

# COMBUSTÍVEIS LÍQUIDOS PARA MOTORES STIRLING

**Eduardo Muniz Yokoyama**

Universidade Católica de Petrópolis - Engenheiro Mecânico

Orientador:

**Prof. Aldo Falconi**

Universidade Católica de Petrópolis - Coordenador de engenharia  
Mecânica

## RESUMO

Este trabalho visa apresentar a comparação, através de dados obtidos com experiências, entre combustíveis líquidos quando utilizados em motores de combustão externa Stirling. Será demonstrado o básico da teoria de funcionamento dos motores de ciclo Stirling. É apresentado também um breve resumo sobre o biodiesel, mostrando algumas formas de obtenção deste combustível. Após essa demonstração é feita uma comparação experimental entre os seguintes combustíveis líquidos: álcool anidro, biodiesel de óleo de soja novo, biodiesel de óleo de soja reciclado, diesel B2, gasolina 77%.

*Palavras-chave: stirling; biodiesel; óleo de soja.*

## 1. INTRODUÇÃO

O ciclo e o motor de Stirling não são uma tecnologia recente, datam de 1816, porém ainda são uma tecnologia pouco explorada. Apesar da sua maior eficiência comprovada quando comparado com os motores atuais de ciclo Otto e de Diesel (no ano de 1975 a empresa holandesa Phillips construiu um motor Stirling que chegou à eficiência de 40%<sup>1</sup>, muito maior que os costumeiros 30%<sup>2</sup> alcançados pelos motores de combustão interna) e apesar do menor risco de acidentes e menor necessidade de manutenções, não foi explorado. Um dos motivos para isso se deve ao fato de que, até poucas décadas atrás, não havia a preocupação com o consumo de combustíveis fósseis, sua escassez e conseqüente poluição, assunto hoje de extrema importância, sendo constantemente discutido em congressos mundiais.

O foco mundial tem sido a solução de problemas relacionados ao aquecimento global, fato esse agravado pelo uso de combustíveis fósseis. Outro problema a ser resolvido é justamente a dependência que temos dos mesmos, visto que eles não são renováveis e poucos países controlam suas fontes.

O Biodiesel é uma alternativa aos combustíveis derivados do petróleo. Pode ser usado em carros e qualquer outro veículo com motor a diesel. Fabricado a partir de fontes renováveis, como o girassol, a soja e a mamona, é um combustível que emite menos poluente que o diesel. Além disso, pode ser produzido no Brasil que, devido às suas condições de solo e clima, tem grande potencial de produção de biomassa como o etanol e o biodiesel.

---

<sup>1</sup> Fonte: G.Walker, Stirling engines, 1978.

<sup>2</sup> Fonte: Gastão Moraes da Silveira, Máquinas para a Pecuária.

## 1.1 OBJETIVO

Este Trabalho tem por objetivo principal o estudo do uso de biodiesel em motores de ciclo Stirling e o teste experimental da produção de biodiesel, comparando com os combustíveis hoje já utilizados, como a gasolina e o diesel derivado do petróleo. Este estudo visa demonstrar que a utilização de uma fonte renovável de energia e de uma tecnologia de maior eficiência em conjunto pode ser uma das soluções para os problemas energéticos e ambientais da atualidade.

## PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DOS MOTORES STIRLING

Os motores de ciclo Stirling são motores de combustão externa, ou seja, realizam a combustão fora do motor. Para gerar o trabalho, o calor entra no motor através do trocador de calor que fica em contato com a combustão, em seqüência o fluxo de calor passa pelo trocador até ser transferido para o gás de trabalho<sup>3</sup>, que pode ser o Hélio, o Hidrogênio ou o próprio ar atmosférico.

Após o gás de trabalho ter recebido o calor da combustão, ele expande<sup>4</sup> empurrando o pistão de força do motor e, após essa expansão, o gás é deslocado para fora do contato com o trocador de calor que está aquecido e passa a fazer contato com outro trocador de calor que deverá estar a uma temperatura inferior à do gás de trabalho. Quando o gás entra em contato com a parede desse trocador de calor, por estar a uma temperatura mais elevada, cede calor ao trocador que por sua vez o transfere para fora do motor. Após ter cedido esse calor o gás se contrai e é novamente deslocado para entrar em contato com o trocador de calor quente, reiniciando o ciclo.

Abaixo é detalhado o funcionamento de um motor Stirling de configuração beta:

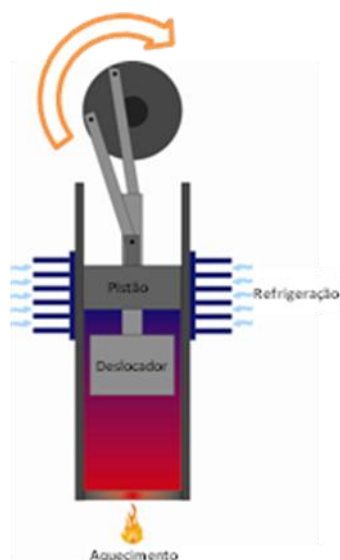


Fig. 3-1 Beta 1º passo

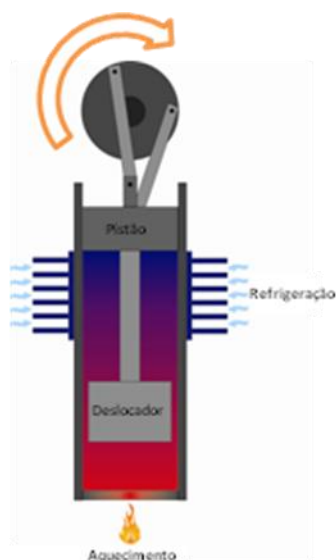


Fig. 3-2 Beta 2º passo

<sup>3</sup> Gás que, através de sua expansão e contração, move o motor gerando trabalho.

<sup>4</sup> Os gases possuem a propriedade de expansão (aumento de volume) e contração (diminuição de volume). Essas mudanças ocorrem de acordo com a mudança de temperatura e/ou pressão.

1. O pistão de força<sup>5</sup> comprimiu o gás de trabalho enquanto o deslocador<sup>6</sup> se encontra na parte fria do cilindro, fazendo o gás de trabalho ficar na parte quente, trocando calor (ver Fig. 3-1).
2. O gás de trabalho tem sua temperatura aumentada e conseqüentemente a pressão interna do cilindro faz o pistão de força se deslocar, enquanto o deslocador começa seu movimento da parte fria do cilindro para a parte quente (ver Fig. 3-2).

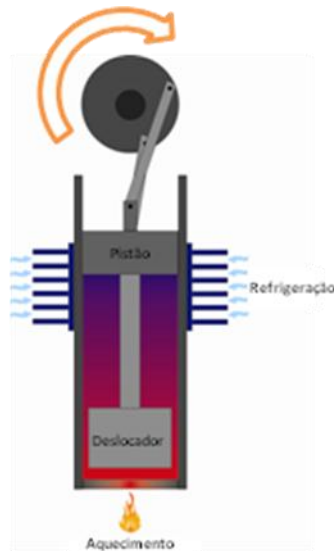


Fig. 3-3 Beta 3º passo

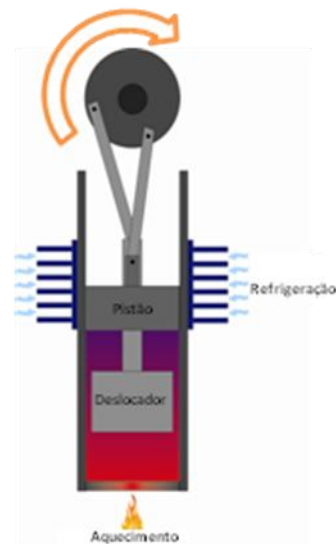


Fig. 3-4 Beta 4º passo

3. O deslocador se encontra na parte quente do cilindro, fazendo o gás de trabalho ficar na parte fria e trocar calor com as paredes do cilindro, que por sua vez troca e dissipa esse calor (ver Fig. 3-3).
4. O gás de trabalho agora é comprimido pelo momento do disco, esse processo é facilitado pela queda de pressão interna do cilindro. O deslocador começa seu movimento da parte quente para a parte fria do cilindro (ver Fig. 3-4).

Podemos observar na Fig. 3-5 que o pistão está defasado 90° em relação ao deslocador, ou seja, enquanto o deslocador está na parte quente do cilindro o pistão está comprimindo o gás de trabalho e, quando o deslocador está na parte fria do cilindro, o pistão está sendo movido para cima pela força gerada pela expansão do gás de trabalho.

<sup>5</sup> Pistão que gera trabalho ao ser movido pelo gás de trabalho.

<sup>6</sup> Similar a um pistão, porém com folgas para permitir que o gás de trabalho escoe. Seu objetivo é ocupar o espaço onde se encontra o gás de trabalho, movendo-o para a área desejada do motor.

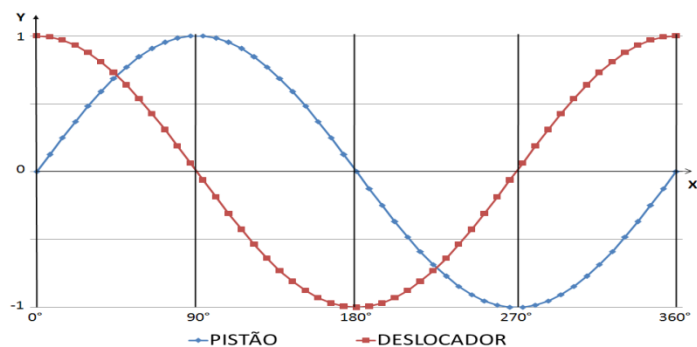


Fig. 3-5 Defasagem entre o deslocador e o pistão

## 1.2 AQUECEDOR E REFRIGERADOR

Chamamos de aquecedor e refrigerador o local por onde o calor entra no motor e por onde ele sai. Os motores Stirling funcionam por diferencial de temperatura, quanto maior for esse diferencial maior será a energia gerada pelo motor. Sabemos que o tipo do material e a espessura da parede do trocador de calor são dados necessários para o cálculo do fluxo de calor que entra e sai do sistema. Então, para se obter um maior fluxo de calor é necessário se ter um aquecedor ou refrigerador de um material de alta condutibilidade térmica e de mínima espessura.

Qualquer acréscimo de material depositado sobre o aquecedor e o refrigerador dificultará o fluxo de calor, visto que o material depositado pode ter baixa condutibilidade térmica e ter elevada espessura. Por esse motivo, qualquer tipo de fuligem que possa ocorrer em aquecedores que ficarão em contato com os gases da combustão deve ser evitada a fim de se ter maior eficiência nos motores de ciclo Stirling.

## COMBUSTÍVEIS LÍQUIDOS PARA MOTORES STIRLING

Qualquer combustível pode ser usado para se movimentar um motor Stirling visto que para isso somente é necessário gerar um diferencial de temperatura. No entanto, a futura escassez dos combustíveis derivados do petróleo e fatores ambientais nos levarão a procurar cada vez mais combustíveis renováveis e de baixa emissão de poluentes que possam ser usados em motores de maior eficiência do que os atualmente utilizados.

Os motores Stirling tem elevada eficiência quando comparados com os de ciclo Otto e Diesel utilizados atualmente. Logo, se faz necessário o estudo de combustíveis que atinjam melhor eficiência nesses motores de ciclo Stirling.

## 1.3 BIODIESEL

É um óleo combustível que, assim como o diesel derivado do petróleo, pode ser usado em motores de ciclo Diesel, seja puro ou em mistura com o diesel derivado do petróleo. Atualmente, o diesel vendido nos postos de combustíveis vem com uma mistura de 2% de biodiesel, por isso são chamados de diesel B2.

Diferentemente do diesel derivado do petróleo, é um combustível renovável e limpo. Pode-se usar como matéria-prima óleos vegetais ou animais, misturados com um álcool (Etanol ou Metanol são os mais utilizados) e um catalisador (NaOH ou KOH).

### 1.3.1 ÓLEO DE COZINHA RECICLADO

Após a utilização do óleo de cozinha, muitas pessoas o descartam de forma incorreta nas pias e ralos, sem saber que o óleo contaminará os corpos d'água. Para

seu correto descarte é necessário separar o óleo usado em garrafas e destiná-los aos pontos de coleta capazes de tratar ou reciclar esse óleo.

Os benefícios da utilização do óleo de cozinha reciclado para a fabricação de biodiesel não são apenas econômicos, mas também ambientais. Além do preço inferior ao do óleo novo (sendo que em alguns casos pode ser obtido sem custos quando se é do interesse de alguma empresa o descarte do mesmo), a fabricação do biodiesel com o óleo reciclado ajuda a retirá-lo do meio ambiente.

Um litro de óleo de cozinha, quando descartado de maneira incorreta (diretamente nas redes de esgotos através de pias e ralos), pode contaminar cerca de 25 mil litros de água<sup>7</sup>. Apesar de o óleo passar por estações de tratamento, as mesmas não tem capacidade de tratar todo o óleo, por exemplo, a SABESP de São Paulo consegue tratar apenas 68% de todo o óleo que chega até ela.

A SABESP ainda estima que, no Brasil, cerca de quatro bilhões de litros de óleo sejam usados por ano, sendo desse total dois bilhões descartados, mas apenas 5% destes dois bilhões são reciclados. Sendo assim cerca de 1,9 bilhões de litros de óleo são descartados. Tomando como base de cálculo a capacidade de tratamento da SABESP, mesmo tratando 68% desses 1,9 bilhões de litros de óleo descartado, ainda 608 milhões de litros de óleo usado não seriam tratados, poluindo assim cerca de 15,2 trilhões de litros de água, o equivalente a 6,08 milhões de piscinas olímpicas, por ano.

Além do impacto ambiental do óleo de cozinha, o seu tratamento é muito custoso para o Estado.

### 1.3.2 TECNOLOGIA APLICADA PARA A PRODUÇÃO DE BIODIESEL

Existem duas tecnologias que podem ser aplicadas para obtenção de biodiesel a partir de óleos vegetais e sebo animal: tecnologia de transesterificação e tecnologia de craqueamento<sup>8</sup>.

No Brasil, o processo de craqueamento está sendo desenvolvido, porém a realidade das usinas já instaladas é o processo de transesterificação, motivo pelo qual esse trabalho adotará a tecnologia de transesterificação.

A tecnologia predominante no mundo é a de rota de transesterificação metálica, nos quais os óleos vegetais ou sebo animal são misturados com metanol que, associados com um catalisador, produzem o biodiesel. É possível obter o biodiesel através da rota de transesterificação etílica, porém na maioria dos países o alto custo do etanol não torna esta opção economicamente viável.

### 1.3.3 TRANSESTERIFICAÇÃO

A transesterificação (ver Fig. 4-3) é uma reação química entre um éster<sup>9</sup> (RCOOR') e um álcool<sup>10</sup> (R''OH) da qual resulta um novo éster (RCOOR'') e um álcool (R'OH), onde R, R' e R'' são radicais orgânicos. No processo de fabricação do biodiesel origina-se um éster de ácido graxo e glicerol como subproduto. Cerca de 20% de uma molécula de óleo vegetal é formado por glicerina.

---

<sup>7</sup> Fonte: SABESP.

<sup>8</sup> Processo de divisão de uma substância em partes menores pela ação de calor e/ou catalisador.

<sup>9</sup> Constituem o grupo funcional, que consiste em um radical orgânico, unido ao resíduo de qualquer ácido oxigenado, orgânico ou inorgânico.

<sup>10</sup> Composto orgânico de fórmula R-OH, onde R é um radical alquila, que por sua vez é um radical orgânico monovalente de fórmula geral C<sub>n</sub>H<sub>2n+1</sub>.

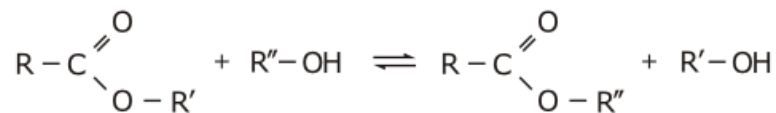


Fig. 4-1 Transesterificação

#### 1.4 PROCESSO DE OBTENÇÃO DE BIODIESEL

Para fins de comparação, o método utilizado para obtenção de biodiesel com óleo de soja novo e usado são os mesmos. Abaixo segue a lista de materiais utilizados:

1. Recipiente com escala volumétrica em ml.
2. Recipiente com tampa para a mistura do metanol com o NaOH.
3. Recipiente com tampa para separação da glicerina.
4. Recipiente para pesagem do NaOH.
5. Garrafa pet com tampa para mistura do óleo de soja com o metóxido de sódio.
6. Garrafa pet com tampa para descarte de refugos do processo.
7. Multímetro com termopar (Minipa ET-1110).
8. Balança digital (Eletronic Kitchen Scale SF-400).
9. Fonte de calor
10. Funil
11. NaOH (3,5 g marca Reagen)
12. Metanol (200 ml marca Reagen)
13. Óleo de soja (novo ou reciclado) (1 litro)
14. Água

Este método foi estudado no *website*: A Journey to Forever (ver capítulo 7 item 4). Não se trata de uma fórmula ou regra, podendo seus valores ser alterados e conseqüentemente alterando o resultado obtido.

##### 1.4.1 PROCEDIMENTO

1. Pesar com a balança 3,5 gramas de NaOH. (ver Fig. 4-2)



Fig. 4-2 Materiais

2. Utilizar o recipiente com escala em ml para medir 200 ml de metanol.
3. Adicionar os 200 ml de metanol em um recipiente com tampa, adicionar os 3,5 gramas de NaOH e misturar até todo o NaOH estar diluído no metanol, formando assim metóxido de sódio Na(CH<sub>3</sub>O). Esse processo é exotérmico. (ver Fig. 4-3)



Fig. 4-3 Metóxido de Sódio

4. Passar o óleo por uma malha fina para separar dos resíduos de alimentos, caso necessário. (ver Fig. 4-4)



Fig.4-4 Filtração do óleo

5. Colocar 1 litro de óleo de soja (novo ou usado) na garrafa pet utilizando o funil.
6. Aquecer o óleo até a temperatura de 60°C e manter essa temperatura sob controle por 15 minutos. O objetivo é verificar se há a presença de água no óleo. O óleo começará a emitir sons de pequenos estouros perto dos 50°C se houver a presença de água, caso contrário não há água o suficiente para atrapalhar o processo e sendo assim o próximo passo poderá ser pulado. Se o óleo for novo essa etapa não se faz necessária.
7. Virar o óleo em outra garrafa pet, manter esta virada com a parte da tampa para baixo e deixar descansar por 1 dia. Após feito isso, descartar o óleo com água (aproximadamente 10% do volume total) que se encontra na parte inferior da garrafa pet. Para tal abra um pouco a tampa com a garrafa ainda virada para baixo e deixe

- escorrer 10% do volume de óleo. Descarte este óleo na garrafa pet de descarte de refugos. O óleo que sobrou está adequado para o uso.
8. Aquecer o óleo e manter a temperatura de 55°C. Não ultrapassar essa temperatura visto que o metanol evapora aos 64°C.
  9. Inserir na garrafa pet com o óleo aquecido o metóxido de sódio. Isso fará com que imediatamente precipite glicerina no fundo. Misture o metóxido de sódio ao óleo por 10 minutos, procurando manter a temperatura de 55°C. (ver Fig. 4-5)



Fig. 4-5 Mistura à temperatura constante

10. Deixar em repouso, com a tampa virada para baixo, por 12 horas. (ver Fig. 4-6)



Fig. 4-6 Decantando por 12 horas

11. A Glicerina estará na parte de baixo com uma coloração mais escura, abra a tampa um pouco para deixar a glicerina sair (ainda com a garrafa virada para baixo), quando começar a sair o óleo feche a tampa. (ver Fig. 4-7)





Fig. 4-7 Glicerina e biodiesel separados

12. Coloque a glicerina em um recipiente fechado com tampa
13. Adicione 200 ml de água a 50°C dentro da garrafa com o óleo, misture por 5 minutos e deixe repousar por 30 minutos com a tampa para baixo. Após, irá se acumular na parte de baixo um líquido com coloração branca leitosa. (ver Fig. 4-8)



Fig. 4-8 Purificando o biodiesel

14. Abra um pouco a tampa e deixe sair o líquido leitoso, repita o passo anterior até que o líquido que se deposite no fundo esteja clara e não leitoso. (ver Fig. 4-9)



Fig. 4-9 Biodiesel após purificação

15. Coloque o líquido leitoso na garrafa de descarte de refugo.

### 1.5 CUIDADOS NA FABRICAÇÃO DE BIODIESEL

Alguns cuidados devem ser tomados para se evitar acidentes, visto que muitos produtos utilizados no processo são tóxicos.

1. Não ingerir Metanol ou qualquer mistura feita com o mesmo. Metanol é tóxico e pode levar a morte. No caso de ingestão procurar imediatamente socorro médico.
2. Utilizar luvas e óculos de proteção para evitar que os produtos entrem em contato com a pele ou olhos. Caso ocorra o contato, lavar em água corrente e procurar socorro médico.
3. Não deixar os produtos em recipientes destampados, visto que eles exalam gases tóxicos.
4. Não deixar o metanol ou qualquer outro combustível perto de fontes de calor pelo perigo de explosão.
5. Não utilizar utensílios de uso doméstico, ou caso o faça inutilize-os para o uso doméstico visto que pode ocorrer contaminação de alimentos.

### TESTES E COMPARAÇÕES ENTRE OS COMBUSTÍVEIS

Faz-se necessário saber quais são as características do biodiesel obtido através da metodologia adotada nesse trabalho. Outro fator importante é comparar o combustível obtido com outros comerciais a fim de se saber qual é o melhor combustível líquido a ser utilizado em motores de ciclo Stirling.

Para esta etapa do Trabalho de Conclusão de Curso foram selecionados os seguintes combustíveis líquidos:

- Álcool anidro (álcool de posto de combustível)
- Biodiesel de óleo de soja novo (fabricação própria)
- Biodiesel de óleo de soja usado (fabricação própria)
- Diesel B2 (diesel de posto de combustível)
- Gasolina 77% (gasolina de posto de combustível)

O mesmo procedimento de teste foi seguido para todos os combustíveis para fins de comparação entre os mesmos. Por não ter sido feito em laboratório com ambiente controlado, foram anotados os valores da temperatura ambiente no início

de cada teste, assim como a temperatura inicial da água. Abaixo segue a lista de materiais para execução dos testes:

1. Barbante de algodão de 5 mm de diâmetro e 80 mm de comprimento.
2. Lamparina (fabricação própria).
3. Papel alumínio.
4. Multímetro com termopar (Minipa ET-1110).
5. Balança digital (Eletronic Kitchen Scale SF-400).
6. Suporte para a panela (fabricação própria).
7. Panela com capacidade maior que 1 litro.
8. Cronômetro digital.

#### 1.6 PROCEDIMENTO DE TESTE

1. Pesquisar com a balança digital 500 ml de combustível e anotar o valor obtido em gramas.
2. Inserir o combustível a ser testado na lamparina.
3. Colocar o barbante de algodão e vedar a lamparina com papel alumínio de modo que a ponta do barbante fique para fora cerca de 3 mm.
4. Pesquisar o conjunto da lamparina com o combustível na balança digital e anotar o valor.
5. Colocar a panela sobre a balança digital, usar a função “tara” para zerar a balança e adicionar 1000 g de água.
6. Posicionar a panela com água sobre o suporte da panela. Abaixo da panela, posicionar a lamparina.
7. Com o multímetro com termopar, medir a temperatura ambiente e a temperatura da água e anotar os dados obtidos.
8. Colocar a ponta do termopar na água de forma que a mesma não se encoste ao fundo ou nas laterais da panela.
9. Acender a lamparina e iniciar o cronômetro.
10. Manter a chama acesa até que a temperatura medida pelo multímetro seja igual à temperatura inicial da água mais 20 °C ( $T_i + 20\text{ °C}$ ). (ver Fig.5-1).



Fig. 5-1 Teste sendo realizado

11. Parar o cronômetro e anotar o tempo.
12. Pesquisar na balança digital a lamparina com combustível e anotar o seu valor.

13. Caso seja necessário, limpar o fundo da panela para remoção de camadas de fuligem (ver Fig. 5-2).



Fig. 5-2 Camada de fuligem após teste

### 1.7 CUIDADOS NA REALIZAÇÃO DOS TESTES

1. Realizar os testes em local arejado, mas sem a presença de forte corrente de ar para não atrapalhar nos testes.
2. Não deixe materiais inflamáveis perto da lamparina quando ela estiver acesa.
3. Utilize máscara para não inalar a fumaça gerada pela combustão.

### 1.8 ANÁLISE DOS DADOS OBTIDOS EM TESTE

Para a análise dos dados obtidos em teste se fazem necessários a padronização das unidades e a utilização de nomes para identificar o que se estava analisando.

A tabela 5-1 a seguir mostra os nomes e unidades de grandezas físicas adotadas nesse trabalho.

IDENTIFICAÇÃO	DESCRIÇÃO	UNIDADE
$Q_{\text{gerado}}$	Calor gerado no ensaio pela queima do combustível	kcal
$Q_{\text{requerido}}$	Calor requerido pelo ensaio (aquecer 1000g de H <sub>2</sub> O em 20°C)	kcal
$PQ_{\text{tabelado}}$	Poder calorífico gerado pela queima de combustível tabelado	kcal/kg
$PQ_{\text{experimental}}$	Poder calorífico obtido através do ensaio do combustível	kcal/kg
$PQ_{\text{lítro}}$	Poder calorífico por volume de combustível	kcal/ l
$M_{\text{média}}$	Média aritmética de massa utilizada nos 5 ensaios dos combustíveis	g
$M_{100\%}$	Massa utilizada caso o ensaio obtivesse 100% de	g

	<b>eficiência</b>	
<b>M<sub>i</sub></b>	<b>Massa medida da lamparina com combustível no início do ensaio</b>	<b>g</b>
<b>M<sub>f</sub></b>	<b>Massa medida da lamparina com combustível no final do ensaio</b>	<b>g</b>
<b>V<sub>médio</sub></b>	<b>Média aritmética de volume utilizado nos 5 ensaios dos combustíveis</b>	<b>ml</b>
<b>V<sub>100%</sub></b>	<b>Volume utilizado caso o ensaio obtivesse 100% de eficiência</b>	<b>ml</b>
<b>Tempo<sub>médio</sub></b>	<b>Média aritmética do tempo gasto nos 5 ensaios dos combustíveis</b>	<b>hh:mm:ss</b>
<b>Tempo</b>	<b>Tempo cronometrado de cada ensaio</b>	<b>hh:mm:ss</b>
<b>T<sub>amb</sub></b>	<b>Temperatura ambiente medida no início dos ensaios</b>	<b>°C</b>
<b>T<sub>i</sub></b>	<b>Temperatura inicial da água no início dos ensaios</b>	<b>°C</b>
<b>T<sub>f</sub></b>	<b>Temperatura final da água ao término dos ensaios</b>	<b>°C</b>
<b>M<sub>H2O</sub></b>	<b>Massa de água utilizada nos ensaios</b>	<b>g</b>
<b>m</b>	<b>Massa</b>	<b>g</b>
<b>V</b>	<b>Volume</b>	<b>ml</b>
<b>cp</b>	<b>Calor específico</b>	<b>cal/g.°C</b>
<b>ρ</b>	<b>Massa específica</b>	<b>kg/m<sup>3</sup></b>
<b>ε</b>	<b>Eficiência</b>	<b>%</b>

Tabela 5-1 Identificação, descrição e unidade de grandezas físicas adotadas

### 1.8.1 MASSA ESPECÍFICA ρ

Para este cálculo foram utilizados os dados obtidos com a pesagem de 500 ml e a massa desse volume em gramas. A equação de cálculo para a tabela 5-2 é a seguinte:

$$\rho = \frac{\left[ \frac{(M \times 1000)}{(V \times 1000)} \right]}{1000} \quad (3)$$

A seguir os valores obtidos nos cálculos:

	<b>VOLU ME (ml)</b>	<b>MASS A (g)</b>	<b>ρ (kg/m<sup>3</sup> )</b>
<b>ÁLCOOL ANIDRO:</b>	500	405	810
<b>DIESEL:</b>	500	424	848
<b>GASOLINA:</b>	500	376	752
<b>BIODIESEL DE ÓLEO NOVO:</b>	500	441	882
<b>BIODIESEL DE ÓLEO RECICLADO:</b>	500	429	858

Tabela 5-2 Massa específica calculada

### 1.8.2 TESTE DO PODER CALORÍFICO DOS COMBUSTÍVEIS

Abaixo seguem as equações de cálculo utilizadas nas tabelas 5-3 a 5-7, para um melhor esclarecimento será utilizado o biodiesel de óleo reciclado (Tabela 5-5) para explicitar as equações:

- $Q_{requerido} = \left( \frac{m \cdot cp \cdot \Delta T}{1000} \right), \quad (4)$

Será igual em todos os casos visto que em todos os testes a massa de água e o diferencial de temperatura serão iguais, logo, utilizando os valores utilizados nos ensaios na equação (4) temos:

$$Q_{requerido} = \frac{1000 \cdot 1 \cdot 20}{1000} = 20 \text{ kcal}$$

- $\varepsilon = \frac{Q_{requerido}}{Q_{gerado}} \quad (5)$

Utilizando os valores do álcool anidro (Tabela 4-2) na equação (5), tem-se:

$$\varepsilon = \frac{20 \text{ kcal}}{37,12 \text{ kcal}} = 0,539 = 53,9 \%$$

- $Q_{gerado} = Q_{teórico} \cdot \left( \frac{M_{média}}{1000} \right) \quad (6), \text{ para os combustíveis}$   
que possuem o  $Q_{teórico}$ .

Para o biodiesel que não possui valor tabelado, podemos usar a seguinte equação:

$$Q_{gerado} = \frac{Q_{requerido}}{\varepsilon} \quad (7)$$

Logo, para o biodiesel de óleo reciclado que, de forma igual ao álcool anidro não gerou fumaça e fuligem, adota-se a eficiência do álcool anidro e utilizando a equação (7), temos:

$$Q_{gerado} = \frac{20 \text{ kcal}}{0,539} = 37,1 \text{ kcal}$$

Como já dito anteriormente,  $Q_{requerido}$  será igual para todos os combustíveis, logo o  $Q_{gerado}$  do biodiesel de óleo de soja novo, do biodiesel de óleo de soja reciclado e do álcool anidro será igual a 37,1 kcal.

- $M_{100\%} = \varepsilon \cdot M_{média} \quad (8)$

Utilizando os valores do biodiesel de óleo de soja reciclado na equação (8), temos:

$$M_{100\%} = 0,539 \cdot 4,2 \text{ g} = 2,3 \text{ g}$$

- $V_{100\%} = \varepsilon \cdot V_{médio} \quad (9)$

Utilizando os valores do biodiesel de óleo de soja reciclado na equação (9), temos:

$$V_{100\%} = 0,539 \cdot 4,9 \text{ ml} = 2,6 \text{ ml}$$

$$\bullet PQ_{\text{experimental}} = \frac{Q_{\text{gerado}}}{\left(\frac{M_{\text{média}}}{1000}\right)} \quad (10)$$

Equivale ao  $Q_{\text{teórico}}$ , para o biodiesel experimental já que não possui o valor de tabela.

Utilizando os dados obtidos nos ensaios na equação (10) temos que:

$$PQ_{\text{experimental}} = \frac{37,15 \text{ kcal}}{\left(\frac{4,2 \text{ g}}{1000}\right)} = 8838 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

$$\bullet PQ_{\text{litro}} = \left(\frac{Q_{\text{gerado}}}{V_{\text{médio}}}\right) \cdot 1000 \quad (11)$$

É o poder calorífico gerado por litro de combustível. Conseguimos calculá-lo através da média aritmética dos volumes utilizados de cada combustível nos ensaios. Para o biodiesel de óleo de soja reciclado, utilizando a equação (11), temos:

$$PQ_{\text{litro}} = \left(\frac{37,1 \text{ kcal}}{4,9 \text{ ml}}\right) \cdot 1000 = 7583 \frac{\text{kcal}}{\text{litro}}$$

Abaixo seguem os valores obtidos em cada teste:

ÁLCOOL ANIDRO									
	ENS AIO 1	ENS AIO 2	ENS AIO 3	ENS AIO 4	ENS AIO 5				
						$M_{\text{média}}$	5,8		
$M_{\text{H}_2\text{O}}$	1000	1000	1000	1000	1000	$V_{\text{médio}}$	7,2		
$T_{\text{amb}}$	19	19	19	19	19	$\text{Tempo}_{\text{médio}}$	00:20:22		
$T_i$	19	20	20	20	20	$PQ_{\text{tabelado}}$	6400		
$T_f$	39	40	40	40	40	$Q_{\text{requerido}}$	20		
$M_i$	97	91	85	80	74	$Q_{\text{gerado}}$	37,1		
$M_f$	91	85	80	74	68	$\varepsilon$	53,9 %		
Tempo	00:20:45	00:21:16	00:19:51	00:20:10	00:19:50	$PQ_{\text{litro}}$	5184		
Obs.:	SEM FUMAÇA, ALTA VOLATILIDADE						$M_{100\%}$	3,1	
							$V_{100\%}$	3,9	

Tabela 5-3 Valores obtidos nos ensaios para o álcool anidro

BIODIESEL DE ÓLEO DE SOJA NOVO							
	ENS AIO 1	ENS AIO 2	ENS AIO 3	ENS AIO 4	ENS AIO 5	$M_{m\acute{e}dia}$	4,2
$M_{H_2O}$	1000	1000	1000	1000	1000	$V_{m\acute{e}dio}$	4,8
$T_{amb}$	19	19	19	18	18	Tempo $_{m\acute{e}dio}$	00:31:19
$T_i$	20	19	20	19	19	PQ $_{experimental}$	8838
$T_f$	40	39	40	39	39	$Q_{requerido}$	20
$M_i$	106	101	97	93	89	$Q_{gerado}$	37,1
$M_f$	101	97	93	89	85	$\epsilon$	53,9 %
Tempo	00:29:31	00:27:30	00:30:19	00:32:24	00:36:50	PQ $_{litro}$	7795,1
Obs.:	SEM FUMAÇA, RÁPIDA FORMAÇÃO DA FRENTE DE CHAMA					$M_{100\%}$	2,3
						$V_{100\%}$	2,6

Tabela 5-4 Valores obtidos nos ensaios para o biodiesel de óleo de soja novo

BIODIESEL DE ÓLEO DE SOJA RECICLADO							
	ENS AIO 1	ENS AIO 2	ENS AIO 3	ENS AIO 4	ENS AIO 5	$M_{m\acute{e}dia}$	4,2
$M_{H_2O}$	1000	1000	1000	1000	1000	$V_{m\acute{e}dio}$	4,9
$T_{amb}$	19	18	18	18	18	Tempo $_{m\acute{e}dio}$	00:36:09
$T_i$	21	19	19	19	20	PQ $_{experimental}$	8838,0
$T_f$	41	39	39	39	40	$Q_{requerido}$	20
$M_i$	107	102	97	93	90	$Q_{gerado}$	37,1
$M_f$	102	97	93	90	86	$\epsilon$	53,9 %
Tempo	00:40:25	00:34:15	00:35:13	00:35:46	00:35:06	PQ $_{litro}$	7583
Obs.:	SEM FUMAÇA, RÁPIDA FORMAÇÃO DA FRENTE DE CHAMA					$M_{100\%}$	2,3
						$V_{100\%}$	2,6

Tabela 5-5 Valores obtidos nos ensaios para o biodiesel de óleo de soja reciclado

DIESEL B2							
	ENS AIO 1	ENS AIO 2	ENS AIO 3	ENS AIO 4	ENS AIO 5	$M_{m\acute{e}dia}$	5,8
$M_{H_2O}$	1000	1000	1000	1000	1000	$V_{m\acute{e}dio}$	6,8
$T_{amb}$	19	19	19	19	19	Tempo $_{m\acute{e}dio}$	00:37:07
$T_i$	19	19	20	20	20	PQ $_{tabelado}$	10761
$T_f$	39	39	40	40	40	$Q_{requerido}$	20



M <sub>i</sub>	94	88	103	97	91	Q <sub>gerado</sub>	62,4
M <sub>f</sub>	88	83	97	91	85	ε	32%
Tempo	00:40 :13	00:37 :51	00:34 :35	00:36 :42	00:36 :12	PQ <sub>litro</sub>	9125, 3
Obs.:	MUITA FUMAÇA, FORMAÇÃO DE CAMADA DE FULIGEM, FRENTE DE CHAMA NÃO SE FORMA POR COMPLETO					M <sub>100%</sub>	1,9
						V <sub>100%</sub>	2,2

Tabela 5-6 Valores obtidos nos ensaios para o diesel B2

GASOLINA 77%							
	ENS AIO 1	ENS AIO 2	ENS AIO 3	ENS AIO 4	ENS AIO 5	M <sub>média</sub>	6,4
M <sub>H2O</sub>	1000	1000	1000	1000	1000	V <sub>médio</sub>	8,5
T <sub>amb</sub>	21	21	23	22	20	Tempo <sub>médio</sub>	00:30 :29
T <sub>i</sub>	21	21	22	21	20	PQ <sub>tabelado</sub>	9557
T <sub>f</sub>	41	41	42	41	40	Q <sub>requerido</sub>	20
M <sub>i</sub>	93	87	100	93	80	Q <sub>gerado</sub>	61,2
M <sub>f</sub>	87	81	93	87	73	ε	33%
Tempo	00:26 :34	00:25 :15	00:33 :09	00:30 :46	00:36 :40	PQ <sub>litro</sub>	7186, 9
Obs.:	MUITA FUMAÇA, FORMAÇÃO DE CAMADA DE FULIGEM, FRENTE DE CHAMA NÃO SE FORMA POR COMPLETO					M <sub>100%</sub>	2,1
						V <sub>100%</sub>	2,8

Tabela 5-7 Valores obtidos nos ensaios para a gasolina 77%

### 1.8.3 ANÁLISE DOS DADOS OBTIDOS

Os testes foram feitos simulando um sistema de combustão externa, assim como ocorre no ciclo de Stirling. Nos testes utilizando gasolina e diesel, foi observada elevada emissão de fumaça e formação de uma camada de fuligem no fundo da panela.

Podemos fazer uma analogia entre o fundo da panela e o trocador de calor de um motor Stirling. Para se obter maior eficiência do motor Stirling é necessário que o material a ser utilizado no trocador de calor tenha elevada condutibilidade térmica e mínima espessura. Caso seja adicionada uma camada extra de material, seja de alta ou baixa condutibilidade, haverá uma redução de eficiência como podemos comprovar pelas equações:

$$qx = \frac{T_1 - T_n}{\Sigma R} \quad (12)$$

Uma vez que:  $R = \frac{L}{k \times A} \quad (13);$

L é a espessura da parede;

k é o coeficiente de condutibilidade térmica;

A é a área perpendicular ao fluxo de calor;

T<sub>1</sub> é a temperatura da parede que primeiro faz contato com o fluxo de calor;

T<sub>n</sub> é a temperatura da enésima parede por onde passa o fluxo de calor.

Sendo assim, a camada de fuligem criada pela gasolina e pelo diesel diminui a eficiência do sistema. Podemos comprovar isso pelo gráfico 5-1 a seguir:

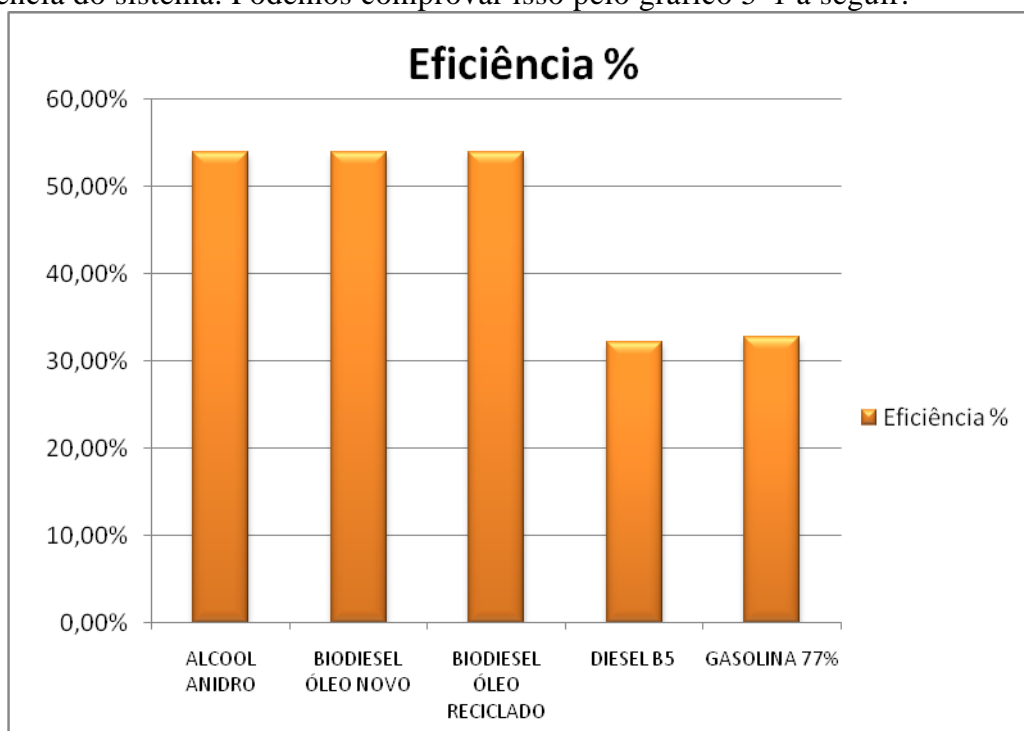


Gráfico 5-1 Eficiência

Nesse gráfico foram utilizados os valores tabelados para o calor específico do álcool anidro, diesel B2 e gasolina 77%.

Tendo medido a média de combustível gasto é possível calcular o poder calorífico dos mesmos e assim calcular sua eficiência.

Podemos analisar que os combustíveis que geram emissão de fumaça e criam uma camada de fuligem na panela tem, como esperado, uma redução na eficiência, podendo alcançar o valor aproximado de 33%.

Já para o álcool anidro, como não gera fumaça e fuligem, obtém uma eficiência muito superior, de aproximadamente 54%. Como os combustíveis, biodiesel de óleo de soja novo e biodiesel de óleo de soja reciclado não geram fumaça nem fuligem, foi adotada uma eficiência igual à do álcool anidro. Com essa eficiência podemos calcular um valor aproximado para o que seria 100% de eficiência.

Os gráficos 5-2 e 5-3 a seguir nos mostram uma comparação dos valores de poder calorífico, massa e volume dos combustíveis testados.

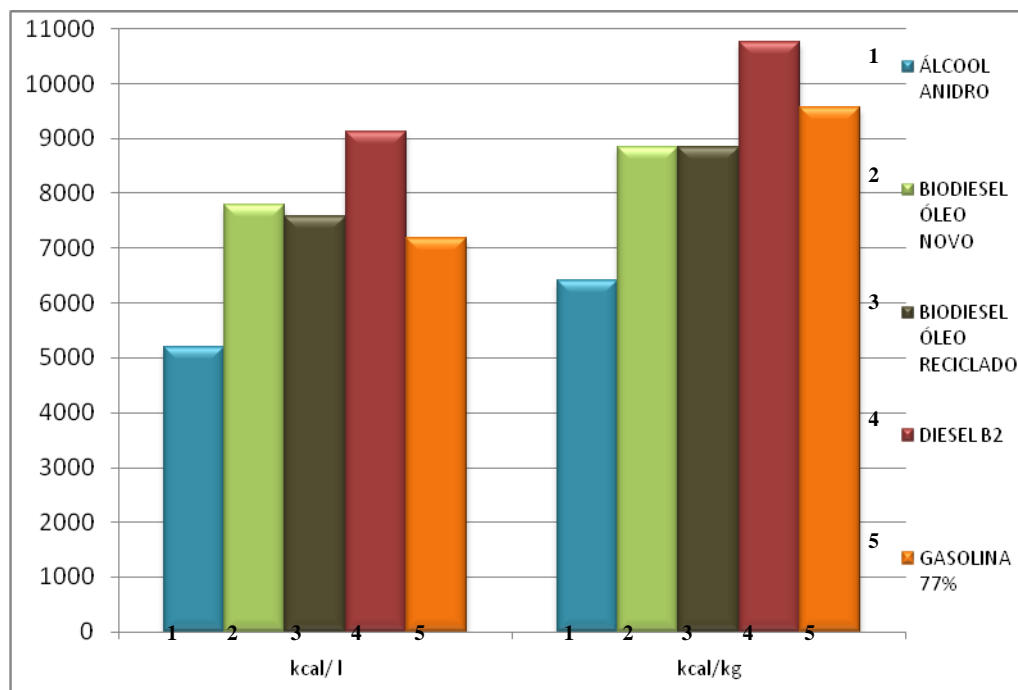


Gráfico 5-2 Poder calorífico

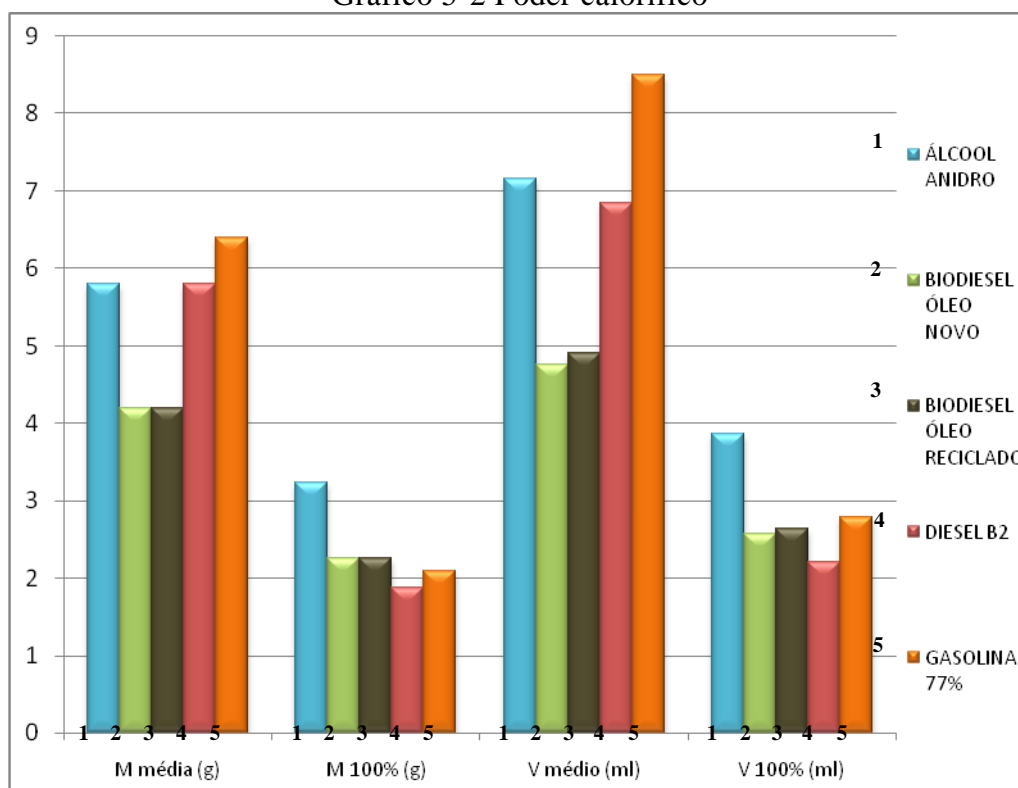


Gráfico 5-3 Massa e volume médios e 100%

Analisando os dados dos gráficos podemos chegar a algumas conclusões:

1. Na teoria a gasolina tem maior poder calorífico em kcal/kg do que os outros combustíveis testados. Porém, como a gasolina testada foi retirada de posto de combustível onde ela é misturada com álcool anidro (77% de gasolina), observamos que o diesel B2 (diesel de posto de combustível com 2% de Biodiesel) possui maior poder calorífico que o da gasolina. Os valores do biodiesel de óleo de soja novo e reciclado são

iguais e um pouco inferiores aos da Gasolina 77%. O Álcool anidro é o que apresenta menor poder calorífico.

2. Como pagamos por volume de combustível e não por massa do mesmo, podemos observar que novamente o diesel tem maior poder calorífico por volume de combustível. Observamos também que a diferença entre o diesel e a gasolina aumenta. Isso se deve ao fato de o diesel possuir maior massa específica que a gasolina e assim, para o mesmo volume de diesel e gasolina, temos uma maior massa de diesel do que de gasolina. Podemos ver claramente a diferença de massas específicas no gráfico 5-4 seguinte:

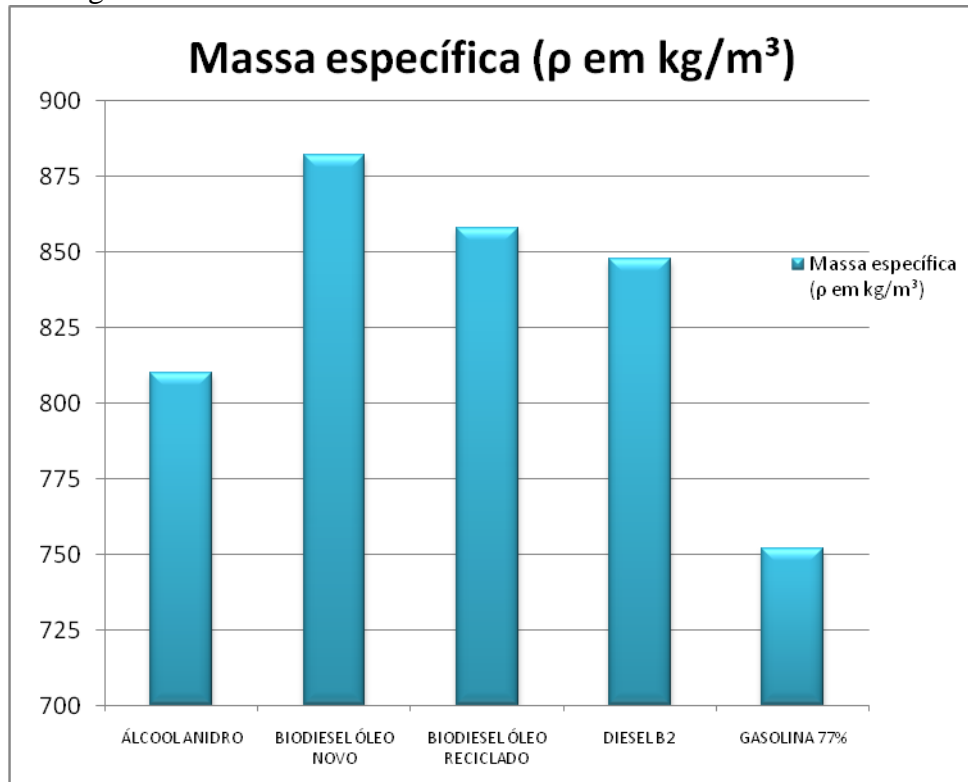


Gráfico 5-4 Massa específica

3. Devido à redução da eficiência dos combustíveis que geram fumaça e fuligem, podemos verificar que o biodiesel de óleo de soja novo e reciclado, que usariam mais massa e volume de combustível nos testes, acabam por utilizar menor quantidade de massa e volume.
4. A diferença entre os gastos de volume e massa aumentam, novamente utilizando o gráfico 5-3 podemos constatar que para uma mesma massa de biodiesel de óleo de soja novo ou reciclado temos um maior volume do que os outros combustíveis.
5. Em todos os testes os valores do álcool anidro são muito inferiores aos dos outros combustíveis.

## CONCLUSÃO

É possível concluir que, para os motores Stirling, o combustível mais indicado para uso é o biodiesel de óleo de soja reciclado visto que:

1. Possui aproximadamente as mesmas características do biodiesel de óleo de soja novo, sendo que por usar como matéria prima o óleo reciclado que seria descartado (muitas vezes de forma incorreta na natureza) possui menor custo.

2. Ajuda a retirar da natureza o óleo que seria descartado, diminuindo os custos de tratamento de água e reduzindo a poluição dos rios e oceanos.
3. Por não emitir fumaça e fuligem não necessita de constantes manutenções no trocador de calor de um motor Stirling, diferente da gasolina e do diesel que por gerar muita fumaça e fuligem necessitariam constantemente de paradas para manutenção dos trocadores de calor, elevando o custo de manutenção e diminuindo a vida útil do motor.
4. Combustível de fonte renovável diferente da gasolina e do diesel que são derivados do petróleo.
5. Possui poder calorífico por volume de combustível superior aos da gasolina 77% e do álcool anidro, se aproximando ao valor do diesel B2.
6. No ciclo Stirling, para gerar a mesma quantidade de energia, consumirá um volume muito inferior aos outros combustíveis.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Para a concretização deste trabalho, diversas fontes foram consultadas. Para o estudo inicial dos motores de ciclo Stirling e aprofundamento em diversas teorias de funcionamento, o trabalho do Prof. Israel Urielle (ver capítulo 7 item 2) foi de suma importância, visto que é um trabalho riquíssimo quanto a essas informações e de uma excelente didática. Outra bibliografia consultada foi a de G. Walker, *Stirling engines* de 1978 (ver capítulo 7 item 7), apesar dos vários desenvolvimentos realizados desde a publicação deste livro, o conceito fundamental se mantém o mesmo, além de possuir todo o procedimento para um projeto inicial de motores Stirling.

Para a obtenção do biodiesel utilizou-se as informações contidas no *website* Journey to Forever (ver capítulo 7 item 4) e as equações aqui empregadas da cadeira de Transferência de Calor e Massa foram retiradas do livro Fundamentos de Transferência de Calor e Massa, de Incropera e DeWitt, da editora LTC (ver capítulo 7 item 1).

## BIBLIOGRAFIA

1. Incropera, Frank P. Incropera; David P. DeWitt. Fundamentos de Transferência de Calor e Massa, 5ª Edição, Rio de Janeiro, editora LTC, 2003.
2. Urieli, Israel. Stirling Cycle Engines, 1 de Março de 2009, disponível em: <http://www.ent.ohiou.edu/~urieli/stirling/stirling.html>
3. SABESP, Óleo de fritura para reciclagem, 18 de Março de 2009, disponível em:  
<http://www.sabesp.com.br/CalandraWeb/CalandraRedirect/?temp=4&proj=AgenciaNoticias&pub=T&db=&docid=D1204EAF9A0BC3308325757D006B0A38>
4. A journey to forever, Biodiesel, 18 de Fevereiro de 2009. Disponível em: <http://journeytoforever.org/biodiesel.html>
5. Wikipedia, Motor Stirling, 18 de Fevereiro de 2009. Disponível em: [http://pt.wikipedia.org/wiki/Motor\\_Stirling](http://pt.wikipedia.org/wiki/Motor_Stirling)

6. EM 722 Geração, Distribuição e Utilização de Vapor, Profº Waldir A. Bizzo, 18 de Março de 2009, disponível em:  
<http://www.fem.unicamp.br/~em672/GERVAP2.pdf>
7. Walker, Graham; Stirling engines, Oxford University Press, New York, 1978.
8. Moraes da Silveira, Gastão; Máquinas para a Pecuária, 1ª Edição, Editora Nobel, 1997.
9. Cardoso, Jaciene J.F., Costa, Adilton A., Almeida, Márcio A.P. Melo, Caio K., Cardias, Henrique T.C.; Caracterização do biodiesel metílico produzido a partir de óleo babaçu e suas misturas com o diesel de petróleo, Departamento de Tecnologia Química – Universidade do Maranhão.