

**GERSON HARUO INOUE**

**USO DO ÓLEO VEGETAL EM MOTOR ESTACIONÁRIO  
DE CICLO DIESEL**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de Doctor Scientiae.

**VIÇOSA  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2008**

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e  
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

I58a  
2008

Inoue, Gerson Haruo, 1970-

    Uso do óleo vegetal em motor estacionário de ciclo diesel / Gerson Haruo Inoue. – Viçosa, MG, 2008. xix, 91f.: il. (algumas col.) ; 29cm.

Inclui anexo.

Orientador: Luciano Baião Vieira.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Biocombustíveis. 2. Motor diesel. 3. Óleos vegetais como combustíveis. 4. Agricultura e energia. 5. Geração distribuída de energia elétrica. 6. Mecanização agrícola. 7. Engenharia agrícola. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22.ed. 662.88

**GERSON HARUO INOUE**

**USO DO ÓLEO VEGETAL EM MOTOR ESTACIONÁRIO  
DE CICLO DIESEL**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 25 de junho de 2008.

---

Prof. Gastão Moraes da Silveira

---

Prof. Haroldo Carlos Fernandes

---

Prof. Ronaldo Perez  
(Co-orientador)

---

Prof. Mauri Martins Teixeira

---

Prof. Luciano Baião Vieira  
(Orientador)

**A Deus, fonte de vida,**

**À memória de meus pais e ao amado irmão Hélio,**

**A Keles, esposa e amiga de todos os momentos,**

**Ao Igor, nosso filho, alegria e felicidade em nosso lar.**

## **Agradecimentos**

Aos meus familiares, em especial aos meus irmãos, Mario, Florindo, Jânio, Yara, Sara, Sueli, Irma e Mauro, além de meu tio Tadashi, responsáveis pelo meu sucesso e incentivo nos momentos difíceis.

À Universidade Federal de Roraima (UFRR), pela oportunidade de promover minha capacitação, e à Universidade Federal de Viçosa - UFV, por permitir a constante renovação de conhecimentos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela concessão da bolsa de estudos PICDT, e ao CNPq, pelo auxílio financeiro através do Edital Universal 2006.

À Caramuru Alimentos Ltda., pelo fornecimento do óleo vegetal para os ensaios, e à Agrale, pelo fornecimento do motor e de toda a assistência técnica necessária.

A Retifica Rio Branco, ao CETEC, em especial ao Laboratório de Emissões. Ao SENAI, em especial à equipe do Laboratório de Ensaio de Óleos e Lubrificantes. Ao CEFET-MG, em especial ao Laboratório de Química, pela atenção e qualidade dos serviços prestados.

Ao meu orientador, Prof. Luciano Baião Vieira, pela forma segura de apresentar as discussões e propostas pelo trabalho concretizado, além de sua amizade, compreensão e apoio.

Aos professores Adílio, Ricardo, Nerilson e Ronaldo, por participarem do trabalho como conselheiros, pelas sugestões e apoio, e aos demais professores da UFV que acreditaram no trabalho.

Aos técnicos administrativos do Departamento de Engenharia Agrícola, Edna, Renato, Juvercino, Marcos, Zé Mauro, Galenari, Dona Maria, Fátima, Claudenílson e Jurandir, e em especial aos do Laboratório de Mecanização Agrícola, Marcelo, Danilo, Geraldo e Wantuil, que sempre estiveram apoiando a execução do trabalho.

Aos amigos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, em especial aos colegas de curso, Paula, Edinei, Geice Danilo William, Amanda, Bigode, Mario, Henrique, Ariston, Selma, Barba, Diogo, Wagner, Murilo, Walter, Ronaldo, Leo, Sergio, Francelino, Luisinho, Helder, pelas nossas conversas no tradicional cafezinho da Mecanização.

Aos amigos Alcir, Soelene, Cleber, Jose, Cacaoio, Edinei, Stela, Marcos, Cristine, Herly, Aurora, Yugi, Prof Gutemberg, Abner, Cinara e todos os amigos da Pelada da Violeira, encontro sagrado nas manhãs de sábado.

Aos estagiários Guilherme e Wagner que tanto contribuíram para o sucesso do trabalho.

Á assistência social da UFV, em especial Neuza, e a todos os funcionários do Hospital São João Batista, que com muito carinho deram condições de concretizar este trabalho.

A todos os que contribuíram, diretamente ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

## **Biografia**

Gerson Haruo Inoue, filho de Tatsuo Inoue e Toshiko Inoue, nascido em 11 de abril de 1970, em Piedade-SP, graduou-se em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Lavras (UFLA), em janeiro de 1994. Em junho de 1997, tornou-se Mestre em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Em agosto de 1997, foi contratado pela Universidade Federal de Roraima (UFRR) como Professor Substituto e, em junho de 1998, por meio de concurso público, tornou-se professor efetivo da UFRR. Em março de 2004, iniciou o curso de doutorado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa.

## Índice

Lista de Tabelas e Quadros.....	viii
Lista de Figuras .....	x
Lista de Figuras .....	x
Resumo .....	xvi
Abstract .....	xviii
Introdução .....	1
Referências.....	3

### **Capítulo 1: Desenvolvimento e Avaliação de um Sistema de Aquecimento Para Utilização de Óleos Vegetais em Motores de Ciclo Diesel**

1.1. Resumo.....	4
1.2. Abstract .....	4
1.3. Introdução.....	5
1.4. Material e Métodos .....	9
1.4.1. Avaliação da Viscosidade.....	9
1.4.2. Sistema de Aquecimento.....	11
1.5. Resultados e Discussões .....	14
1.5.1. Viscosidade em Função da Temperatura.....	14
1.5.2. Avaliação do Sistema de Aquecimento .....	16
1.6. Conclusões .....	17
1.7. Referências Bibliográficas .....	17

### **Capítulo 2: Avaliação da Utilização de Óleo Degomado de Soja em Motor de Ciclo Diesel**

2.1. Resumo.....	19
2.2. Abstract .....	19
2.3. Introdução .....	20
2.4. Materiais e Métodos .....	26
2.5. Resultados e Discussões .....	33
2.5.1. Regime de trabalho .....	33
2.5.2. Potência .....	34
2.5.3. Torque .....	35



2.5.5. Considerações Gerais .....	38
2.6. Conclusões .....	39
2.7. Referências Bibliográficas.....	39

**Capítulo 3: Avaliação do Desempenho de um Motor de Ciclo Diesel  
Alimentado com Misturas de Óleo Vegetal e Diesel**

3.1. Resumo .....	42
3.2. Abstract .....	43
3.3. Introdução .....	43
3.4. Materiais e Métodos .....	48
3.4.1. Avaliação do Desempenho do Motor.....	49
3.4.2. Operação com o Grupo Gerador.....	51
3.4.3. Desgaste e resíduos do motor.....	56
3.4.4. Análise dos Óleos Lubrificantes .....	56
3.4.5. Custos da Geração de Energia. ....	57
3.5. Resultados e Discussões .....	59
3.5.1. Avaliação do Desempenho do Motor.....	59
3.5.1.1. Tratamento OV0/Tamb.....	59
Regime de Trabalho .....	59
Potência.....	60
Torque .....	61
Consumo Específico .....	63
3.5.1.2. Tratamento OV05/Tamb.....	64
Regime de Trabalho .....	64
Potência.....	65
Torque .....	66
Consumo Específico .....	66
3.5.1.3. Tratamento OV50/90 .....	67
3.5.2. Operação do Grupo Gerador.....	68
3.5.2.1. Tratamento OV05/ambiente.....	68
3.5.2.2. Tratamento OV50/Tamb .....	69
3.5.2.3. Tratamento OV0/Tamb .....	69
3.5.2.4. Tratamento OV50/T90 <sup>o</sup> C .....	70
3.5.3. Formação de Resíduos .....	74

3.5.3.1. Tratamento OV05/Tamb .....	74
3.5.3.2. Tratamento OV0/Tamb .....	76
3.5.3.3. Tratamento OV50/90 .....	77
3.5.4. Desgaste dos Componentes do Motor .....	79
3.5.5. Análise dos Lubrificantes Usados.....	79
3.5.6. Custo da geração de energia .....	81
Depreciação, Juros, Alojamento e Seguro.....	81
Manutenção .....	81
Salários.....	82
Combustíveis .....	82
Custos totais .....	83
3.6. Conclusões .....	84
3.7. Referências Bibliográficas .....	85
<b>4. Resumo e Conclusões .....</b>	<b>88</b>
<b>5. Anexos.....</b>	<b>90</b>

## Lista de Tabelas e Quadros

### **Capítulo 1: Desenvolvimento e Avaliação de um Sistema de Aquecimento Para Utilização de Óleos Vegetais em Motores de Ciclo Diesel**

Tabela 1. Produtividade de algumas oleaginosas .....	6
Tabela 2. Viscosidades de alguns óleos vegetais em função da temperatura.....	7
Quadro 1. Equações para estimar as viscosidades dos óleos estudados.....	14
Quadro 2. Percentual da redução de viscosidade em cada faixa de temperatura.....	15

### **Capítulo 2: Avaliação da Utilização de Óleo Degomado de Soja em Motor de Ciclo Diesel**

Tabela 1. Características físicas do OBS, biodiesel e óleo diesel tipo interior.....	27
--	----

### **Capítulo 3: Avaliação do Desempenho de um Motor de Ciclo Diesel Alimentado com Misturas de Óleo Vegetal e Diesel**

Tabela 1. Características das amostras das misturas de combustíveis utilizados nos ensaios de desempenho. ....	49
Tabela 2. Exemplos de origens de desgastes metálicos.....	56
Quadro 1. Resultados das análises físico-químicos das amostras de lubrificante usadas no motor na condição de trabalho e do lubrificante novo.....	80
Quadro 2. Resultados das análises de desgaste metálico e aditivação das amostras de lubrificante usadas no motor na condição de trabalho e do lubrificante novo. ....	80
Quadro 3. Vida útil ou intervalo de substituições de elementos, em horas, visando à composição de custos. ....	81
Quadro 4. Custo horário, em reais, das manutenções realizadas no motor, visando à composição dos custos.....	82
Quadro 5. Parâmetros utilizados para composição dos custos com combustível.....	83

Quadro 6. Composição dos parâmetros utilizados para o cálculo do custo de produção de energia elétrica.....	83
---	----

## Lista de Figuras

### **Capítulo 1: Desenvolvimento e Avaliação de um Sistema de Aquecimento Para Utilização de Óleos Vegetais em Motores de Ciclo Diesel**

Figura 1. Carbonização do bico injetor relatado por Mazieiro e Corrêa (2004).....	8
Figura 2. Viscosímetro Saybolt.....	10
Figura 3. Sistema de aquecimento de combustível desenvolvido para motor estacionário Agrale, modelo M90.....	11
Figura 4. Sistema de aquecimento do combustível.....	12
Figura 5. Termopar utilizado para coleta da temperatura de injeção, coberto com isolante térmico. ....	13
Figura 6. Viscosidades estimadas pelas Equações 1, 2 e 3, em função da temperatura, para os óleos estudados.....	15
Figura 7. Media das temperaturas de injeção observadas.....	17

### **Capítulo 2: Avaliação da Utilização de Óleo Degomado de Soja em Motor de Ciclo Diesel**

Figura 1. Dinamômetro utilizado na avaliação do motor.....	27
Figura 2: Termômetro digital utilizado para leitura das temperaturas.....	28
Figura 3. Regime de trabalho em função da força de frenagem aplicado pelo dinamômetro. ....	34
Figura 4. Potência nominal em função da força de freangem aplicada pelo dinamômetro. ....	35
Figura 5. Efeito da força aplicado pelo dinamômetro no torque do motor. ....	36
Figura 6. Efeito da força e % de ODS no consumo específico.....	37

### **Capítulo 3: Avaliação do Desempenho de um Motor de Ciclo Diesel Alimentado com Misturas de Óleo Vegetal e Diesel**

Figura 1. Motor acoplado ao dinamômetro, para realização dos ensaios de desempenho do motor. ....	50
Figura 2. Vista geral da Estrutura montada para consumir a energia e acomodar o grupo gerador.....	52
Figura 2 A. Estrutura com 30 bocais. ....	52

Figura 2B. Estrutura com 10 bocais. ....	52
Figura 3. Medidor de energia e sistema para controle de carga no motor. ...	53
Figura 4. Termômetro com datalogger, instalado na sala com isolamento acústico.....	54
Figura 5. Termopar instalado para medição da temperatura dos gases de admissão.....	54
Figura 6. Termopar para medição da temperatura do óleo lubrificante.....	55
Figura 7. Termopar instalado para medição das temperaturas dos gases de escape. ....	55
Figura 8. Comparação entre os valores de regime de trabalho estimados e observados para as condições antes e depois do uso do grupo gerador no tratamento OV0/Tamb. ....	60
Figura 9. Comparação entre os valores de potência nominal estimados e observados para as condições antes e depois do uso do grupo gerador no tratamento OV0/Tamb. ....	61
Figura 10. Comparação entre os valores de torque estimados e observados para as condições antes e depois do uso do grupo gerador no tratamento OV0/Tamb. ....	62
Figura 11. Comparação entre os valores de consumo específicos estimados e observados para as condições antes e depois do uso do grupo gerador no tratamento OV0/Tamb. ....	63
Figura 12. Comparação entre os valores de regime de trabalho estimados e observados para as condições antes e depois do uso do grupo gerador no tratamento OV05/Tamb. ....	64
Figura 13. Comparação entre os valores de potência nominal estimados e observados para as condições antes e depois do uso do grupo gerador no tratamento OV05/Tamb. ....	65
Figura 14. Comparação entre os valores de torque estimados e observados para as condições antes e depois do uso do grupo gerador no tratamento OV05/Tamb. ....	66
Figura 15. Comparação entre os valores de consumo específicos estimados e observados para as condições antes e depois do uso do grupo gerador no tratamento OV05/Tamb. ....	67
Figura 16. Média de temperaturas ambiente.....	71

Figura 17. Temperatura média dos gases de admissão coletados durante a operação do motor para cada tratamento analisado.....	72
Figura 18. Temperatura média dos gases de escape coletados durante a operação do motor para cada tratamento analisado.....	72
Figura 19. Temperatura média do óleo lubrificante coletados durante a operação do motor para cada tratamento analisado.....	73
Figura 20. Temperatura média do combustível, no momento da injeção, coletados durante a operação do motor para cada tratamento analisado.....	74
Figura 21. Deposição de resíduos na válvula de admissão no tratamento OV5/Tamb.....	75
Figura 22. Situação do cabeçote do motor no tratamento OV05/Tamb.....	75
Figura 23. Deposição de resíduos no bico injetor no tratamento OV05/Tamb.....	76
Figura 24. Depósito na válvula de admissão no tratamento OV0/Tamb .....	76
Figura 25. Depósito no cabeçote no tratamento OV0/Tamb. ....	77
Figura 26. Deposição de resíduos na válvula de admissão no tratamento OV50/T90.....	78
Figura 27. Situação do cabeçote do motor no tratamento OV50/T90. ....	78
Figura 28. Situação do pistão no tratamento OV50/T90.....	79

## Lista de Símbolos

ANEEL	-	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	-	Agência Nacional do Petróleo
AS	-	Custo do Alojamento e Seguro
B2	-	Óleo diesel com 2% de Biodiesel
C	-	Força de frenagem
$C_e$	-	Consumo específico
CAPES	-	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CCC	-	Conta de Consumo de Combustíveis
CEFET-MG	-	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
CEMIG	-	Companhia Energética de Minas Gerais
CEPLAC	-	Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira
CETEC-MG	-	Fundação Centro Tecnológica de Minas Gerais
Ch	-	Consumo horário
CNPq	-	Conselho de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
D	-	Depreciação
$D_c$	-	Densidade do combustível
Fa	-	Fator atmosférico
Fm	-	Fator do motor
H	-	Carga horária anual do grupo gerador
I	-	Taxa de juros anual
INT	-	Instituto Nacional de Tecnologia
IPT	-	Instituto de Pesquisa Tecnológica
J	-	Custo referente aos juros
K	-	Constante do dinamômetro
Kd	-	Fator de redução para motores diesel
LMA	-	Laboratório de Mecanização Agrícola
MAPA	-	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
OBG	-	Óleo Bruto de Girassol
OBM	-	Óleo Bruto de Milho
OBS	-	Óleo Bruto de Soja
ODS	-	Óleo Degomado de Soja



OECD	-	Organisation for Economic Co-operation and Development
OIE	-	Oferta Interna de Energia
OV	-	Percentual de Óleo Vegetal no Combustível
OV0	-	Combustível com 0% de ODS
OV0/Tamb	-	Tratamento com combustível com 0% de ODS sem aquecimento
OV05	-	Combustível com 5% de ODS
OV05/Tamb	-	Tratamento com combustível com 5% de ODS sem aquecimento
OV100	-	Combustível com 100% de ODS
OV50	-	Combustível com 50% de ODS
OV50/T90	-	Tratamento com combustível com 5% de ODS com aquecimento de 90°.
OV50/Tamb	-	Tratamento com combustível com 5% de ODS sem aquecimento.
OV75	-	Combustível com 75% de ODS
OVEG	-	Programa de Óleos Vegetais
$P_r$	-	Preço de aquisição da máquina
P	-	Potência do motor
$P_b$	-	Pressão barométrica
PICDT	-	Programa Institucional de Capacitação Docente e Técnica
$O_s$	-	Pressão do ar seco
q	-	Vazão de combustível do motor
Q	-	Vazão de combustível
$Q_c$	-	Vazão específica de combustível
R	-	Razão de compressão
S	-	Valor de Sucata
SAS	-	Statistical Analysis System
SENAI	-	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
SIN	-	Sistema Integrado Nacional
SSU	-	Segundo Saybolt Universal
$\tau$	-	Torque
T	-	Temperatura do combustível
T	-	Tempo de duração do ensaio
$T_{ar}$	-	Temperatura do ar de admissão
$T_s$	-	Temperatura de bulbo seco

Tu	-	Temperatura de bulbo úmido
UFLA	-	Universidade Federal de Lavras
UFRR	-	Universidade Federal de Roraima
UFV	-	Universidade Federal de Viçosa
V	-	Volume de combustível consumido
$V_d$	-	Volume de deslocamento do motor
$v_d$	-	Velocidade de deslocamento do motor quatro tempos.
$V_u$	-	Vida útil
$\omega$	-	Regime de trabalho do motor

## Resumo

INOUE, Gerson Haruo, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, junho de 2008.

**Uso de Óleo Vegetal em Motor Estacionário de Ciclo Diesel.** Orientador: Luciano Baião Vieira. Co-orientadores: Adílio Flauzino Lacerda Filho, Nerilson Terra Santos, Ricardo Capucio Resende e Ronaldo Perez

Em termos de biocombustíveis líquidos, as questões relacionadas ao álcool estão em um patamar desenvolvido com a criação de uma cadeia produtiva em que todos os processos estão tecnologicamente resolvidos desde a produção da cana-de-açúcar até o consumo do álcool com o desenvolvimento dos carros multicompostíveis. Quanto à utilização dos óleos vegetais, algumas barreiras deverão ser vencidas, principalmente em comunidades isoladas, com ocorrência de oleaginosas, porém, com dificuldades na produção do biodiesel, devido aos custos ou à logística para o transporte dos produtos utilizados para o processo de transesterificação. Assim, a utilização do óleo vegetal “*in natura*” em motores diesel se torna importante fonte de energia e requer a utilização de técnicas e adaptações para o bom desempenho do motor, entre elas o aquecimento para redução da viscosidade e a alternância de combustível para promover a lavagem das tubulações de alimentação com óleo diesel. Objetivou-se com este trabalho avaliar a viabilidade do uso do óleo vegetal na forma “*in natura*” em motores diesel de baixa potência. Primeiramente foi realizado um estudo para verificar o efeito da temperatura na redução da viscosidade e desenvolver um sistema de aquecimento do combustível de baixo custo. Após o desenvolvimento do aquecedor, verificou-se por meio de ensaios dinamométricos, o desempenho do motor alimentado com misturas de óleo vegetal e óleo diesel em diferentes proporções e temperaturas de injeção. Por último, o motor foi avaliado em condições de trabalho, na geração de energia elétrica em um grupo gerador, operando por períodos de até 300 horas. Ao final, foram verificadas as medidas dos componentes do motor e os resíduos na câmara de combustão. As principais conclusões deste trabalho foram: os óleos brutos de Girassol, Milho e Soja alcançam a viscosidade do óleo diesel quando aquecidos as temperaturas acima de 160° C; o sistema de aquecimento foi eficiente para aquecer

e manter a temperatura exigida; a temperatura de injeção e as proporções de óleo vegetal no combustível não influenciaram no regime de trabalho, na potência nominal e no torque; ocorreu aumento do consumo específico com o aumento da proporção de óleo vegetal no combustível; não ocorreu formação de resíduos nas proporções de até 50% de óleo vegetal que justificasse a descarbonização da câmara de combustão; e o custo de produção de energia elétrica aumentou em 4,66% com a utilização de Óleo Degomado de Soja na proporção de 50%, em relação ao óleo diesel.

## **Abstract**

INOUE, Gerson Haruo, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, June de 2008.

**Vegetal Oil use in Stationary Engine of Diesel Cycle.** Adviser: Luciano Baião Vieira. Co-advisers: Adílio Flauzino Lacerda Filho, Nerilson Terra Santos, Ricardo Capucio Resende e Ronaldo Perez

In terms of liquid biofuels, the questions related to alcohol are in a developed level with the creation of a productive chain where all the processes are technologically decided since the production of the sugar cane until the alcohol consumption with the development of the multifuel cars. As for the use of vegetable oils, some barriers must be overcome, mainly in isolated communities, with occurrence of oil plant, however, with difficulties in the production of biodiesel, due to the costs or the logistic one for the transport of the products used for the transesterification process. Thus, the use of the "*in natura*" vegetable oil in diesel engines becomes an important power source and requires the use of techniques and adaptations for a good engine performance, among them the heating for viscosity reduction and the fuel alternation to promote the washing of the feeding tubes with diesel oil. The objective of this work was to evaluate the viability of the use of the vegetable oil in the "*in natura*" form in low power diesel engines. First a study was carried through to verify the effect of the temperature in the viscosity reduction and to develop a low cost fuel heating system. After the development of the heater, the performance of the engine fed with vegetable oil mixtures and diesel oil in different ratios and temperatures of injection were verified by means of dynamometric assays. Finally, the engine was evaluated in work conditions, in the generation of electric energy in a generating group, operating for periods of up to 300 hours. In the end, the measurements of the components of the engine and the residues in the combustion chamber were verified. The main conclusions of this work were: the crude Sunflower oils. Maize and Soy reached to the diesel oil viscosity when warmed to temperatures above 160° C; the heating system was efficient to heat and to maintain the required temperature; the injection temperature and the vegetable oil ratios in the fuel did not influence in the work regimen, and in the normal rated power

and the torque; an increase of the specific consumption occurred with the increase of the vegetable oil ratio in the fuel; a residue formation in the ratios of up to 50% of vegetable oil did not occur that justified the descarbonization of the combustion chamber; e the production cost of electric energy increased in 4,66% with the use of degummed soy oil in the ratio of 50%, in relation to diesel oil.

## Introdução

A utilização de energias alternativas ao petróleo tem sido de grande importância para o mundo e para o país, tanto que tem sido destaque nos estudos para o desenvolvimento de novas formas de geração de energia, assim como no desenvolvimento de tecnologias para a utilização de forma mais eficiente. Para o Brasil, a forma de energia alternativa mais atraente tem sido a Biomassa, destacando-se os resíduos da agroindústria, o álcool proveniente da cana-de-açúcar e mais recentemente os óleos vegetais.

Os resíduos da agroindústria são utilizados geralmente na queima direta, podendo ser utilizados para o aproveitamento do calor ou para a produção de energia elétrica por meio de grupos geradores acionados por turbinas a vapor, como ocorre na agroindústria da cana-de-açúcar, cujo bagaço se tornou importante fonte de energia nas usinas de álcool, gerando até um excedente comercializado com as concessionárias de energia elétrica.

O álcool teve no Brasil o seu auge em meados da década de 1980, quando 90% dos carros produzidos foram equipados com motores a álcool. Porém, a falta de organização da cadeia produtiva levou à falta do produto e conseqüente desestímulo à sua utilização. O desestímulo tem sido derrubado com a tecnologia dos motores multicomcombustíveis, em que o motor, por meios eletrônicos, detecta e utiliza qualquer proporção da mistura álcool/gasolina.

A tecnologia de utilização de motores multicomcombustíveis é totalmente dominada pelo Brasil e exportada para outros países, que serão no futuro importadores de álcool do Brasil.

A utilização comercial do óleo vegetal em motores diesel é recente. Entretanto, Rudolf Diesel, inventor do motor diesel, já sugeria a utilização do óleo de amendoim "*in natura*". Em toda história da utilização do óleo vegetal, por diversas vezes os estudos foram interrompidos devido ao custo do petróleo que atingia altos preços e depois estes se reduziam. Os preços recordes do barril de petróleo acima de U\$140,00 têm incentivado o desenvolvimento de novas tecnologias para a utilização do óleo vegetal nos motores diesel.

O Brasil apresenta vantagens em relação aos países do primeiro mundo, tendo em vista as grandes áreas agricultáveis, as diversas espécies que podem ser

cultivadas ou exploradas de forma sustentável, além das características climáticas que privilegiam o país.

Em termos de área, o Brasil explora menos de um terço de sua área agricultável, o que constitui a maior fronteira para expansão agrícola do mundo. O potencial é de cerca de 150 milhões de hectares, sendo 90 milhões referentes às novas fronteiras, e os outros 60 referentes às terras de pastagens que podem ser convertidas em exploração agrícola em curto prazo (IICA, 2007).

A utilização do óleo vegetal na forma bruta poderá ter vantagens sociais, ambientais e econômicas. A fim de atender à produção de óleos vegetais, muitas culturas poderão ser utilizadas de acordo com as condições regionais, destacando-se aquelas que já são exploradas comercialmente, como amendoim, soja, milho, dendê, girassol e canola, e outras de caráter regional como mamona, andiroba, pequi, buriti, inajá, carnaúba, pinhão-manso, entre outras.

A utilização de óleos vegetais "*in natura*" pode ser viável, tomando-se alguns cuidados e fazendo algumas adaptações no motor com o intuito de melhorar a injeção do combustível, ou em mistura com óleo diesel em proporções que deverão ser estudadas.

As técnicas freqüentemente utilizadas para alimentar um motor diesel com óleo vegetal em nível de até 100% são o aquecimento e a alternância de combustível. O aquecimento pode ser feito por meio de sistemas instalados nos reservatórios que utilizam como fonte de calor a resistência elétrica, cujo sistema é comercializado em alguns países da Europa, ou por outros sistemas que utilizam como fonte de calor os fluidos do sistema de arrefecimento e dos gases de escape. A alternância de combustível tem por finalidade lavar as tubulações do sistema de alimentação com óleo diesel para evitar a formação de gomas no sistema e facilitar a partida a frio.

Outra técnica que tem sido desenvolvida é a alteração da pressão de injeção com conseqüente alteração do avanço da injeção. Machado (2003), estudando o efeito do aquecimento e alteração do avanço da injeção, chegou à conclusão de que o aquecimento é mais eficiente para melhorar o rendimento do motor.

Para Kaltner (2004), os principais problemas no uso de óleos vegetais nos motores a diesel são: a dificuldade de partida a frio em razão da elevada viscosidade dos óleos vegetais; a formação de gomas nos bicos injetores; o desgaste dos



componentes da bomba injetora devido à acidez do óleo; e a formação de depósitos de carvão na câmara de combustão, nos cilindros e nas válvulas.

A utilização de óleos vegetais pode ser de grande importância para a geração de energia por meio de grupos geradores acionados por motores a diesel, principalmente em locais que têm custo de transporte do combustível elevado devido à distância do local da geração de energia e das condições dos meios de transporte, como as condições precárias das estradas no período de chuvas e o baixo nível dos rios no período de seca, dificultando o transporte por barcos.

Pelas informações da Eletrobrás (2008), os sistemas isolados atendem a uma área de 45% do território e a cerca de 3% da população nacional, ou seja, aproximadamente 1,3 milhões de consumidores. Desta forma, pode-se estimar que as propriedades sejam bastante afastadas entre si e o custo para atender com linhas de transmissão e distribuição é elevado, justificando a produção de energia nas comunidades ou vilas.

Assim, o objetivo do trabalho foi verificar o efeito da temperatura na redução da viscosidade, desenvolver e avaliar um sistema de aquecimento utilizando os gases de escape do motor, verificar o efeito de proporções de óleo degomado de soja e o aquecimento dos combustíveis no rendimento do motor, verificar a formação de resíduos na câmara de combustão e o desgaste dos componentes do motor quando operado em condições de trabalho.

## Referências

- ELETROBRAS. Comunidades isoladas. [www.eletrobras.gov.br/ELB/data/Pages/LUMIS79364694PTBRNN.htm](http://www.eletrobras.gov.br/ELB/data/Pages/LUMIS79364694PTBRNN.htm). Acesso em 10/04/2008.
- IICA. Informe Sobre a Situação e Perspectivas da Agroenergia e dos Biocombustíveis no Brasil. 44 p. 2007
- KALTNER, F. J. Geração de energia elétrica em pequenas comunidades da Amazônia, utilizando óleo vegetal “*in natura*” de espécies nativas como combustível em motores diesel. SAEX` 2004. Módulo 1-Biomassa. P 9.

## **Capítulo 1: Desenvolvimento e Avaliação de um Sistema de Aquecimento Para Utilização de Óleos Vegetais em Motores de Ciclo Diesel**

### **1.1. Resumo**

Para a utilização do óleo vegetal "*in natura*" em motores diesel, são necessárias algumas técnicas e adaptações para melhorar o desempenho destes motores, entre elas o aquecimento para a redução da viscosidade. Objetivou-se com este trabalho verificar o efeito da temperatura na redução da viscosidade e desenvolver um sistema de aquecimento do combustível de baixo custo. Foi utilizado o viscosímetro Saybolt, produzido pela Petrotest para a determinação das viscosidades do óleo bruto de girassol, óleo bruto de milho e óleo bruto de soja, nas temperaturas de 60, 90, 120, 150, 180 e 210°C. O sistema de aquecimento foi desenvolvido e montado em um motor Agrale, modelo M90. O motor teve seu desempenho analisado em um dinamômetro. O sistema de aquecimento foi testado nas temperaturas 90, 120 e 150 °C, e combustível com 0, 5, 50, 75 e 100% de óleo vegetal. Concluiu-se que: a maior taxa de redução da viscosidade ocorreu até 90 °C; a partir de 150 °C, nos óleos vegetais, a redução da taxa de viscosidade foi menor com o incremento de temperatura; o sistema de aquecimento desenvolvido foi eficiente para o aquecimento do óleo degomado de soja em todas as proporções estudadas; e que o controle do aquecimento foi eficiente, obtendo-se sempre temperaturas de injeção de combustível dentro dos limites estabelecidos.

### **1.2. Abstract**

For the utilization of "*in natura*" vegetable oil in diesel engines, some techniques and adaptations are necessary to improve the performance of these engines, among them the heating for viscosity reduction. In this work the objective was to verify the effect of the temperature in the viscosity reduction and to develop a low cost fuel heating system. The Saybolt viscometer, produced by Petrotest, was used for the determination of viscosities of the crude oil of sunflower, crude oil of maize and the

crude oil of soy, in the temperatures of 60, 90, 120, 150, 180 and 210°C. The heating system was developed and assembled in a Agrale Engine, model M90. The engine had its performance analyzed in a dynamometer. The heating system was tested in temperatures 90, 120 and 150 °C, and fuel with 0, 5, 50, 75 and 100% of vegetal oil in diesel. It was concluded that: the biggest viscosity reduction rate occurred until 90 °C; starting at 150 °C, in vegetable oils, the reduction of the viscosity rate was smaller with the temperature increase; the developed heating system was efficient for the heating of the soy oil in all the studied ratios; e that the heating control was efficient, always obtaining fuel injection temperatures of inside of the established limits.

### **1.3. Introdução**

A energia poderá ser o grande obstáculo para o desenvolvimento dos países industrializados. Segundo o Ministério de Minas e Energia (2006), no Brasil, em 2005, 44,5% da OIE (Oferta Interna de Energia) teve origem em fontes renováveis, enquanto no mundo essa taxa é de 13,2% e nos países membros da OECD foram de apenas 6,1%. Da participação da energia renovável, 14,8% corresponde à geração hidráulica e 29,7% a outras fontes renováveis. Os 55,5% restantes vieram de fontes fósseis e outras não renováveis.

O ano de 2006 foi marcante para o Brasil, que anunciou a auto-suficiência na produção do petróleo, além disso, tecnologias para utilização mais eficiente de biocombustíveis estão sendo desenvolvidas, entre elas a utilização do etanol em substituição à gasolina e dos óleos vegetais em substituição ao óleo diesel.

A utilização de óleos vegetais em substituição ao óleo diesel tem sido satisfatória, sendo as formas mais usuais o Biodiesel na forma de óleo vegetal "*in natura*" (bruta, refinada e degomada) e mais recentemente na forma de Hbio.

Para atender à produção de óleos vegetais, muitas culturas poderão ser utilizadas de acordo com as condições regionais, destacando-se as que são exploradas comercialmente, como amendoim, soja, milho, dendê, girassol e canola, e outras de caráter regional como mamona, andiroba, pequi, buriti, inajá, carnaúba, pinhão-manso, entre outras. Algumas características produtivas de algumas oleaginosas apresentadas por Parente (2003) podem ser visualizadas na Tabela 1.

**Tabela 1.** Produtividade de algumas oleaginosas.

<b>Espécie</b>	<b>Origem do Óleo</b>	<b>Conteúdo de Óleo (%)</b>	<b>Rendimento (ton. Óleo ha<sup>-1</sup>)</b>
<b>Dendê</b>	Amêndoa	20,0	3,0-6,0
<b>Abacate</b>	Fruto	7,0-35,0	1,3-1,5
<b>Coco</b>	Fruto	55,0-60,0	1,3-1,9
<b>Babaçu</b>	Amêndoa	66,0	0,1-0,3
<b>Girassol</b>	Grão	38,0-48,0	0,5-1,9
<b>Canola</b>	Grão	40,0-48,0	0,5-0,9
<b>Mamona</b>	Grão	43,0-45,0	0,5-0,9
<b>Amendoim</b>	Grão	40,0-43,0	0,6-0,8
<b>Soja</b>	Grão	17,0	0,2-0,4
<b>Algodão</b>	Grão	15,0	0,1-0,2

Fonte: Adaptado de Parente (2003).

A idéia de aproveitar óleos vegetais para alimentar veículos não é nova. Rudolf Diesel, inventor do motor a diesel, propôs, há cerca de cem anos, a utilização de óleo de amendoim como combustível, porém o baixo custo do petróleo inibiu o projeto.

Para Kaltner (2004), os principais problemas no uso de óleos vegetais nos motores diesel são: a dificuldade de partida a frio em razão da elevada viscosidade dos óleos vegetais; a formação de gomas nos bicos injetores; o desgaste dos componentes da bomba injetora devido à acidez do óleo; e a formação de depósitos de carvão na câmara de combustão, nos cilindros e nas válvulas.

A utilização de óleos vegetais "*in natura*" pode ser viável na forma pura, tomando-se alguns cuidados e realizando-se algumas adaptações no motor com o intuito de melhorar a injeção do combustível, ou em mistura com óleo diesel em proporções que deverão ser estudadas.

Para utilizar o óleo vegetal em nível de 100%, é necessário reduzir a sua viscosidade por meio de aquecimento. Este aquecimento pode ser feito por meio de resistência elétrica instalada no reservatório de combustível, cujo sistema é comercializado em alguns países da Europa, ou por outros sistemas adaptados ao motor que utilizam como fonte de calor os fluidos do sistema de arrefecimento e dos gases de escape.

A viscosidade é a resistência interna de um fluido ao movimento de uma camada em relação à outra, e considera o Índice de Viscosidade (IV) como uma

forma de expressar esta variação da viscosidade resultante da mudança de temperatura. Assim, um óleo de alto IV apresenta menor variação na viscosidade com a alteração da temperatura (BARGUER et al., 1966).

Moraes (1980) informa que a Viscosidade do Óleo Bruto de Soja é de 34 cSt a 37,8° C, e Machado (2003) apresentou a variação de viscosidades de alguns óleos vegetais em função do aquecimento (Tabela 2).

**Tabela 2.** Viscosidades de alguns óleos vegetais em função da temperatura.

Temperatura (°C)	Viscosidade (cSt)				
	Amendoim	Algodão	Girassol	Colza	Soja
<b>20</b>	81,0	64,9	71,0	71,8	61,5
<b>22</b>	71,7	60,0	60,0	61,0	58,6
<b>30</b>	58,7	44,0	55,0	47,6	44,6
<b>37,8</b>	42,3	38,5	42,0	37,0	35,0
<b>40</b>	42,0	38,0	39,5	35,0	34,0
<b>50</b>	31,3	28,8	31,0	25,7	24,6
<b>60</b>	23,0	22,5	23,5	22,3	19,0
<b>70</b>	18,0	16,5	17,5	15,7	13,7
<b>80</b>	11,5	10,0	14,0	11,0	9,7
<b>100</b>	8,2	8,4	9,0	10,4	6,0

Fonte: Machado (2003)

Portas & Denucci (2003) comentaram que no Brasil ocorre falta de óleo diesel nas fronteiras agrícolas, onde muitas máquinas e equipamentos são acionados por motores diesel, desde barcos na Amazônia a colhedoras no sul, além de ser o grande responsável pelo aumento de custo dos insumos agrícolas, refletindo no aumento do custo de produção. Seguindo este pensamento, mesmo com a dificuldade da utilização na forma bruta devido à grande viscosidade do óleo vegetal, sua utilização pode ter grande importância para regiões isoladas ou que encontram dificuldades para a aquisição do óleo diesel.

Mazieiro et al (2007), ao avaliarem um motor MWM D229-3, injeção direta, que acionava um trator Valmet modelo 68, alimentaram-no exclusivamente com óleo bruto de girassol, sem adaptação ou técnica para minimizar os efeitos negativos da utilização do óleo vegetal. Iniciaram um teste com duração prevista de 200 horas, o qual foi interrompido com menos de 60 horas devido à elevação da temperatura do lubrificante. Detectaram alterações e acúmulo de carvão no injetor. Concluíram que a alta viscosidade do óleo bruto de girassol dificultava a pulverização dos bicos injetores, propiciando queima irregular do combustível e, conseqüentemente,

formando depósitos nos bicos e cabeçotes (Figura1), levando à redução do desempenho e da durabilidade do motor.



**Figura 1.** Carbonização do bico injetor relatado por Mazieiro e Corrêa (2004).

Machado (2003), utilizando um motor MWM modelo 229, injeção direta e de quatro tempos, verificou que a viscosidade elevada do óleo de palma resultou em atomização pobre, depósitos de carbono, obstrução de linhas de combustível e dificuldades na partida em temperaturas baixas. Porém, quando aquecido a 100 °C apresentou uma viscosidade mais baixa, melhor combustão, tendo verificado menor formação de depósitos.

Soares et al. (2000) avaliaram o desempenho de um motor MWM D229-6, com 90 hp a 1.800 rpm, 6 cilindros e injeção direta, alimentado com óleo de dendê, acoplado a um gerador elétrico. Aqueceram o combustível para reduzir a viscosidade e melhorar o rendimento do motor. As temperaturas utilizadas foram de 55, 80 e 100 °C. Verificaram que a viscosidade afetou a qualidade da pulverização do combustível pelos bicos injetores e que, quando alimentado com óleo a 100 °C, houve acréscimo de 12% no consumo de combustível e redução da carbonização na câmara de combustão. Contudo, os bicos injetores apresentaram problemas de vedação interna ocasionados, possivelmente, pela oxidação do óleo e formação de gomas, ou pela danificação do filtro de combustível, por isso a temperatura de 80 °C foi considerada a mais adequada.

Verifica-se assim a importância do aquecimento do combustível e a técnica de alternância de combustível para o bom funcionamento do motor, quando alimentado com óleo vegetal.

A utilização do óleo vegetal na forma bruta poderá ter vantagens em relação ao Biodiesel. Dentre elas, citam-se as facilidades para a produção do combustível, não necessitando de reagentes, permitindo o aproveitamento das espécies oleaginosas encontradas na propriedade, além de aproveitar os resíduos para a alimentação de animais ou na forma de adubo orgânico.

Objetivou-se com o trabalho verificar o efeito da temperatura na redução da viscosidade dos óleos vegetais e suas misturas com óleo diesel e avaliar um sistema de aquecimento de combustível, utilizando os gases de escape do motor.

#### **1.4. Material e Métodos**

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Mecanização Agrícola (LMA), do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. A avaliação da viscosidade foi feita em um viscosímetro Saybolt, e a avaliação do sistema de aquecimento, foi realizado por meio do desempenho do motor, com a utilização de um dinamômetro de transmissão com motor montado em berço.

##### **1.4.1. Avaliação da Viscosidade**

Para avaliar a variação da viscosidade em função da temperatura, foram utilizados para os ensaios, Óleo Bruto de Girassol (OBG), Óleo Bruto de Milho (OBM) e Óleo Bruto de Soja (OBS), fornecidos pela Caramuru Alimentos. As determinações da viscosidade ocorreram após o aquecimento das amostras nas temperaturas de 60, 90, 120, 150, 180 e 210 °C. Foi utilizado um viscosímetro Saybolt, produzido pela Petrottest, como apresentado na Figura 2. Temperaturas menores a 60° C tiveram dificuldade em escoar pelo orifício do viscosímetro e foram abandonadas. As temperaturas foram controladas por meio de um termostato do próprio viscosímetro e conferidas em um termômetro inserido na amostra.

O ensaio se iniciava com a liberação da passagem da amostra através de um orifício de 1,71 mm de diâmetro, determinando o tempo do escoamento dos 60 cm<sup>3</sup> da amostra. O tempo de coleta da amostra, medida por um cronômetro digital, foi dada em Segundo Saybolt Universal (SSU) e convertida para a unidade centistoke (cSt) com o auxílio do ábaco apresentado por Barguer et al. (1966).



**Figura 2.** Viscosímetro Saybolt

O experimento foi conduzido em um delineamento inteiramente casualizado, com 3 tipos de óleos vegetais, 6 níveis de temperaturas e 5 repetições para cada tratamento.

Para a análise estatística dos dados, foi utilizado o Software Estatístico SAS 9.1 for Windows e para tabulação dos dados e confecção dos gráficos, foi utilizado o software EXCEL 2000.

A equação foi selecionada após a aplicação de modelos pela análise de variância pelo teste F ao nível de 1%. Para a seleção do modelo, levou-se em consideração a simplicidade da equação e o fator de correlação. Neste caso, foi gerado um modelo para cada tipo de óleo, tendo como variável a temperatura.



### 1.4.2. Sistema de Aquecimento

A necessidade de aquecer o combustível até 150°C e os problemas encontrados por Soares et al. (2000) justificaram o desenvolvimento de um sistema adaptado à tubulação de alta pressão entre a bomba injetora e o bico injetor. Desta forma, a tubulação original do motor foi substituída por uma de maior comprimento permitindo sua passagem pelo sistema de aquecimento. A tubulação do motor MWM modelo 229, encontrada no mercado, permitiu efetuar esta adaptação.

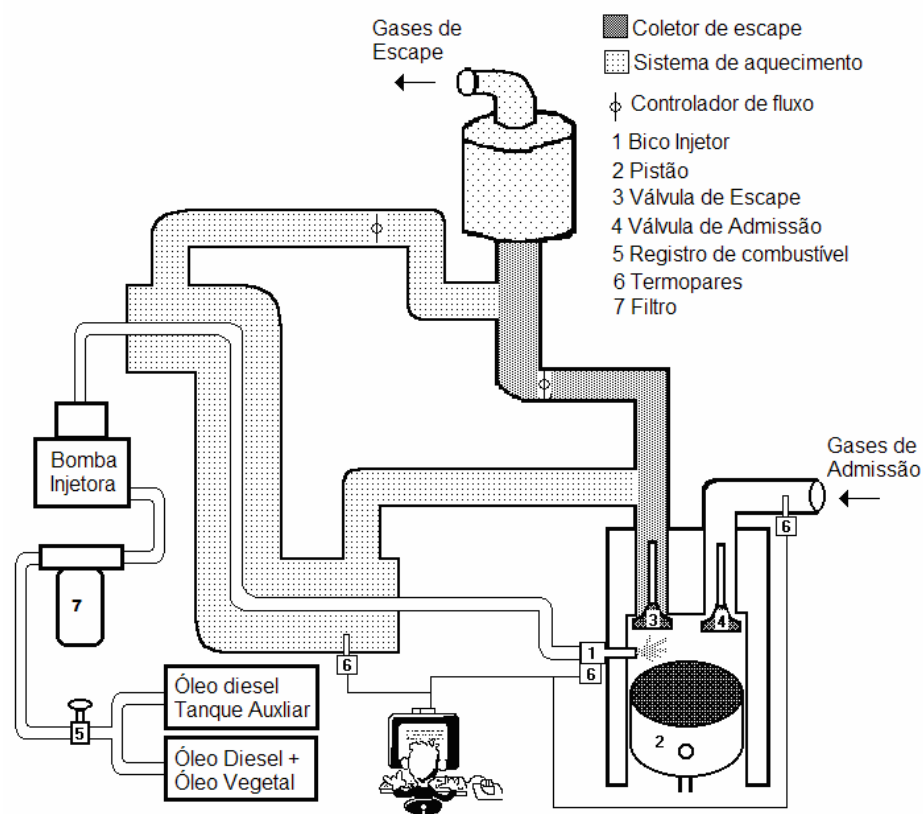
Para o desenvolvimento do sistema de aquecimento, utilizaram-se tubos e conexões de ferro galvanizado de 1 1/4". O sistema de aquecimento foi desenvolvido no LMA e pode ser visualizado na Figura 3.



**Figura 3.** Sistema de aquecimento de combustível desenvolvido para motor estacionário Agrale, modelo M90.

O princípio de funcionamento do sistema de aquecimento consistiu em duas tubulações paralelas por onde ocorre o fluxo dos gases de escape. Em uma, ocorreu o contato entre os gases de escape enquanto a tubulação de combustível promovia o aquecimento. A outra foi utilizada para a passagem dos gases de escape não

utilizados para o aquecimento do combustível e seguiu o fluxo normal, como é apresentado na Figura 4. Foram instalados registros para o controle da temperatura do combustível por meio do fluxo dos gases. O sistema apresentou facilidade de construção e operação.



**Figura 4.** Sistema de aquecimento do combustível.

O sistema de aquecimento foi montado em um Motor Agrale, modelo M90, com potência nominal de 9,6 kW (13 cv) a 2.500 rpm, injeção direta, refrigerado a ar e taxa de compressão de 20:1. O motor foi ensaiado utilizando um dinamômetro de rotação do tipo transmissão montado em berço, aplicando-se força de frenagem de 18, 25, 31, 38, 45, 52, 58 e 67 N.

As proporções de Óleo Degomado de Soja utilizadas para avaliar o sistema de aquecimento foram de 0, 5, 50, 75 e 100%, denominados, respectivamente, de OV0, OV5, OV50, OV75 e OV100. Deve-se lembrar que o óleo diesel adquirido em posto de combustível é classificado como diesel interiorano e contém uma mistura de 2% de biodiesel, denominado assim de B2.

As temperaturas de injeção do combustível selecionadas para avaliar o sistema de aquecimento foram de 90, 120 e 150 °C. Na medição das temperaturas, foi fixado um termopar do tipo K na tubulação de alta pressão do combustível próximo ao bico injetor, tendo sido a leitura feita em um termômetro digital. Com o intuito de evitar a perda do calor para o ambiente, o termopar foi coberto por um isolante térmico (fibra de vidro) e uma camada de papel alumínio, como ilustrado na Figura 5.



**Figura 5.** Termopar utilizado para coleta da temperatura de injeção, coberto com isolante térmico.

O motor foi aquecido por um período de até 15 minutos, e foi aplicado a força de frenagem pelo dinamômetro para estabilizar o regime de trabalho em torno de 2500 rpm, regime de trabalho utilizada no grupo gerador. Com a rotação estabilizada, ajustou-se a temperatura de injeção do combustível, selecionado para o ensaio, por meio do controle do fluxo dos gases do escape do motor, estabelecendo-se um limite de  $\pm 5\%$  de erro. Logo após a estabilização, retirou-se a força de frenagem do motor e se iniciaram as avaliações de desempenho do motor medindo-se a temperatura para cada força de frenagem aplicada pelo dinamômetro.

O experimento foi conduzido segundo o delineamento inteiramente casualizado, sendo avaliados 3 níveis de temperatura, 5 proporções de óleo vegetal e 8 níveis de força, com 3 repetições para cada tratamento. Para a análise

estatística dos dados, foi utilizado o Software Estatístico SAS 9.1 for Windows e para a confecção dos gráficos, foi utilizado o software EXCEL 2000.

A equação foi selecionada após a aplicação de modelos que tiveram como variáveis os níveis de combustíveis e a temperatura de injeção ajustada, e atenderam à análise de variância pelo teste F ao nível de 1% e ao teste T ao nível de 1% para verificar a influência dos termos no modelo gerado. Para a seleção do modelo, levou-se em consideração ainda a simplicidade da equação e o fator de correlação.

## 1.5. Resultados e Discussões

### 1.5.1. Viscosidade em Função da Temperatura.

Por meio da análise de regressão, foram determinadas as equações apresentadas no Quadro 1. Pela Análise de Variância, verificou-se que os modelos foram significativos ao nível de 1% pelo teste F.

A viscosidade foi reduzida com o aumento da temperatura e teve valores semelhantes para a temperatura acima de 150° C. Até 150° C, o óleo de maior viscosidade foi o de milho, seguido pelos óleos de soja e girassol, como pode ser visualizado na Figura 6.

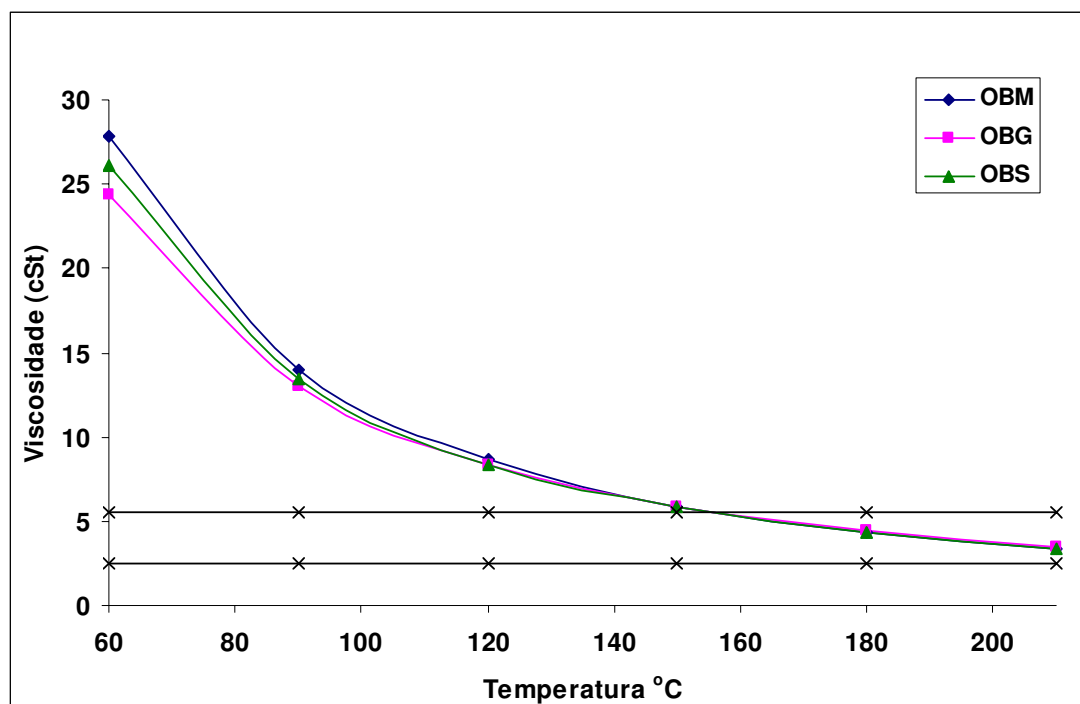
**Quadro 1.** Equações para estimar as viscosidades dos óleos estudados.

Tipo de Óleo	Equação	R <sup>2</sup>	Equação
Soja (OBS)	$v_{OBS} = 21445,0T^{-1,6389}$	0,9981	1
Girassol (OBG)	$v_{OBG} = 14195,7T^{-1,5550}$	0,9978	2
Milho (OBM)	$v_{OBM} = 28653,9T^{-1,6940}$	0,9975	3

Onde:  $v_{OBS}$  - Viscosidade Cinemática do OBS, cSt;  
 $v_{OBG}$  - Viscosidade Cinemática do OBG, cSt;  
 $v_{OBM}$  - Viscosidade Cinemática do OBM, cSt;  
T – Temperatura, °C.

A maior redução de viscosidade dos óleos vegetais verificou-se entre 60 e 90°C, e quanto maior a temperatura aplicada, menor se torna a redução da

viscosidade. A partir de 150°C, houve pequena alteração da viscosidade, além de ocorrer valores semelhantes entre os óleos vegetais estudados.



**Figura 6.** Viscosidades estimadas pelas Equações 1, 2 e 3, em função da temperatura, para os óleos estudados

Mesmo ocorrendo uma redução menor da viscosidade com o acréscimo da temperatura, o aumento da temperatura pode ser aplicado para obter valores de viscosidades de interesse para outros estudos, já que para nos limites de temperaturas aplicadas, obteve-se redução de até 88% da viscosidade, em relação à temperatura inicial de 60° C. A redução percentual da viscosidade devido ao aquecimento pode ser verificada no Quadro 2.

**Quadro 2.** Percentual da redução de viscosidade em cada faixa de temperatura.

Faixa de Temperatura	Milho (%)	Girassol (%)	Soja (%)
60-90	49,68	46,77	48,55
60-120	69,09	65,97	67,89
60-150	78,82	75,95	77,73
60-180	84,45	81,88	83,48
60-210	88,02	85,74	87,17

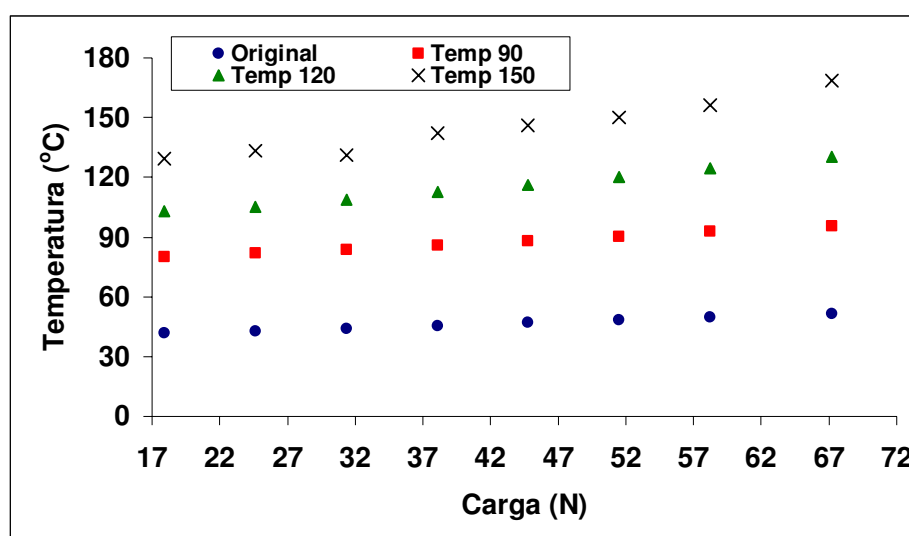
As viscosidades dos óleos vegetais foram similares ao do óleo diesel, a partir do aquecimento superior a 160°C, passando a atender aos limites de viscosidade estabelecidos pela Portaria ANP Nº 310, ou seja, entre 5,5 e 2,5 cSt.

As viscosidades estimadas neste trabalho, a partir das Equações 1 e 2 apresentadas na Tabela 2 e as viscosidades apresentadas por Machado (2003) nas temperaturas de 60º, 70º, 80º, e 100º C, foram comparadas e verificou-se que, para todas as temperaturas, as viscosidades estimadas tiveram tendência a ter valores superiores aos apresentados pelo autor.

### 1.5.2. Avaliação do Sistema de Aquecimento

Para a análise da eficiência do sistema de aquecimento, foram aplicadas força de frenagem pelo dinamômetro. O monitoramento das temperaturas foi feito por meio de termômetros. Verificou-se que a rotação de trabalho do motor, de 2500 rpm, sugerida pelo fabricante, ocorreu quando foi aplicada uma força de 52 N.

Para a força de 52 N, pode-se verificar na Figura 7, que as médias das temperaturas de injeção observadas no experimento, foram semelhantes das temperaturas previamente estabelecidas para a condição de trabalho do motor. Desta forma, confirma-se o bom funcionamento do sistema de controle de temperatura para o aquecimento do combustível, visando à sua melhor queima na câmara de combustão.



**Figura 7.** Media das temperaturas de injeção observadas.

O sistema de aquecimento desenvolvido pode aumentar a temperatura de injeção sem causar danos ao filtro e promover melhor pulverização do combustível reduzindo a carbonização na câmara de combustão do motor, como levantado por Soares et al. (2000). O sistema pode ainda aquecer qualquer proporção de combustível sem se preocupar com o ponto de fulgor do óleo diesel.

## 1.6. Conclusões

Este trabalho permitiu concluir que:

- o aumento de temperatura propicia redução da viscosidade, principalmente entre 60º e 90º C;
- os óleos vegetais apresentaram viscosidade semelhante ao óleo diesel quando aplicadas temperaturas acima de 160º C;
- o sistema de aquecimento desenvolvido foi satisfatório para o aquecimento do óleo degomado de soja em qualquer proporção; e
- o controle do sistema de aquecimento foi eficiente, obtendo-se temperaturas de injeção de combustível dentro dos limites estabelecido.

## 1.7. Referências Bibliográficas

- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO-ANP (2001). Portaria ANP N° 310, de 27 DE Dezembro de 2001. Diário Oficial da União de 28/12/2001.
- BARGUER, E.L., LILJEDAHL, J.B., CARLETON, W.M., MCKIBBEN, E.G. **Tratores e seus motores**. São Paulo: Edgar Blucher, 1966. 398p.
- KALTNER, F. J. Geração de energia elétrica em pequenas comunidades da Amazônia, utilizando óleo vegetal "*in natura*" de espécies nativas como combustível em motores diesel. SAEX` 2004. Módulo 1-Biomassa. P 9.
- MACHADO, P, R, M. **Avaliação de Desempenho do Óleo de Soja como Combustível para Motores Diesel**. 212 p. Dissertação, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria-RS. 2003.

- MAZIEIRO, J. V. G.; CORRÊA, I.M.; ÚNGARO, M.R., BERNARDI, J. A.; STORINO, M. 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
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME, Balanço Energético Nacional. Análise Energética Brasileira – período 1970 a 2005. Brasília. 2006.
- PARENTE, E. J.de S. et al. **Biodiesel: uma aventura tecnológica num país engraçado**. Fortaleza: Tecbio, 2003. 68p.
- PORTAS, A., e DENUCCI, S. A cadeia produtiva do Biodiesel. **O Estado de São Paulo**, São Paulo, 08 de out. 2003. Caderno Agrícola.
- SOARES, G. F. W.; VIEIRA, L. S. R.; NASCIMENTO, M. V. G. Operação de um grupo gerador utilizando óleo vegetal bruto como combustível . In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL-AGRENER, 3, 2000. Campinas. Anais... Campinas: [s.n.], 2000.



## **Capítulo 2: Avaliação da Utilização de Óleo Degomado de Soja em Motor de Ciclo Diesel.**

### **2.1. Resumo**

Os estudos com combustíveis alternativos no Brasil não são recentes, pois são realizados desde a década de 20. O país tem grande vantagem em relação aos países do primeiro mundo, tendo em vista as grandes áreas agricultáveis, as diversas espécies que podem ser cultivadas ou exploradas de forma sustentável, além das características climáticas que privilegiam o país. A utilização de óleo vegetal na forma "*in natura*" poderá ser uma alternativa viável para regiões distantes dos grandes centros, onde existe dificuldade de acesso para o transporte do diesel. Visando a utilização do óleo vegetal "*in natura*" na geração de energia elétrica, foi utilizado um Motor Agrale, modelo M90, com potência nominal de 9.6 kW (13 CV), a 2.500 rpm, injeção direta, refrigerado a ar e taxa de compressão de 20:1. Os combustíveis avaliados foram: óleo diesel puro e misturas com Óleo Degomado de Soja (ODS) com diesel nas proporções de 5, 50, 75 e 100%. As temperaturas de injeção utilizadas foram: temperatura ambiente, 90°, 120° e 150°C. O combustível foi aquecido por meio de um dispositivo adaptado à tubulação dos gases de escape do motor. Para o ensaio do motor, este foi acoplado ao dinamômetro de transmissão com motor montado em berço, aplicando-se forças de frenagem de 18, 25, 31, 38, 45, 52, 58 e 67 N. Utilizou-se a técnica de alternância de combustível. Verificou-se que a temperatura não apresentou efeito no desempenho do motor. A potência nominal, o torque e o regime de trabalho não sofreram influência do aquecimento do combustível e nem da adição de ODS ao combustível. O consumo específico sofreu influência, aumentando com a adição de ODS no combustível, chegando a 8% na condição OV100.

### **2.2. Abstract**

The studies with alternative fuels in Brazil are not recent, they have been accomplished since the 1920's. This country has great advantage compared to the

first world countries, analyzing the great planting areas, the diverse species that can be cultivated or be explored in a sustainable way, beyond the climatic characteristics that privilege the country. The “*in natura*” vegetable oil use could be a viable alternative for regions distant from the great centers, where access difficulty for diesel transportation exists. Aiming at the use the “*in natura*” vegetable oil in the generation of electricity, an Agrale Engine, M90 model, was used with normal rated power of 9.6 kW (13 CV), at 2,500 rpm, direct injection, air cooled and compression rate of 20:1. The evaluated fuels were: pure diesel oil and mixtures with ungummed soy oil (ODS) with diesel ratios of 5, 50, 75 and 100%. The injection temperatures used were: environment temperature, 90°, 120° and 150°C. The fuel was heated by a device adapted to the exhaust gases tubing of the engine. For the engine evaluation, it was connected to the transmission dynamometer, assembled in a cradle, applying loads of 18, 25, 31, 38, 45, 52, 58 and 67 N. The fuel alternation technique was used. It was verified that the temperature did not show any effect in the engine performance. The power, the torque and the work regime did not suffer influence from the fuel heating nor the addition from ODS to the fuel. The specific consumption suffered influence, increasing with the addition of ODS to the fuel, reaching at 8% in the OV100 condition.

### **2.3. Introdução**

A energia poderá ser o grande obstáculo para o desenvolvimento dos países industrializados. No Brasil, segundo o Ministério de Minas e Energia (2006), no ano de 2005, 44,5% da OIE (Oferta Interna de Energia) originou-se de fontes renováveis, enquanto no mundo, essa taxa foi de 13,2%, e nos países membros da OECD foram de apenas 6,1%. Dos 44,5 % da participação da energia renovável, 14,8% corresponderam à geração hidráulica e 29,7% a outras fontes renováveis. Os 55,5% restantes da OIE vieram de fontes fósseis e outras não renováveis.

Os estudos com combustíveis alternativos no Brasil não são recentes, pois desde a década de 20 o Instituto Nacional de Tecnologia (INT) tem pesquisas direcionadas ao assunto. A partir da década de 70, juntamente com o Instituto de Pesquisa Tecnológica (IPT) e com a Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira (CEPLAC), o INT vem desenvolvendo pesquisas relativas à utilização de

óleos vegetais como combustível. Em 1983, motivados pela alta nos preços do petróleo, o governo federal lançou o Programa de Óleos Vegetais (OVEG), em que foram testadas a utilização de biodiesel e misturas combustíveis em veículos que percorreram mais de um milhão de quilômetros. Com a elevação do preço do óleo diesel e o interesse em reduzir sua importação, o governo lançou em 30 de outubro de 2002, pela portaria Ministerial 702, o Programa Brasileiro de Desenvolvimento Tecnológico do Biodiesel (MCT, 2002).

Em 1984, foram realizados testes em motores diesel Agrale, utilizando como combustível o Biodiesel de Cutieira (*Joannesia princeps*) por Salvador (1984), iniciando os trabalhos com a utilização de óleo vegetal em motores diesel.

O Brasil tem grandes vantagens em relação aos países do primeiro mundo, tendo em vista as grandes áreas agricultáveis, as diversas espécies que podem ser cultivadas ou exploradas de forma sustentável, além das características climáticas que privilegiam o país.

Para os motores do ciclo otto, o álcool é um biocombustível já testado e aprovado, sendo até produto de exportação para países do primeiro mundo, e a tecnologia para sua utilização tem avançado tanto que já são comercializados motores “flex”, que utilizam uma mistura de álcool ou gasolina em qualquer proporção. A utilização de óleos vegetais em substituição ao óleo diesel tem sido satisfatória, sendo as formas mais usuais o Biodiesel na forma de óleo vegetal “*in natura*” e mais recentemente na forma de Hbio. Para atender à produção de óleos vegetais, muitas culturas poderão ser utilizadas de acordo com as condições regionais, destacando-se aquelas que já são exploradas comercialmente, como amendoim, soja, milho, dendê, girassol e canola, e outras de caráter regional como mamona, andiroba, pequi, buriti, inajá, carnaúba, pinhão-manso, entre outras.

Para a Petrobrás (2007), o Hbio é produzido por um sistema que usa matérias-primas de origem vegetal ou animal e por hidrorefino – o refino com a utilização do hidrogênio – que produz óleo diesel. O processo acontece dentro de um catalisador que fica em movimento ininterrupto e os óleos de origem vegetal são adicionados ao diesel tradicional, sendo todo o conjunto bombardeado por moléculas de hidrogênio. A hidrogenação diminui a concentração de partículas poluentes como o enxofre, e aumenta as que contribuem para a eficiência do produto como a parafina, que melhora a qualidade da ignição dos veículos. Pelas

expectativas da Petrobrás, em 2007 esperava produzir 256 milhões de litros de diesel a partir do processo HBio.

O biodiesel é definido por muitos como um produto resultante de um processo químico denominado transesterificação, em que os óleos vegetais, animais ou residuais são misturados a um catalisador e álcool. Após a reação completa, tem-se um subproduto denominado glicerina, além do éster, que recebe o nome de biodiesel.

A utilização de óleo vegetal na forma “*in natura*” é importante para regiões distantes dos grandes centros, onde existe dificuldade de acesso ao transporte do diesel, caso específico das regiões norte e parte do centro-oeste. Nestas regiões, além de dificuldade do transporte para o óleo diesel, existe a ocorrência de oleaginosas nativas que têm grande potencial de produção de óleos vegetais.

Portas & Denucci (2003) comentaram que, no Brasil, ocorre falta do diesel nas fronteiras agrícolas, onde muitas máquinas e equipamentos são acionados por motores diesel, desde os motores dos barcos amazônicos às colhedoras no sul, além de ser grande responsável pelo aumento dos insumos agrícolas que aumentam os custos de produção dos produtos agrícolas. Seguindo este pensamento, mesmo com a dificuldade de utilização na forma bruta devido à grande viscosidade do óleo vegetal, a utilização nesta forma pode ser de grande importância para regiões isoladas ou que encontram dificuldade para a aquisição do óleo diesel.

Para Moraes (1982), o óleo vegetal misturado ao óleo diesel e na forma “*in natura*” em substituição ao óleo diesel, são alternativas viáveis, considerando-se, especialmente, os aspectos sociais.

A utilização do óleo vegetal na forma bruta poderá ter as seguintes vantagens em relação ao biodiesel: facilidade da produção do combustível, não necessitar de reagentes para sua produção, produção do combustível utilizando espécies de oleaginosas encontradas na propriedade rural, e extração do óleo na propriedade, cujos resíduos poderão ser transformados em farelo para alimentação de animais ou em adubo orgânico.

A idéia de aproveitar óleos vegetais para alimentar veículos não é nova. Rudolf Diesel, inventor do motor a diesel, propôs, há cerca de cem anos, a utilização de óleo de amendoim como combustível, porém o baixo custo do petróleo inibiu o

projeto. Os motores diesel daquela época utilizavam o sistema de injeção indireta, isto é, além da câmara de combustão, possuíam uma pré-câmara que garantia uma maior tolerância às características dos combustíveis em relação aos motores modernos. Entretanto, o baixo rendimento daqueles motores, aliado ao melhoramento gradativo da qualidade dos combustíveis, com o passar dos anos a pré-câmara passou a ser desnecessária e prejudicial ao desempenho dos motores diesel e, então se passou a incorporar a injeção direta.

As características de um motor de maior interesse para este estudo se referem ao tipo de injeção (direta ou indireta), pressão de injeção do combustível, avanço do ângulo de injeção, taxa de compressão, sistema de arrefecimento, regime de trabalho e temperatura de injeção. Em geral, são características que podem influenciar a queima do combustível na câmara de combustão.

Para Barguer et al. (1966), no sistema de arrefecimento a ar, a temperatura das paredes dos motores é em geral maior que nos motores arrefecidos com ar e água, devido ao baixo coeficiente de transmissão de calor entre o metal e o ar.

Na utilização do óleo vegetal, devem-se verificar fatores relacionados ao combustível e ao motor. As características do combustível de maior interesse para o bom funcionamento do motor são: poder calorífico, viscosidade e número de cetanos.

Em artigo técnico da Revista Elo com o tema “Qualidade do óleo diesel no Brasil”, o poder calorífico significa poder ou energia calorífica que um combustível é capaz de desenvolver durante sua combustão e se expressa por uma unidade chamada caloria, que é a quantidade de calor necessária para elevar de 1 °C a quantidade de um grama de água. Combustíveis com poder calorífero inferior ao especificado comprometem o rendimento dos motores, fazendo com que os mesmos operem com potências aquém das anunciadas pelos fabricantes.

Em um outro artigo da Revista Elo com o tema “O diesel e o Motor Caterpillar”, a viscosidade é definido como a medida de resistência do líquido ao fluxo. Para os motores Caterpillar é recomendada a viscosidade ente 1,4 a 20 centistoke na entrada da bomba injetora. Quando utilizado em padrões inaceitáveis pode causar o desgaste do trem de engrenagens, eixo de cames e tuchos do conjunto de bombas injetoras, assim como, problemas para injeção e dificuldade na partida.

Ainda neste artigo o número de cetanos é conceituado como a medida da qualidade de ignição do combustível e afeta a partida e a aceleração do motor. Motores com injeção indireta requerem um número de cetanos mínimo de 35, e para os motores de injeção direta, o mínimo é de 40 para boas características de partida. Número de cetanos baixo geralmente causa atraso na ignição do motor, dificultando a partida e a detonação no motor. O atraso da ignição causa deficiência no desempenho, podendo provocar avarias ao motor. A sensibilidade ao número de cetanos pode ser reduzida pela elevação da temperatura do ar de admissão.

Para Kaltner (2004), os principais problemas no uso de óleos vegetais nos motores diesel são: a dificuldade de partida a frio em razão da elevada viscosidade dos óleos vegetais; a formação de gomas nos bicos injetores; o desgaste de componentes da bomba injetora devido à acidez do óleo; e a formação de depósitos de carvão na câmara de combustão, nos cilindros e nas válvulas.

Machado (2003) avaliou um motor Agrale M90, injeção indireta, 4 tempos, taxa de compressão de 19:1, refrigerado a ar, potência de 8,83 kW(12 cv) a 2750 rpm. O motor foi alimentado com combustíveis com proporções de 10, 30, 50, 70 e 100% de óleo de soja. Para cada mistura, foram estudados o efeito do aquecimento do combustível e a alteração do avanço de injeção. As temperaturas aplicadas foram de 57 e 68° C e o avanço de injeção de 1º, 2º e 3º graus superiores aos 21º recomendados pelo fabricante. O aquecimento foi feito por um sistema instalado no tanque de combustível, sendo utilizadas como fonte de calor resistências elétricas com controle eletrônico de temperatura. Porém, para alguns combustíveis com maiores níveis de óleo diesel na temperatura de 68°C, o ensaio não foi realizado devido à evaporação do óleo diesel. Verificou ainda que o aquecimento tem maior influência no desempenho do motor. No caso do avanço, quando utilizados os avanços de 21 e 22º, o motor apresentou rendimento superior àquele apresentado com 23 e 24º. O aquecimento de 58 para 67° C, para a condição de óleo de soja puro, fez com que o motor aumentasse a potência em 6,7%, o torque em 6,6% e o consumo específico reduzido em 13%.

Nascimento et al. (1999) relataram a experiência que tiveram ao alimentar um grupo gerador de 75 kVA (60 kW) com óleo de dendê "*in natura*", adaptando um sistema de pré-aquecimento do óleo e um sistema de alternância de combustível, para permitir a operação com óleo diesel durante sua partida e seu desligamento. A

temperatura média de injeção do óleo foi de 54°C. Nas primeiras 35 horas de utilização, verificou-se redução da potência máxima de 53 kW, quando alimentado com diesel, para 49,6 kW, quando alimentado com óleo de dendê. Observou-se também aumento de 15 a 20% no consumo específico, dependendo da força aplicada. Os autores afirmaram ser viável, sob certas condições, a utilização do óleo vegetal "*in natura*" na geração de energia elétrica, o que é justificável pela vocação das localidades isoladas.

Soares et al. (2000) avaliaram o desempenho de um motor MWM D229-6, com 90 hp (67kW), a 1.800 rpm, 6 cilindros e injeção direta, acoplado a um gerador elétrico e alimentado com óleo de dendê. Foram aplicadas cargas de 12,5, 25,0, 37,0 e 48,5 kW, sendo o motor alimentado com óleo de dendê nas temperaturas de 55, 80 e 100° C. Durante 5 a 10 minutos do início e término da operação, o motor era alimentado com óleo diesel. Verificou-se que a viscosidade afetou a qualidade da pulverização do combustível pelos bicos injetores e que, quando alimentado com óleo a 100° C, houve acréscimo de 12% no consumo de combustível e redução da carbonização da câmara de combustão. Contudo, os bicos injetores apresentaram problemas de vedação interna ocasionados possivelmente pela oxidação do óleo e formação de gomas ou pela danificação do filtro de combustível. Por isso, a temperatura de 80° C foi considerada a mais adequada.

Torres (2000) avaliou um motor Agrale M80, injeção indireta, com potência de 7 cv (5 kW), alimentado com óleo de dendê, operando em regime de trabalho constante, com a potência variando de 50 a 100% da potência máxima. O autor concluiu que ocorreu uma redução na potência máxima entre 5 e 15% na carga máxima, quando o motor foi alimentado com óleo de dendê. Porém o combustível alternativo apresenta vantagens em propriedades rurais que não dispunham de energia elétrica por ser uma fonte energética.

Mazieiro & Corrêa (2004), ao avaliarem um motor MWM D229-3, injeção direta, que acionava um trator Valmet modelo 68, alimentado com óleo diesel durante as 50 primeiras horas e depois exclusivamente com óleo bruto de girassol, verificaram que ocorreu redução de 7,1 a 10,1% na potência da TDP e aumento de 13,9 a 16% no consumo específico. O teste de 200 horas foi interrompido com menos de 60 horas devido à elevação da temperatura do lubrificante, tendo sido detectados, previamente, a ocorrência de alterações do mesmo e acúmulo de

carvão no injetor. Os autores ainda relataram que a alta viscosidade do óleo bruto de girassol dificultou a pulverização dos bicos injetores, propiciando queima irregular do combustível e, conseqüentemente, formando depósitos nos bicos e cabeçotes que levam à redução do desempenho e da durabilidade do motor.

Oliveira & Costa (2002) comentaram que a produção de energia elétrica em grupo gerador é uma alternativa viável do ponto de vista técnico, pelo fato de a dinâmica do regime ser mais regular que no setor de transporte, onde ocorrem aceleração e desaceleração contínuas.

O objetivo do trabalho foi avaliar o efeito da temperatura no desempenho de um motor diesel alimentado com misturas de Óleo Degomado de Soja (ODS) e óleo diesel.

## **2.4. Materiais e Métodos**

O Motor Agrale modelo M90, com potência nominal de 9.6 kW (13 Cv), a 2.500 rpm, injeção direta, refrigerado a ar e taxa de compressão de 20:1, cedido exclusivamente para o estudo pela AGRALE SA.

O experimento relacionado a esta pesquisa foi executado nas dependências do Laboratório de Mecanização Agrícola (LMA), da Universidade Federal de Viçosa. Na condução deste experimento foi utilizado o esquema fatorial segundo o delineamento inteiramente casualizado, com três repetições. Os fatores avaliados neste experimento foram força de frenagem, proporções de ODS com óleo diesel; e temperaturas de injeção de combustível. Os níveis de força de frenagem avaliados foram 18, 25, 31, 38, 45, 52, 58 e 67 N. Para a aplicação dos níveis de força de frenagem ao motor, foi utilizado um dinamômetro de rotação do tipo transmissão montado em berço, como ilustrado na Figura 1.

As proporções de ODS avaliadas foram óleo diesel puro ( $OV_0$ ) e misturas de Óleo Degomado de Soja (ODS) com diesel nas proporções de 5 % ( $OV_{05}$ ), 50%( $OV_{50}$ ), 75%( $OV_{75}$ ) e 100% ( $OV_{100}$ ). O óleo diesel adquirido em posto de combustível é classificado como diesel interiorano e contém uma mistura de 2% de biodiesel, denominado assim de B2.





**Figura 1.** Dinamômetro utilizado na avaliação do motor.

O óleo bruto de soja foi selecionado para a execução desta pesquisa, devido à expansão desta cultura em todo o Brasil, em especial nos estados da região amazônica, e por ser um dos óleos de menor cotação no mercado, além dos resíduos serem importantes para a alimentação de animais. As principais características físicas do óleo de soja são apresentadas na Tabela 2, juntamente com as características do óleo diesel e do biodiesel originado de óleo de soja.

**Tabela 1.** Características físicas do OBS, biodiesel e óleo diesel tipo interior.

<b>Características</b>	<b>OBS</b>	<b>Biodiesel de Soja 100%</b>	<b>Biodiesel</b>	<b>Óleo Diesel Interior</b>
<b>Massa Específica</b>	0,91	0,88	*	0,82 a 0,88
<b>Ponto de Fulgor(°C)</b>	315	Nd <sup>(3)</sup>	100	38
<b>Viscosidade</b>	34 a	3,17 a	**	2,5 - 5,5
<b>Cinemática (cSt)</b>	37,8° C	40° C		A 40° C
<b>Número de Cetano</b>	40	Nd <sup>(1)</sup>	45	42
<b>Fontes</b>	MORAES (1980)	FERRARI et al (2004)	ANP (2003)	ANP (2001)

\* A mistura biodiesel/óleo diesel utilizada deverá obedecer aos limites estabelecidos para massa específica a 20°C, constantes da Portaria ANP N° 310 que especifica o óleo diesel automotivo, em vigor.

\*\* A mistura óleo diesel/biodiesel utilizada deverá obedecer aos limites estabelecidos para viscosidade a 40° C, constantes da especificação vigente da ANP de óleo diesel automotivo.

(1) Não determinado pelos autores.

As temperaturas de injeção utilizadas para o ensaio do motor foram: temperatura ambiente com a tubulação original e 90, 120 e 150°C, utilizando o

sistema de aquecimento. O aquecimento do combustível foi feito utilizando o calor dos gases de escape e o controle da temperatura feito por meio do controle de fluxo dos gases, conforme ilustrado na Figura 4 do Capítulo 1.

Para o controle da temperatura de injeção de combustível no motor, foi instalado um termopar tipo K na superfície da tubulação de alta pressão e a leitura foi realizada por meio de um termômetro digital (Figura 2). O termopar foi instalado o mais próximo possível do bico injetor, revestido pelos isolantes térmicos, lã de vidro e papel alumínio, como apresentado na Figura 5 do capítulo 1.



**Figura 2:** Termômetro digital utilizado para leitura das temperaturas.

Nos ensaios, com duração de 5 minutos, fez-se a coleta de dados determinando-se o regime de trabalho, a força de frenagem aplicada pelo dinamômetro, o consumo e as temperaturas. A rotação do dinamômetro e o regime de trabalho do motor foram determinados com o auxílio de um tacômetro digital de contato.

O consumo de combustível do motor durante os 5 minutos foi medido com a utilização de um fluxômetro constituído de uma proveta com capacidade de 250 ml, com resolução de 2 ml. O tempo foi medido por meio de um cronômetro digital.

O motor, no início e final da operação, foi alimentado com óleo diesel. Para o aquecimento, o motor funcionou durante 5 minutos em regime livre e outros 5 minutos com força de frenagem para avaliar a sua operação em regime de trabalho com rotação de 2500 rpm. Depois do aquecimento, o motor foi mantido com carga, com o combustível a ser ensaiado, por mais 10 minutos, quando foi feito o ajuste da temperatura de injeção do combustível selecionado no sistema de aquecimento. Depois da regulagem da temperatura, aplicaram-se os níveis de carga em ordem crescente iniciando os ensaios.

A potência do motor foi calculada por meio da Equação 1.

$$P = K C \omega 0,746 \quad \text{Equação 1}$$

Em que:

- P - potência do motor, em kW;
- K - constante do dinamômetro,  $K = 0,00025$ ;
- C - força de frenagem aplicada pelo dinamômetro, em lbf; e
- $\omega$  - regime de trabalho do motor, em rpm.

Utilizando a potência calculada (Equação 1), foi calculado o torque por meio da Equação 2:

$$\tau = \left( \frac{1000 \ 60 \ P}{2 \ \pi \ \omega} \right) \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

- $\tau$  - torque, em mN;
- P - potência do motor, em kW; e
- $\omega$  - regime de trabalho do motor, em rpm.

Para determinação do consumo específico do motor, primeiramente foi calculado o consumo horário por meio da Equação 3.

$$Ch = \frac{V}{t} \quad \text{Equação 3}$$

Em que:

- Ch - consumo horário, em  $L \ h^{-1}$ ;

- V - volume de combustível consumido, em L; e  
 T - tempo de duração do ensaio, em h.

Depois de calculado o consumo horário, foi calculado o consumo específico utilizando-se a Equação 4.

$$C_e = \frac{Ch D_c}{P} \quad \text{Equação 4}$$

Em que:

- $C_e$  - consumo específico, em  $g \text{ kWh}^{-1}$ ;  
 $Ch$  - consumo horário, em  $L \text{ h}^{-1}$ ;  
 $P$  - potência do motor, em kW; e  
 $D_c$  - densidade do combustível, em  $kg \text{ dm}^{-3}$ .

Para estimar a massa específica do combustível, foi utilizada a Equação 5, que tem como variáveis independentes a temperatura do combustível e a percentagem de óleo vegetal no combustível. A Equação 5 foi gerada utilizando-se os resultados observados das medidas do volume de combustível contido em uma proveta e da sua massa, em uma balança de precisão. A massa específica foi calculada pela relação entre a massa e o volume. As temperaturas aplicadas na amostra variaram de 17° a 70°C. As proporções de ODS utilizadas foram de 0, 5, 50, 75 e 100%.

$$D_c = 0,87193 + 0,05618OV - 0,0006835T \quad \text{Equação 5}$$

Em que:

- $D_c$  - densidade do combustível, em  $kg \text{ dm}^{-3}$ ;  
 $OV$  - percentual de Óleo Vegetal no Combustível; e  
 $T$  - temperatura do combustível, em ° C.

Os resultados de potência, torque e consumo específico do motor, tiveram seus valores corrigidos por meio do fator de redução, em função da pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ar. Essas reduções foram feitas de acordo com a NBR-5484 (ABNT,1985), tendo sido consideradas as condições-

padrão para os ensaios. A redução para os motores diesel pode ser calculada utilizando-se o fator de redução conforme pela Equação 6.

$$kd = fa^{fm} \quad \text{Equação 6}$$

Em que:

- kd - fator de redução para motores diesel;
- fa - fator atmosférico; e
- fm - fator do motor.

O cálculo do fator atmosférico deve ser feito utilizando a Equação 7 para a condição de motor de aspiração natural.

$$fa = \left( \frac{99}{ps} \right) \left( \frac{T_{ar} + 273}{298} \right)^{0,7} \quad \text{Equação 7}$$

Em que:

- T<sub>ar</sub> - temperatura do ar de admissão, em °C;
- ps - pressão do ar seco, em kPa;

Para fazer a redução, é necessário o cálculo da pressão do ar seco, podendo ser utilizada a Equação 8.

$$ps = pb - \frac{1}{7,5} \left[ e^{\left[ 21,106 - \left( \frac{5345,5}{(tu+273)} \right) \right]} - 0,49(T_s - T_u) \frac{pb}{100} \right] \quad \text{Equação 8}$$

Em que:

- ps - pressão do ar seco, em kPa;
- pb - Pressão barométrica, em kPa;
- T<sub>s</sub> - temperatura de bulbo seco, em °C; e
- T<sub>u</sub> - temperatura de bulbo úmido em °C.

Para a determinação da temperatura de bulbo úmido e seco, foi utilizado um psicrômetro. A pressão barométrica foi fornecida pela estação meteorológica da UFV.

O fator do motor está relacionado à característica do motor e, por isso, foi necessário determinar o valor da vazão específica do combustível pela Equação 9.

$$qc = \frac{q}{r} \quad \text{Equação 9}$$

Em que:

- Qc - vazão específica de combustível, em mg L<sup>-1</sup>;
- Q - vazão de combustível; e
- R - razão de compressão.

O valor da vazão de combustível para motores quatro tempos foi calculado utilizando a Equação 10.

$$q = 120.000 \frac{Q}{V_d v_d} \quad \text{Equação 10}$$

Em que:

- Q - vazão de combustível do motor, em g/s;
- V<sub>d</sub> - volume de deslocamento do motor, em l; e
- v<sub>d</sub> - velocidade de deslocamento do motor quatro tempos.

Quando os valores da vazão específica de combustível variam entre 40 e 65 mg l<sup>-1</sup>, o valor do fator do motor pode ser calculado utilizando-se a Equação 11. Para valores de vazão específica de combustível menores que 40, devem-se utilizar o valor de 30 e para valores acima de 65 é utilizado o valor de 1,2 para fator do motor.

$$fm = 0,036qc - 1,14 \quad \text{Equação 11}$$

Em que:

- Fm - fator do motor; e
- Qc - vazão específica de combustível, em mg L<sup>-1</sup>.

Depois de calculados os valores reduzidos, foram relacionadas as seguintes variáveis: Força de frenagem x Regime de trabalho, Força de frenagem x Potência, Força de frenagem x Torque, e Força de frenagem x Consumo específico.

Com o auxílio do Software EXCEL 2000, os dados coletados foram tabulados, convertidos e corrigidos de acordo com a Norma NBR 5484 e analisados estatisticamente com o auxílio do software SAS for Windows, versão 9.1.

Por meio da análise de regressão linear, foram avaliados diferentes modelos de regressão das características dos motores em função dos fatores em estudo nesta pesquisa. Os modelos foram selecionados segundo os critérios de significância, coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e simplicidade. Para que um modelo pudesse ser sujeito a seleção, todos os seus coeficientes deveriam ser significativos pelo teste t. Dentre os modelos que satisfizeram o critério de significância, aqueles que apresentaram  $R^2$  maior ou igual a 90% foram submetidos ao critério de simplicidade. Quanto menor o número de variáveis independentes (fatores), mais simples foi considerado o modelo. Dentre aqueles modelos compostos pelos mesmos fatores, porém, com grau de polinômios diferentes, foi selecionado como o mais simples aquele que apresentou menor grau do polinômio. Para realizar as análises de regressão foi utilizado o software SAS.

## 2.5. Resultados e Discussões

### 2.5.1. Regime de trabalho

Os fatores que influenciaram, significativamente, ao nível de 1% pelo teste T, o modelo para estimar o regime de trabalho do motor, foram os níveis de Força de frenagem, proporção de ODS e temperatura de injeção, sendo o  $R^2$  igual a 95,94%, para este modelo. Para simplificar o modelo, foi feita análise com a retirada dos fatores combustível e temperatura de injeção, fazendo com que o  $R^2$  fosse reduzido para 93,85%. Seguindo a proposta de simplificar o modelo e devido ao  $R^2$  acima de 90%, optou-se pelo modelo simplificado.

O modelo selecionado para estimar os valores do regime de trabalho é representado pela Equação 12, e o gráfico correspondente é apresentado na Figura 5. Portanto, em que este regime pode ser estimado em função somente dos valores de força e seu efeito conforme a Figura 3.

$$\omega = 2614,836771 - 1,16706541C$$

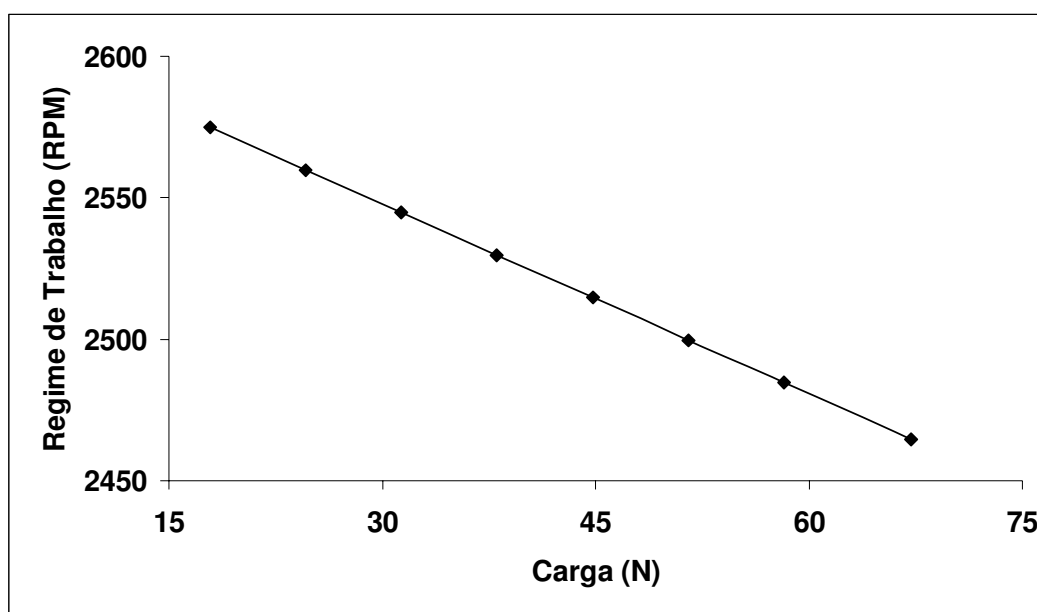
Equação 12

Em que:

$\omega$  - regime de trabalho, em rpm; e

C - força de frenagem, em N.

Como esperado, a força teve um efeito negativo no regime de trabalho do motor, pois acréscimo nos valores de força reduziu o regime de trabalho do moto de forma linear. Segundo o modelo selecionado, para atingir o regime de trabalho do motor de 2500 RPM, a força a ser aplicada é de 52 N.



**Figura 3.** Regime de trabalho em função da força de frenagem aplicado pelo dinamômetro.

### 2.5.2. Potência

Pelas análises não se verificou efeito da temperatura de injeção na potência do motor, segundo o teste T ao nível de 1%, sendo o modelo obtido um  $R^2$  de 99,82%. Foi feita uma nova análise retirando-se o fator combustível e verificou-se que houve semelhança do  $R^2$  que passou a ser de 99,81%.

O modelo de regressão selecionado para estimar valores de potência nominal é apresentado na Equação 13 o qual é ilustrado graficamente na Figura 4.

$$P = -0,0469241365 + 0,1111399279C$$

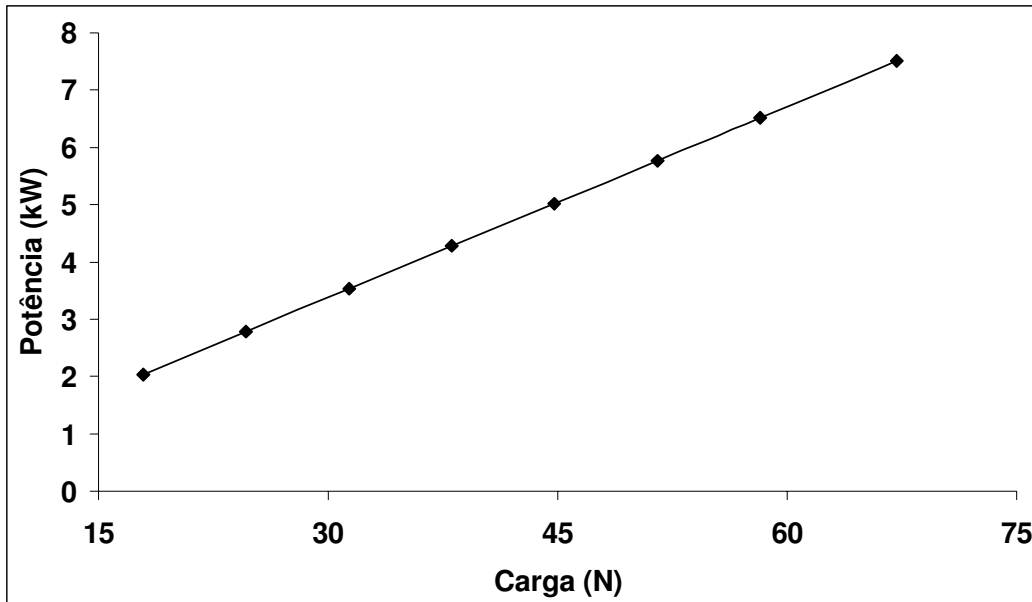
Equação 13

Em que:



$P$  - potência nominal, em kW; e

$C$  - força de frenagem, em N.



**Figura 4.** Potência nominal em função da força de frenagem aplicada pelo dinamômetro.

Não ocorreu influência da temperatura na potência nominal do motor, podendo este fato ser de grande importância para evitar a formação de resíduos na câmara de combustão e no bico injetor. Os níveis de ODS não influenciaram a potência, contrariando os resultados encontrados por Machado (2003), Mazieiro & Corrêa (2004) e Torres (2000), que relataram queda de potência com o incremento de óleos vegetais na alimentação do motor.

### 2.5.3. Torque

Verificou-se, pela análise estatística, que os fatores força de frenagem, combustível e temperatura de injeção foram significativos ao nível de 1% pelo teste T, com  $R^2$  de 99,81%. Seguindo a mesma metodologia do regime de trabalho e potência nominal, foram retirados os fatores combustíveis e temperatura, verificando-se que o valor de  $R^2$  de 99,80%, semelhante ao  $R^2$  do modelo com os

demais fatores. O modelo selecionado para o torque é função apenas da força, conforme é apresentado na Equação 14 e ilustrado graficamente na Figura 5.

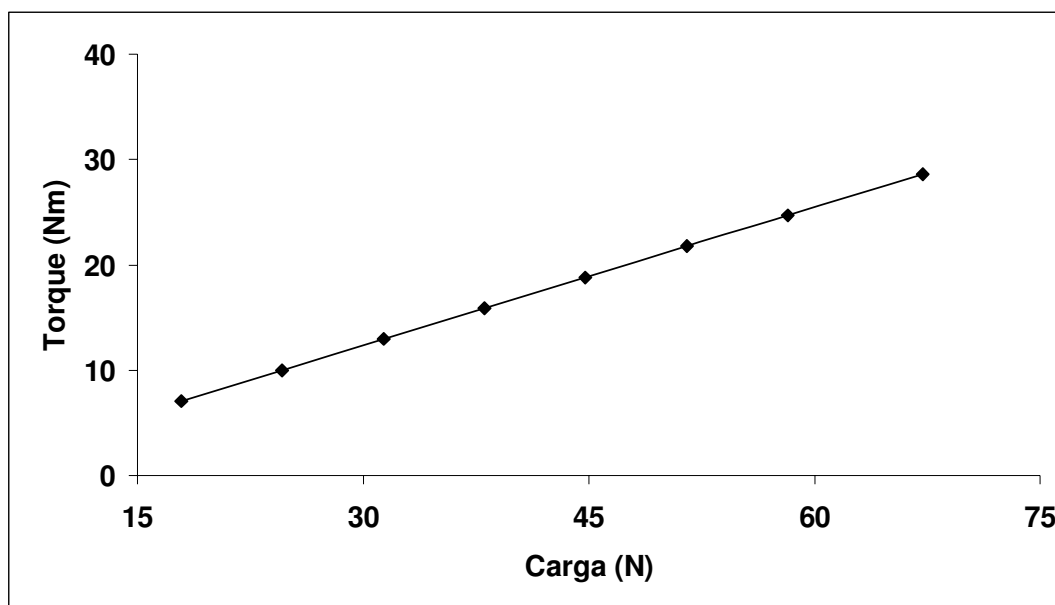
O torque tem efeito direto nas variações de regime de trabalho e potência nominal e como não ocorreram alterações nestas características, o torque também não variou.

$$\tau = -0,7605530814 + 0,4374109889C \quad \text{Equação 14}$$

Em que:

- $\tau$  - torque, em mN;
- C - força de frenagem, em N; e
- OV - percentual de ODS no combustível.

Pode-se verificar que o torque máximo, de 28,63 mN, ocorreu na maior força aplicada que foi de 67 N. O torque no regime de trabalho de 2500 rpm foi de 21,77 mN.



**Figura 5.** Efeito da força de frenagem aplicada pelo dinamômetro no torque do motor.

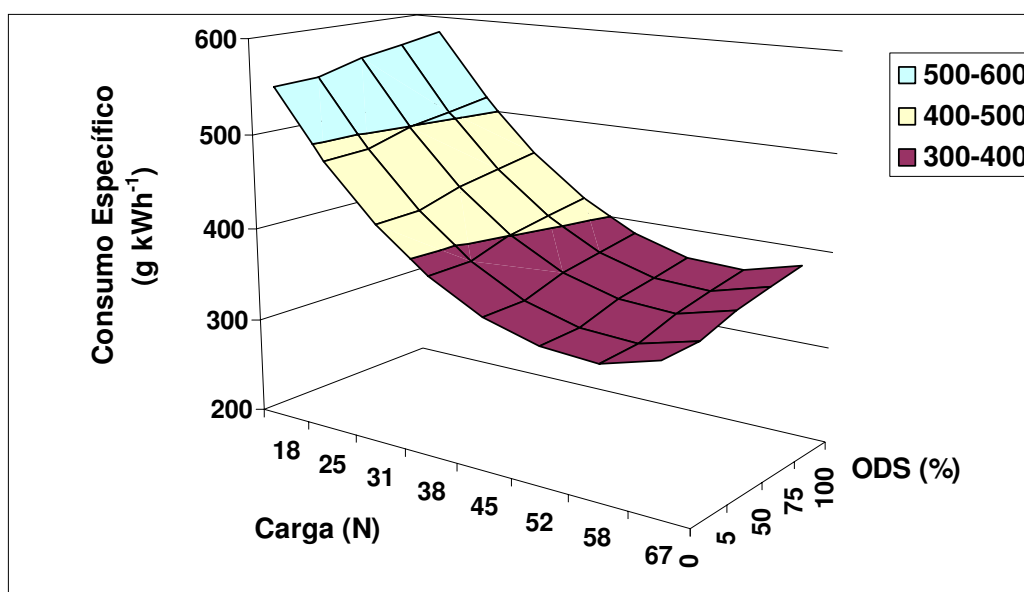
### 2.5.4. Consumo Específico

No consumo específico, verificou-se efeito quadrático da força aplicada e efeito linear para as proporções de ODS. Os parâmetros estimados foram testados pelo teste T ao nível de 1%, e o modelo é representado graficamente na Equação 14, teve um  $R^2$  de 93,78%. O modelo selecionado para o consumo específico é apresentado na Equação 15 e ilustrado graficamente na Figura 6.

$$C_e = 800,7268507 - 164125609C + 0,1447206C^2 + 29,8996863OV \quad \text{Equação 15}$$

Em que:

- $C_e$  - consumo específico, em  $\text{g kWh}^{-1}$ ;
- C - força de frenagem, em N; e
- OV - percentual de ODS no combustível.



**Figura 6.** Efeito da força de frenagem e % de ODS no consumo específico.

O consumo mínimo ocorreu entre 55 e 58 N, equivalente ao regime de trabalho aproximado de 2490 rpm nas proporções de combustível estudadas. Para o regime de trabalho de 2500 rpm, o consumo específico foi de 339, 341, 354, 362 e 369  $\text{g kWh}^{-1}$ , respectivamente, para os tratamentos OV0, OV05, OV50, OV75 e OV100.

### **2.5.5. Considerações Gerais**

O aquecimento do combustível não gerou efeito positivo no desempenho do motor. Assim, pode-se deduzir que a viscosidade não influenciou o rendimento do motor, já que o aquecimento do combustível visava à redução da viscosidade com o intuito de melhorar a sua pulverização.

O número de cetanos dos óleos vegetais não influenciou no rendimento do motor, devido ao regime de trabalho constante do motor e das técnicas de alternância de combustível, evitando a partida a frio com óleo vegetal e não havendo ocorrência de acelerações e desacelerações, condições que o número de cetanos poderia influenciar. Estas são condições que podem ser implementadas sem grandes problemas em motores estacionários.

Outro aspecto interessante na utilização dos motores estacionários é a pequena variação do regime de trabalho. No caso do motor utilizado, foram registradas rotações no intervalo de 2460 a 2630 rpm, respectivamente, da condição de carga máxima do trabalho à condição de regime livre. Como a variação do regime de trabalho é pequena, o número de cetanos pouco pode influenciar no desempenho do motor.

O fato de a bomba injetora dosar o combustível em volume provoca injeção de quantidade de combustível maior em massa, devido ao aumento da densidade do combustível com o acréscimo de ODS. O fato pode explicar a igualdade da potência nominal, regime de trabalho e torque e o aumento do consumo específico com o acréscimo de ODS, ou seja, o poder calorífico menor do ODS é equilibrado com uma injeção maior de combustível pela bomba injetora. Para mesma temperatura, a variação de densidade entre o óleo diesel puro e o OV100 pode chegar a 7%.

Desta forma, foi verificado um aumento do consumo específico, para o regime de trabalho de 2500 rpm, na ordem de 0,43; 4,22; 6,20; e 8,01% na condição de OV0, OV05, OV50, OV75 e OV100, respectivamente.

As características do motor podem ter influenciado seu desempenho. O fato de a taxa de compressão ser elevada (20:1) pode ter gerado temperaturas mais altas durante ao processo de combustão, melhorando a queima do combustível de pior qualidade, caso do ODS.

No sistema de arrefecimento a ar, menos eficiente que o sistema a água e ar, podem ocorrer um arrefecimento menor causando aquecimento maior, melhorando a queima do combustível de pior qualidade, caso do ODS.

O maior regime de trabalho do motor pode ocasionar maior turbulência dos gases de admissão na câmara de combustão, promovendo uma melhor queima do combustível.

## 2.6. Conclusões

Pode-se concluir, de acordo com os resultados apresentados, que:

- a potência nominal, o torque, o regime de trabalho e consumo específico não sofreram a influência do aquecimento do combustível;
- a potência nominal, o torque e o regime de trabalho não sofreram influência da adição de ODS no combustível em nenhuma proporção; e
- ocorreu maior consumo específico de combustível para maiores proporções de ODS.

## 2.7. Referências Bibliográficas

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5484: motores alternativos de combustão interna de ignição por compressão (Diesel) ou ignição por centelha (Otto) de velocidade angular variável - ensaio - Método de ensaio*. Rio de Janeiro, 1985. 8 p.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO-ANP (2001). Portaria ANP N° 310, de 27 DE Dezembro de 2001. Diário Oficial da União de 28/12/2001.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO-ANP, (2003). **Portaria ANP N° 255**, de 24 de setembro de 2003. Diário Oficial da União de 16/9/2003.
- BARGUER, E.L., LILJEDAHN, J.B., CARLETON, W.M., MCKIBBEN, E.G. **Tratores e seus motores**. São Paulo: Edgar Blucher, 1966. 398p.

- FERRARI, R. A.; OLIVEIRA, V. S.; SCABIO, A.; BARCARO, P.; SOUZA, W. L. Biodiesel etílico de óleo de soja e girassol. **Revista Biomassa & Energia**, Viçosa-MG, v. 1, n.3, p. 255-263, 2004.
- KALTNER, F. J. Geração de energia elétrica em pequenas comunidades da Amazônia, utilizando óleo vegetal "*in natura*" de espécies nativas como combustível em motores diesel. SAEX` 2004. Módulo 1-Biomassa. P 9.
- MACHADO, P, R, M. **Avaliação de Desempenho do Óleo de Soja como Combustível par Motores Diesel**. 212 p. Dissertação, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria-RS. 2003.
- MCT - Ministério da Ciência e Tecnologia. Rede Brasileira de Biodiesel – PROBIODIESEL, 19 p.2002.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME, Balanço Energético Nacional. Análise Energética Brasileira – período 1970 a 2005. Brasília. 2006.
- MORAES, J. R. **Manual dos óleos vegetais e suas possibilidades energéticas**. CNI,1980. 78 p.
- NASCIMENTO, M. V. G.; VIEIRA, L. S. R.; SILVA, M. R.; FLEURY, G.; DOMINGUES, P. C.; SADI, J. C.; ALMEIDA, S. C. A.; BELCHIOR, C. R. P. Opções à geração diesel-elétrica para sistemas isolados na Região Norte: Eólica, Hidrocinética e Biomassa. **XV SNTPEE**. Foz do Iguaçu-PR 1999.
- OLIVEIRA, L. B., COSTA, A. O. da. BODIESEL: UMA EXPERIÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL In: Congresso Brasileiro de Energia, 2002, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: COPPE, 2002. v.IV. p.1772 – 1779
- Petrobrás 2007. Por Dentro da Tecnologia Petrobrás. [www2.petrobras.com.br/tecnologia2/port/hbio.asp](http://www2.petrobras.com.br/tecnologia2/port/hbio.asp). Conteúdo Publicitário. Acesso em 02/09/2007.
- PORTAS, A., e DENUCCI, S. A cadeia produtiva do Biodiesel. **O Estado de São Paulo**, São Paulo, 08 de out. 2003. Caderno Agrícola.
- SALVADOR, N. **Desempenho de um Motor de Ciclo Diesel Utilizando o Éster Metílico do Óleo de Jannesia Princeps, em Substituição em Misturas com o Óleo Diesel**, Viçosa-MG,1984. (Tese de Mestrado)
- SOARES, G. F. W.; VIEIRA, L. S. R.; NASCIMENTO, M. V. G. Operação de um grupo gerador utilizando óleo vegetal bruto como combustível. In: ENCONTRO

DE ENERGIA NO MEIO RURAL-AGRENER, 3.,2000, Campinas. **Anais...**  
Campinas: [s.n.], 2000.

- TORRES, E. A. Avaliação de um motor de ciclo diesel operando com óleo de dendê para suprimento energético em comunidades rurais. . In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL-AGRENER, 4.,2002, Campinas. **Anais...** Campinas: [s.n.], 2002.
- Revista Elo. Artigo técnico. **Pesquisa Exclusiva Aprova Qualidade do Diesel no Brasil.** [www.revistaelo.com.br](http://www.revistaelo.com.br). Acesso em 12/06/2008.
- Revista Elo. Artigo Técnico. **O Diesel e o Motor Caterpillar.** Disponível em: [www.revistaelo.com.br](http://www.revistaelo.com.br). Acessado em 12/06/2008.

## **Capítulo 3: Avaliação do Desempenho de um Motor de Ciclo Diesel Alimentado com Misturas de Óleo Vegetal e Diesel**

### **3.1. Resumo**

Mesmo em um país que tem as melhores condições de produção de energia elétrica gerada a partir de hidrelétricas, que representam 95 % da produção, existem localidades afastadas ou isoladas que não permitem a expansão da rede de distribuição, ficando sem acesso à energia. A saída racional é a produção local da energia elétrica, justificando este trabalho que avaliou misturas de óleo vegetal em um motor diesel de baixa potência acionando um grupo gerador, para verificar a formação de resíduos na câmara de combustão, o desgaste do motor e avaliar os custos de produção da energia elétrica. O grupo gerador foi composto por um Motor Agrale, modelo M90, com potência nominal de 9.6 kW a 2.500 rpm, injeção direta, refrigerado a ar e taxa de compressão de 20:1, um gerador Bambozzi, de 6 KVA com funcionamento a 1800 rpm. A energia gerada foi consumida por uma bancada de lâmpadas incandescentes. As misturas utilizadas foram de óleo diesel com Óleo de Soja Degomado (ODS) em níveis que variaram de 0 (OV0), 5 (OV5) e 50% (OV50) na condição original do motor. Devido a problemas encontrados durante a operação do conjunto, a mistura OV50 passou a operar com sistema de aquecimento para elevar a temperatura de injeção para 90° C. O trabalho permitiu as seguintes conclusões: não houve diferenças de desempenho nas avaliações dinâmicas entre as condições antes e depois da operação com o gerador; não houve formação de resíduos na câmara de combustão que necessitasse de descarbonização antes de 300 horas de operação do motor em todos os tratamentos utilizados; houve um custo menor com o combustível, quando utilizada uma maior proporção de ODS; houve um custo maior com manutenção, principalmente no sistema de alimentação, quando foi utilizada uma maior proporção de ODS; houve aumento no custo de produção de energia elétrica também quando se utilizou uma maior proporção de ODS.



### **3.2. Abstract**

Even though in a country that has the best conditions to produce electricity by means of hydroelectric plants that represent 95% of the production, there exists far away or isolated localities that do not allow the expansion of the distribution net, being without access to the energy. The rational solution is the local production of the electricity, justifying this work that evaluated vegetal oil mixtures in a low power diesel engine activating a generator group, to verify the formation of residues in the combustion chamber, the engine consumption and to evaluate the costs of production of the electricity. The generator group was composed by an Agrale Engine, M90 model, with normal rated power of 9.6 kW the 2,500 rpm, direct injection, air refrigerated and compression rate of 20:1, a Bambozzi generator, of 6 KVA with functioning at 1800 rpm. The generated energy was consumed by a group of benches of incandescent lights. The used mixtures had been of oil diesel with ungummed Oil (ODS) in levels that had varied from 0 (OV0), 5 (OV5) and 50% (OV50) in the original condition of the engine. Due to problems encountered during the operation of the set, mixture OV50 started to operate with heating system to raise the temperature of injection for 90° C. The work allowed the following conclusions: the performance did not differ in the dynamometer evaluations before it enters in the conditions and after the operation with the generator; it did not have formation of residues in the combustion chamber that needed descarbonization before 300 hours of operation the engine in all the used treatments; it had a smaller cost with the fuel, when used a bigger ratio of ODS; it had a bigger cost with maintenance, mainly in the feeding system, when used a bigger ratio of ODS; it had increase in the cost of production of electric energy with a bigger ratio of ODS.

### **3.3. Introdução**

Mesmo em um país que tem as melhores condições de produção de energia elétrica geradas a partir de hidrelétricas que representam 95 % da produção, existem localidades afastadas ou isoladas que não permitem a expansão da rede de distribuição, ficando sem acesso à energia.

Segundo nota do Ministério de Minas e Energia (2004), no Norte do país, 62,5% da população rural (cerca de 2,6 milhões de pessoas) não tem acesso aos serviços de energia elétrica. No Nordeste, 39,3% dos moradores da área rural (5,8 milhões de pessoas) não têm luz. No Centro-Oeste, somam 27,6% (367 mil pessoas); no Sudeste, 11,9% (807 mil pessoas); enquanto no Sul, 8,2% (484 mil pessoas).

A falta de acesso da energia elétrica à região norte se explica pela falta de redes de transmissão e distribuição em função de aspectos geográficos, econômicos e ambientais.

O aspecto geográfico está relacionado às grandes distâncias que deverão ser percorridas pela linha de distribuição devido à baixa densidade demográfica da região, além dos obstáculos naturais tais como vegetação densa e grandes rios que cortam a região.

O aspecto econômico está relacionado à necessidade de elevados investimentos para a implantação e manutenção das redes de transmissão e distribuição para um consumo reduzido, levando-se em consideração que as propriedades da região são em sua maioria de produtos de subsistência.

Os aspectos ambientais estão relacionados aos impactos ambientais causados pela instalação das redes de transmissão e distribuição que, em muitos casos, deverão passar por reservas ambientais ou indígenas.

Para a ANP (2006), os Sistemas Isolados Brasileiros, predominantemente térmicos e majoritariamente localizados na Região Norte, permaneceram dependentes dos combustíveis fósseis. As tarifas resultantes destes sistemas seriam bastante altas, inviáveis para os consumidores finais. Com a finalidade de subsidiar estes Sistemas foi formulada a Conta de Consumo de Combustíveis (CCC), que transfere estes recursos financeiros dos concessionários de todo o país para a cobertura da diferença entre o custo da geração hidráulica e da térmica.

A produção de energia elétrica em Sistemas Isolados simplifica sua distribuição, porém, para a produção, é necessário óleo diesel, que tem custo de transporte elevado devido à distância do local do consumo da energia e das condições dos meios de transporte, bem como das condições precárias das estradas no período de chuvas e dos níveis dos rios alterados no período de seca dificultando o transporte por barcos.

Pelas informações encontradas na página eletrônica da Eletrobrás, os Sistemas Isolados Brasileiros atendem a uma área de 45% do território e a cerca de 3% da população nacional, ou seja, aproximadamente 1,3 milhões de consumidores.

No Relatório Interministerial coordenado pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA, verifica-se que existem comunidades na Amazônia em que o custo de geração da energia elétrica com óleo diesel chega a oitocentos dólares o megawatt, denotando claramente a potencialidade da geração com óleo vegetal "*in natura*". Nestas comunidades, a partir de uma organização social mínima, é possível produzir o óleo e, apesar de algumas desvantagens em relação à eficiência do motor, essa produção compensa pelo seu custo baixo.

Segundo informações do Atlas de Energia Elétrica da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, (2005), nos Sistemas Isolados, em outubro de 2003, havia 345 centrais elétricas em operação e distribuídas em grande parte na Região Norte, onde estão instaladas 304 unidades: Mato Grosso com 36 e nos estados de Pernambuco, Bahia, Maranhão e Mato Grosso do Sul estão instalados outros 5. Tomados em conjunto, esses sistemas cobrem quase 50% do território nacional e consomem em torno de 3% da energia elétrica utilizada no país.

Neste Atlas comenta-se que os mais importantes Sistemas Isolados, do ponto de vista da dimensão do consumo, são os que atendem às capitais da região Norte – Manaus, Porto Velho, Macapá, Rio Branco e Boa Vista – exceto Belém, que está interligada ao Sistema Integrado Nacional (SIN).

Na região amazônica existem inúmeras propriedades rurais sem acesso à energia distribuída pela concessionária. Neste caso, as propriedades rurais têm geração própria por meio de geradores elétricos acionados por motores diesel, que geralmente funcionam durante a noite em um período não superior a 5 horas, devido ao alto custo do combustível.

Para minimizar este problema, uma estratégia a ser adotada é a adoção de energia renovável para a produção de energia elétrica, de forma descentralizada, na própria propriedade ou de forma conjunta nas comunidades ou vilas. A utilização do óleo vegetal como combustível alternativo ao óleo diesel pode ser de grande importância e pode ser realizada por meio do biodiesel ou por meio da alimentação do motor com óleo vegetal bruto ou "*in natura*".

A idéia de aproveitar óleos vegetais para alimentar veículos não é nova. Rudolf Diesel, inventor do motor a diesel, propôs a utilização do óleo de amendoim

como combustível no início do século XIX, porém, o baixo custo do petróleo inibiu o projeto.

Para Kaltner (2004), os principais problemas no uso de óleos vegetais nos motores diesel são: a dificuldade de partida a frio em razão da elevada viscosidade dos óleos vegetais, a formação de gomas nos bicos injetores, o desgaste de componentes da bomba injetora devido à acidez do óleo, e a formação de depósitos de carvão na câmara de combustão, nos cilindros e nas válvulas.

Miranda e Moura (2000) utilizaram dois grupos geradores alimentados com óleo de dendê: um acionado por um motor MWM D225-4, 4 cilindros e 51cv de potência e outro acionado por um motor Multi Fuel 4RTA-G da MAS. No motor MWM, testado por 4000 horas, obteve-se redução da carbonização e dos ésteres presentes no óleo lubrificante quando foi aumentada a pressão nos bicos injetores, o que resultou numa melhor combustão. Durante os testes verificou-se ainda que o aumento da temperatura do óleo vegetal provocou redução do pH, acentuando o desgaste dos bicos. O motor Multi Fuel 4RTA-G da MAS apresentou desempenho inadequado quando alimentado com óleo de dendê bruto.

Soares et al. (2001) realizaram estudos com um gerador elétrico acionado por um motor MWM, modelo D229-6, alimentado com óleo de dendê por um período de 400 horas, chegando à conclusão de que a melhor temperatura para utilização do óleo deste vegetal é de 80 °C. Quanto à potência máxima, o autor constatou redução de 10% e que durante os testes ainda ocorreu queda de 6% na potência, devido ao acúmulo de resíduos na bomba injetora e à carbonização das câmaras de combustão. O autor sugere ainda que a troca de óleo, em virtude da contaminação acentuada do lubrificante, seja realizada a cada 100 horas e não 200 horas como recomendado pelo fabricante.

Prateepchaikul e Apuchato (2003) estudaram o desempenho e a durabilidade de motores Kubota, monocilíndricos, com injeção indireta, operados com rotação de 2.200 rpm e com 75% da carga nominal, alimentado com óleo diesel e óleo de dendê refinado, por um período de 2.000 horas em condições idênticas. Durante o experimento, os motores foram desmontados para análise de desgaste logo após 50 horas de operação e posteriormente a cada 500 horas para análise dos componentes. Antes de serem desmontados, os motores foram avaliados em dinamômetro para verificar seu desempenho. Quanto ao consumo, verificou-se que

o consumo de óleo de dendê é de 15 a 20% maior. Ocorreu apenas diferença significativa no desgaste dos anéis de segmento: maior desgaste foi encontrado no motor abastecido pelo óleo de dendê.

Fonseca (2007) alimentou um grupo gerador com óleo de dendê “*in natura*”, tendo sido o grupo gerador acionado por um motor Tramontini, modelo R180N, monocilíndrico e potência de 7,5 cv (5,5 kW) a 2600 rpm. O sistema de aquecimento foi instalado no reservatório do óleo de dendê, e utilizou como fonte de calor resistências elétricas que somaram 2000 W para manter a temperatura a 100° C no reservatório e a 85° C na entrada do sistema de alimentação do motor. A energia gerada foi consumida por uma bancada de lâmpadas incandescentes que simularam de 25 a 100% da carga total do gerador.

Utilizando óleo de dendê, Coelho et al (2004) trabalharam com um grupo gerador de 115 kW, utilizando a técnica de alternância de combustível e aquecimento do óleo de dendê tendo como fonte de calor a água do sistema de arrefecimento do motor. O sistema produziu energia elétrica por 6 horas diárias a um custo de 0,38 R\$/kW h<sup>-1</sup>. Após 500 horas de trabalho verificaram que em termos de desempenho, ocorreu um consumo 10% superior, atribuída ao menor poder calorífico do óleo de dendê, e os outros parâmetros se mantiveram inalterados. Ao analisarem os desgastes dos componentes dos motores, verificaram obstruções parciais nos bicos injetores, entupimentos dos filtros de combustível e carbonização da câmara de combustão em níveis superiores ao padrão, e sugere o aumento da pressão de injeção como forma de reduzir os problemas nos bicos injetores e na câmara de combustão, além de adotar um sistema de pré-filtragem do óleo de dendê. Assim, foi introduzido um novo calendário de manutenção que gerou um custo 20 a 25% maior. De forma geral chegaram a conclusão que o baixo custo do combustível pode cobrir os gastos com a manutenção e equilibrar os custos nos patamares encontrados na geração a diesel.

Na análise de custos, Fonseca (2007) considerou que os custos relativos à manutenção quando alimentados com óleo de dendê correspondiam ao dobro dos custos do óleo diesel.

Nascimento et al. (1999) afirmam ser viável, sob certas condições, a utilização do óleo vegetal “*in natura*” na geração de energia elétrica, o que é justificável pela vocação das localidades isoladas.

Para Moraes (1982), o óleo vegetal misturado ao óleo diesel e na forma “*in natura*” na substituição do óleo diesel são alternativas viáveis, considerando especialmente os aspectos sociais.

A utilização do óleo vegetal na forma bruta poderá ter vantagens sociais, ambientais e econômicas. A fim de atender à produção de óleos vegetais, muitas culturas poderão ser utilizadas, de acordo com as condições regionais, destacando-se aquelas que já são exploradas comercialmente, como amendoim, soja, milho, dendê, girassol e canola, e outras de caráter regional como mamona, andiroba, pequi, buriti, inajá, carnaúba, pinhão-manso, entre outras.

A utilização do óleo vegetal como combustível em grupos geradores acionados a óleo diesel, em locais isolados, pode contribuir para o Programa Luz para Todos, cujo intuito é levar energia elétrica a mais de 12 milhões de brasileiros até o ano de 2008. O óleo vegetal bruto poderá ser utilizado onde o diesel necessita de uma logística complicada, fazendo com que o preço do combustível seja elevado. Nestas regiões podem-se analisar a utilização de espécies nativas para a produção de óleo vegetal e o subproduto utilizado para alimentação de animais ou adubo orgânico.

O objetivo do trabalho foi avaliar misturas de óleo vegetal em um motor diesel de baixa potência, acionando um gerador de eletricidade.

### **3.4. Materiais e Métodos**

O experimento foi realizado para avaliar o desempenho de um grupo gerador composto por um motor diesel alimentado com misturas de óleo vegetal e diesel.

O óleo vegetal selecionado para o ensaio foi o Óleo de Soja Degomado (ODS), fornecido pela CARAMURU ALIMENTOS e utilizado na composição do combustível juntamente com o óleo diesel. Os níveis de ODS no combustível variaram de 0 (OV0), 5 (OV5) e 50% (OV50). O óleo diesel utilizado foi adquirido em posto de combustível é classificado como diesel interiorano e contém uma mistura de 2% de biodiesel, denominado assim de B2.

As características dos óleos utilizados no trabalho foram determinadas pelo Centro de Análises Químicas do CEFET-MG e os resultados apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1.** Características das amostras das misturas de combustíveis utilizados nos ensaios de desempenho.

<b>Características</b>	<b>Método</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>OV0</b>	<b>OV05</b>	<b>OV50</b>
Massa específica a 20 °C (Kg/m <sup>3</sup> )	ASTMD 1298	820	880	866,6	868,6	893,1
Destilação 50%, vol. recuperado (°C)	ASTMD 86	245,0	310,0	288,0	293,0	*
Destilação 85%, vol. recuperado (°C)	ASTMD 86	---	370,0	355,6	368,7	
Ensaio de corrosão 3h, 50 °C	ASTMD130	---	1	1 a	1 a	1 a
Cinzas, máx. (% massa)	ASTMD 482	---	0,010	0,005	0,008	0,0131
Índice de cetano calculado	ASTMD 4737	42,0	---	45,7	45,5	*
Ponto de fulgor, mín (°C)	ASTMD 56	38,0	---	40,3	62,0	82,5
Atendimento as normas ANP	---	---	---	Sim	Sim	Não

OBS. \* O ensaio teve que ser interrompido no ponto de 50% do volume recuperado, pois, a temperatura já estava em 342°C. Deve se proceder ao ensaio de destilação utilizando o equipamento para destilação à pressão reduzida (ASTM 1160)

O grupo gerador utilizado foi cedido pela AGRALE SA, para a realização dos ensaios. O conjunto era composto por um Motor Agrale, modelo M90, com potência nominal de 9.6 kW a 2.500 rpm, injeção direta, refrigerado a ar e taxa de compressão de 20:1. O gerador era da fabricante Bambozzi, de 6 KVA, com funcionamento a 1800 rpm. No início deste trabalho, o motor totalizava 100 horas trabalhadas em operações de dinamometria, e o gerador não tinha sido submetido a nenhum trabalho.

### 3.4.1. Avaliação do Desempenho do Motor

A avaliação do desempenho do motor foi realizada antes e depois do acionamento do gerador. O motor foi acoplado ao dinamômetro, por meio de correias do tipo V, utilizando o combustível OV<sub>0</sub> como referência. Realizado o primeiro ensaio dinamométrico, o motor foi acoplado ao gerador e, após a operação na condição de trabalho, o motor foi novamente acoplado ao dinamômetro e enviado para a oficina. Para realizar o ensaio, foi utilizado um dinamômetro de rotação do tipo transmissão montado em berço, como apresentado na Figura 1, e aplicadas

focas de frenagem de 18, 25, 31, 38, 45, 52, 58 e 67 N. O ensaio foi realizado baseando-se na norma NBR 5484 (1984).



**Figura 1.** Motor acoplado ao dinamômetro, para realização dos ensaios de desempenho do motor.

Após a coleta dos dados, foram calculados potência nominal, torque e consumo específico. Seguindo como padrão a Norma NBR 5484, foi realizada a redução dos fatores. Com os resultados de desempenho do motor nas situações antes e depois da operação, os dados foram tabulados no Software EXCEL 2003 e a análise por meio de regressão linear foi realizada com o Software SAS 9.0.

Foi avaliada a significância da interação entre as forças aplicadas e as condições (antes e depois) da geração de energia. Quando a interação foi significativa ao nível de 1% pelo teste F, foi considerado que o efeito da força dependia da condição, necessitando assim de um modelo para estudar o efeito desta força antes, e de outro para estudar o efeito da força depois da operação com o gerador. Caso a interação fosse não significativa, seria considerado que uma única equação seria usada para estudar o efeito da força de frenagem nas duas condições.

Com os resultados das análises de regressão, foram gerados gráficos com o intuito de avaliar o regime de trabalho, potência nominal, torque e consumo



específico em função da força de frenagem aplicada, e comparar as médias dos dados coletados com os valores estimados.

### **3.4.2. Operação com o Grupo Gerador**

O grupo gerador foi programado para operar por um período de 300 horas com as misturas de combustíveis selecionadas, com uma carga horária acima de 20 horas diárias, à exceção dos dias em que ocorreram problemas com o motor ou a necessidade de realizar as manutenções preventivas.

Nas operações diárias, foi adotada a técnica de alternância de combustível, em que no início e término das operações do grupo gerador, o motor era alimentado exclusivamente com óleo diesel. Assim, o motor era iniciado com óleo diesel durante os 15 minutos iniciais, sendo 5 em rotação livre e 10 com carga. Para desligar o motor, durante 15 minutos ele era alimentado com óleo diesel, sendo novamente 10 minutos com carga, para limpeza dos dutos do sistema de alimentação, e 5 minutos sem carga, para seu resfriamento. .

Para os combustíveis OV0, OV05 e OV50, foram previsto a utilização da tubulação original do motor, ou seja, sem o sistema de aquecimento do combustível, recebendo denominações OV0/Tamb, OV05/Tamb e OV50/Tamb, respectivamente. No decorrer da coleta de dados, ocorreram problemas no motor, necessitando o cancelamento do tratamento OV05/Tamb, que teve a mistura repetida, porém, com a utilização do sistema de aquecimento para elevar a temperatura até 90<sup>o</sup> C, sendo então denominado OV50/T90.

No intervalo em que o motor permaneceu desligado, foram realizadas as análises de temperatura, verificação do nível e adição do óleo lubrificante se necessário, e abastecimento e manutenções preventivas sugeridas pelo fabricante do motor.

Para consumir a energia produzida pelo grupo gerador, foi montada uma estrutura no Laboratório de Mecanização Agrícola (LMA) do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, constituída por lâmpadas incandescentes, com tensão de 220 V (Figura 2). A estrutura montada foi dividida em 2 partes: a primeira composta por um circuito elétrico de 30 bocais (Figura 2a) e a segunda por 10 bocais (Figura 2b). Para o grupo gerador, foi construída uma

estrutura para protegê-lo dos fatores ambientais, evitarem acidentes e isolar acusticamente.

Na primeira parte, as lâmpadas eram acesas ao ligar o disjuntor e por meio das combinações de potências das lâmpadas, 14 lâmpadas de 200 W e 16 lâmpadas de 100 W, o consumo total aplicado era de 4,4 kW.



**Figura 2.** Vista geral da Estrutura montada para consumir a energia e acomodar o grupo gerador.



**Figura 2 A.** Estrutura com 30 bocais.



**Figura 2B.** Estrutura com 10 bocais.

Na segunda parte, foram instalados interruptores, em que 8 bocais podiam ser acesos dois a dois e outros dois bocais podiam ser acesos individualmente. Foram instaladas 9 lâmpadas de 200 W e 1 de 100 W, sendo responsável por aplicar o restante da carga de 1 kW para completar a carga máxima estabelecida em

5,4 kW. O acendimento das lâmpadas serviu para controlar a carga aplicada no gerador, e, nesta segunda parte, as lâmpadas não utilizadas ficaram de reserva, sendo utilizadas no momento em que alguma lâmpada fosse danificada (Figura 3).



**Figura 3.** Medidor de energia e sistema para controle de carga no motor.

Durante o funcionamento do motor, foram monitoradas as temperaturas de admissão do ar, dos gases de escape, injeção do combustível e lubrificante, por meio de um Termômetro equipado com datalogger instalado em estrutura construída para acomodar os equipamentos de monitoramento do experimento, como apresentado na Figura 4.

As medições de temperaturas foram realizadas por termopares do tipo K, as temperaturas foram coletadas e armazenadas em intervalos de 10 minutos. Para a instalação do termopar na tubulação de admissão e escape, foram feitos orifícios para o seu encaixe, como ilustrado na Figura 5.

Para medição da temperatura do lubrificante, foi adquirido um termopar com medidas semelhantes às da vareta de verificação do nível de lubrificante, Figura 6, tendo o termopar sido introduzido no orifício, substituindo a vareta.

O monitoramento da temperatura de injeção foi realizado por um termopar instalado na superfície da tubulação de alta pressão, próximo ao bico injetor, que foi envolvido com isolantes térmicos para não ocorrer perda de calor e dar uma maior exatidão nas medidas da temperatura, como ilustrado na Figura 4 do capítulo 1.



**Figura 4.** Termômetro com datalogger, instalado na sala com isolamento acústico.



**Figura 5.** Termopar instalado para medição da temperatura dos gases de admissão.

Para medir a temperatura dos gases de escape, foi instalado um termopar do tipo K na tubulação por meio de um orifício, como demonstrado na Figura 7.

As temperaturas ambientes foram determinadas pela Estação Meteorológica do Departamento de Engenharia Agrícola.



**Figura 6.** Termopar para medição da temperatura do óleo lubrificante.



**Figura 7.** Termopar instalado para medição das temperaturas dos gases de escape.

As temperaturas foram tabuladas no Software EXCEL 2003, gerando-se gráficos para verificar as tendências para cada tratamento.

### 3.4.3. Desgaste e resíduos do motor

O motor foi enviado para a oficina para análise e manutenção. A oficina realizou a desmontagem do motor, fotografando as principais peças e ocorrências e emitindo um laudo técnico, tendo realizado todas as manutenções necessárias.

A oficina contratada para realizar os serviços foi a Retífica Rio Branco, situada na cidade de Visconde de Rio Branco-MG. A manutenção preventiva do grupo gerador foi realizada de acordo com o manual do fabricante pela equipe do LMA.

As medições foram realizadas para verificar os desgastes no cilindro, pistão, eixo virabrequim, biela, bucha da biela, válvula, virabrequim e pressão do bico injetor. A análise visual foi realizada pra verificar alguma anormalidade nas peças e formação de resíduos causados pela combustão do motor.

Os desgastes e outras ocorrências verificadas no desmonte do motor foram comparados com a condição em que se utilizou o OV0/Tamb.

### 3.4.4. Análise dos Óleos Lubrificantes

Em função dos resultados das análises do lubrificante do motor, alguns dos metais encontrados terão sua origem identificada em função da Tabela 2 apresentada pelo Ministério da Defesa (2003).

**Tabela 2.** Exemplos de origens de desgastes metálicos.

<b>Metais</b>	<b>Origem do desgaste</b>
<b>Ferro</b>	cilindros, engrenagens, anéis, eixo, virabrequim, rolamentos, bomba de óleo, compressor de ar, eixo de comando de válvulas, guias e sedes
<b>Cromo</b>	anéis, rolamentos, cubos de freio, cilindros e partes de sistemas hidráulicos
<b>Cobre</b>	buchas, rolamentos, discos de transmissão, aditivos, arruelas de encosto, mancais, casquilhos
<b>Chumbo</b>	buchas em bronze (quando encontrado juntamente com cobre)
<b>Alumínio</b>	pistões, rolamentos, bombas, rotores, tuchos de bombas injetoras.

Os óleos lubrificantes substituídos durante os testes, foram retiradas amostras e enviadas para análise no Laboratório de Ensaio em Óleos Lubrificantes

(LEOL), do SENAI-MG. Foram realizadas análise Físico-Química e de Desgaste Metálico e de Aditivção.

### 3.4.5. Custos da Gerao de Energia.

O custo em operaes com mquinas agrcolas é dividido em custos fixos e operacionais. Os custos fixos são debitados independentemente da utilizao da mquina, estando incluídos a depreciao, juros, alojamentos e seguros. Os custos operacionais dependem da quantidade do uso que se faz da mquina, estando incluídos os custos com combustível, manuteno, salrios e lubrificantes.

A energia consumida foi medida por um medidor de energia padro, calibrado, instalado pelos tcnicos da UFV. A leitura foi realizada ao final do turno de trabalho que variou de 18 a 24 horas, salvo problemas tcnicos ou paradas para manuteno. Um tanque auxiliar foi instalado para aumentar o intervalo de abastecimento.

Pelo fato de não haver uma referncia sobre a vida útil do motor diesel, por ser variável em funo do uso e da manuteno, considerou-se a vida útil do conjunto em 10.000 horas. O valor de sucata foi considerado como sendo 10% do valor do grupo gerador novo. Assim, o valor da depreciao foi calculado pelo método linear, utilizando a Equao 1. O valor do grupo gerador utilizado foi avaliado em R\$9.000,00.

$$D = (P_r - S) V_u^{-1} \quad \text{Equao 1}$$

Em que:

- D - depreciao, em R\$/h;
- $P_r$  - preo de aquisio da mquina, em R\$;
- S - valor de Sucata, em R\$; e
- $V_u$  - vida útil, em Horas.

Para determinar a depreciao do sistema de aquecimento utilizado no tratamento OV50/T90, considerou-se o custo de construo estimado em R\$200,00, vida útil estimada de 2.000 horas e valor de sucata de 10%.

A taxa de juros considerada para calcular os custos fixos foi a do empréstimo do FINAME que, em pesquisa, apresentou valores de 9%a.a. em fevereiro de 2008 e foi calculada em R\$ pela Equação 2. A carga horária anual considerada foi de 4380 horas, que equivale ao trabalho diário de 12 horas durante os 365 dias do ano.

$$J = \left( \frac{P_r + 0,1P_r}{2} \right) i \frac{1}{H} \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

- J - juros, em R\$ hora<sup>-1</sup>;
- P<sub>r</sub> - preço de aquisição do grupo gerador, em R\$;
- i - taxa de Juros Anual; e
- H - carga horária anual do grupo gerador, em horas.

O alojamento e o seguro, segundo Pacheco (2000), são estimados em 1% do preço inicial para cada item. Sendo assim, foi considerado o valor de 2% na Equação 3, para estimar os custo de alojamento e seguro.

$$AS = \frac{0,02P_r}{H} \quad \text{Equação 3}$$

Em que:

- AS - custo do alojamento e seguro em R\$ h<sup>-1</sup>;
- P<sub>r</sub> - preço de aquisição do grupo gerador em R\$; e
- H - carga horária anual do grupo gerador em h.

O consumo do combustível foi determinado em função da quantidade em massa, com a qual o motor foi abastecido durante o período de seu funcionamento.

Para determinar os custos das manutenções, foram computados os custos das manutenções corretivas e preventivas para cada combustível avaliado, considerando a vida útil de cada item substituído nas manutenções.

Os custos com a mão-de-obra foram estimados em um salário mínimo, levando em consideração a baixa potência do grupo gerador e não ser necessário acompanhamento constante (Pacheco 2000). Foram ainda incluídos nos custos da mão-de-obra, além do salário, o décimo terceiro e 20% de encargos sociais.



Os custos de geração de energia foram comparados com a energia produzida com o combustível padrão, no caso, quando o grupo gerador foi alimentado com OV0; e com as tarifas praticadas pela Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG, onde o  $\text{kW h}^{-1}$  é comercializado por R\$0,33 para a zona rural e de R\$0,67 para o consumo residencial, incluindo os impostos.

As avaliações para analisar a geração de energia foram conduzidos em um delineamento inteiramente casualizado, sendo a ordem dos combustíveis sorteada, obtendo-se a seqüência: OV05/Tamb, OV50/Tamb, OV0/Tamb.

### **3.5. Resultados e Discussões**

#### **3.5.1. Avaliação do Desempenho do Motor**

O desempenho do motor foi avaliado pelos resultados dos ensaios do motor no dinamômetro. No OV0/Tamb e OV05/Tamb não foram detectados problemas para a realização dos ensaios, porém, com a mistura de OV50/T90, não foi possível realizar o ensaio no motor, por terem sido detectados problemas com o rolamento do eixo virabrequim, que necessitou de substituição, devido ao desgaste.

##### **3.5.1.1. Tratamento OV0/Tamb**

###### **Regime de Trabalho**

Na análise dos dados verificou-se que a interação entre a força de frenagem e a condição antes e depois foi significativa ao nível de 1%, pelo teste F, necessitando assim gerar dois modelos distintos: um para a condição antes da operação com o grupo gerador (Equação 4) e na condição depois (Equação 5).

As tendências geradas pelas estimativas das equações e as médias nas condições são apresentadas na Figura 8. Pode-se verificar que ocorreram diferenças entre o regime de trabalho do motor nas condições antes e depois.

Ocorreu uma redução do regime de trabalho nas condições de força de frenagem mais elevadas. Pelo funcionamento do grupo gerador, percebe-se que a diferença ocorreu na condição antes da operação com o grupo gerador, em que o

regime do motor foi superior em relação às avaliações posteriores. Esta ocorrência pode ter sido causada pela substituição da guia e da válvula de escape, que apresentaram problemas ao final da amostra OV50/Tamb.

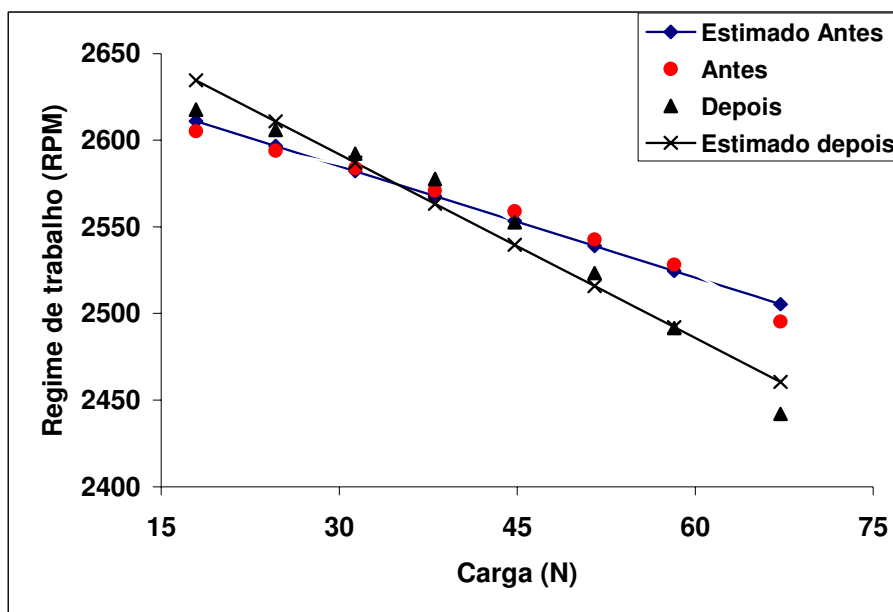
$$\omega = 2649,553645 - 2,145995C \quad R^2=97,13\% \quad \text{Equação 4}$$

$$\omega = 2698,077287 - 3,536781C \quad R^2=94,87\% \quad \text{Equação 5}$$

Em que:

$\omega$  - regime de trabalho, em RPM; e

C - força de frenagem em N.



**Figura 8.** Comparação entre os valores de regime de trabalho estimados e observados para as condições antes e depois do uso do grupo gerador no tratamento OV0/Tamb.

### Potência

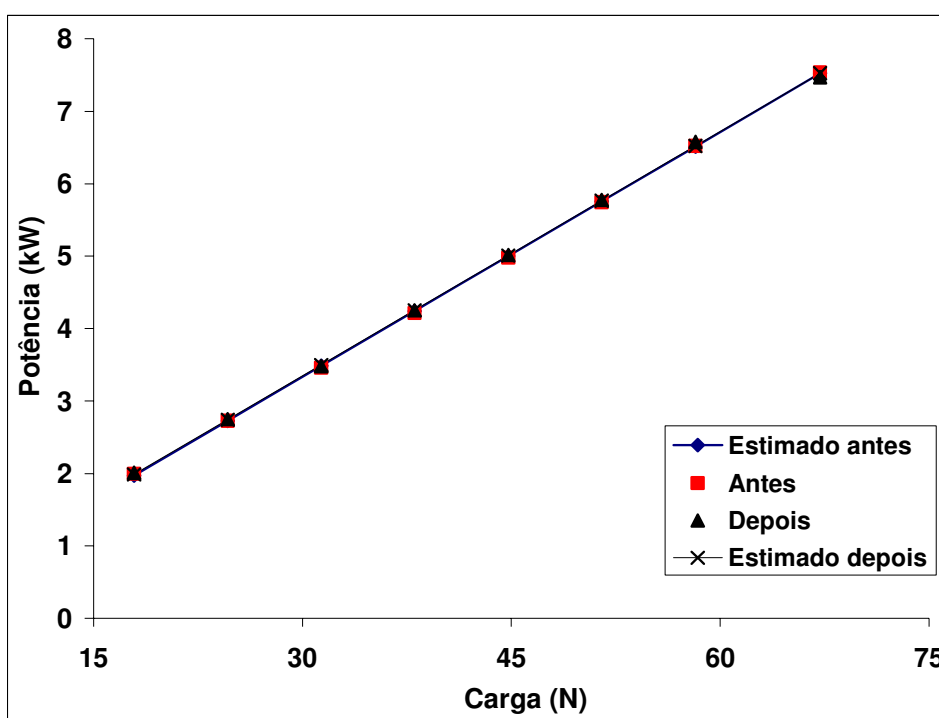
No caso da potência demandada, verificou-se não foi verificada significância entre a interação força e condição antes e depois, ao nível de 1% pelo teste F necessitando assim gerar apenas um modelo para estimar os valores de potência, verificando-se essas tendências na Figura 9.

Verificou-se que a alteração do regime de trabalho na condição antes da operação com o grupo gerador não afetou a potência do motor. A Equação 6 foi gerada para estimar os valores de potência nominal.

$$P = -0,050367185 - 0,112743258C \quad R^2=99,93\% \quad \text{Equação 6}$$

Em que:

- P - potência nominal; em kW, e
- C - força de frenagem, em N.



**Figura 9.** Comparação entre os valores de potência nominal estimado e observados para as condições antes e depois do uso do grupo gerador no tratamento OV0/Tamb.

### Torque

O mesmo efeito que ocorreu na potência foi verificado no torque, em que a interação entre a força e a condição antes e depois foi significativa ao nível de 1% pelo teste F, porém, a operação do grupo gerador não afetou o torque do motor.

Foram geradas as Equações 7 e 8, respectivamente, para as condições antes e depois da operação com o grupo gerador.

O motivo da significância no teste F foi à pequena variação encontrada entre as repetições dos tratamentos, ocasionando um valor reduzido da Soma dos Quadrados e do Quadrado Médio, gerando um valor elevado de F.

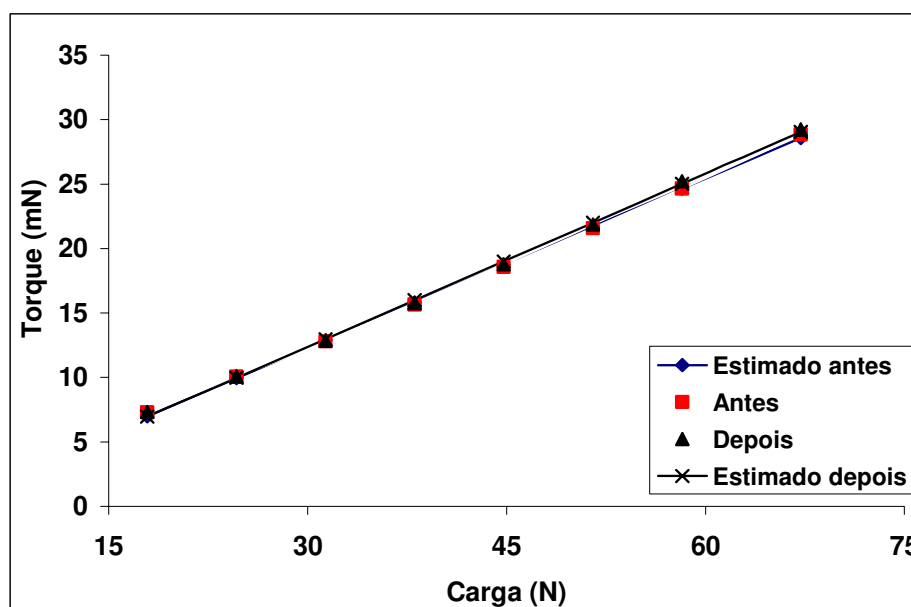
Na Figura 10, podem-se comparar os dados estimados pelas equações geradas com as médias dos valores de torque para o tratamento.

$$\tau = -0,8585099171 + 0,4380780818C \quad R^2=99,88\% \quad \text{Equação 7}$$

$$\tau = -1,082656289 + 0,448466817C \quad R^2=99,85\% \quad \text{Equação 8}$$

Em que:

- $\tau$  - torque, em mN; e
- C - força de frenagem, em N.



**Figura 10.** Comparação entre os valores de torque estimados e observados para as condições antes e depois do uso do grupo gerador no tratamento OV0/Tamb.

## Consumo Específico

No consumo específico, ocorreram diferenças entre as condições antes e depois da operação com o grupo gerador. Pode-se verificar na Figura 11 que a diferença ocorreu nas condições em que foram aplicadas forças mais elevadas.

O efeito pode ser explicado pela redução do regime de trabalho do motor que pode ter levado a um menor consumo específico, podendo o regime de trabalho ter sido mais favorável à sua redução.

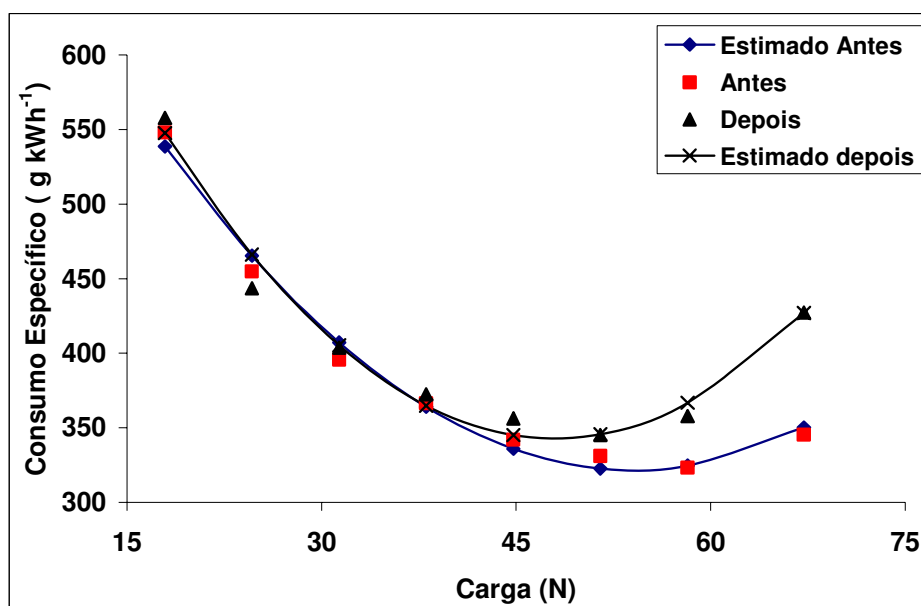
$$C_e = 807,0809524 - 17,958851C + 0,1660906C^2 \quad R^2=97,80\% \quad \text{Equação 9}$$

$$C_e = 865,2908872 - 21,7959337C + 0,2273106C^2 \quad R^2=96,54\% \quad \text{Equação 10}$$

Em que:

$C_e$  - consumo específico, em  $\text{g kWh}^{-1}$ ; e

$C$  força de frenagem, em N.



**Figura 11.** Comparação entre os valores de consumo específicos estimados e observados para as condições antes e depois do uso do grupo gerador no tratamento OV0/Tamb.

### 3.5.1.2. Tratamento OV05/Tamb

#### Regime de Trabalho

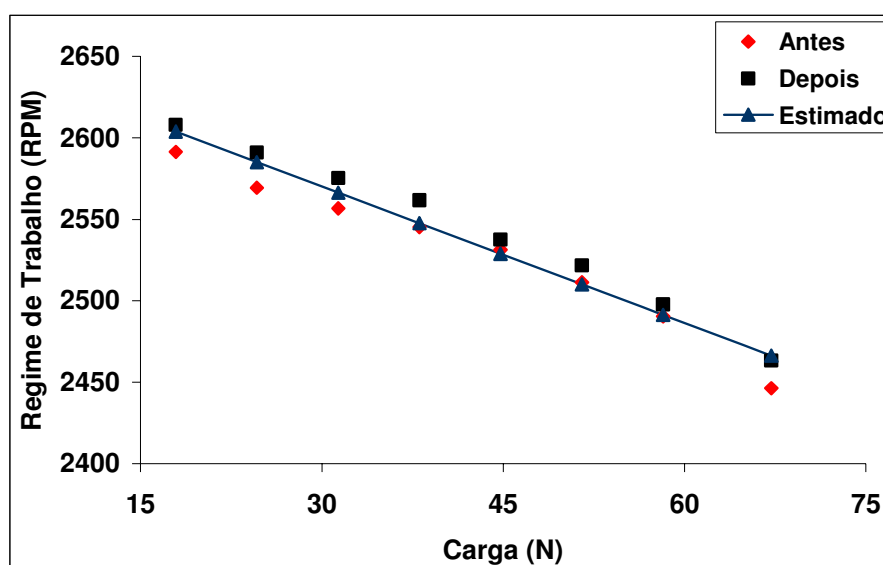
O regime de trabalho pode ser estimado apenas pela equação, tendo em vista que a interação não foi significativa ao nível de 1% pelo teste F, sendo gerado um único modelo para estimar os valores de regime de trabalho (Equação 11).

$$\omega = 2653,882164 - 2,792851C \quad R^2=94,42\% \quad \text{Equação 11}$$

Em que:

- $\omega$  - regime de trabalho, em rpm; e
- $C$  - força de frenagem, em N.

Na Figura 12, podem-se observar os valores estimados e compará-los com as médias do regime de trabalho para o tratamento OV05/Tamb.



**Figura 12.** Comparação entre os valores de regime de trabalho estimados e observados para as condições antes e depois do uso do grupo gerador no tratamento OV05/Tamb.

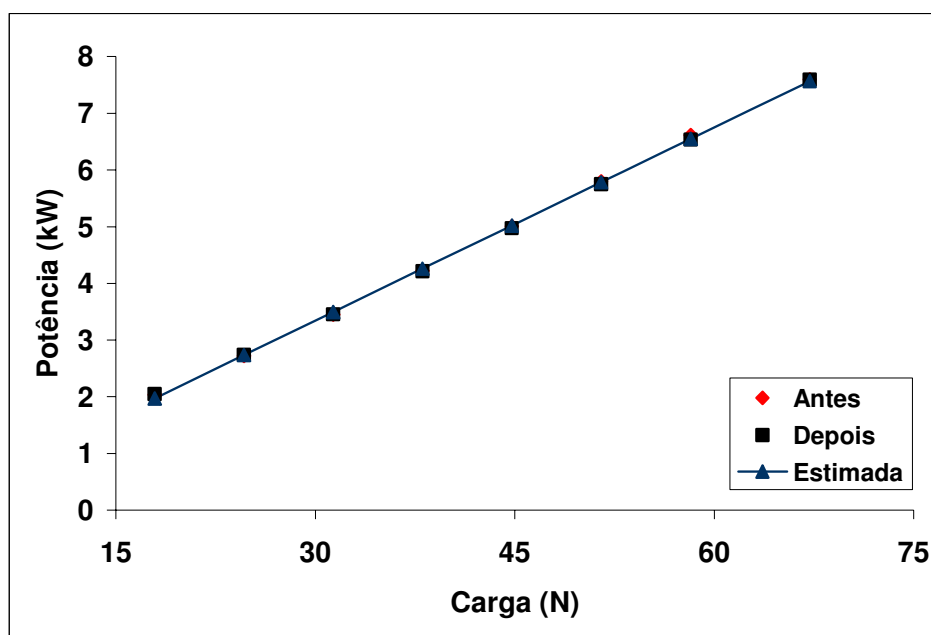
## Potência

Para a potência demandada, verificou-se que a interação entre as forças de frenagem e a condição antes e depois foi significativa ao nível de 1%, pelo teste F. Assim foi gerada a Equação 12 para estimar a potência nominal para as condições antes e depois da operação com o grupo gerador. As estimativas da potência calculada pela equação podem ser comparadas com as médias das potências para este tratamento na Figura 13

$$P = -0,0636538631 - 0,1135130445C \quad R^2=99,93\% \quad \text{Equação 12}$$

Em que:

- P - potência nominal, em kW; e
- C - força de frenagem, em N.



**Figura 13.** Comparação entre os valores de potência nominal estimados e observados para as condições antes e depois do uso do grupo gerador no tratamento OV05/Tamb.

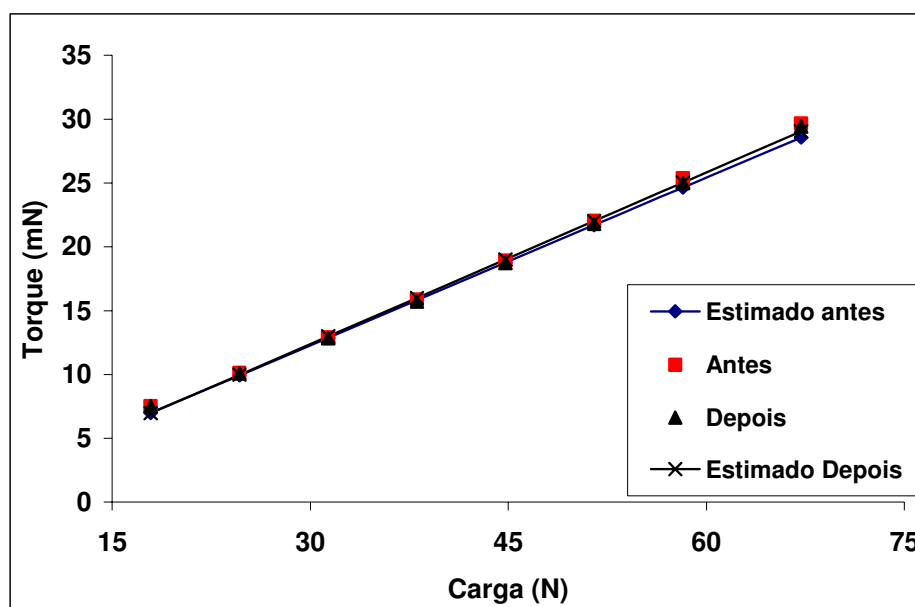
## Torque

No torque do motor, ocorreu o mesmo efeito que no tratamento OV0/Tamb, em que a interação força de frenagem e condição antes e depois não foi significativa ao nível de 1%, pelo teste F. Assim, foi gerada a Equação 13 e os valores estimados podem ser comparados com as médias de torque do tratamento OV05/Tamb na Figura 14.

$$\tau = -0,997802252 + 0,448589179C \quad R^2=99,75\% \quad \text{Equação 13}$$

Em que:

- $\tau$  - torque, em mN; e
- C - força de frenagem, em N.



**Figura 14.** Comparação entre os valores de torque estimados e observados para as condições antes e depois do uso do grupo gerador no tratamento OV05/Tamb.

## Consumo Específico

Para o consumo específico para o tratamento OV05/Tamb, verificou-se que a interação entre as forças e as condições antes e depois não foi significativa ao nível



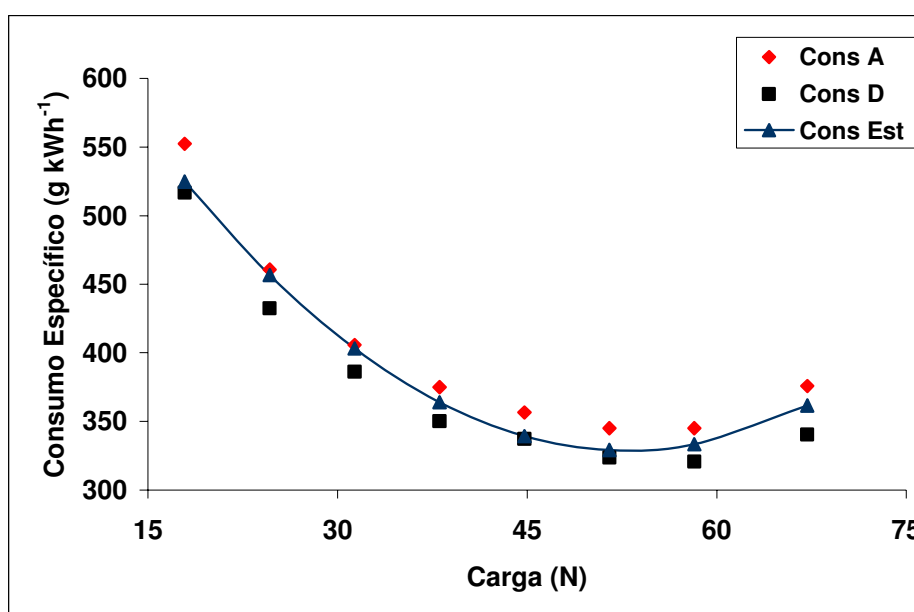
de 1%, pelo teste F. Desta forma, foi gerada apenas a Equação 14 para estimar os valores de Consumo Específico para as duas condições, que podem ser comparadas na Figura 15 com as médias dos valores coletados.

$$C_e = 776,7019078 - 16,9357497C + 0,1601449C^2 \quad R^2=94,01\% \quad \text{Equação 14}$$

Em que:

$C_e$  - consumo específico,  $\text{g kWh}^{-1}$ ; e

C - força de frenagem, em N.



**Figura 15.** Comparação entre os valores de consumo específicos estimados e observados para as condições antes e depois do uso do grupo gerador no tratamento OV05/Tamb.

### 3.5.1.3. Tratamento OV50/90

No tratamento OV50/90 não foi possível a comparação entre as condições antes e depois, devido à manutenção necessária causada pelo dano no rolamento do eixo virabrequim, que necessitou do desmonte do motor.

### **3.5.2. Operação do Grupo Gerador**

No início da avaliação dos combustíveis, o motor diesel utilizado contabilizava cerca de 100 horas de operação com várias proporções de combustíveis.

#### **3.5.2.1. Tratamento OV05/ambiente**

Na operação do grupo gerador com OV05/Tamb, a carga foi variável, acendendo e apagando-se as lâmpadas, variando a carga a cada 200 W, para manter a rotação do motor em 2500 rpm.

Para manter a rotação do motor, foram acesas de 27 a 29 lâmpadas, porém, ao completar 294 horas trabalhadas, o gerador apresentou problemas (segundo os técnicos da UFV), causados por um fio solto no gerador, responsável por um curto-circuito.

O gerador foi encaminhado à assistência técnica, tendo os técnicos da empresa relatados que o dano do gerador poderia ter sido causado pelo excesso de carga. Outro gerador, com as mesmas características, foi adquirido para o prosseguimento do trabalho.

Como era pequeno o tempo para o término do trabalho com o OV05/Tamb, e todo o processo de aquisição demandariam tempo, o trabalho foi encerrado, sendo o motor ensaiado no dinamômetro e enviado para a oficina para análise.

Outro problema observado foi a quebra do parafuso de sustentação do tanque de combustível original do motor, ainda no primeiro dia de funcionamento, causando sua queda, vazamento do combustível e pane seca. O cálculo da quantidade de combustível gasto foi estimado em função de consumos posteriores e do período de funcionamento registrado pelas temperaturas de operação do motor.

Das 294 horas trabalhadas, durante 2,24 horas o grupo gerador trabalhou sem a produção de energia e alimentado com OV0, ou seja, foi utilizado para o aquecimento e resfriamento do motor. Nas outras 4,48 horas, o grupo gerador operou com o OV0, gerando energia para a técnica de alternância de combustível. Nas 287,40 horas restantes, o grupo gerador foi alimentado com OV05.

Os turnos de trabalho tiveram em média 21 horas diários. A quantidade de energia produzida foi de 1555,8 kW, sendo 23,88 kW com OV0 e 1531,92 kW utilizando OV05/Tamb.

### **3.5.2.2. Tratamento OV50/Tamb**

Em função do ocorrido com o gerador no ensaio com o OV05/Tamb, a carga máxima no gerador foi estipulada em 5,4 kW, sendo a rotação controlada por meio da alavanca do acelerador.

O motor trabalhou com bom desempenho até chegar a 80 horas trabalhadas, quando se iniciaram as perdas de potência observadas pela queda da temperatura dos gases de escape.

O motor trabalhou por um período aproximado de 100 horas, e como o problema se manteve, optou-se pela sua desmontagem e verificação de suas peças. Durante a desmontagem foi verificada perda de pressão do bico injetor, que, regulado para trabalhar com 185 kgf/cm<sup>2</sup>, estava gerando 180 kgf/cm<sup>2</sup>, além de ter sido verificado um engripamento da válvula de escape. Foi necessária a substituição do elemento do bico injetor, da guia e da válvula de escape.

Durante os ensaios com o OV50, ocorreram problemas com o bico injetor, haste e guia das válvulas, que provocaram o abandono do ensaio e o início da alimentação do motor com OV0, depois de realizar sua desmontagem na oficina.

Como o problema ocorreu no bico injetor que totalizou uma carga horária em torno de 500 horas de trabalho, ao abandonar o OV50 com temperatura ambiente, decidiu-se retornar com o OV50, porém, com a temperatura de injeção de 90° C, obtida por meio de sistema de aquecimento desenvolvido para este fim, que utiliza os gases de escape do motor como fonte de calor.

### **3.5.2.3. Tratamento OV0/Tamb**

A operação com OV0/Tamb iniciou-se com o motor utilizado por aproximadamente 500 horas trabalhadas. O motor operou sem problemas com este combustível sem nenhuma anormalidade.

Das 299,92 horas trabalhadas, durante 2,4 horas o grupo gerador operou em rotação livre, sem produção de energia e alimentado com OV0/Tamb, com o intuito de promover o aquecimento e o resfriamento do motor. Nas outras 297,52 horas, o grupo gerador operou com o OV0, acionando o gerador e gerando energia.

#### **3.5.2.4. Tratamento OV50/T90° C**

Os ensaios com o OV50 com o combustível aquecido a 90° C por meio de um sistema de aquecimento adaptado ao motor foram iniciados quando o motor tinha em seu histórico 800 horas de operação com alguns tipos de biocombustível.

A temperatura foi regulada para trabalhar a 90° C, e evitou-se alterar a regulagem para verificar a variação da temperatura em uma mesma condição de regulagem. Assim, foram realizadas regulagens apenas quando as temperaturas eram superiores  $\pm 5^\circ$  C no momento da partida, após a estabilização do motor e nas visitas de verificação dos equipamentos.

O motor depois de revisado passou pelo dinamômetro para avaliação de seu desempenho. Iniciada a operação de geração de energia, verificaram-se problemas quando o motor totalizava 100 horas de operação, tendo ocorrido dificuldade para dar a partida no motor, com isto foi detectado pelos técnicos do LMA a ocorrência de travamento do elemento da bomba injetora. A bomba injetora foi desmontada e encaminhada para a oficina, onde foi realizada a substituição do elemento da bomba.

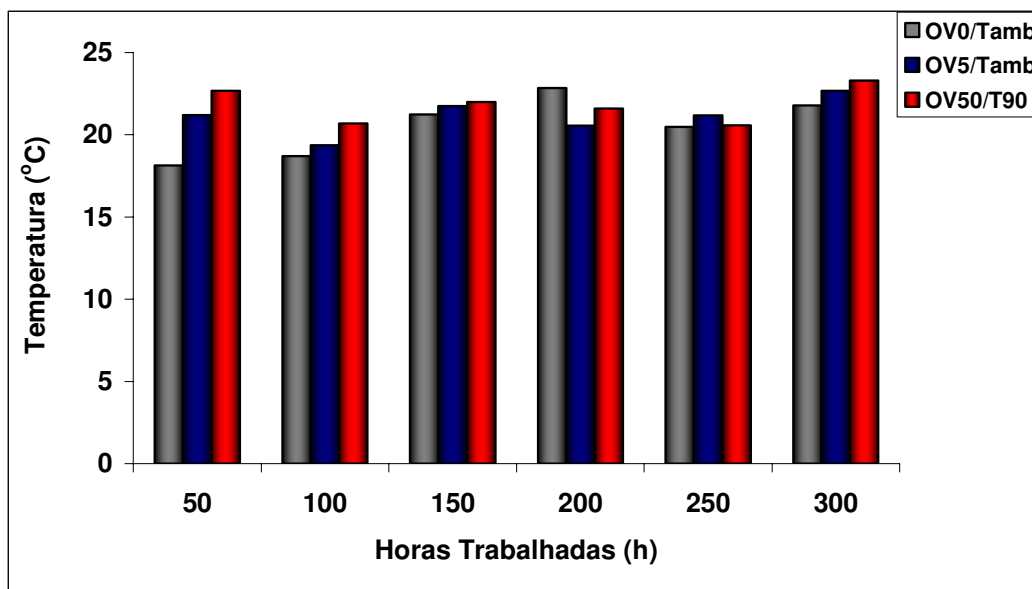
Com 250 horas, verificou-se perda de potência do motor por meio da bateria de lâmpadas, já que o motor deixou de fornecer a potência de 5,4 kW e passou a produzir 5,0 kW, para uma rotação de 2500 rpm.

Das 299,45 horas trabalhadas, durante 2,4 horas o grupo gerador trabalhou em rotação livre, sem a produção de energia para promover o aquecimento e o resfriamento do motor com OV0/T90. O grupo gerador operou ainda com OV0 por 4,8 horas no acionamento do gerador para aquecimento do motor após a partida e durante o processo de desligamento do grupo gerador para ocupar a tubulação com OV0/T90 e facilitar a partida no outro turno de operação, ou seja, em condição de partida a frio. Nas outras 292,25 horas, o grupo gerador operou com o OV50/T90, gerando energia.

A média das temperaturas ambientes foi determinada para cada faixa de 50 horas de trabalho do grupo gerador. Verifica-se, pela Figura 16, que não ocorreram valores que chamassem a atenção.

As temperaturas dos gases de admissão tenderam a ser diferentes em todas as faixas de trabalho. O tratamento OV50/T90 teve tendência a ser menor, como pode ser observado na Figura 17, sendo explicado pelo posicionamento da

tubulação de escape que ficou em uma altura maior que nos outros tratamentos, evitando que os gases de escape retornassem para a estrutura onde o motor foi instalado.

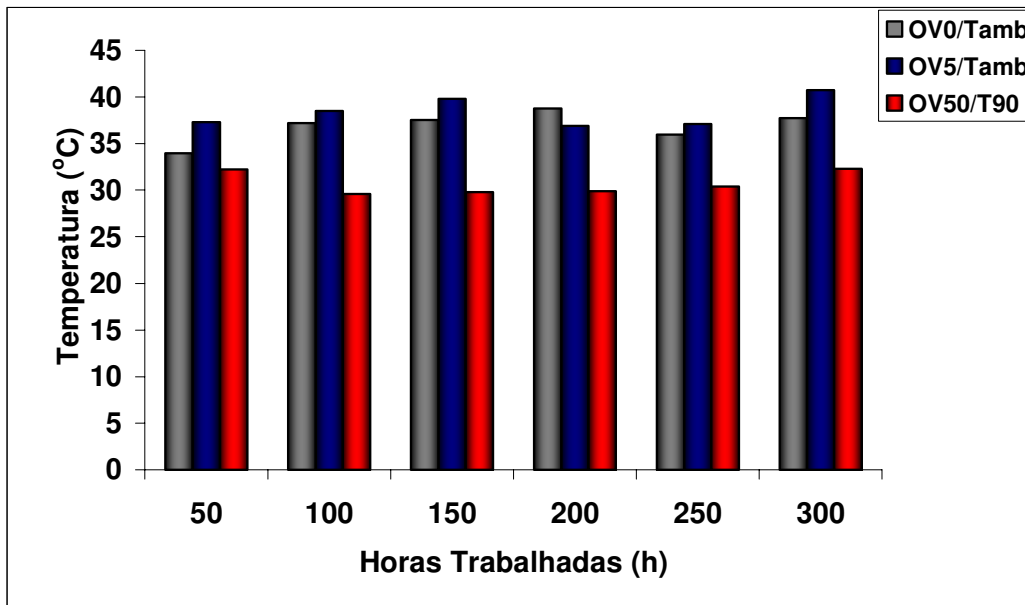


**Figura 16.** Média de temperaturas ambiente.

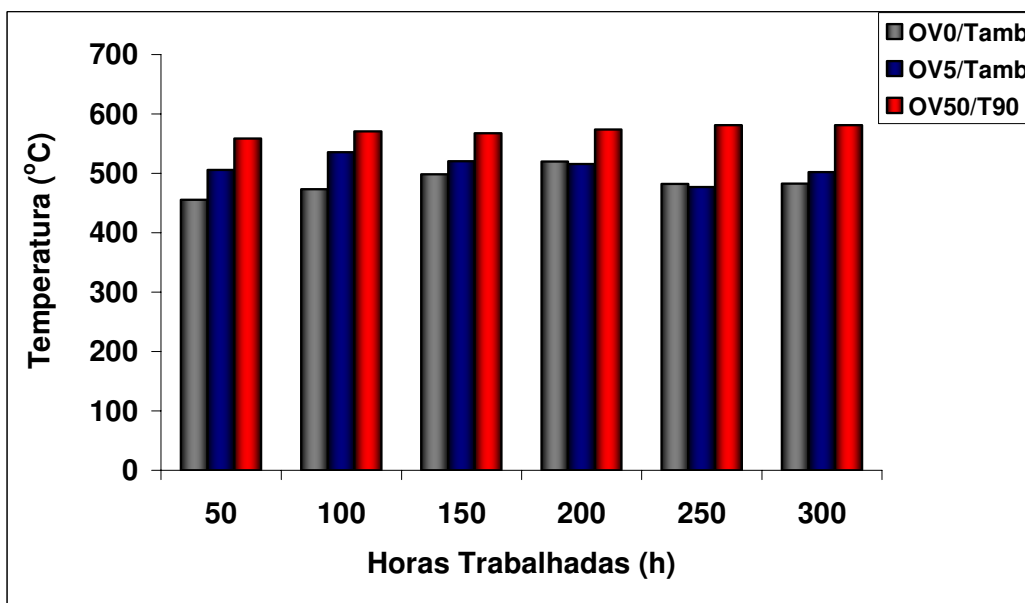
Nos tratamentos em que não ocorreu a adaptação do sistema de aquecimento de combustível, os gases foram lançados a uma altura menor, podendo estes mesmos gases, seguindo o fluxo de retorno, aquecer o local onde o grupo gerador estava instalado.

Em relação às diferenças entre os tratamentos OV0/Tamb e OV05/Tamb, pode-se verificar que foram influenciadas pela temperatura ambiente, pois na temperatura na faixa de 200 horas, tanto na temperatura ambiente como na temperatura de admissão, foram obtidas temperaturas maiores para o OV0/Tamb.

Para os gases de escape do motor foi verificada uma temperatura maior para o tratamento em que o combustível foi aquecido a 90° C (Figura 18), porém, não foi observada alteração na potência do motor por meio da geração de energia, tendo sido verificada queda de rendimento do tratamento OV50/T90 a partir das 250 horas.

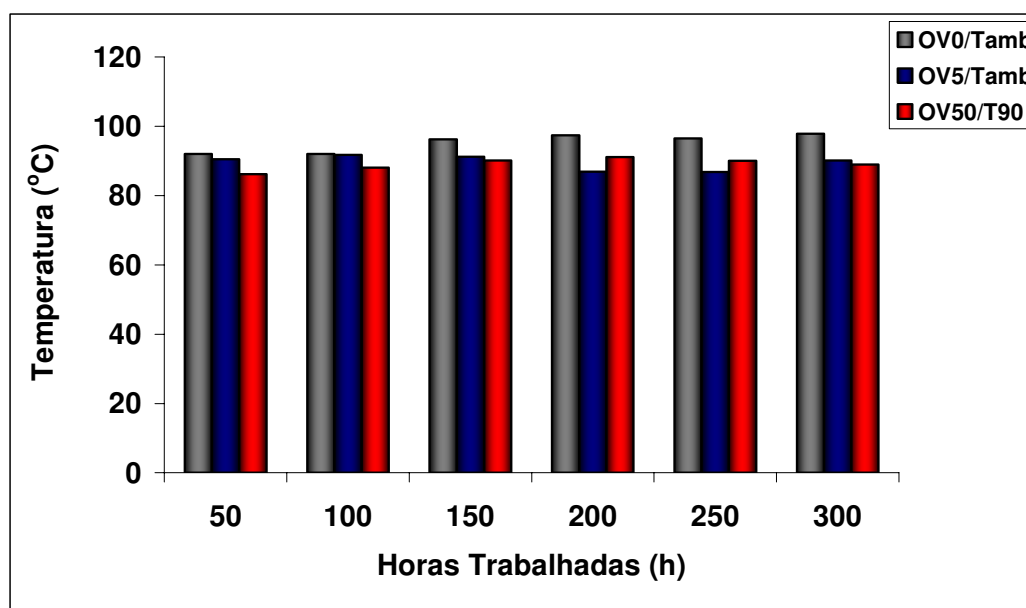


**Figura 17.** Temperatura média dos gases de admissão coletados durante a operação do motor para cada tratamento analisado.



**Figura 18.** Temperatura média dos gases de escape coletados durante a operação do motor para cada tratamento analisado

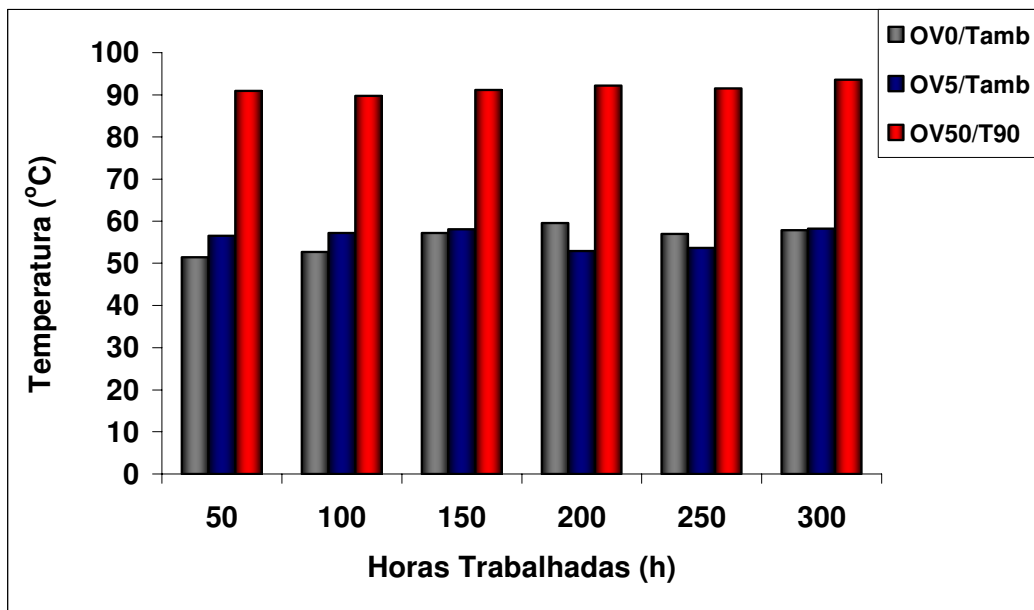
As temperaturas médias do lubrificante não sofreram alterações em função da sua utilização, como pode ser observado na Figura 19. Pode-se verificar que, no tratamento OV50/T90, houve uma maior estabilidade da temperatura, além da tendência de ser menor em relação aos outros tratamentos. A explicação pode ser dada pela temperatura dos gases de admissão que também foi menor para este tratamento.



**Figura 19.** Temperatura média do óleo lubrificante coletados durante a operação do motor para cada tratamento analisado

Quanto à temperatura de injeção do combustível, fica evidente a influência do sistema de aquecimento. Para as condições em que não houve aquecimento, a temperatura de injeção foi influenciada pela temperatura ambiente de admissão.

As médias de temperaturas para cada faixa de trabalho são apresentadas na Figura 20.



**Figura 20.** Temperatura média do combustível, no momento da injeção, coletados durante a operação do motor para cada tratamento analisado.

### 3.5.3. Formação de Resíduos

#### 3.5.3.1. Tratamento OV05/Tamb

No primeiro combustível a ser testado, não foram verificadas ocorrências anormais no funcionamento do motor. Observou-se deposição de resíduos na válvula de admissão do motor (Figura 21).

A formação de depósito pode ser verificada também no cabeçote do motor, como apresentado na Figura 22. A deposição de resíduos foi verificada em todos os tratamentos, inclusive no tratamento que utilizou apenas o óleo diesel, tratamento OV0/Tamb.

No bico injetor (Figura 23), na bomba injetora e na cabeça do pistão, não foram encontradas anomalias, apenas carbonização, considerada normal para a carga horária do motor.





**Figura 21.** Deposição de resíduos na válvula de admissão no tratamento OV5/Tamb.



**Figura 22.** Situação do cabeçote do motor no tratamento OV05/Tamb.



**Figura 23.** Deposição de resíduos no bico injetor no tratamento OV05/Tamb.

### 3.5.3.2. Tratamento OV0/Tamb

No OV0/Tamb, não foi encontrado nenhum tipo de anomalia, e seus resultados foram utilizados como padrão, servindo de comparação com os resultados de outros tratamentos.

Observou-se formação de depósitos de resíduos na válvula de admissão (Figura 24) e no cabeçote (Figura 25), como ocorrido no tratamento OV05/Tamb. Nenhuma ocorrência foi verificada durante os ensaios com óleo: tratamento OV0/Tamb.



**Figura 24.** Depósito na válvula de admissão no tratamento OV0/Tamb



**Figura 25.** Depósito no cabeçote no tratamento OV0/Tamb.

### **3.5.3.3. Tratamento OV50/90**

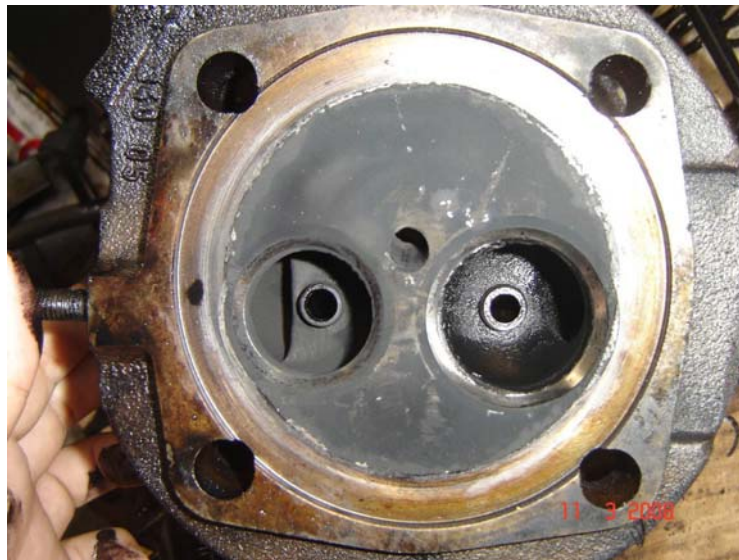
No momento da desmontagem do motor na oficina foi verificado travamento do elemento do bico injetor, provocando sua substituição.

Foi verificada deposição na válvula de admissão (Figura 26) e cabeçote (Figura 27), como ocorrido nos outros tratamentos, porém, em uma intensidade maior, podendo ser notada uma pequena deposição de resíduos na cabeça do pistão (Figura 28), necessitando de uma limpeza da câmara de combustão após o período de 300 horas. No bico injetor foi também verificada deposição no mesmo nível encontrado na câmara de combustão.

De forma geral, a formação de resíduos não foi superior a ponto de influenciar no desempenho no motor, porém, para a mistura de OV50/90, é interessante a descarbonização da câmara de combustão pelo menos em um intervalo de 500 horas. O tempo de trabalho foi de 300 horas, mas não houve necessidade de abertura especificamente para a descarbonização.



**Figura 26.** Deposição de resíduos na válvula de admissão no tratamento OV50/T90



**Figura 27.** Situação do cabeçote do motor no tratamento OV50/T90.



**Figura 28.** Situação do pistão no tratamento OV50/T90.

#### **3.5.4. Desgaste dos Componentes do Motor**

Os resultados dos relatórios enviados pela oficina Retifica Rio Branco podem ser avaliadas no Anexo 1, e podemos verificar que em termos de desgaste possivelmente pelo uso das misturas do combustível com óleo vegetal, apenas nos componentes do sistema de alimentação do motor foram verificadas danos ou desgaste.

#### **3.5.5. Análise dos Lubrificantes Usados**

O laudo das análises das amostras dos óleos lubrificantes utilizados durante os testes de geração de energia foram todos reprovados pelo Laboratório de Ensaio de Óleos Lubrificantes - LEOL, do SENAI-MG, sugerindo a sua substituição, até mesmo quando o motor foi alimentado somente com o OV0.

Para a situação do óleo novo, foi enviada uma amostra e nas condições de óleos usados foram enviadas duas amostras. No quadro 1, podem ser verificados os resultados das análises físico-químicas e os métodos utilizados para a análise das amostras de óleo lubrificante utilizados. Nas colunas dos óleos usados, são apresentadas as médias de duas amostras.

A análise do ponto de fulgor das amostras de OV0/Tamb não pôde ser realizada devido a grande contaminação com água.

**Quadro 1.** Resultados das análises físico-químicos das amostras de lubrificante usadas no motor na condição de trabalho e do lubrificante novo.

Ensaio	Método	Óleos Lubrificantes			
		Novo	OV05/Tamb	OV0/Tamb	OV50/T90
Viscosidade a 40° C (cSt)	ABNT NBR 10441	155,32	110,44	170,24	124,98
pH		8,54	7,08	7,68	7,89
Ponto de Fulgor (°C)	ABNT NBR 11341	245	236	*	255
TBN (mg KOH g <sup>-1</sup> )	ABNT NBR 5798	9,9799	3,7111	9,5312	7,8131
Insolúveis de Pentano (%)	P-MB-325	0,09	0,04	0,02	0,025
Água (% de volume)	ABNT NBR 14238	0,0	0,1	0,1	0,1

A análise de desgaste metálico e aditivação são apresentadas no quadro 2. O ensaio foi realizado de acordo com o Método LEOL/IT-09.

**Quadro 2.** Resultados das análises de desgaste metálico e aditivação das amostras de lubrificante usadas no motor na condição de trabalho e do lubrificante novo.

Ensaio	Óleos Lubrificantes			
	Novo	OV05/Tamb	OV0/Tamb	OV50/T90
Fe (ppm)	1,30	98,95	77,45	961,50
Al (ppm)	0,30	7,75	4,40	19,85
Na (ppm)	4,10	12,00	12,05	10,70
Zn (ppm)	707	1145	874,50	568,00
Cr (ppm)	0,00	3,60	1,85	16,10
Ni (ppm)	0,00	2,40	0,85	1,30
Mg (ppm)	2291	270,00	1916,5	1826,50
Mo (ppm)	0,00	2,00	4,90	2,40
Pb (ppm)	0,00	16,25	4,60	9,15
Ca (ppm)	320	2302,00	851,50	360,00
Cu (ppm)	0,00	3,15	3,65	7,00
Si (ppm)	6,60	23,75	11,50	16,40
Ba (ppm)	4,50	0,05	14,30	7,30
V (ppm)	0,00	2,30	1,20	0,60
B (ppm)	25,40	0,35	18,45	17,25
P (ppm)	698	1030,50	685,50	521,00

Verifica-se que em todas as amostras de óleos usados, foi sugerida, pelo laudo, que havia a necessidade de se proceder a substituição do lubrificante

Ainda observa-se que a quantidade de ferro, cromo, cobre e alumínio presentes, nas análises do lubrificante no tratamento OV50/T90, foi superior em relação aos outros tratamentos, fortalecendo a hipótese do desgaste do eixo virabrequim e do rolamento.

### **3.5.6. Custo da geração de energia**

#### **Depreciação, Juros, Alojamento e Seguro**

A depreciação, juros, e alojamento e seguro foram calculados e os custos horários foram de R\$0,81, R\$0,10 e R\$0,04, respectivamente.

#### **Manutenção**

A vida útil ou o intervalo de substituições de alguns elementos para a manutenção preventiva são apresentados no Quadro 3, levando em consideração o manual do fabricante, os dados coletados nos experimentos e a consulta a técnicos da AGRALE, da Retífica Rio Branco e do LMA.

**Quadro 3.** Vida útil ou intervalo de substituições de elementos, em horas, visando à composição de custos.

<b>Manutenção</b>	<b>OV0/Tamb</b>	<b>OV05/Tamb</b>	<b>OV50/T90</b>
<b>Óleo lubrificante (h)</b>	150	150	150
<b>Filtro de combustível (h)</b>	200	200	200
<b>Filtro de Ar (h)</b>	200	200	200
<b>Elemento do Bico Injetor (h)</b>	2000	2000	500
<b>Bico Injetor (h)</b>	2000	2000	1000
<b>Elemento da Bomba Injetora (h)</b>	5000	5000	500
<b>Descarbonização da câmara de combustão (h)</b>	1000	1000	500

Para o cálculo do óleo lubrificante, levou-se em consideração a capacidade de 2,5 litros do reservatório do cárter e somou-se mais 0,5 litros para a reposição

durante o intervalo de troca para manter o nível do lubrificante recomendado pelo fabricante. O custo do lubrificante foi de R\$8,00 por litro.

Os filtros de ar e de combustível foram adquiridos em rede autorizada por R\$ 8,00 e R\$ 40,00 a unidade, respectivamente, e foram substituídos de acordo com o manual do fabricante.

O bico, a bomba injetora e a junta tiveram a manutenção feita na Oficina Retífica Rio Branco. Para o cálculo, foi considerado o custo do elemento do bico e da bomba injetora no valor de R\$70,00 cada.

Os parâmetros utilizados para a determinação do cálculo dos custos com as manutenções são apresentados no Quadro 4. Verifica-se que os custos com as manutenções foram menores que aqueles considerados por Fonseca (2007), que considerou o dobro dos custos da manutenção quando utilizou somente o óleo diesel.

**Quadro 4.** Custo horário, em reais, das manutenções realizadas no motor, visando à composição dos custos.

<b>Manutenção</b>	<b>OV0/Tamb</b>	<b>OV05/Tamb</b>	<b>OV50/T90</b>
<b>Óleo lubrificante (R\$ h<sup>-1</sup>)</b>	0,16	0,16	0,16
<b>Filtro de combustível (R\$ h<sup>-1</sup>)</b>	0,04	0,04	0,04
<b>Filtro de Ar (R\$ h<sup>-1</sup>)</b>	0,20	0,20	0,20
<b>Bico Injetor (R\$ h<sup>-1</sup>)</b>	0,07	0,07	0,28
<b>Bomba Injetora (R\$ h<sup>-1</sup>)</b>	0,01	0,01	0,10
<b>Descarbonização (R\$ h<sup>-1</sup>)</b>	0,15	0,15	0,30
<b>Total (R\$ h<sup>-1</sup>)</b>	<b>0,63</b>	<b>0,63</b>	<b>1,08</b>

### **Salários**

Para o cálculo do salário, levou-se em consideração o salário mensal de R\$450,00, o valor do décimo terceiro e 20% de encargos sociais que geraram um custo horário de 1,60 para compor o custo total.

### **Combustíveis**

Os custos dos combustíveis foram calculados em função dos dados coletados durante a operação com o grupo gerador e são apresentados na Quadro 5.



**Quadro 5.** Parâmetros utilizados para composição dos custos com combustível.

Custos	OV0/Tamb	OV05/Tamb		OV50/T90	
	OV0	OV0	OV05	OV0	OV50
Consumo de Combustível (kg)	523,70	8,33	532,65	8,33	588,85
Preço do Combustível (R\$ L <sup>-1</sup> )	1,95	1,95	1,90	1,95	1,46
Custo do Combustível (R\$)	1194,40	16,24	1038,68	16,24	859,72
Produção de Energia (kW)	1535,8	23,88	1531,92	22,95	1426,06
Horas Trabalhadas (h)	299,45	4,48	287,40	4,8	292,25
Consumo Horário (kg h <sup>-1</sup> )	1,76	1,85	1,86	1,73	2,01
Carga Horária Média (h)	20		21		20
Custo Total (R\$)	1194,40		1054,92		875,96
Custo específico (R\$ kW <sup>-1</sup> )	0,66		0,68		0,60
<b>Custo Horário (R\$ h<sup>-1</sup>)</b>	<b>3,43</b>	<b>3,62</b>	<b>3,52</b>	<b>3,38</b>	<b>2,94</b>

**Custos totais**

Em função dos cálculos de cada variável para a composição final do custo horário do funcionamento do motor e do custo de produção de energia elétrica, os valores calculados foram sintetizados no Quadro 6.

**Quadro 6.** Composição dos parâmetros utilizados para o cálculo do custo de produção de energia elétrica.

Custos	OV0/Tamb	OV05/Tamb	OV50/T90
Depreciação do grupo gerador	0,81	0,81	0,81
Depreciação do Sistema de Aquecimento (R\$ h <sup>-1</sup> )	0,00	0,00	0,01
Juros (R\$ h <sup>-1</sup> )	0,10	0,10	0,10
Alojamento e Seguro (R\$ h <sup>-1</sup> )	0,04	0,04	0,04
Combustível (R\$ h <sup>-1</sup> )	3,43	3,52	2,94
Manutenção (R\$ h <sup>-1</sup> )	0,63	0,63	1,08
Salários (R\$ h <sup>-1</sup> )	1,60	1,60	1,60
<b>Custos Totais (R\$ h<sup>-1</sup>)</b>	<b>6,61</b>	<b>6,70</b>	<b>6,58</b>
<b>Custo de Produção (R\$ kWh<sup>-1</sup>)</b>	<b>1,29</b>	<b>1,26</b>	<b>1,35</b>

Pode-se verificar um menor custo de aquisição do OV50, mas seu custo específico, custo por kW, se aproxima do OV0, devido ao maior consumo de OV50, e por ter ocorrido uma produção menor de energia.

A menor quantidade de energia gerada pode ter sido ocasionada pela perda de rendimento nas últimas 50 horas de trabalho, que foi reduzido em média em 0,4 kW h<sup>-1</sup>.

Assim, pode-se verificar que ocorre um equilíbrio nos custos do funcionamento do grupo gerador, tendo em vista que a economia gerada pelo custo menor de aquisição do combustível OV50, foi gasta devido ao aumento nos custos de manutenção do motor.

Quando se analisa o custo da geração de energia elétrica, verifica-se que o tratamento OV50/T90 teve um custo superior, que foi de R\$1,35 por kWh (4,66% maior que o OV0/Tamb), enquanto para os tratamentos OV0/Tamb e OV05/Tamb, os custos foram de R\$1,29 e R\$1,26 por kWh produzido, um custo menor foi obtido com o tratamento OV05/Tamb (2,47% menor) devido ao custo de manutenção ser mantido semelhante e ocorrer um custo menor do combustível.

O custo de geração de energia de todos os tratamentos foi superiores ao praticada pela CEMIG, porém, aceitável devido a geração termelétrica ter um custo naturalmente elevado em relação à produção por hidrelétricas, motivo da existência da Conta Consumo de Combustíveis - CCC.

Comparadas com os custos encontrados por Coelho (2005), os menores custos encontrados é explicado pelo menor custo do óleo de dendê e o grupo gerador ser de porte maior, fazendo que alguns custos sejam reduzidos.

Mesmo com maior custo de produção, não se deve pensar em abolir seu uso, tendo em vista que os custos foram calculados para a cidade de Viçosa-MG. Levando-se em consideração que grande parte dos custos teve como causa o combustível, em locais de difícil acesso onde o custo do óleo diesel pode ser maior, a produção de energia utilizando o óleo vegetal pode ter um atrativo econômico, além dos atrativos sociais mencionados por Moraes (1982).

### **3.6. Conclusões**

Verifica-se em função dos resultados do trabalho que:

- Não ocorreu formação de resíduos na câmara de combustão que necessitasse de descarbonização antes de 300 horas de operação do motor em todos os tratamentos utilizados, até a proporção de 50%;

- Ocorreu um custo menor com o combustível, quando utilizada uma maior proporção de ODS;
- Ocorreu um custo maior com manutenção, principalmente no sistema de alimentação, quando utilizada uma maior proporção de ODS;
- O custo de produção de energia elétrica aumenta com maior proporção de ODS; e,
- A utilização de óleo vegetal é uma alternativa viável em comunidades isoladas.

### 3.7. Referências Bibliográficas

- AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA– ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 2ª edição – Brasília: ANEEL, 2005. 243 p.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO-ANP (2001). **Portaria ANP N° 310**, de 27 de Dezembro de 2001. Diário Oficial da União de 28/12/2001
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO-ANP, (2003). **Portaria ANP N° 255**, de 24 de setembro de 2003. Diário Oficial da União de 16/9/2003.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO-ANP. Conta consumo de combustíveis dos Sistemas Isolados de Geração de Energia Elétrica. NOTA TÉCNICA - SCM 29p. 2006
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5484*: motores alternativos de combustão interna de ignição por compressão (Diesel) ou ignição por centelha (Otto) de velocidade angular variável - ensaio - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1985. 8 p.
- COELHO, S. T. ; SILVA, O. C. ; SILOTTO, C. E. G. ; VELÁZQUEZ, S. M. S. G. ; MONTEIRO, M. B. C. A. . Implantação e Testes de Utilização de Óleo Vegetal Como Combustível Para Diesel Geradores em Comunidades Isoladas da Amazônia. In: 5º Encontro de Energia no Meio Rural e Geração Distribuída-AGRENER, 2004. **Anais...** Campinas. 2004.
- ELETROBRAS. Comunidades isoladas. [www.eletróbras.br](http://www.eletróbras.br). Acesso em 10/04/2008.
- FONSECA, C. H. M. **Substituição do Óleo Diesel por Combustível alternativo na Geração de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro-RJ, 2007. (Dissertação de Mestrado)

- KALTNER, F. J. Geração de energia elétrica em pequenas comunidades da Amazônia, utilizando óleo vegetal “*in natura*” de espécies nativas como combustível em motores diesel. SAEX` 2004. Módulo 1-Biomassa. P 9.
- KALTNER, F. J. Geração de energia elétrica em pequenas comunidades da Amazônia, utilizando óleo vegetal “*in natura*” de espécies nativas como combustível em motores diesel. SAEX` 2004. Módulo 1-Biomassa. P 9.
- MAZIEIRO, J. V. G.; CORRÊA, I.M. Biocombustível em xeque. **Revista Cultivar Máquinas**. N. 32, p. 6-9.julho de 2004.
- Ministério da Agricultura e Desenvolvimento Agrário-MAPA. **Indicação de aspectos Tecnológicos Relativos ao Uso do Biodiesel**. In: Relatório Final, Anexo III. Grupo de Trabalho Interministerial – BIODIESEL.
- Ministério da Defesa – Exército Brasileiro. Trabalho Técnico Sobre Manutenção Preditiva em Vtr da Família Leopard 1 e em Vbtp M113 por Meio da Análise Química de Óleos Lubrificante. 2003. [www.dmnt.eb.mi.br/trab\\_tec/trab\\_tec.htm](http://www.dmnt.eb.mi.br/trab_tec/trab_tec.htm). Acesso em 31/08/2008.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME, Brasília. 2004MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME, Luz Para Todos Instala Comitê Estadual de Universalização no Ceará, Brasília. 2004.
- MIRANDA, R. de M. & MOURA, R. D. Óleo de dendê, alternativa ao óleo diesel como combustível para geradores de energia em comunidades da Amazônia.. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3., 2000. **Anais...** Campinas
- MORAES, J. R. **Manual dos óleos vegetais e suas possibilidades energéticas**. CNI,1980. 78 p.
- NASCIMENTO, M. V. G.; VIEIRA, L. S. R.; SILVA, M. R.; FLEURY, G.; DOMINGUES, P. C.; SADI, J. C.; ALMEIDA, S. C. A.; BELCHIOR, C. R. P. Opções à geração diesel-elétrica para sistemas isolados na Região Norte: Eólica, Hidrocinética e Biomassa. **XV SNTPEE**. Foz do Iguaçu-PR 1999.
- OLIVEIRA, L. B., COSTA, A. O. da. BIODIESEL: UMA EXPERIÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL In: Congresso Brasileiro de Energia, 2002, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: COPPE, 2002. v.IV. p.1772 – 1779
- PACHECO, E.P. **Seleção e custo operacional de máquinas agrícolas**. Rio Branco: Embrapa. Acre, 2000. 21p. (Embrapa Acre. Documentos, 58).

- PRATEEPCHAIKUL, G; APICHATO, T.; Palm Oil as a Fuel for Agricultural Diesel Engines: Comparative Testing against Diesel Oil. **Songklanakarin J. Sci. Technol.** V.25, n.3, p. 317-326, 2003.
- SOARES, G. F. W.; VIEIRA, L. S. R.; NASCIMENTO, M. V. G. Operação de um grupo gerador utilizando óleo vegetal bruto como combustível . In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL-AGRENER, 3, 2000. Campinas. Anais... Campinas: [s.n.], 2000.
- TORRES, E. A. Avaliação de um motor de ciclo diesel operando com óleo de dendê para suprimento energético em comunidades rurais. . In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL-AGRENER, 4.,2002, Campinas. **Anais...** Campinas: [s.n.], 2002.

#### 4. Resumo e Conclusões

O trabalho foi conduzido no Laboratório de Mecanização Agrícola (LMA) do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa e foi dividido em 3 experimentos. No primeiro, foi estudada a influência da temperatura na redução da viscosidade, sendo aplicadas as temperaturas de 60º, 90º, 120º, 150º e 180º C, nas amostras de óleo “*in natura*” de girassol, milho e soja. A determinação da viscosidade foi realizada em um viscosímetro tipo Saybolt, e por meio da análise estatísticas foram gerados modelos matemáticos para estimar os valores de viscosidades dentro das temperaturas e dos tipos de óleo estudados.

No segundo experimento, foram estudados os efeitos da temperatura e as proporções de óleo degomado de soja no óleo diesel. Foram utilizados 4 níveis de temperatura (ambiente, 90º, 120º e 150º C) nos 5 níveis de proporção de óleo degomado de soja (0, 5, 50, 75 e 100%). Os ensaios foram realizados em um dinamômetro e foram aplicadas as força de frenagem de: 18 , 25, 31, 38, 45, 52, 58 e 67 N. Foram feitas as análises estatísticas dos dados e gerados gráficos para verificar o desempenho do motor em relação ao regime de trabalho, potência, torque e consumo específico. Neste experimento também foram acompanhadas as temperaturas de injeção do combustível para avaliação do sistema de aquecimento desenvolvido.

No terceiro experimento, o motor alimentado com misturas de até 50% de ODS foi submetido ao trabalho por meio do acionamento de um grupo gerador. Foi construída uma estrutura para a distribuição e consumo da energia produzida. Neste experimento, foram verificados a formação de resíduos na câmara de combustão, o desgaste de componentes, a quantidade de energia gerada e o custo da energia gerada.

Ao final da análise dos experimentos, concluiu-se que:

- os óleos vegetais estudados apresentaram viscosidade semelhante ao óleo diesel quando aplicadas temperaturas acima de 160º C;
- o sistema de aquecimento desenvolvido foi eficiente para o aquecimento do óleo degomado de soja em qualquer proporção;
- o controle do sistema de aquecimento foi eficiente, obtendo-se temperaturas de injeção de combustível dentro dos limites de temperatura estabelecidos;

- a temperatura de injeção de combustível não apresentou efeito no desempenho do motor;
- a potência, o torque e o regime de trabalho não sofreram influência do aquecimento do combustível e da adição de ODS ao combustível;
- ocorreu um consumo maior para maiores proporções de ODS;
- não ocorreu formação de resíduos na câmara de combustão que necessitasse de descarbonização antes de 300 horas de operação do motor, em todos os tratamentos utilizados;
- ocorreu um custo menor com o combustível, quando foi utilizada uma maior proporção de ODS, até os níveis de 50%;
- ocorreu um custo maior com manutenção, principalmente no sistema de alimentação, quando foi utilizada uma maior proporção de ODS;
- o custo de produção de energia elétrica aumenta com a maior proporção de ODS; e
- a utilização de óleo vegetal é uma alternativa viável em comunidades isoladas.

## 5. Anexos

Laudos da Oficina Retífica Rio Branco

Ensaio realizado em 22/10/2007			
Situação: Primeiro desmonte antes do inícios dos ensaios de longa duração.			
Componente		Diâmetro	Ovalização
Cilindro		90,00	0,01
Pistão		89,94	XX
Eixo Virabrequim		50,93	0,00
Biela		54,00	0,00
Buchas da Biela		28,08	0,01
Válvula	Altura	Admissão	0,80
		Descarga	0,95
	Haste	Admissão	7,95
		Descarga	7,95
	Guia	Admissão	8,01
		Descarga	8,01
Folga Axial do Virabrequim		0,25	
Folga da Bronzina ao Eixo Virabrequim		0,07 a 0,08	
Pressão do Bico Injetor		185 kgf/cm	
Bico injetor		Aspecto Carbonizado e Colorido	
Elemento da Bomba		Aspecto de novo	

Ensaio realizado em 11/12/2007			
Situação: desmontagem após a utilização por 300 h com a mistura de OV5 e antes do início do ensaio de longa duração com a mistura de OV50.			
Componente		Diâmetro	Ovalização
Cilindro		90,00	0,01
Pistão		89,94	XX
Eixo Virabrequim		50,93	0,00
Biela		54,00	0,00
Buchas da Biela		28,08	0,01
Válvula	Altura	Admissão	0,80
		Descarga	0,95
	Haste	Admissão	7,95
		Descarga	7,95
	Guia	Admissão	8,01
		Descarga	8,01
Folga Axial do Virabrequim		0,25	
Folga da Bronzina ao Eixo Virabrequim		0,07 a 0,08	
Pressão do Bico Injetor		185 kgf/cm	
Bico injetor		Aspecto Carbonizado e Colorido	
Elemento da Bomba		Aspecto de novo	



Ensaio realizado em 17/01/2008				
Situação: Desmontagem após a utilização do OV50/Tamb e início com OV0				
Componente			Diâmetro	Ovalização
Cilindro			90,00	0,01
Pistão			89,94	XX
Eixo Virabrequim			50,93	0,00
Biela			54,00	0,00
Bucha da Biela			28,08	0,01
Válvula	Altura	Admissão	0,80	
		Descarga	0,95	
	Haste	Admissão	7,95	
		Descarga	7,95	
	Guia	Admissão	8,01	
		Descarga	8,01	
Folga Axial do Virabrequim			0,25	
Folga da Bronzina ao Eixo Virabrequim			0,09 a 0,10	
Pressão do Bico Injetor			180 kgf/cm	
Bico injetor			Desgaste médio necessitando de troca	
Elemento da Bomba			Aspecto de novo	
Engripamento da guia de válvula de escape folga de 0,10 mm na parte inferior e 0,20 mm na parte superior				

Ensaio realizado em 12/02/2008				
Situação: Desmonte a utilização com OV50 e início com OV0				
Componente			Diâmetro	Ovalização
Cilindro			90,00	0,01
Pistão			89,94	XX
Eixo Virabrequim			50,93	0,00
Biela			54,00	0,00
Bucha da Biela			28,08	0,01
Válvula	Altura	Admissão	0,80	
		Descarga	0,95	
	Haste	Admissão	7,95	
		Descarga	7,95	
	Guia	Admissão	8,01	
		Descarga	8,01	
Folga Axial do Virabrequim			0,25	
Folga da Bronzina ao Eixo Virabrequim			0,09 a 0,10	
Pressão do Bico Injetor			185 kgf/cm	
Bico injetor			Aspecto Carbonizado e Colorido	
Elemento da Bomba			Aspecto de novo	

Ensaio realizado em 11/03/2008				
Situação: Desmontagem após a utilização com OV50/T90				
Componente			Diâmetro	Ovalização
Cilindro			90,00	0,01
Pistão			89,94	XX
Eixo Virabrequim			50,93	0,00
Biela			54,00	0,00
Buchas da Biela			28,08	0,01
Válvula	Altura	Admissão	0,80	
		Descarga	0,95	
	Haste	Admissão	7,95	
		Descarga	7,95	
	Guia	Admissão	8,01	
		Descarga	8,01	
Folga Axial do Virabrequim			0,25	
Folga da Bronzina ao Eixo Virabrequim			0,09 a 0,10	
Pressão do Bico Injetor			185 kgf/cm	
Bico injetor			Aspecto de novo	
Elemento da Bomba			Elemento travado e necessitando de troca	
Rolamento do eixo virabrequim necessitou ser substituído em função do seu desgaste, assim como o eixo virabrequim.				