

CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE MISTURAS DE DIESEL, ETANOL E BUTANOL COMO COMBUSTÍVEIS PARA MOTORES DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO

Roberto Guimarães Pereira

Departamento de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense – UFF, Rua Passo da Pátria 156, Niterói, RJ, CEP 24210-240
temrobe@vm.uff.br

Ithamar Ribeiro Rangel

Instituto Militar de Engenharia – IME, Departamento de Engenharia Mecânica e Materiais - DE/4, Praça Gen. Tibúrcio, 80, Praia Vermelha - Urca - cep: 22290-160, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Jorge Luiz de Oliveira

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense – UFF, Rua Passo da Pátria 156, Niterói, RJ, CEP 24210-240

Resumo. A baixa solubilidade do etanol no óleo diesel motivou o estudo de novas blends usando butanol como co-solvente. Neste trabalho, parâmetros reológicos e físico-químicos, tais como: viscosidade, densidade, ponto de névoa foram investigados e comparados para determinar se estão dentro dos limites recomendados. As novas blends foram testadas em motores de ignição por compressão. Resultados em banco dinamométrico foram obtidos.

Palavra chave: energia; misturas de combustíveis; caracterização; aplicações

1. Introdução

O mundo inteiro vive hoje um grande desafio, que é continuar seu desenvolvimento e atender as necessidades do homem, sem, contudo, degradar de forma irracional o ambiente. Tal desafio pode ter a solução resumida por duas palavras: *desenvolvimento sustentável*.

Nesse trabalho tem-se por objetivo principal a avaliação físico-química de misturas álcool-diesel com diferentes percentuais, que possam, ainda que parcialmente, substituir o óleo diesel sem, no entanto, comprometer a durabilidade e a eficiência dos motores de ignição por compressão ou motores diesel como são popularmente chamados.

A mistura etanol-diesel apresenta pouca estabilidade com a variação de temperatura e umidade ambiente. Esse fato exige a utilização de uma terceira substância (co-solvente) que permita misturas estáveis com maiores percentuais de substituição. Dentre as alternativas disponíveis optou-se pela utilização do butanol como co-solvente.

Em outros trabalhos, os autores mostraram o desempenho de diversas misturas álcool-diesel em motores de ignição por compressão (Rangel e Pereira 2002a,b,c).

Neste trabalho ênfase maior é dada a caracterização mais detalhada das misturas álcool-diesel.

A análise consiste em comparar as propriedades padrões das misturas com as propriedades do diesel puro e determinar se estas estão dentro dos limites das recomendados.

2. Experimental

Adota-se no presente trabalho a seguinte nomenclatura:

- D – óleo diesel.
- AD10 – mistura álcool-diesel, sendo 90% de diesel, 7% de etanol anidro e 3% de butanol normal.
- AD15 – mistura de álcool-diesel, sendo 85% de diesel, 10% de etanol anidro e 5% de butanol normal.

Os diferentes ensaios físico-químicos foram realizados nos Laboratórios de Termociências - LATERMO e de Reologia - LARE, da Universidade Federal Fluminense - UFF, de acordo com as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e da American Society of Testing Materials (ASTM). Detalhes encontram-se em Oliveira (2003).

Os combustíveis utilizados no presente trabalho têm as seguintes origens:

- a) Óleo diesel e etanol hidratado - posto comercial varejista do Estado do Rio de Janeiro;
- b) Etanol anidro – refinaria de Manguinhos, e
- c) Butanol normal – Laboratório Merck / Lote 607100

Foram, ainda, realizados testes de desempenho em banco dinamométrico de indução marca Schenck, modelo D630, com capacidade de absorção até 630 kw a 5500 rpm, utilizando o motor MBB OM355/6A, cujas especificações encontram-se na Tab. 1.

Os ensaios foram realizados segundo a orientação da norma ABNT 5484.

O início de cada bateria de ensaios sempre foi precedido da estabilização da temperatura do óleo lubrificante e da temperatura da água de arrefecimento.

Para a avaliação dos resultados tomou-se como padrão de referência o desempenho do motor com o seu combustível original, óleo diesel, para a solicitação de plena carga e de 40% de carga.

Tabela 1. Especificações do motor utilizado

Marca	Mercedes-Benz
Modelo	OM355/6A
Número de série	E-253-MBB
Número de cilindros	06
Curso	150mm
Diâmetro do cilindro	129,52mm (Reparo III)
Cilindrada Total	11857 cm ³
Taxa de Compressão	15:1
Aplicação	Veicular
Câmara de Combustão	Injeção Direta
Regular de Velocidade	RQ-250/1100 PA419R
Bomba Injetora	Bosch, 44 80 300

3. Resultados e Discussão

A seguir apresentam-se os resultados dos testes de caracterização físico-química e de desempenho dos combustíveis.

3.1. Aspecto, cor e enxofre

O aspecto é uma indicação visual da qualidade e de possível contaminação do produto. Os combustíveis devem apresentar-se límpidos e isentos de materiais em suspensão, que quando presentes podem reduzir a vida útil dos filtros dos motores.

A cor é uma característica do combustível. Alterações na mesma podem ser um indicativo de: problemas no processo produtivo, contaminação ou degradação.

O teor de enxofre de um óleo combustível depende da sua origem e do processo de produção. É limitado por atuar em processos de corrosão e causar emissões poluentes.

Os resultados obtidos após ensaios das características de aparência (aspecto e cor) e percentual de enxofre do óleo diesel e misturas encontram-se na Tab. 2.

Tabela 2. Características de aparência e percentual de enxofre

Código da Amostra	Aspecto	Cor	Enxofre	Data
	Método: Visual	Método: ASTM D 1500	Método: ASTM D 4294 (%m/m)	
D	LII ¹	1,5	0,169	22/09/03
AD10	LII ¹	1,5	0,154	22/09/03
AD15	LII ¹	L1,5 ²	0,141	22/09/03

¹ LII - límpido e isento de impurezas.

² A letra “L” a frente do número significa que a cor do produto analisado encontra-se entre dois valores, sendo menor que a cor padrão apresentada e maior que a cor padrão imediatamente anterior.

Quanto ao aspecto, na Tab. 2, observa-se que todos os produtos avaliados encontram-se de acordo com os limites de especificação da ANP, ou seja, por ocasião do ensaio apresentaram-se límpidos e isentos de impurezas. Sendo o aspecto uma indicação visual de possível contaminação e da qualidade pode-se dizer que os produtos avaliados não apresentam materiais em suspensão, que quando presentes podem reduzir a vida útil dos filtros dos motores.

A característica de cor, com ensaio realizado de acordo com as normas NBR 14483, da ABNT e ASTM D 1500, satisfaz os limites para todas as amostras.

Alterações na cor podem ser um indicativo de problemas no processo produtivo; contaminação ou degradação do diesel, fatos que podem ocorrer quando o diesel é estocado por longos períodos ou quando exposto a temperaturas acima da ambiente.

No que se refere ao enxofre total, avaliado de acordo com a norma ASTM D 4294, observa-se que todos as amostras avaliadas estão abaixo do limite máximo da ANP que é de 0,2%. Vale destacar que, como se vê na Tab. 2, esse valor se reduz com o aumento do percentual de etanol.

3.2. Massa específica

Deve-se ficar atento a essa propriedade visto que valores abaixo da massa específica adequada reduzem o desempenho dos motores, devido à formação de uma pobre mistura ar-combustível. Este fato leva a uma perda de potência do motor e conseqüentemente a um aumento do consumo de combustível. No caso de valores acima da massa específica adequada, ocorre um enriquecimento da mistura ar/combustível, aumentando a emissão de poluentes, tais como: hidrocarbonetos, monóxido de carbono e material particulado.

A massa específica, determinada em 27 de julho de 2003, de acordo com as normas NBR 14065 da ABNT e ASTM D 4052/02 apresentou os resultados listados na Tab. 3.

Tabela 3 – Massa específica a 15°C e 20°C

Amostra	Massa específica (g/cm ³)	
	a 20°C	a 15°C
D	0,8490	0,8523
AD10	0,8442	0,8475
AD15	0,8400	0,8433

Pela Tabela 3, observa-se que os valores de massa específica verificados para as amostras analisadas se encontram dentro da faixa de especificação da ANP, que vai de 0,820 a 0,865 (g/cm³). Portanto, com relação a essa propriedade as misturas de etanol-diesel podem ser utilizadas sob forma de misturas em motor de combustão interna por compressão.

3.3. Ponto de névoa

Ponto de névoa corresponde à temperatura em que a parafina ou outras substâncias começam a se cristalizar ou separar da solução quando o óleo é resfriado sob condições específicas de ensaio. O ensaio para determinação dessa propriedade foi realizado de acordo com a norma ASTM D 2500/02 e apresentou os resultados mostrados na Tab. 4.

Tabela 4 – Ponto de névoa

Amostra	Ponto de névoa (°C)	Data
D	-2,0	26/09/03
AD10	0,0	26/09/03
AD15	9,0	26/09/03

Pelos resultados observados na Tab. 4, verifica-se que o aumento do percentual de etanol, resultando em uma mistura de menor massa específica, eleva o ponto de névoa, dessa forma exigindo cuidados na utilização de misturas principalmente em locais de baixa temperatura.

3. 4. Ponto de fluidez

Ponto de fluidez corresponde a menor temperatura na qual o óleo ainda tem capacidade de escoamento, quando após aquecimento preliminar, se necessário, a amostra é resfriada numa taxa específica e examinada a intervalos de 3°C quanto às características de escoamento, de acordo a norma NBR 11349 da ABNT e ASTM D 97.

Na Tabela 5 têm-se os resultados dos ensaios realizados.

Tabela 5 – Ponto de fluidez

Amostra	Ponto de fluidez (°C)	Data
D	-15,0	30/09/03
AD10	-18,0	30/09/03
AD15	-27,0	30/09/03

Tal como o ponto de névoa, o ponto de fluidez é de grande importância quando o combustível é utilizado em locais de baixa temperatura, uma vez que podem provocar dificuldade de partida a frio ou até chegar a entupir filtros. Esse problema pode ser solucionado por meio de aditivos utilizados para melhorar essa propriedade.

Nota-se que o aumento do percentual de etanol, resultando em uma mistura de menor massa específica, concorre para a diminuição do ponto de fluidez.

3.5. Viscosidade

A viscosidade de um fluido é a medida da sua resistência ao escoamento a uma determinada temperatura. É uma das características de maior importância de um óleo combustível, que determinará as condições de manuseio e utilização do produto.

Os ensaios foram realizados a 40°C, seguindo-se a norma ASTM D445, e os resultados encontram-se na Tab. 6.

Tabela 6 – Viscosidade cinemática

Amostra	Viscosidade (mm ² /s) a 40°C	Data
D	3,267	26/09/03
AD10	2,848	26/09/03
AD15	2,578	26/09/03

O aumento do percentual de etanol, resultando em uma mistura de menor massa específica, acarretou uma diminuição na viscosidade. No entanto, pela Tab. 6, vê-se que as misturas etanol anidro-diesel apresentaram valores dentro da faixa de especificação da ANP, que vai de 2,5 mm²/s a 5,5 mm²/s.

3.6. Destilação

Destilação é um processo de evaporação e re-condensação por meio do qual os líquidos são separados em várias frações de acordo com seus pontos de ebulição ou variações de ebulição.

No presente estudo foi realizada a destilação para cada um dos produtos de acordo com as normas NBR-9619 da ABNT e ASTM D 86, cujos resultados encontram-se na Tab. 7 a 9. .

Tabela 7 – Destilação do Diesel (D) - Método ASTM D 86/02

	Temperatura (°C)
PIE ¹	178,0
5%	201,5
10%	209,5
15%	217,5
20%	225,0
30%	240,0
40%	254,0
50%	270,0
60%	285,0
70%	303,0
80%	325,0
85%	338,0
90%	355,0
95%	368,0
PFE ¹	368,0
Recuperado %	96,0
Resíduo %	3,4
Perda %	0,6

Volume de amostra: 100 mL	Proveta 100 mL
Temperatura ambiente: 22,0 °C	Termômetro: 7C
Pressão barométrica: 764,5 mmHg	Data: 19/09/2003

Obs: 1 - PIE e PFE correspondem, respectivamente, a ponto inicial e ponto final de ebulição

Tabela 8 – Destilação do Etanol anidro-Diesel (AD10) - Método ASTM D 86/02

	Temperatura (°C)
PIE ¹	81
5%	104,0
10%	137,0
15%	202,5
20%	213,0
30%	230,0
40%	248,0
50%	264,0
60%	280,0
70%	297,5
80%	320,0
85%	330,5
90%	349,0
95%	370,0
PFE ¹	370,0
Recuperado %	96,0
Resíduo %	3,3
Perda %	0,7

$$AD10 = (90\% D + 7\% EA + 3\% B)$$

Obs.: D – diesel; EA –etanol anidro; B – butanol normal

Volume de amostra: 100 mL	Proveta 100 mL
Temperatura ambiente: 22,0 °C	Termômetro: 7C
Pressão barométrica: 764,5 mmHg	Data: 19/09/2003

Obs: 1 - PIE e PFE correspondem, respectivamente, a ponto inicial e ponto final de ebulição.

Tabela 9 – Destilação do Etanol anidro-Diesel (AD15) – Método ASTM D 86/02

	Temperatura (°C)
PIE ¹	80,0
5%	89,0
10%	92,5
15%	104,0
20%	181,0
30%	218,5
40%	237,0
50%	257,5
60%	274,0
70%	293,5
80%	316,0
85%	330,0
90%	347,0
95%	370,0
PFE ¹	370,0
Recuperado %	96,0
Resíduo %	3,6
Perda %	0,4

AD15 = (85% D + 10% EA + 5% B)

Obs.: D – diesel; EA –etanol anidro; B – butanol normal

Volume de amostra: 100 mL	Proveta 100 mL
Temperatura ambiente: 21,5 °C	Termômetro: 8C - 7C
Pressão barométrica: 763,5 mmHg	Data: 19/09/2003

Obs: 1 - PIE e PFE correspondem, respectivamente, a ponto inicial e ponto final de ebulição.

Pode-se observar pelas Tab. 7 a 9 que o acréscimo de etanol anidro faz baixar a temperatura de destilação, ou seja, reduz o ponto de ebulição do diesel. Este fato se verifica tanto na temperatura de destilação de 50% do volume em análise, quanto na temperatura de 85% desse mesmo volume.

No entanto, as temperaturas não são muito menores ou mais baixas que as do combustível original, o que representa, no que diz respeito a essa propriedade, compatibilidade das misturas para utilização em motor de combustão por compressão.

3.7. Índice de cetano

O índice de cetano (IC), mostrado na Tab. 10, é calculado a partir da massa específica e da temperatura de destilação de 50% do produto em análise, por meio da Equação 1.

$$IC = 454,74 - 1641,416D + 774,74D^2 - 0,554B + 97,803(\log B)^2 \quad (1)$$

sendo:

D – massa específica, em g/cm³, a 15 °C;

B – temperatura de destilação de 50% do produto, em °C.

Tabela 10 – Índice de cetano

Amostra	D	B	Índice de Cetano
D	0,8523	270	47,13
AD10	0,8475	264	47,38
AD15	0,8433	257,5	47,26

D – massa específica, em g/cm³, a 15 °C;

B – temperatura de destilação de 50% do produto, em °C.

Os resultados de índice de cetano apresentados na Tab. 10 encontram-se bem próximos da especificação da norma ASTM D 976, na qual essa propriedade tem valor mínimo de 48. Dessa forma, a princípio as misturas podem ser utilizadas, no entanto, deve-se adicionar aditivo para elevar o índice de cetano, visto que baixos valores dessa propriedade provocam dificuldade de partida a frio, depósito nos pistões e mau funcionamento do motor. Já alto índice de cetano facilita a partida a frio do motor, permite mais rápido aquecimento, impede a ocorrência de pós-ignição, reduz a possibilidade de erosão dos pistões, possibilita menor nível de ruído quando em funcionamento e minimiza a emissão de poluentes (hidrocarbonetos, monóxido de carbono e material particulado).

Nota-se que a presença de álcool na mistura não alterou o índice de cetano consideravelmente e que mesmo o diesel puro apresenta valores abaixo de 48.

3.8. Corrosão

O teste para avaliação do potencial de corrosividade das amostras, este normalmente associado à presença de enxofre elementar e gás sulfídrico, foi realizado de acordo a norma NBR 14359, da ABNT e ASTM D130/94 (re-aprovada em 2000) e apresentou os resultados mostrados na Tab. 11.

Depois de retirada da amostra a lâmina foi lavada e teve sua coloração comparada com lâminas padrão de acordo com a norma da ASTM e não apresentou alteração na sua cor original, onde 1a quer dizer que a placa apresentou cor alaranjada clara parecida com a cor que apresentava tão logo foi polida antes do início do ensaio.

Tabela 11 – Corrosividade ao cobre

Amostra	Classificação ASTM
D	1a
AD10	1a
AD15	1a

3.9. Desempenho

Para a avaliação dos resultados obtidos nos testes dinamométrico, utilizando-se no motor MBB OM 355/6A misturas de combustíveis, fixou-se como referência de desempenho uma queda máxima de potência em torno de 5%, e um aumento no consumo específico em torno de 6%. Esses referenciais foram tomados com base em experiência de campo, isto é, uma subtração de potência e um aumento no consumo específico acima desses valores, influenciam acentuadamente na dirigibilidade e economicidade, além disso, essas variações encontram-se dentro das diferenças obtidas em banco dinamométrico, em teste de desempenho de motores de igual classificação, e uma possível explicação para sua ocorrência é através dos processos utilizados na fabricação da referida máquina térmica.

Os percentuais de substituição de óleo diesel, efetuados através da adição de butanol normal e etanol anidro, foram corrigidos e avaliados conforme as Equações 2 a 4.

$$SC = 1 - (CEVDM / CEVD) \quad (2)$$

Sendo:

SC - percentual de substituição corrigido de óleo diesel

CEVDM - consumo específico volumétrico de óleo diesel na mistura

CEVD - consumo específico volumétrico de óleo diesel

$$CEVDM = (DM \times CV) / Neo \quad (3)$$

Sendo:

DM – percentual de diesel na mistura

CV – consumo volumétrico da mistura álcool-diesel

Neo – potência efetiva observada

$$ES = (SC / SV) \times 100 \quad (4)$$

Sendo:

ES – eficiência de substituição de óleo diesel

SC – percentual de substituição corrigido de óleo diesel

SV – substituição volumétrica de óleo diesel

Os resultados médios obtidos encontram-se nas Tabelas 12 e 13.

Tabela 12 – Resultados obtidos nos testes de desempenho em banco dinamométrico do motor MBB OM 355/6A

MISTURAS	SOLICITAÇÃO DE CARGA	RENDIMENTO TÉRMICO (%)	SUBSTITUIÇÃO VOLUMÉTRICA DE ÓLEO DIESEL (%)	SUBSTITUIÇÃO VOLUMÉTRICA DE ÓLEO DIESEL CORRIGIDA (%)
D	PLENA	39,1	-	-
D	40%	35,6	-	-
AD10	PLENA	41,9	10	12,0
AD10	40%	36,0	10	7,3
AD15	PLENA	40,9	15	14,8
AD15	40%	36,0	15	7,9

Tabela 13 – Resultados obtidos nos testes de desempenho em banco dinamométrico do motor MBB OM 355/6 A

MISTURAS	SOLICITAÇÃO DE CARGA	EFICIÊNCIA DE SUBSTITUIÇÃO (%)	VARIAÇÃO DE POTÊNCIA (%)	VARIAÇÃO DE CONSUMO ESPECÍFICO (%)
D	PLENA	-	-	-
D	40%	-	-	-
AD10	PLENA	120	0,5	-3,6
AD10	40%	73	-	1,4
AD15	PLENA	98,7	-4,1	-0,4
AD15	40%	52,7	-	7,5

Na solicitação de carga plena, todas as misturas ficaram dentro dos parâmetros pré-determinados de potência e consumo específico.

De um modo geral, os resultados de desempenho obtidos em banco dinamométrico, na solicitação de carga plena, utilizando o motor Mercedes-Bens MBB OM 355/6A, podem ser considerados excelentes. Todas as misturas apresentaram a plena carga redução no consumo específico e aumento no rendimento térmico. Apenas a mistura AD 15 apresentou uma pequena queda de potência.

Os testes de desempenho do motor em banco dinamométrico apresentaram uma piora nos resultados para solicitação parcial de carga, quando comparados aos resultados obtidos na solicitação de carga plena, resultando em um maior aumento no consumo específico e queda na eficiência de substituição.

4. Conclusões

Por meio dos resultados obtidos pode-se concluir que a mistura etanol-diesel pode ser utilizada em motores de ignição por compressão.

A utilização de mistura etanol-diesel proporciona a redução do volume de diesel utilizado em motores, com reflexos imediatos na economia do país, uma vez que, dependendo do volume de diesel a ser substituído, o país tem a possibilidade de reduzir a importação de petróleo para esse fim.

Tendo apresentado características bem próximas do combustível original (diesel), a utilização de mistura etanol-diesel se mostra promissora..

Dentre as várias alternativas para a substituição parcial do óleo diesel, a utilização de misturas etanol anidro-diesel destaca-se como a de aplicação mais simples, uma vez que existe no país grande disponibilidade de etanol, além de não se fazer necessária qualquer alteração no motor original. Além disto, o aumento de produção do etanol é possível e viável, uma vez que existe uma tradição tecnológica que vem se desenvolvendo desde da época do Brasil Colônia.

Dentre as misturas testadas, a que apresentou o melhor resultado foi a AD10, sugerindo que a continuidade da investigação seja efetuada com esta mistura.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Rio de Janeiro (FAPERJ), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à CAPES pelo apoio financeiro prestado.

6. Referências

- Oliveira, J.L., 2003, Caracterização Físico-Química de Misturas de Combustíveis, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense
- Rangel, I. R. e Pereira, R. G., 2002a, Análise da Variação dos Parâmetros de Desempenho de um Motor de Ignição por Compressão Utilizando Misturas Álcool-Diesel., IV Encontro de Energia no Meio Rural – AGRENER.
- Rangel, I. R. e Pereira, R. G., 2002b, Aplicação de Misturas de Óleo Diesel/Etanol Anidro/Butanol em Motores de Ignição por Compressão, II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, CONEM.
- Rangel, I. R. e Pereira, R. G., 2002c, Caracterização Reológica e Físico-Química de Misturas de Combustíveis e Análise de Desempenho em Motores, IX Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas, ENCIT.

PHYSICAL-CHEMISTRY CHARACTERIZATION OF MIXTURES OF DIESEL, ETHANOL AND BUTANOL AS FUELS FOR COMPRESSION IGNITION MOTORS

Roberto Guimarães Pereira

Departamento de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense – UFF, Rua Passo da Pátria 156, Niterói, RJ, CEP 24210-240
temrobe@vm.uff.br

Ithamar Ribeiro Rangel

Instituto Militar de Engenharia – IME, Departamento de Engenharia Mecânica e Materiais - DE/4, Praça Gen. Tibúrcio, 80, Praia Vermelha - Urca - cep: 22290-160, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Jorge Luiz de Oliveira

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense – UFF, Rua Passo da Pátria 156, Niterói, RJ, CEP 24210-240

Abstract

The low solubility of ethanol in the diesel oil has motivated the study of new blends using butanol like co-solvent. In this work, rheological and physical-chemistry parameters, such as viscosity and density were investigated and compared to determine if they are inside of the recommended limits. The new blends were tested in compression ignition engines. Results were obtained in dynamometer bench.

Keywords: energy; fuel blends; characterization; application