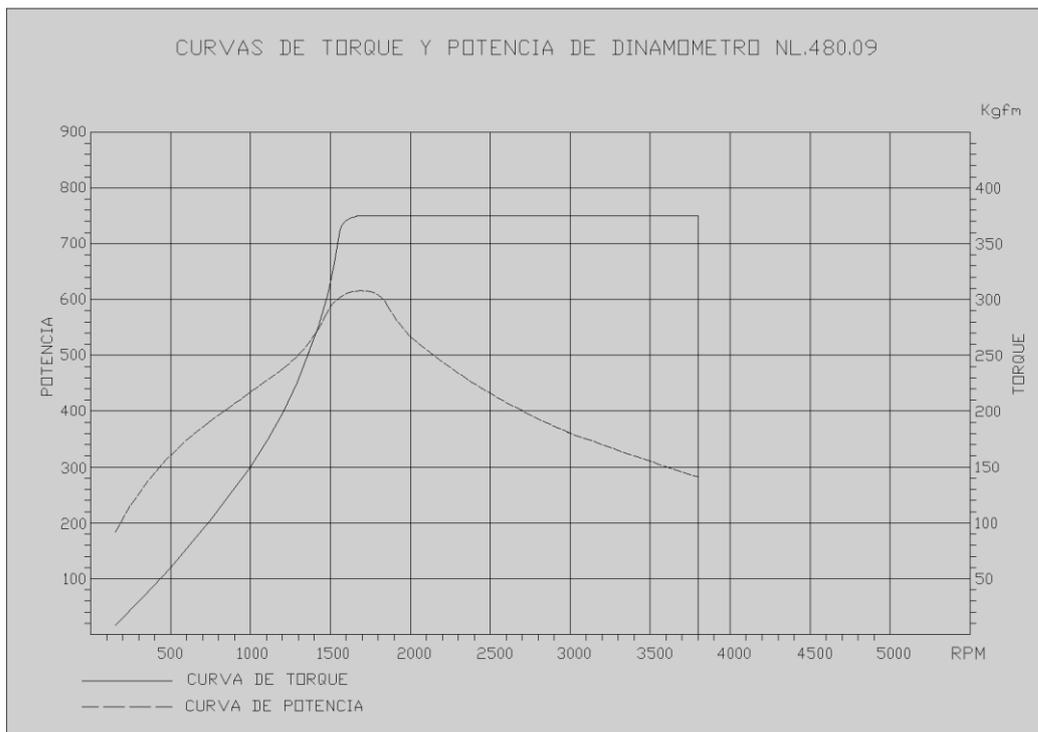
CONSERVAR EM LOCAL SECO E AREJADO

Anexo C - Vista do rotor no interior da carcaça do dinamômetro



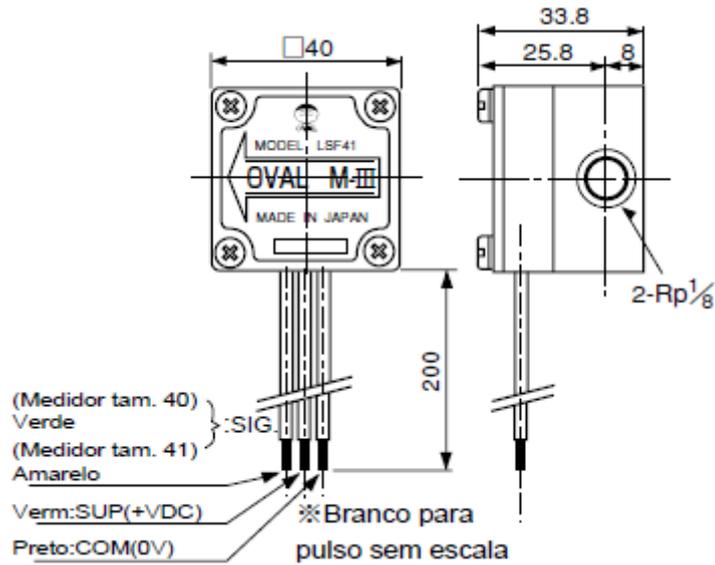
Fonte: Manual MWD NL 480 (2010).

Anexo D - Curvas de torque e potência do dinamômetro NL 480, como indicativo das limitações do equipamento



Fonte: Manual MWD NL 480 (2010).

Anexo E - Detalhes dimensionais do medidor de fluxo utilizado



Fonte: Especificação geral GS.No.GBB340-8-P (OVAL, 2010). Enviado pelo fornecedor.

Anexo F - Desenho e dimensões do tanque auxiliar utilizado para armazenamento e substituição das misturas durante os ensaios

TOLERÂNCIAS NÃO ESPECIFICADAS Norma IT 027										REV.	DESCRIÇÃO DA REVISÃO	DATA	APROVADOR
GRAU DE PRECISÃO	01 a 06	06 a 18	18 a 50	50 a 120	120 a 240	240 a 500	500 a 1000	1000 a 2000	2000 a 4000	01	ALTERADA GEOMETRIA DA PEÇA	16/09/09	RAFAEL
Fino	±0.05	±0.10	±0.15	±0.20	±0.25	±0.30	±0.40	±0.50	—				
Medio	±0.10	±0.20	±0.30	±0.50	±0.60	±0.80	±1.00	±1.30	±2.00				
Grosso	±0.20	±0.50	±0.80	±1.20	±1.50	±2.00	±2.50	±3.00	±4.00	X			
Extra Grosso	±0.50	±0.80	±1.00	±1.50	±2.00	±2.50	±3.00	±4.00	±5.00				

		TRATAMENTO/REVESTIMENTO:	ESCALA:	FOLHA:
		ACABAMENTO:	1:5	1 de 1
MONRIZZO		MATERIA-PRIMA:	TAMANHO:	PESO:
		POLIP COPO EP 310 D SOPRO (N)	A4	0,507Kg
DESENHISTA:	DATA:	DESCRIÇÃO:	REVISÃO:	PROJEÇÃO:
RAFAEL	16/09/09	TANQUE 4 LITROS NATURAL	01	
			CÓDIGO:	
			240.600.06	