

2

Revisão bibliográfica

Miranda e Moura (2000) apresentaram o resultado de um experimento feito cujo objetivo era analisar o comportamento de um motor Diesel após ter o óleo vegetal de dendê *in natura* como combustível. O enfoque foi o desenvolvimento de pesquisas para viabilizar o uso do óleo vegetal nos motores do ciclo Diesel.

Foram usados três diferentes motores para os testes, sendo o primeiro um motor veicular de uma Kombi, o segundo um grupo gerador MWM D225-4 e por fim um grupo gerador *Multi Fuel* 4RTA-G da AMS. Os grupos geradores MWM não necessitaram de nenhum ajuste para a operação com o óleo vegetal. Em relação ao motor veicular, por sua complexidade, foi necessária a utilização de um óleo de dendê um pouco mais fino, denominado de oleína. A oleína é obtida por fracionamento natural do óleo de palma refinado. O fracionamento natural consiste em operações de resfriamento e filtração sem uso de aditivos químicos

O artigo mostra também a comparação entre o óleo diesel e o óleo de dendê. Existe uma semelhança de valores entre o poder calorífico superior do óleo diesel e do óleo de dendê, (10715 kcal/kg – óleo de dendê e 10840 kcal/kg - óleo Diesel) e o índice de cetano (aproximadamente 40 para o óleo de dendê e aproximadamente 45 para o óleo diesel). Este mesmo artigo apresenta que o óleo de dendê possui cerca de 11 vezes menos enxofre, principal causador da chuva ácida, que o óleo diesel. Outra característica importante do óleo de dendê em relação ao diesel é o seu ponto de fulgor, temperatura na qual os vapores de combustível podem ser inflamados quando expostos a uma chama. Quanto maior o ponto de fulgor mais seguro é o combustível. O ponto de fulgor do dendê é extremamente superior que o do Diesel, sendo assim mais seguro de se trabalhar e de se estocar.

De acordo com o estudo realizado, o óleo de Dendê é um excelente substituto para o óleo Diesel, basta que se aumente a pressão nos bicos injetores para diminuir o acúmulo de resíduos de carbono na descarga do motor.

Dos três motores utilizados, o de melhor desempenho foi o grupo-gerador MWM. O grupo-gerador AMS não apresentou um desempenho adequado com a utilização do

óleo bruto de dendê. Conforme já informado, o motor da Kombi, por sua complexidade, utilizou um óleo mais fino chamado de oleína, por isso não se pode comparar com outros testes.

Torres (2000) apresentou os resultados dos testes com um motor com cargas variadas usando o óleo de dendê filtrado, também conhecido como óleo de palma, como combustível para os motores Diesel.

Este teste foi realizado com um motor de ciclo Diesel da marca Agrale modelo M-80 e um dinamômetro de marca Shenck, com controle eletrônico.

O motor possui refrigeração a ar, 4 tempos 7CV e injeção indireta - sistema de injeção que introduz o combustível sob forma de jato pulverizado no coletor de admissão, ou na câmara auxiliar (no caso dos motores diesel).

Foi adotada uma rotação constante e variação da carga de 50% até 100% com o monitoramento dos parâmetros listados abaixo:

- Rotação do motor;
- Torque;
- Consumo de combustível;
- Temperatura dos gases de escape;
- Temperatura do cabeçote;
- Potência;
- Temperatura do ar de refrigeração;
- Nível e coloração do óleo lubrificante;
- Gases de escape e vibração.

Com a utilização do óleo vegetal a máxima potência atingida pelo motor, em plena carga, foi de 6,74 CV. Isso corresponde a uma queda de aproximadamente 4 % da máxima potência atingida, com a mesma carga, com o motor utilizando óleo diesel.

Na Tabela 1 são apresentados alguns valores dos parâmetros medidos em função da carga:

Tabela 1 Parâmetros em função da carga

	Carga de 50%	Carga de 75%	Carga de 100%
Potência	entre 2 e 3,53 CV	entre 3,14 e 5,14 CV	Entre 4,19 e 6,74 CV
Consumo específico	entre 0,271 e 0,303 kg/CVh	entre 0,247 e 0,259 kg/CVh	entre 0,235 e 0,272 kg/CVh
Temperatura do cabeçote	entre 104 e 109 °C	entre 118 e 126 °C	entre 112 e 136 °C
Temperatura dos gases de escape	entre 191 e 250°C	entre 236 e 318°C	entre 318 e 411°C

Pode-se notar que a potência máxima atingida está entre 5 e 15% abaixo da potência dada pelo fabricante, porém este fato pode estar relacionado com a idade do motor, uma vez que não foi utilizado um motor novo e sim um motor usado. Esta diferença de potência pode ser desprezada se o motor for utilizado em comunidades rurais isoladas devido ao fato de que, para a obtenção de óleo diesel para essas localidades, é necessário utilizar o próprio diesel como combustível para o transporte do produto, tornando-o economicamente desfavorável para a utilização na geração.

Cavaliero e da Silva (2000) mostraram uma metodologia para se estimar qual seria a área necessária para o plantio e cultivo de uma planta oleaginosa para a produção de óleo vegetal como combustível para geração de energia elétrica. Mostraram também o potencial da utilização desses óleos para a geração de eletricidade em áreas isoladas.

Uma das vantagens da utilização do óleo vegetal como combustível nos grupos geradores nos locais isolados é a captura do CO₂ pela planta oleaginosa para o processo de fotossíntese, o que diminui o balanço global da emissão deste gás na atmosfera.

O estudo foi feito levando-se em consideração o uso do óleo de Buriti, planta nativa da região amazônica ocidental e da qual é possível se obter um total de 5.000 quilos de óleo vegetal/ha/ano. Existem outras plantas das quais se podem extrair mais ou

menos óleo, como, por exemplo, a soja da qual é possível se extrair 400 quilos de óleo vegetal/ha/ano ou o dendê cuja extração pode ser de 6.000 quilos de óleo vegetal por hectares por ano.

Para se determinar a área para a extração do óleo de Buriti, que foi o substituto do óleo diesel como combustível dos geradores de energia elétrica, foi utilizada a seguinte equação:

$$\text{Área} = \frac{S_b \cdot C_{diesel} \cdot \rho_{diesel} \cdot PCI_{diesel}}{\theta_{buriti} \cdot PCI_{buriti}} \quad (1)$$

onde:

S_b = taxa de substituição do óleo diesel por óleo de buriti;

C_{diesel} = consumo de óleo diesel (L);

ρ_{diesel} = massa específica de óleo diesel (0,851 kg/L);

PCI_{diesel} = poder calorífico inferior do óleo diesel (10.180 kcal/kg);

θ_{buriti} = rendimento de extração de óleo de buriti por área (5.000 kg/ha);

PCI_{buriti} = poder calorífico inferior do óleo de buriti (8.780 kcal/kg).

Para se calcular a área necessária, através da equação (1), para o plantio do Buriti, é preciso saber qual foi o consumo de óleo diesel durante o ano da operação para a geração da energia. Como exemplo da utilização da equação, o consumo de diesel anual para a geração de energia elétrica durante o ano inteiro foi cerca de 42.336 litros, com isso, a área para o plantio de Buriti, depois de substituídos os valores, é de :

$$A = 27,8 S_b \quad [\text{ha}] \quad (2)$$

Para se utilizar este método é necessária a extração de óleo de forma produtiva, isto quer dizer que se necessita do plantio organizado da oleaginosa em questão. Se for preciso fazer a substituição total do óleo diesel por óleo vegetal, será necessária uma área com 28 hectares de plantas nativas e 8,5 hectares com árvores plantadas, o que

corresponde a 30% das plantas nativas. Esse valor representa 0,02% da área total da região onde foi realizado o teste.

Em seu estudo, **Soares e Vieira (2000)** avaliaram o funcionamento de um grupo gerador diesel convencional utilizando o óleo combustível de dendê *in natura*.

Os testes foram realizados com um grupo gerador de 60kW de potência nominal com um motor MWM D229-6 1800 rpm e injeção direta (sistema de injeção onde o combustível é diretamente injetado sobre a cabeça do pistão mediante um bico injetor com um ou vários pequenos furos).

No grupo gerador foi utilizado o óleo de palma (dendê) como combustível, porém, antes e após o uso do dendê, o grupo gerador era operado com óleo diesel para limpeza dos bicos injetores e cabeçote e amaciamento do motor.

O motor foi testado durante 400 horas sendo que nas primeiras 50 horas e nas últimas 50 horas rodou-se com óleo diesel para uma limpeza do motor, isto foi feito para retirar possíveis resíduos depositados pelo óleo vegetal.

Foram monitorados alguns parâmetros do motor, dentre os quais:

- Temperatura do combustível;
- Temperatura do óleo lubrificante;
- Temperatura da água de refrigeração;
- Temperatura dos gases de escape;
- Consumo de combustível;
- Potência fornecida.

Como o dendê possui uma viscosidade muito mais elevada que a do óleo diesel, foi necessário o pré-aquecimento do mesmo para a diminuição desta viscosidade. Primeiramente aqueceu-se o dendê até uma temperatura de 55°C. Nesta temperatura ocorreu uma carbonização acentuada nas pontas dos bicos injetores, porém sem qualquer obstrução dos orifícios de injeção e sem prejuízo no seu funcionamento. Quando o dendê foi aquecido a 100°C, o consumo específico ficou menor, porém ocorreu um problema de vedação nos bicos injetores. Isto ocorreu porque parte da resina adesiva contida no combustível foi dissolvida, sendo carregada para os bicos

injetores. Foi constatado que a temperatura ótima para a operação com óleo de dendê é de 80°C, pois a esta temperatura o consumo específico ficou bem próximo ao consumo específico do diesel e não houve problema nos bicos injetores.

Uma das principais características do uso de óleo vegetal para a geração de energia foi a perda de potência do motor em cerca de 10%.

O uso do óleo de dendê causa a contaminação do óleo lubrificante. Esta desvantagem pode ser suprida simplesmente trocando-se o óleo num intervalo de tempo inferior. Intervalo esse reduzido de 200 horas para 100 horas. Sendo assim, o custo de manutenção aumenta, porém utilizando-se um óleo lubrificante mais viscoso ou de especificação mais nobre este custo volta a cair.

O custo de operação utilizando o óleo vegetal é viável caso o custo do óleo for 25% menor que o custo do diesel e com a utilização do gerador com uma potência relativamente alta, algo em torno de 100 kW ou se o gerador for utilizado em localidades distantes, aonde o transporte do diesel se torna um empecilho para a utilização deste combustível.

Coelho et al (2004) tratam da utilização do óleo vegetal em regiões isoladas, que não possuem eletrificação, visando a sustentabilidade econômica e melhoria social de uma comunidade isolada no Pará, onde existe apenas um gerador para o fornecimento de energia elétrica para 700 moradores.

A vantagem da utilização do óleo vegetal nesta região se dá, primeiramente, pela dificuldade de acesso à comunidade. As embarcações que acessam a comunidade utilizam óleo diesel como combustível, com isso há aumento nas despesas do combustível, resultando em gasto adicional do diesel. Outra vantagem é a facilidade de exploração do dendê na região.

Para os testes foi desenvolvido um *kit* para a utilização do óleo vegetal, Figura 1, cujo funcionamento é de fácil compreensão. Inicialmente aquece-se o óleo de dendê a uma temperatura de 60°C para que possa ser aspirado pela bomba. Em seguida, após ser filtrado, o óleo entra no tanque de pré-aquecimento onde terá a sua temperatura elevada, através do uso da água de refrigeração do motor, para 75°C, aproximadamente. Após passar pela válvula de três vias o óleo vegetal ficará no

reservatório da mistura de onde será inserido no motor. É nesse reservatório que o óleo terá a sua temperatura elevada até o ponto final de operação, em torno de 90°C, o que facilita sua combustão, já que nesta temperatura, o óleo bruto tem sua viscosidade reduzida para as condições de utilização.

Estes testes mostraram que as emissões com o óleo vegetal foram bem semelhantes às emissões do óleo diesel. Alguns gases tiveram suas emissões reduzidas em relação ao diesel, como é o caso do óxido de nitrogênio. Um aspecto fundamental com relação às emissões com o óleo vegetal é a ausência de óxidos de enxofre na combustão do óleo de dendê.

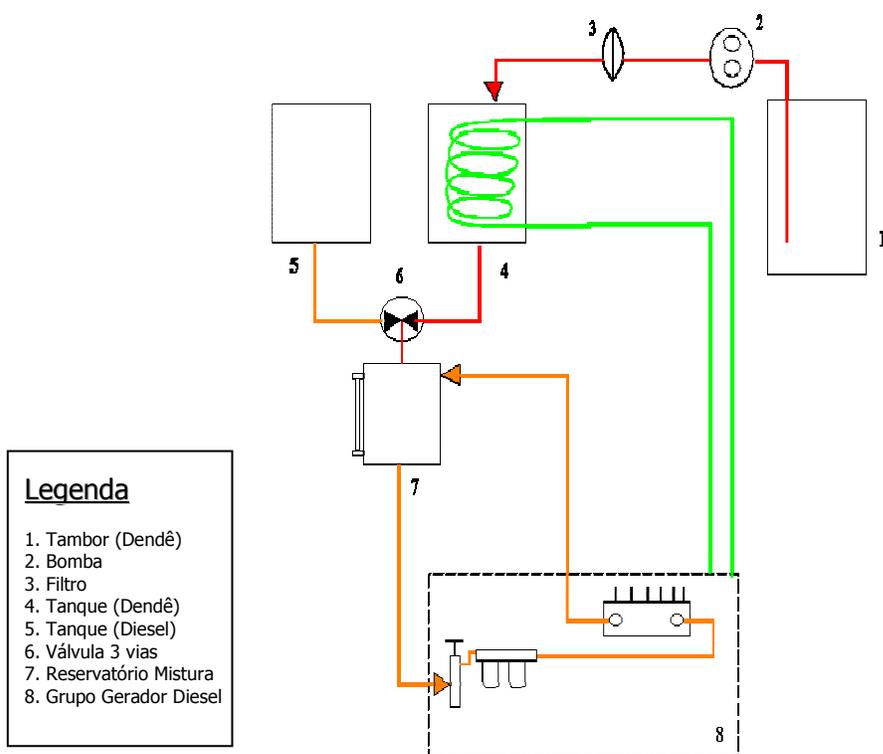


Figura 1 Esquema do kit para conversão do motor diesel para óleo vegetal

Para o abastecimento do motor durante 6 horas diárias, são necessários 10 litros de diesel e 55 litros de dendê, o que representa 50 kg de óleo, totalizando algo em torno de 18.000 kg de óleo de dendê no ano. A área necessária para esse cultivo é de aproximadamente 4,5 ha para o abastecimento do motor, o que representa uma parte muito pequena dos 1.000 ha que são cultivados na comunidade.

Pimentel (2002) objetivou a análise teórica e prática do desempenho, emissões e problemas operacionais de motores diesel estacionários operando com óleo vegetal *in natura* como combustível e comparando com os resultados apresentados com o motor operando com óleo diesel.

O experimento foi realizado durante 350 horas e foram observados os depósitos provenientes da combustão, do débito de combustível, os efeitos do avanço da injeção e temperatura do ar de admissão sobre as emissões e sobre o desempenho do motor, bem como as emissões dos gases poluentes.

As emissões de CO, CO₂ e HC foram menores com a utilização do dendê ao invés do diesel. Em relação ao CO, os valores passaram de 0,12% com diesel para 0,04% com o óleo de dendê. O dióxido de carbono teve uma variação de 10,7% aproximadamente com diesel para 10,0% com dendê. Para os hidrocarbonetos, a diminuição dos valores foi significativa. Caiu de um pouco mais de 150 ppm para quase zero. Todos esses valores são para o débito de combustível de 16 ml/min.

Os níveis de CO com o motor utilizando o dendê como combustível foram praticamente constantes em função dos débitos de combustível.

Com relação às taxas de compressão, o estudo mostrou um decréscimo de emissão de CO e HC com o aumento da taxa de compressão, com a utilização do óleo de dendê como combustível, caindo, por exemplo, de 0,04% para 0,03% de monóxido de carbono e aproximadamente 120 ppm de hidrocarbonetos para 50 ppm com o motor rodando com dendê. Esses valores são para uma variação da taxa de compressão de 11,91:1 para 12,39:1. Por outro lado, o aumento da taxa de compressão fez com que aumentasse a emissão de CO₂ de 8,6% aproximadamente para 9,0%. Houve um aumento da potência em relação ao aumento da taxa de compressão no motor com a utilização de diesel e dendê.

O aumento da temperatura do ar de admissão refletiu no aumento do consumo específico dos combustíveis. Os níveis de emissão de CO com o motor utilizando o óleo de dendê como combustível não tiveram alterações com o aumento da temperatura do ar de admissão, mantendo-se estável. Com a utilização do diesel, a potência caiu com o aumento da temperatura do ar de admissão.

O próximo parâmetro analisado foi o avanço da injeção. Com o aumento do avanço a potência com os dois óleos também aumentou, porém o consumo específico diminuiu. Os níveis de CO com o motor utilizando o dendê também não sofreram nenhuma alteração com o aumento do avanço da ignição, mas os níveis com óleo diesel diminuíram.

Este trabalho mostrou também a necessidade de um aquecimento do óleo de dendê a uma temperatura de 85°C para que a viscosidade do mesmo seja próxima à do diesel. Com este aquecimento foi verificada a diminuição da formação de depósitos em relação ao uso do dendê à temperatura ambiente.

Em relação a emissões de CO, os motores utilizando óleo vegetal tiveram emissões parecidas com as do diesel quando as cargas eram de 75 e 100%. Uma vez utilizadas cargas menores, 25 e 50%, a emissão de CO com o óleo vegetal ficou abaixo do óleo diesel.

As emissões de NO_x apresentaram um maior valor quando o motor operava com diesel em relação ao motor operando com dendê. Os hidrocarbonetos não queimados (HC) também apresentaram uma queda com o motor operando com dendê e com o aumento da carga.

Rakopoulos et al (2006) mostraram o desempenho e as emissões de poluentes para diferentes misturas de óleo vegetal com o diesel e também biodiesel de várias origens. As misturas foram feitas na proporção de 10/90 ou 20/80, isso quer dizer 10% de óleo ou biodiesel para 90% de diesel ou 20% de óleo ou biodiesel para 80% de diesel.

Foram utilizados no estudo os biodiseis de girassol, dendê, algodão, canola e soja. Os óleos vegetais que foram misturados ao diesel são aqueles derivados do algodão, soja, girassol, milho e semente de azeitona.

No teste realizado os parâmetros medidos foram o consumo específico de combustível, as emissões de poluentes, tais como o NO_x, CO e HC. Esses valores foram medidos e comparados com os valores do diesel.

O estudo comparou os parâmetros para duas cargas definidas, uma de 38% da carga total e a outra de 75% da carga.

O estudo mostrou que tanto para a média carga (38%) quanto para a alta carga (75%) a densidade de fumaça de todos os biodieséis foram menores que a do diesel. Em compensação, os índices obtidos com os óleos vegetais misturados ao diesel foram maiores que o do diesel puro.

Em relação às emissões de NO_x, tanto para a carga média como para a carga alta, nenhum dos biodieséis e óleos vegetais tiveram seus índices maiores que o diesel puro. Nas emissões de monóxido de carbono, por sua vez, verificou-se que os valores com os óleos vegetais misturados ao diesel foram maiores que o diesel puro em ambas as cargas, ao contrário do biodiesel, que teve seus valores menores que o do diesel puro. Nos hidrocarbonetos não queimados (HC), os valores dos biodieséis e dos óleos vegetais com a carga de 38% foram maiores que o biodiesel puro. Na carga de 75% somente os biodieséis de algodão e canola, com uma mistura de 20% tiveram um valor de emissão em ppm menor que o óleo diesel puro.

Puggzhadivu et all (2005) utilizaram óleo de girassol reaproveitado da cozinha como combustível do motor diesel. A experiência utilizou o óleo de girassol aquecido a temperaturas de 75°C e 100°C e também à temperatura ambiente de 30°C. O experimento mostrou que a viscosidade do óleo de girassol se aproxima da do óleo diesel à uma temperatura de 135°C e, com essa temperatura, obteve os resultados mais próximos ao diesel.

Neste estudo foram comparados as emissões do NO_x, CO e fumaça com os óleos de girassol aquecidos ou não, com o óleo diesel.

Em relação ao NO_x, o experimento mostrou que as emissões do motor utilizando o óleo diesel foram maiores que as emissões do motor usando o óleo de girassol, mesmo sem estar aquecido.

Em compensação, as emissões de monóxido de carbono do motor utilizando o óleo de girassol foram maiores que as emissões com o óleo diesel.

A emissão de fumaça foi ligeiramente superior com o óleo de girassol como combustível em comparação ao óleo diesel. Um dos possíveis motivos deste fato foi a pobre volatilidade do óleo de girassol, ocasionando uma combustão incompleta com esse combustível.

De acordo com este estudo, é possível a reutilização do óleo de girassol excedente da cozinha na utilização de combustível para o motor diesel.

O trabalho de **Ramadhas et al (2004)** mostrou os vários experimentos realizados nos últimos anos utilizando óleos vegetais como combustíveis para os motores diesel. Um dos experimentos de maior destaque neste trabalho foi realizado por Altin et al, 2001 e mostra diversos tipos de óleo vegetal como combustível para os motores.

O trabalho de **Ramadhas et al (2004)** também enumera as diversas vantagens da utilização do óleo vegetal, como combustível em motores, na Índia. Entre essas vantagens podem-se mencionar:

- Produção doméstica do óleo vegetal ajudando na redução do custo da importação do petróleo;
- Desenvolvimento da indústria de biodiesel fortalecendo a economia agrícola e rural;
- É biodegradável e atóxico;
- Pode ser utilizado sem modificação no motor.

O trabalho mostra também os desafios para a utilização dos óleos vegetais. Entre eles estão:

- O preço do óleo vegetal depende do preço do insumo;
- Compatibilidade com materiais dos motores;
- Dificuldade em se trabalhar em climas frios.

Este trabalho concluiu que vários países realizaram muitas experiências com óleo vegetal como substituto do óleo diesel e os resultados mostraram que a eficiência térmica é comparável entre os dois óleos, excluindo-se uma pequena perda de potência quando se utiliza o óleo vegetal. As emissões são bem parecidas com uma redução do óxido de nitrogênio.

Em seu trabalho, **Altin et al. (2001)** descrevem comparações entre diversos tipos de óleo originados das oleaginosas com o óleo diesel na utilização dos mesmos como combustíveis para um motor a diesel.

Foram utilizados diferentes óleos e em alguns casos os óleos em questão tiveram um rendimento térmico muito próximo do óleo diesel e em outro, o rendimento ficou melhor que o próprio diesel. Dentre esses podemos destacar o óleo de colza, com o qual o motor teve sua potência reduzida em somente 3% em comparação à potência com óleo diesel.

Em relação à emissão de gases na atmosfera, os óleos derivados das oleaginosas ficaram com os menores índices em relação ao diesel. Dos nove óleos testados, 100% obtiveram uma menor emissão de NO₂ do que o óleo diesel, isto com uma rotação de 1.300 rpm e um torque constante de 35 Nm. Em relação ao dióxido de carbono, metade dos óleos utilizados na experiência teve emissões menores que a do diesel. No que diz respeito ao desempenho do motor, houve uma pequena queda de rendimento com a utilização dos diversos óleos em comparação ao óleo diesel, onde a maior diferença ficou na ordem de 20%. Em comparação aos outros gases e poluentes, 100% dos óleos utilizados teve maiores valores nas emissões de monóxido de carbono e também nos valores de opacidade em comparação ao óleo diesel.

O consumo específico do óleo diesel é menor que os outros óleos. Isto ocorre devido ao poder calorífico do diesel, que é o maior entre todos os óleos. Porém, o óleo derivado do milho teve seu consumo específico muito próximo do óleo diesel por volta de 250g/kWh em comparação aos 245g/kWh do óleo diesel. Ficou caracterizado também o problema surgido pela alta viscosidade dos óleos devido às condições na utilização destes óleos. Este trabalho descreve também o custo elevado dos óleos vegetais em relação ao diesel, porém em comunidades isoladas, onde existe uma dificuldade de obtenção do diesel, os valores ficam equiparados devido ao fato de o diesel ser usado como combustível de transporte.

Kalam et al.(2004) apresenta em seu trabalho os depósitos característicos e analisa as emissões de um pequeno motor diesel utilizando óleo de dendê in natura e também óleo de dendê com um acréscimo de água em sua composição. O trabalho revelou que

a utilização do óleo de dendê pré aquecido faz com que as emissões de CO, HC e material particulado seja menor em comparação a utilização do diesel como combustível. Em contrapartida há uma aumento nas emissões de NOx e também um maior depósito de cinza na utilização do óleo de dendê pré aquecido comparado com o óleo diesel.

Esta dissertação de mestrado tem como principal contribuição científica a utilização de um motor de pequeno porte, de fácil manutenção, que poderá ser utilizado em pequenas comunidades onde inexistente energia elétrica para a geração de eletricidade. Com esse motor os testes de desempenho mostraram que o óleo diesel pode perfeitamente ser substituído pelo óleo de dendê *in natura*, pois não houve nenhuma variação na potência do motor com a utilização do dendê como combustível. Em relação às emissões, além dos gases de escape poluir menos o meio ambiente com a utilização do dendê, a própria plantação de onde será extraído o óleo absorverá uma parcela do gás carbônico emitido pelo motor.