

CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FEI

EDSON RODRIGUES DA SILVA

**Estudo Experimental de Propriedades Termofísicas de
Blendas de Diesel / Biodiesel a Diferentes Temperaturas**

São Bernardo do Campo

2013

EDSON RODRIGUES DA SILVA

**Estudo Experimental de Propriedades Termofísicas de
Blendas de Diesel / Biodiesel a Diferentes Temperaturas**

Dissertação apresentada ao Centro Universitário da
FEI como parte dos requisitos necessários para
obtenção do título de Mestre em Engenharia
Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Belchior Tôrres

São Bernardo do Campo

2013

Silva, Edson Rodrigues da

**Estudo experimental de propriedades termofísicas de
blendas de diesel/biodiesel em diferentes temperaturas / Edson
Rodrigues da Silva. São Bernardo do Campo, 2013.**

59 f. : il.

**Dissertação - Centro Universitário da FEI.
Orientador: Prof. Ricardo Belchior Tôrres.**

**1. Diesel. 2. Biodiesel. 3. Propriedades termofísicas. I. Tôrres,
Ricardo Belchior, orient. II. Título.**

CDU 621.43



Centro Universitário da **FEI**

APRESENTAÇÃO DE DISSERTAÇÃO ATA DA BANCA JULGADORA

PGM-10

Programa de Mestrado de Engenharia Mecânica

Aluno: Edson Rodrigues da Silva

Matrícula: 210122-8

Título do Trabalho: Estudo experimental de propriedades termofísicas de blendas de diesel / biodiesel a diferentes temperaturas.

Área de Concentração: Sistemas da Mobilidade

ORIGINAL ASSINADA

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Belchior Torres

Data da realização da defesa: 26/08/2013

A Banca Julgadora abaixo-assinada atribuiu ao aluno o seguinte:

APROVADO

REPROVADO

São Bernardo do Campo, 26 de Agosto de 2013.

MEMBROS DA BANCA JULGADORA

Prof. Dr. Ricardo Belchior Torres

Ass.: _____

Prof. Dr. Cyro Albuquerque Neto

Ass.: _____

Prof. Dr. Maurício Silva Ferreira

Ass.: _____

VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO

**ENDOSSO DO ORIENTADOR APÓS A INCLUSÃO DAS
RECOMENDAÇÕES DA BANCA EXAMINADORA**

Aprovação do Coordenador do Programa de Pós-graduação

Prof. Dr. Agenor de Toledo Fleury

RESUMO

A qualidade dos combustíveis é um dos principais fatores que afeta o desempenho dos motores de combustão interna. Ela é definida em termos de uma faixa de valores que certas propriedades, tais como densidade, viscosidade, velocidade do som e calor de combustão, podem apresentar. Como uma continuação de um estudo experimental e de otimização de processos envolvendo biocombustíveis, no presente trabalho, valores de densidade, viscosidade cinemática, velocidade do som e calor de combustão de misturas de diferentes tipos de diesel (S10, S500 e S1800) e biodiesel foram determinados, como função da composição, a diferentes temperaturas. As misturas foram preparadas em uma base volumétrica variando de B0 (indicando 0% de biodiesel e 100% de diesel) a B100 (biodiesel puro). A principal motivação deste estudo consiste no fato dessas propriedades afetarem significativamente o processo de atomização, que é o estágio inicial de combustão em um motor a diesel. Foi possível concluir que a densidade, a viscosidade e a velocidade do som aumentam com o aumento da concentração do biodiesel na mistura enquanto que o calor de combustão diminui quando a concentração de biodiesel aumenta. Os resultados experimentais mostraram que o calor de combustão do biodiesel é 14,7%, 14,5% e 13,9% menor do que o diesel fóssil, respectivamente, em comparação com o diesel S10, S500 e S1800. A adição de biodiesel no diesel resultou em uma redução linear do calor de combustão das blends. Os dados da densidade, viscosidade cinemática, velocidade do som e do calor de combustão foram correlacionados usando equações polinomiais empíricas e os resultados apresentaram concordância entre os valores estimados e os resultados experimentais.

Palavras-chave: Biodiesel. Diesel. Propriedades termofísicas.

ABSTRACT

Fuel quality is a major factor that affects the performance of internal combustion engines. It is defined in terms of a range of values that certain properties, such as density, viscosity, speed of sound and heat of combustion can provide. As a continuation of an experimental study and optimization of processes involving biofuels, in this work, values of density, kinematic viscosity, speed of sound and heat of combustion of mixtures of different types of diesel (S10, S500 and S1800) and biodiesel were determined as a function of the composition at different temperatures. The mixtures were prepared on a volume basis ranging from B0 (indicating 0% and 100% biodiesel with diesel engines) to B100 (biodiesel). The main motivation of this study is the fact that these properties significantly affect the atomization process, which is the initial stage of combustion in a diesel engine. It was concluded that the density, viscosity and speed of sound increases with increasing concentration in the biodiesel blend while the heat of combustion decreases when the concentration of biodiesel increases. The experimental results showed that the heat of combustion of biodiesel is 14.7% 14.5% and 13.9% lower than fossil diesel, respectively, compared to diesel S10, S500 and S1800. The addition of biodiesel in diesel resulted in a linear decrease of the heat of combustion of the blends. The data density, kinematic viscosity, speed of sound and heat of combustion were correlated using polynomial equations and empirical results showed agreement between the estimated and experimental results.

Keywords: Biodiesel. Diesel. Thermophysical properties.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Relevância do tema	10
1.2 Objetivo	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 O Mercado do óleo diesel	12
2.2 Diesel no Brasil	14
2.3 Biodiesel.....	17
2.3.1 Biocombustível no Brasil	18
2.4 Propriedades termofísicas de sistemas contendo misturas de combustíveis.....	22
3 METODOLOGIA E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	32
3.1 Materiais utilizados	32
3.2 Descrição dos equipamentos utilizados	33
3.2.1 Equipamento para determinação da densidade e velocidade do som.....	33
3.2.2 Equipamento para determinação da viscosidade	34
3.2.3 Equipamento para determinação do calor de combustão.	35
3.3 Procedimento experimental	37
3.3.1 Procedimento experimental para determinação da densidade e velocidade do som	37
3.3.2 Procedimento experimental para determinação da viscosidade	37
3.3.3 Procedimento experimental para determinação do calor de combustão.....	38
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1 Resultados experimentais	39
4.2 Discussão dos resultados experimentais	52
5 CONCLUSÕES.....	54
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	55
REFERÊNCIAS	56

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Preços médios no mercado <i>spot</i> dos petróleos dos tipos “ <i>Brent</i> ” e WTI – 2002-2011.	12
Tabela 2 - Produção mundial de petróleo no período de 2002 a 2011, segundo blocos econômicos.	13
Tabela 3 - Consumo mundial de petróleo no período de 2002 a 2011, segundo blocos econômicos.	14
Tabela 4 – Composição volumétrica das amostras de diesel/biodiesel.	32
Tabela 5 - Valores da densidade para o sistema biodiesel + diesel S10 a diferentes composições e temperaturas.	39
Tabela 6 - Valores da densidade para o sistema biodiesel + diesel S500 a diferentes composições e temperaturas.	40
Tabela 7 - Valores da densidade para o sistema biodiesel + diesel S1800 a diferentes composições e temperaturas.	40
Tabela 8 - Valores da viscosidade cinemática para o sistema biodiesel + diesel S10 a diferentes composições e temperaturas.	41
Tabela 9 - Valores da viscosidade cinemática para o sistema biodiesel + diesel S500 a diferentes composições e temperaturas.	41
Tabela 10 - Valores da viscosidade cinemática para o sistema biodiesel + diesel S1800 a diferentes composições e temperaturas.	42
Tabela 11 - Valores da velocidade do som para o sistema biodiesel + diesel S10 a diferentes composições e temperaturas.	42
Tabela 12 - Valores da velocidade do som para o sistema biodiesel + diesel S500 a diferentes composições e temperaturas.	43
Tabela 13 - Valores da velocidade do som para o sistema biodiesel + diesel S1800 a diferentes composições e temperaturas.	43
Tabela 14 – Valores do calor de Combustão para os diferentes sistemas estudados a diferentes composições e a 25 °C.	44
Tabela 15 - Parâmetros da Equação 1 para os sistemas biodiesel + diesel a diferentes temperaturas.	46
Tabela 16 - Parâmetros da regressão da viscosidade para o sistema biodiesel + diesel a diferentes temperaturas.	48
Tabela 17 - Parâmetros da regressão linear da velocidade do som para o sistema biodiesel + diesel a diferentes temperaturas.	50
Tabela 18 - Parâmetros da regressão do calor de combustão para o sistema biodiesel + diesel a 25 °C.	51

Tabela 19 - Especificações da densidade para o óleo diesel de uso rodoviário - ANP52

Tabela 20 - Especificações da viscosidade para o óleo diesel de uso rodoviário - ANP53

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Projeção dos Preços do Petróleo Bruto.....	13
Figura 2 - Evolução da composição do diesel no Brasil.	15
Figura 3 - Fases do Proconve.	16
Figura 4 - Importação de Diesel no Brasil em m ³	16
Figura 5 - Evolução da produção de biodiesel - 2005 – 2011.	20
Figura 6 - Estrutura do consumo de derivados (%).	20
Figura 7 - Participação, em volume e dispêndio, dos principais derivados de petróleo importados – 2011.	21
Figura 8 - Matérias-primas utilizadas na produção de biodiesel no Brasil - 2005 – 2011. Volumes em m ³	21
Figura 9 – Analisador de densidade e velocidade do som da Anton Paar (modelo DSA 5000).	34
Figura 10 – Viscosímetro Stabinger da Anton Paar (modelo SVM 3000).	35
Figura 11 - Calorímetro de combustão da marca IKA (modelo C2000).	36
Figura 12 - Vaso de pressão do calorímetro.	36
Figura 13 - Valores da densidade, em função da fração volumétrica de biodiesel, para o sistema biodiesel + diesel S10 a diferentes temperaturas: ◇, 10 °C; □, 20 °C; ○, 30 °C; △, 40 °C; ◆, 50 °C; +, 60 °C. (—) Equação (1). Fonte: Autor.	45
Figura 14 - Valores da densidade, em função da fração volumétrica de biodiesel, para o sistema biodiesel + diesel S500 a diferentes temperaturas: ◇, 10 °C; □, 20 °C; ○, 30 °C; △, 40 °C; ◆, 50 °C; +, 60 °C. (—) Equação (1). Fonte: Autor.	45
Figura 15 - Valores da densidade, em função da fração volumétrica de biodiesel, para o sistema biodiesel + diesel S1800 a diferentes temperaturas: ◇, 10 °C; □, 20 °C; ○, 30 °C; △, 40 °C; ◆, 50 °C; +, 60 °C. (—) Equação (1). Fonte: Autor.	45
Figura 16 - Valores da viscosidade cinemática, em função da fração volumétrica de biodiesel, para o sistema biodiesel + diesel S10 a diferentes temperaturas: ◇, 10 °C; □, 20 °C; ○, 30 °C; △, 40 °C; ◆, 50 °C; +, 60 °C. (—) Equação (2). Fonte: Autor.	47
Figura 17 - Valores da viscosidade cinemática, em função da fração volumétrica de biodiesel, para o sistema biodiesel + diesel S500 a diferentes temperaturas: ◇, 10 °C; □, 20 °C; ○, 30 °C; △, 40 °C; ◆, 50 °C; +, 60 °C. (—) Equação (2). Fonte: Autor.	47
Figura 18 - Valores da viscosidade cinemática, em função da fração volumétrica de biodiesel, para o sistema biodiesel + diesel S1800 a diferentes temperaturas: ◇, 10 °C; □, 20 °C; ○, 30 °C; △, 40 °C; ◆, 50 °C; +, 60 °C. (—) Equação (2). Fonte: Autor.	47

Figura 19 - Valores da velocidade do som, em função da fração volumétrica de biodiesel, para o sistema biodiesel + diesel S10 a diferentes temperaturas: \diamond , 10 °C; \square , 20 °C; \circ , 30 °C; \triangle , 40 °C; \blacklozenge , 50 °C; \blackplus , 60 °C. (—) Equação (3). Fonte: Autor.49

Figura 20 - Valores da velocidade do som, em função da fração volumétrica de biodiesel, para o sistema biodiesel + diesel S500 a diferentes temperaturas: \diamond , 10 °C; \square , 20 °C; \circ , 30 °C; \triangle , 40 °C; \blacklozenge , 50 °C; \blackplus , 60 °C. (—) Equação (3). Fonte: Autor.49

Figura 21 - Valores da velocidade do som, em função da fração volumétrica de biodiesel, para o sistema biodiesel + diesel S1800 a diferentes temperaturas: \diamond , 10 °C; \square , 20 °C; \circ , 30 °C; \triangle , 40 °C; \blacklozenge , 50 °C; \blackplus , 60 °C. (—) Equação (3). Fonte: Autor.49

Figura 22 – Valores do calor de combustão, em função da fração volumétrica de biodiesel, para os sistemas estudados a 25 °C: \diamond , S10; \square , S500; \circ , S1800. (—), Equação 4. Fonte: Autor.....51

1 INTRODUÇÃO

O apelo da sociedade por processos sustentáveis e as normas governamentais relacionadas ao meio ambiente cada vez mais rigorosas têm ocasionado a busca incessante pela redução de emissão de poluentes na atmosfera. Em ordem de importância econômica dos produtos de petróleo no mundo, o diesel é o mais importante de todos eles (PARKASH, 2010). Entretanto, o aumento da demanda mundial por energia, os constantes conflitos no Oriente Médio com consequências na elevação do preço do barril de petróleo e as crescentes preocupações ambientais, têm exigido da comunidade científica mundial esforços na busca de fontes alternativas de energia.

A introdução de combustíveis oriundos de fontes renováveis e menos poluentes, concomitantemente com o avanço tecnológico dos motores de combustão interna, convergem no progresso sócio econômico e ambiental dessa cadeia produtiva.

1.1 Relevância do tema

O combustível é o principal insumo nos motores de combustão interna e há décadas a indústria tem pesquisado o desenvolvimento de fontes alternativas que possam substituir o diesel proveniente de petróleo. Uma fonte promissora que vem sendo testada com sucesso é o biodiesel. Obtido em escala industrial, principalmente através de reações de transesterificação, esse biocombustível pode ser obtido usando como matéria prima gordura animal ou vegetal.

As propriedades termofísicas dos combustíveis têm papel fundamental para o dimensionamento e funcionamento de um motor de combustão interna. Baroutian et al. (2010) citaram que os dados de densidade do combustível são de fundamental importância para modelagem dos processos de combustão. Segundo Alptekin e Canakci (2009), a viscosidade é uma das propriedades mais importantes do combustível porque afeta a qualidade da pulverização, o tamanho das gotículas de combustível e o jato de penetração, influenciando diretamente a eficiência do processo da combustão. Nita, Geacai e Iulian (2011) também afirmaram que algumas das propriedades das misturas de diesel de petróleo com biodiesel, especialmente a densidade e viscosidade, tem um papel importante para a formação de depósitos no motor, sobretudo, em lugares de clima frio. Freitas et al. (2013) descreveram que

a velocidade do som é uma importante propriedade termodinâmica do combustível, e que influencia as características de injeção do combustível e as emissões de NO_x em motores a diesel.

Dzida e Prusakiewicz (2008) mencionaram que a densidade é uma das propriedades mais importantes dos combustíveis porque o sistema de injeção deve fornecer a quantidade de combustível precisamente ajustada para ocorrer uma combustão apropriada. Algumas características como a temperatura e pressão afetam diretamente a densidade. Abolle, Loukou e Henri (2009a) descreveram que, devido ao fato da densidade dos óleos vegetais e animais serem maior do que a do óleo diesel, o volume a ser injetado na câmara de combustão é menor quando esses óleos e biodiesel são utilizados.

Segundo Parente (2003), a viscosidade é uma propriedades fluidodinâmicas de um combustível importante no que diz respeito ao funcionamento dos motores de injeção por compressão (motores diesel), exercendo grande influência na circulação e injeção do combustível.

1.2 Objetivo

Uma vez que as propriedades termofísicas dos combustíveis influenciam diretamente o funcionamento dos motores de combustão interna, o estudo do comportamento dessas grandezas é fundamental para acompanhar as constantes inovações tecnológicas nos veículos e em seus motores.

O objetivo do presente trabalho consistiu em um estudo de propriedades termofísicas de blendas de diesel e biodiesel, em função da composição, da temperatura e do teor de enxofre do diesel. As propriedades estudadas foram a densidade, a viscosidade cinemática, a velocidade do som e o calor de combustão. Foram estudadas blendas com percentual volumétrico variando de B0 (0% de biodiesel e 100% de diesel) a B100 (100% de biodiesel e 0% de diesel) e a faixa de temperatura estudada variou entre 10 °C e 60 °C, com intervalo de 10 °C. Os tipos de diesel utilizados foram o S10 (diesel com 10 ppm, partes por milhão de enxofre), S500 (diesel com 500 ppm de enxofre) e S1800 (diesel com 1800 ppm de enxofre) e o biodiesel estudado foi de origem vegetal, a base de óleo de soja.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O mercado do óleo diesel

Segundo Gazzoni (2013), em 1859 foi descoberto petróleo na Pennsylvania e o seu uso inicial foi principalmente para produção de querosene de iluminação. Durante a exposição mundial de Paris, em 1900, um motor diesel foi apresentado ao público funcionando com óleo de amendoim. Os primeiros motores movidos a óleo diesel eram de injeção indireta. Tais motores eram alimentados com petróleo filtrado, óleos vegetais e até mesmo por óleos de peixe. O combustível especificado como "óleo diesel" somente surgiu com o advento dos motores diesel de injeção direta, sem pré-câmara. A expansão da utilização desses motores se deu na década de 50 devido ao fato de apresentar um maior rendimento, resultando em baixos consumos de combustível.

Em 2011, o óleo do tipo WTI (negociado na Bolsa de Nova York e sua cotação é referência para o mercado norte-americano) foi cotado no mercado a uma média anual de US\$ 95/barril, enquanto o petróleo do tipo “*Brent*” (todo o petróleo extraído no Mar do Norte e comercializado na Bolsa de Londres), a US\$ 111/barril. Em relação a 2010, houve uma alta de 20% e 41%, respectivamente. A tabela 1 mostra a evolução dos preços desde 2002. A figura 1 apresenta uma projeção de aumento no preço do barril do petróleo para os próximos anos.

Tabela 1 - Preços médios no mercado *spot* dos petróleos dos tipos “*Brent*” e WTI – 2002-2011.

Petróleo	Preços médios no mercado <i>spot</i> de petróleo (US\$/barris)										11/10 %
	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	
Brent¹	25	29	38	54	65	73	99	62	79	111	41
WTI	26	31	41	57	66	72	99	62	79	95	20

Fonte: “Platt’s Crude Oil Marketwire”.

¹Os preços médios do petróleo Brent foram calculados a partir dos preços “Brent Dated”.

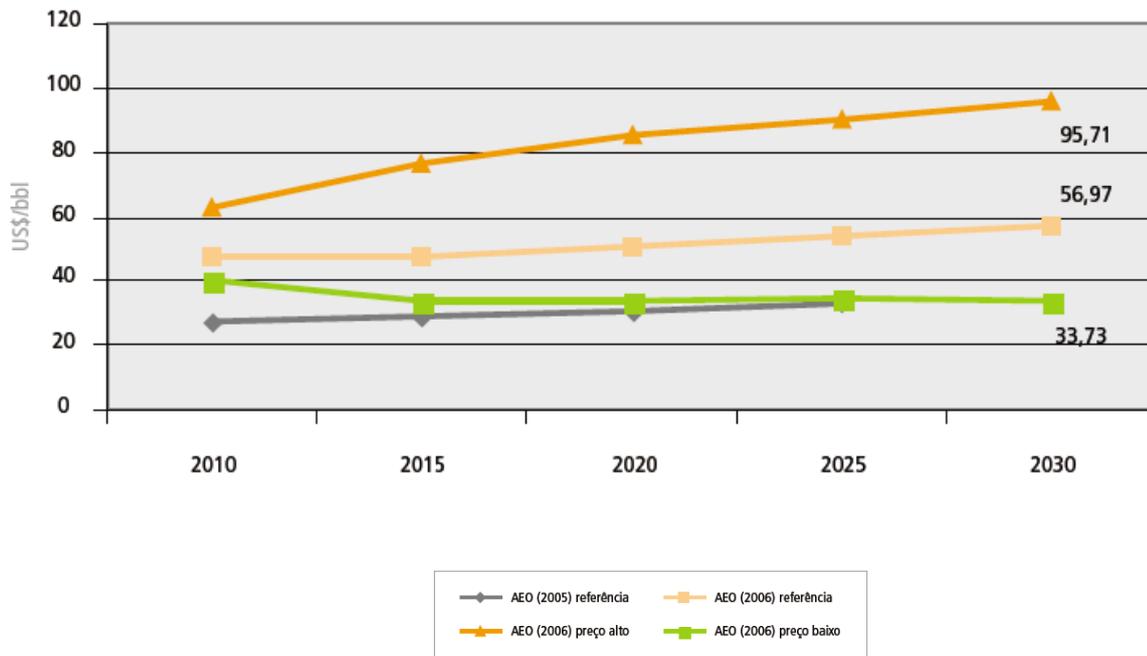


Figura 1 - Projeção dos Preços do Petróleo Bruto.
Fonte: EIA e AEO, 2007, p.87.

As tabelas 2 e 3 mostram, respectivamente, a produção e o consumo mundial de petróleo. É possível observar que entre os anos de 2002 e 2011 houve um aumento de 11,2% no consumo mundial de petróleo enquanto a produção neste mesmo período aumentou em 10,9%.

Tabela 2 - Produção mundial de petróleo no período de 2002 a 2011, segundo blocos econômicos.

Blocos Econômicos	Produção mundial de petróleo (mil barris/dia)									
	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
América do Norte	23.676	24.057	24.945	25.061	24.953	25.070	23.841	22.945	23.491	23.156
Américas Central e do Sul	4.930	4.778	4.966	5.111	5.233	5.582	5.786	5.763	6.079	6.241
Europa e ex-União Soviética	19.571	19.776	19.935	20.095	20.342	19.984	20.002	19.123	19.039	18.924
Oriente Médio	5.467	5.707	6.100	6.365	6.615	6.895	7.270	7.510	7.890	8.076
África	2.560	2.629	2.747	2.864	2.855	3.006	3.150	3.243	3.377	3.336
Ásia-Pacífico	21.983	22.738	24.053	24.429	24.875	25.783	25.720	26.047	27.563	28.301
Total	78.187	79.686	82.746	83.925	84.873	86.321	85.768	84.631	87.439	88.034

Fontes: BP Statistical Review of World Energy 2012; para o Brasil, ANP/SPP.

Nota: Dados retificados pela BP.

Tabela 3 - Consumo mundial de petróleo no período de 2002 a 2011, segundo blocos econômicos.

Blocos Econômicos	Consumo mundial de petróleo (mil barris/doa)									
	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
América do Norte	14.077	14.198	14.143	13.702	13.739	13.631	13.122	13.471	13.880	14.301
Américas Central e do Sul	6.619	6.314	6.590	6.963	6.997	6.982	7.104	7.229	7.293	7.381
Europa e ex-União Soviética	16.247	16.927	17.525	17.476	17.531	17.753	17.537	17.703	17.629	17.314
Oriente Médio	21.710	23.236	24.895	25.392	25.608	25.219	26.320	24.633	25.314	27.690
África	8.028	8.436	9.377	9.954	9.966	10.263	10.284	9.792	10.114	8.804
Ásia-Pacífico	7.811	7.748	7.829	7.904	7.848	7.881	7.969	7.903	8.251	8.086
Total Opep	29.113	30.839	33.641	34.973	35.211	35.067	36.203	33.897	34.753	35.830
Total não Opep	45.380	46.020	46.717	46.418	46.476	46.662	46.132	46.835	47.727	47.745
Total	74.493	76.860	80.358	81.391	81.687	81.729	82.335	80.732	82.480	83.576

Fonte: "BP Statistical Review of World Energy" 2012; para o Brasil, ANP/SPP.

Nota: Dados retificados pela BP.

Duailibe et al (2012) citaram que o consumo mundial de petróleo cresceu cerca de 35% nos últimos 30 anos e deverá continuar em expansão, podendo crescer ainda 24% até 2035.

2.2 Diesel no Brasil

Ao longo dos anos a qualidade do diesel no Brasil tem melhorado com a finalidade de torná-lo menos poluente. Em 1955 o teor de enxofre no diesel era de 10.000 ppm (partes por milhão de enxofre na composição do diesel). Em Janeiro de 2013, passou a ser comercializado no País o diesel S10 (diesel com 10 ppm de enxofre), o que demonstra uma preocupação brasileira em acompanhar as tendências mundiais de redução de emissões e controle de poluição. Na figura 2 é possível observar essa evolução.

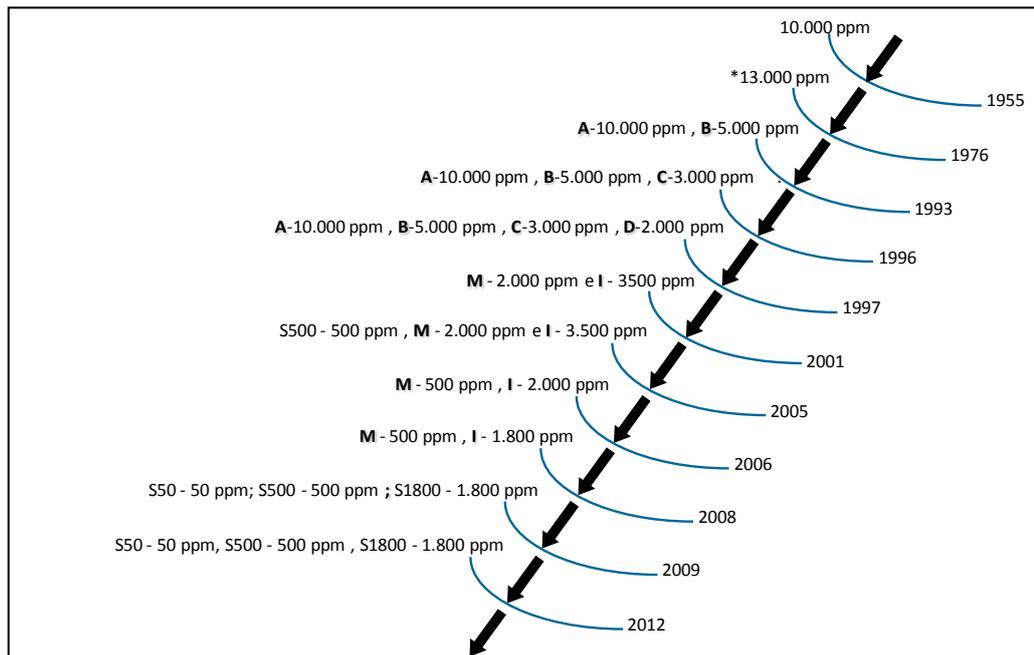


Figura 2 - Evolução da composição do diesel no Brasil.

Fonte: ANP, 2012, p.202.

M: Diesel Metropolitano; A, B, C: classificação de tipos de diesel; I: Diesel Interior.

No início do ano de 2013 entrou em vigor a sétima fase do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (Proconve) que, além de prever a obrigatoriedade do ingresso do S10 na matriz energética nacional, introduziu também a obrigatoriedade da comercialização de veículos com novas tecnologias de motores a diesel, que são o sistema SCR (“*Selective Catalyst Reduction*”) – (Sistema Redutor Catalítico) e o sistema EGR (“*Exhaust Gases Recirculation*”) - (sistema de recirculação de gases). A figura 3 mostra as fases do Proconve e as respectivas evoluções na redução de materiais particulados (MP) e óxido de nitrogênio (NO_x).

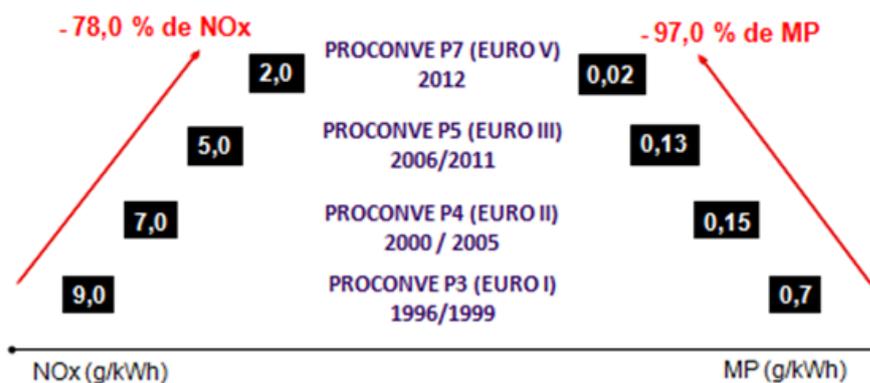


Figura 3 - Fases do Proconve.
 Fonte: ANP, 2012, p.202.

Segundo dados da Biodieselbr, o setor de transportes é o principal consumidor de óleo diesel no país, tendo respondido em 2004, por mais de 77% da demanda total deste combustível. O consumo do diesel no Brasil pode ser dividido em três grandes setores: transportes, representando mais de 75% do total consumido; o agropecuário, representando cerca de 16% do consumo; e o de transformação, que utiliza o produto na geração de energia elétrica e corresponde por cerca de 5% do consumo total de diesel. As importações de óleo diesel nos primeiros dois meses de 2013 superaram 1,78 bilhão de litros. Uma alta de 83% sobre o mesmo período do ano anterior. A figura 4 apresenta os volumes de importação de diesel dos últimos anos.

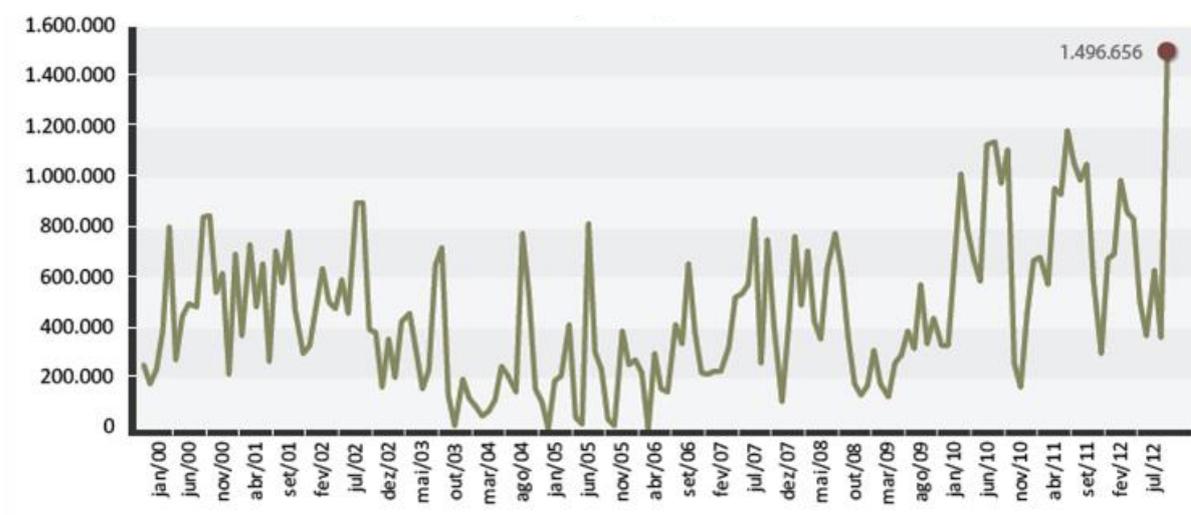


Figura 4 - Importação de Diesel no Brasil em m³.
 Fonte: biodieselbr, 2012.

2.3 Biodiesel

O biodiesel é um combustível alternativo ao diesel, obtido principalmente a partir da reação de transesterificação de óleos, de origem animal ou vegetal, com álcool de cadeia curta (metanol ou etanol) e na presença de um catalisador.

Knothe, Gerpen e Krahl (2005) citaram que a aplicação de óleos vegetais e gorduras animais em motores foram estudadas bem antes da crise energética da década de 1970 e início de 1980. Sabe-se também que Rudolf Diesel (1858-1913), o inventor do motor a diesel, tinha algum interesse nesses combustíveis. Durante uma exposição em Paris no ano de 1900, um pequeno motor a diesel foi operado com óleo de amendoim pela Empresa francesa Otto. Esse motor foi construído para operar com diesel de petróleo, mas foi utilizado óleo vegetal, sem que houvesse a necessidade de qualquer alteração no motor.

Após a primeira crise do petróleo na década de 70, os Estados Unidos da América começaram a estudar aplicação de óleos vegetais como fonte alternativa de energia. Segundo Knothe, Gerpen e Krahl (2006), os testes realizados naquela época concluíram que, devido à alta viscosidade dos óleos vegetais, seria necessário o processo de transesterificação para aplicação em motores diesel durante longos períodos de tempo. Na época, o biodiesel foi figurado apenas como combustível emergencial, e os estudos e investimentos nessa tecnologia foram reduzidos. O interesse no uso do biodiesel ressurgiu no início de 1990 após a Guerra Tempestade no Deserto quando o Congresso Norte Americano começou a estudar alternativas aos combustíveis de petróleo. Com a aprovação da “*Energy Policy Act*” (Ação de Política Energética) de 1992 e a formação do Conselho de Estado da Soja (“*Soydiesel*”), teve início a indústria de biodiesel nos Estados Unidos. Em 1995, esse conselho adotou outras matérias-primas para a produção de biodiesel mudando seu nome para NBB (*National Biodiesel Board*). Ainda segundo os autores, a produção e utilização de biodiesel têm aumentado significativamente em muitos países, devido ao fato dessa fonte de energia renovável poder substituir o diesel de petróleo. Nita, Geacai e Iulian (2011) também comentaram que o biodiesel vem recebendo crescente atenção nos últimos anos pela comprovação científica de que esses combustíveis podem substituir os combustíveis tradicionais a base de petróleo.

Som et al (2010) citaram que motores modernos podem operar com a adição de 5% a 10% de biodiesel, em volume, sem perda de desempenho. Sendo um combustível oxigenado,

esse biocombustível é ambientalmente mais limpo do que o petrodiesel, em relação a emissões de hidrocarbonetos e materiais particulados.

Tat et al. (2000) afirmaram que o biodiesel pode ser utilizado em motores diesel existentes sem modificações adicionais. No entanto, a alteração de propriedades associadas com as diferenças na estrutura química entre biodiesel e petrodiesel pode alterar o tempo de injeção do motor. Essas mudanças de tempo de injeção podem mudar as emissões dos gases de escape e também podem alterar o desempenho dos ajustes otimizados determinados pelo fabricante do motor.

2.3.1 Biocombustível no Brasil

O primeiro programa nacional de incentivo a pesquisa e produção de energia renovável foi o Programa Nacional de Álcool Combustível (Pró-Álcool), criado em 14 de novembro de 1975 pelo decreto n° 76.593.

No final da década de 80, o panorama internacional do petróleo foi transformado e o preço do barril de óleo bruto passou de um patamar de US\$ 30 a 40 para um nível de US\$ 12 a 20, causando impacto direto nos programas de energias renováveis em todo o mundo. No Brasil, os efeitos também foram sentidos e combinaram com um período de insuficiência de recursos públicos aos programas de energias alternativas. Com as vendas de carros movidos a etanol atingindo volumes recordes, em torno de 96% das vendas totais de veículos de ciclo Otto (veículos que consomem gasolina e/ou etanol), a produção de etanol não acompanhou a demanda provocando o declínio do programa. Na segunda metade da década de 2000 os carros “flex” representavam cerca de 80% dos veículos produzidos no País, fazendo com que o etanol ocupasse novamente uma posição relevante na matriz energética nacional. Segundo anuário estatístico do ano de 2012 da ANP, de 2002 a 2011 houve um aumento de 45% na produção de etanol.

A segunda iniciativa brasileira na área de biocombustíveis teve início com o biodiesel. O Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB) foi criado em 2004, por meio da medida provisória n° 214/2004, com o objetivo de promover a produção e uso desse combustível no Brasil. O PNPB, conduzido por uma Comissão Executiva Interministerial,

tem como função elaborar, monitorar, propor os atos normativos que se fizerem necessários à implantação do programa, avaliar e propor outras recomendações e ações, diretrizes e políticas públicas. Sendo o Brasil historicamente deficitário na produção de diesel, o PNPB foi lançado com a finalidade estratégica de suprir esta necessidade. Outro alvo do programa foi a introdução da agricultura familiar nessa cadeia produtiva com o objetivo de promover o desenvolvimento social sustentável com a geração de empregos e de renda para a sociedade regional envolvida no projeto.

Em 13 de janeiro de 2005 foi publicada a Lei 11.097, que dispôs sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira. Esta lei regulamentou que a porcentagem mínima exigida de mistura do biodiesel no diesel ficaria estabelecida em 5% e que colocaria um prazo de oito anos para a aplicação dessa proporção. Esta mesma lei introduziu uma porcentagem intermediária mínima de 2% com um prazo de três para que a mesma entrasse em vigor. Na prática houve uma antecipação do prazo estabelecido em lei, e a combinação obrigatória de 2% entrou em vigor em todo o País em Janeiro de 2008, dentro do prazo previamente estabelecido. Em Julho de 2008, começou o uso de 3% de mistura de biodiesel no diesel. Em Julho de 2009, o País adotou o B4 (diesel com 4% de biodiesel) e em Janeiro de 2010 iniciou-se o uso de B5, antecipando em três anos a meta estabelecida pela Lei nº 11.097.

Segundo dados do Ministério de Minas e Energia (MME), a produção desse biocombustível saltou de 69 milhões de litros em 2006 para 2,4 bilhões de litros em 2010, tornando o Brasil o segundo maior mercado mundial, atrás apenas da Alemanha. Desde o lançamento do PNPB, em dezembro de 2004, até o fim de 2011, o Brasil deixou de importar 7,9 bilhões de litros de diesel, o equivalente a um ganho de cerca de US\$ 5,2 bilhões na balança comercial brasileira. Na figura 5, observa-se a evolução da produção de biodiesel no Brasil.

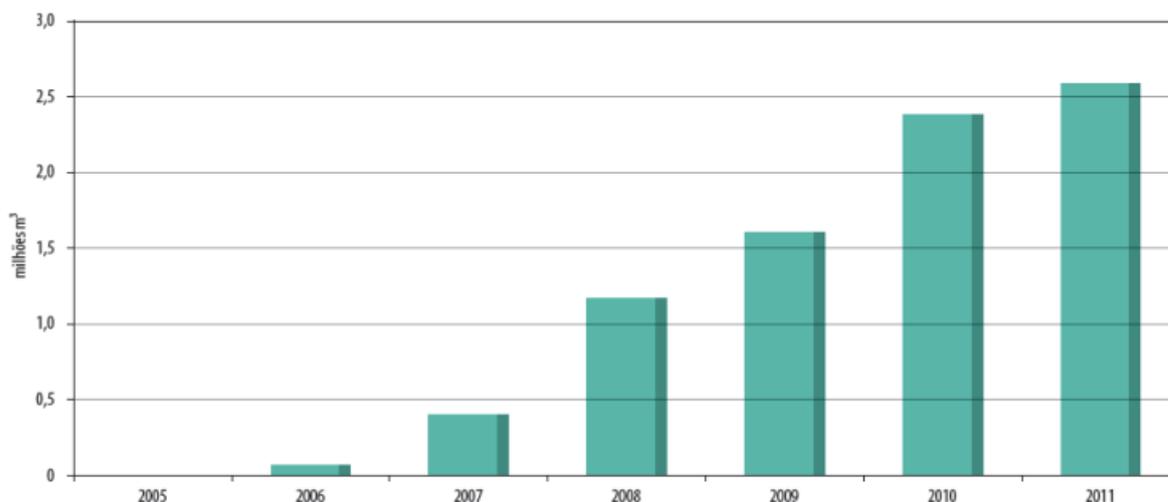


Figura 5 - Evolução da produção de biodiesel - 2005 – 2011.

Fonte: ANP/SSP, 2012, p.205.

A figura 6 apresenta a evolução da participação dos componentes presentes na matriz energética brasileira. É possível observar uma previsão de um grande aumento da participação do biodiesel, significando um impacto na economia de recursos e, conseqüentemente, na balança comercial brasileira. A figura 7 apresenta os custos com a importação de combustíveis no País.

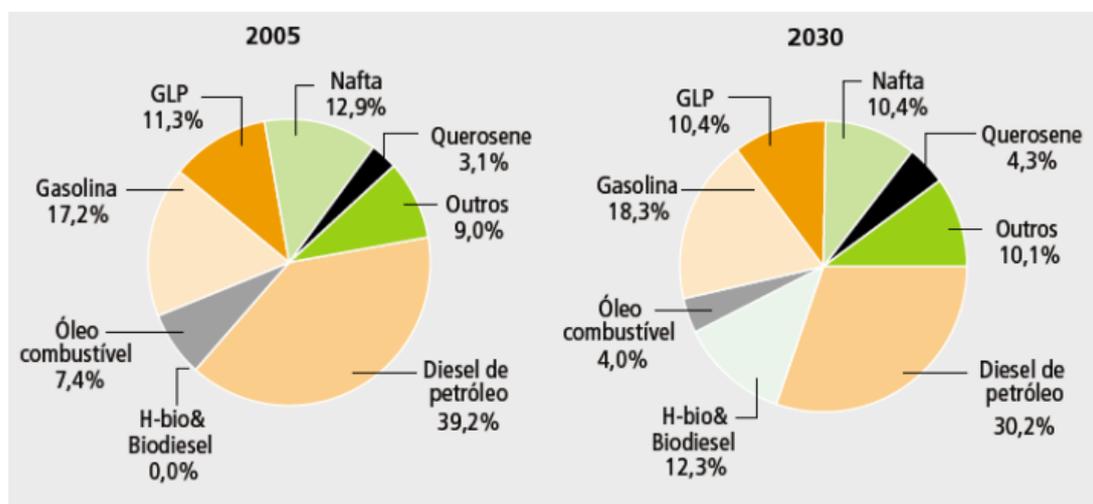


Figura 6 - Estrutura do consumo de derivados (%).

Fonte: MME: Matriz energética nacional, 2007, p.177.

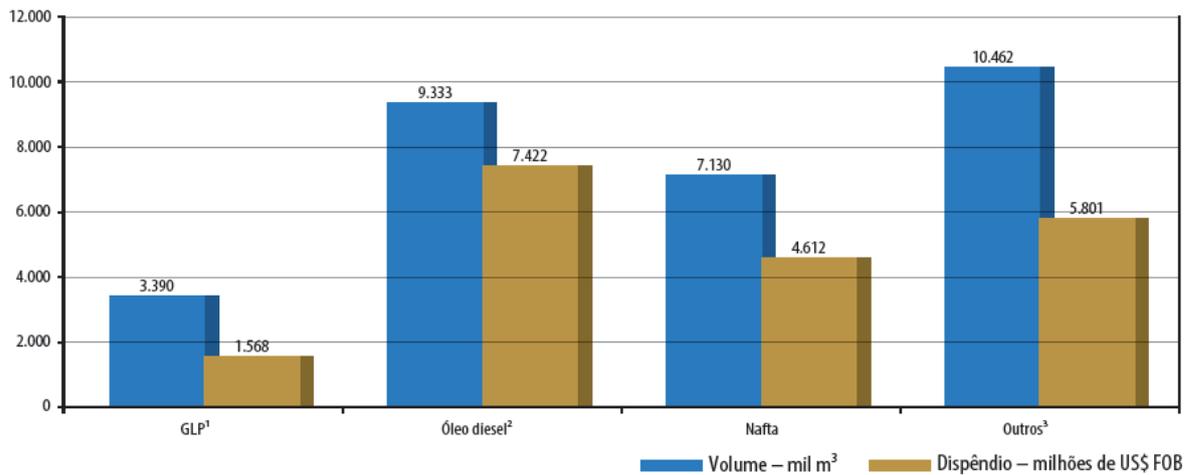


Figura 7 - Participação, em volume e dispêndio, dos principais derivados de petróleo importados – 2011.
Fonte: ANP: Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – 2012, p.130.

A soja é um dos principais produtos da agricultura nacional e atualmente é o principal insumo na fabricação de biodiesel no Brasil. Segundo dados da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), ela corresponde a 49% da área plantada em grãos no país. A figura 8 mostra a distribuição da soja dentre as matérias primas aplicadas na produção do biodiesel.

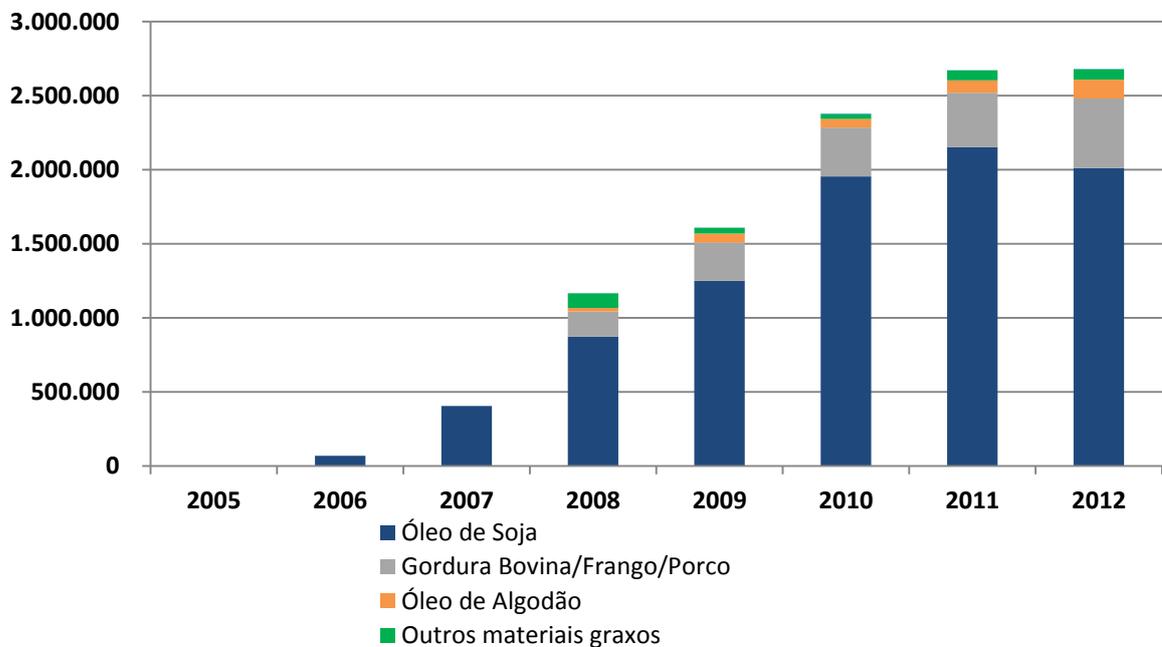


Figura 8 - Matérias-primas utilizadas na produção de biodiesel no Brasil - 2005 – 2011. Volumes em m³.
Fonte: BiodieselBR – Dados Estatísticos

2.4 Propriedades termofísicas de sistemas contendo misturas de combustíveis

Uma vez que o objetivo no presente trabalho é estudar propriedades termofísicas de blendas de biodiesel e diesel, a presente seção tem como finalidade apresentar trabalhos encontrados na literatura contendo resultados experimentais de densidade, viscosidade, velocidade do som e de calor de combustão de sistemas contendo diesel e biodiesel.

Tat e Gerpen (2003) determinaram experimentalmente a densidade e a velocidade do som de misturas de diesel com biodiesel, em função da composição, temperatura e pressão. A velocidade do som foi determinada utilizando um equipamento de medidas de impulsos de ultrassom da marca Panametrics (modelo 5072 PR). Para realizar os experimentos, os autores desenvolveram um sistema para medidas de pressão. O biodiesel estudado neste trabalho foi obtido a partir da reação de transesterificação do óleo de soja, usando a rota metílica e os valores das suas propriedades atenderam os padrões da norma ASTM D 6751. As blendas foram preparadas em base mássica com composições de B20, B50, e B75 de biodiesel para dois tipos diferentes de diesel. As medidas foram realizadas na faixa de pressão entre 0,1 e 32,46 MPa e as temperaturas estudadas variaram entre 293 e 313 K. Os autores concluíram que a velocidade do som foi correlacionada de forma satisfatória usando uma equação de segunda ordem. Equações de correlação e uma regra de mistura foram desenvolvidas para calcular as propriedades estudadas.

Tate et al. (2006) determinaram experimentalmente dados de densidade de blendas de diesel com três diferentes tipos de biodiesel. As matérias primas utilizadas para a produção de biodiesel foram óleo de soja, canola e óleo de peixe. A faixa de temperatura estudada variou entre 293 e 573 K. A análise dos dados apresentou uma dependência linear da densidade em função da temperatura. Os autores não encontraram uma concordância entre os resultados encontrados nesse estudo e aqueles encontrados na literatura para densidades analisadas abaixo de 373 K. Os estudos encontrados na literatura realizaram medidas de densidade na faixa de temperatura entre 273 e 373K, e os biocombustíveis foram produzidos de fontes diferentes tendo, portanto, diferentes composições de ácidos graxos.

Kegl (2006) realizou estudo de emissões em motores através de estudos experimentais com blendas de diesel/biodiesel e comparou os resultados com uma análise numérica. Os combustíveis testados foram o petrodiesel, conforme a norma Europeia EN 590, e o biodiesel

puro B100 (a base de óleo de colza) em conformidade com a norma Europeia EN 14214. O trabalho teve como principal objetivo analisar as características de injeção, especialmente no momento de injeção do combustível, verificando a taxa média de injeção, pressão de injeção e tempo de injeção, características estas que influenciam no desempenho dos motores. Foram determinadas experimentalmente a densidade e a velocidade do som do petrodiesel, do biodiesel e de suas misturas. Os resultados obtidos demonstraram que a densidade aumentou, com o aumento do teor de biodiesel na mistura e com a diminuição da temperatura e que a velocidade do som aumentou com a concentração do biodiesel e com a pressão da mistura combustível. O autor concluiu que houve atraso de injeção (tempo entre o início de entrega e de início da injeção), e que o tempo de injeção diminuiu com o aumento do teor de biodiesel. A viscosidade mais elevada do biodiesel reduz as perdas de combustível durante o processo de injeção, proporcionando uma variação na pressão e, portanto, causando uma regulação do avanço da injeção. As expressões empíricas derivadas para a densidade e a velocidade do som proporcionaram uma base para a modelagem numérica do processo de injeção. As características de injeção obtidas numericamente obtiveram resultados satisfatórios com os dados experimentais em diferentes regimes de operação. Quando se utilizou B100, a pressão de injeção média e a taxa de injeção média foram maiores.

Alptekin e Canakci (2008) determinaram experimentalmente dados de propriedades termodinâmicas de dois diferentes tipos de diesel combinados com seis tipos de biodiesel (óleo de girassol, canola, soja, semente de algodão, milho e resíduos de óleo de palma). Foram preparadas as seguintes blendas em base volumétrica: B2, B5, B10, B20, B50 e B75. Para determinação da densidade e da viscosidade cinemática, os autores realizaram os experimentos seguindo as normas da ASTM. Equações matemáticas encontradas na literatura foram comparadas com as equações desenvolvidas pelos autores a partir dos resultados experimentais. Os desvios absolutos para a densidade e para a viscosidade foram, respectivamente, de 0,42% e 2,25%. De acordo com os resultados experimentais, a densidade e a viscosidade cinemática das misturas aumentaram com o aumento da concentração de biodiesel na mistura combustível.

Abolle, Loukou e Henri (2009a) determinaram experimentalmente a densidade e o ponto de névoa de blendas de diesel com óleos de palma, palmito, algodão, amendoim, côco e girassol. As blendas foram preparadas em base volumétrica variando de B0 a B100 com intervalos percentuais de 10 por cento de óleo vegetal na mistura. Para a determinação da densidade, foi utilizado um densímetro fabricado pela Anton Paar (modelo DMA 4500), e a

faixa de temperatura estudada variou entre 283 e 353K, com intervalos de 10 K. Para a determinação do ponto de névoa, foi utilizado um dispositivo termostático de medição feito de um duplo invólucro transparente com controle de temperatura. Os resultados experimentais do ponto de névoa foram usados para desenvolver um modelo matemático preditivo para as misturas.

Teixeira et al (2010) realizaram experimentos com biodiesel obtido de sebo bovino e de óleo de soja, e de suas misturas com diesel. As propriedades estudadas foram a densidade, viscosidade, ponto de entupimento e ponto de fulgor. Foi demonstrado que o biodiesel de sebo bovino pode ser misturado com o petrodiesel e o biodiesel de soja para melhorar as características da mistura final nos combustíveis. Os autores concluíram que a composição e as propriedades da matéria-prima utilizada para produção de biodiesel têm influência nas propriedades termodinâmicas do combustível. As densidades das amostras foram determinadas de acordo com a norma ASTM D4052, através de um equipamento para medidas de densidade fabricado pela Kyoto Electronics - Japão (modelo DA-500). A viscosidade cinemática à temperatura de 313K foi determinada em conformidade com a norma ASTM D445, utilizando em viscosímetro automático fabricado pela Herzog - Alemanha (modelo HVU 490). Os resultados obtidos para a densidade e a viscosidade mostraram que os valores dessas duas propriedades são maiores para o biodiesel quando comparada as do diesel de petróleo.

Nogueira et al. (2010) determinaram a densidade e a viscosidade cinemática de diferentes misturas de diferentes óleos com biodiesel. O biodiesel foi produzido, através da reação de transesterificação, utilizando como matérias-primas o óleo de babaçu, de semente de algodão e de soja. As misturas binárias foram estudadas na temperatura entre 293,15 e 373,15 K, com variação de 20 K. As medidas de viscosidade e densidade foram realizadas em um viscosímetro Stabinger fabricado pela Anton Paar (modelo SVM 3000). Os valores de densidade do biodiesel diminuíram conforme a sequência: soja > semente de algodão > óleo de babaçu. Os dados de densidade e viscosidade foram correlacionados, respectivamente, com um polinômio de primeira ordem e com uma equação de Andrade modificada. As equações apresentaram uma boa concordância com os dados experimentais. Os resultados experimentais da viscosidade foram usados para calcular os desvios da viscosidade, os quais foram correlacionados com uma equação polinomial de Redlich-Kister. Todos os sistemas estudados apresentaram valores negativos do desvio da viscosidade e diminuíram com o aumento da temperatura.

Lapuerta et al. (2010) realizaram estudos experimentais de estabilidade, lubricidade, viscosidade e ponto de entupimento (CFPP) de blendas de diesel com álcool. Os alcoóis estudados foram: etanol, metanol, propanol, butanol e pentanol. As concentrações em base volumétrica variaram de E0 (0% de álcool e 100% de diesel) a E100, em intervalos de 20% de composição de álcool nas blendas. O estudo de estabilidade foi realizado usando um equipamento óptico (Turbiscan). A viscosidade cinemática das misturas foi medida a 313 K seguindo a norma EN ISO 3104. Os testes de lubricidade foram realizados utilizando um dispositivo alternativo de alta frequência da marca PCS Instruments seguindo as normas Europeias (EN ISO 12156-1 - 2006) ou americanas (ASTM D6079). O CFPP das misturas foi determinado seguindo a norma EN116. Os autores concluíram que os alcoóis de cadeia curta apresentaram baixa estabilidade e viscosidade nas blendas, principalmente para as concentrações de etanol e propanol em diesel, acima de 22 e 45%, respectivamente. A lubricidade das misturas diminuiu com o teor de álcool mas este efeito foi compensado parcialmente pela volatilidade do álcool. As misturas com maior restrição de uso foram aquelas contendo pentanol, as quais devem ser limitadas a concentrações inferiores a 10% em base volumétrica. Devido à alta volatilidade, a capacidade de lubrificação dessas misturas diminuiu. Os autores concluíram que os alcoóis podem ser misturados com diesel, em baixas e altas concentrações, embora para melhorar a estabilidade da mistura de alcoóis de cadeia curta em concentrações intermediária, seria necessária a utilização de aditivos ou de ésteres de ácidos graxos.

Nita, Geacai e Iulian (2011) determinaram dados de densidade e de viscosidade de soluções binárias de biodiesel e diesel a 298,15 K. As medidas de densidade foram determinadas utilizando um densímetro fabricado pela Anton Paar (Modelo DM 4500), de acordo com a norma ASTM D4052. A viscosidade dos combustíveis foi determinada usando um viscosímetro de Ubbelohde, seguindo a norma ASTM D445. A densidade e a viscosidade dos sistemas estudados aumentaram com o aumento da concentração do biodiesel na mistura. A viscosidade das blendas de biodiesel com petrodiesel e biodiesel com benzeno aumentaram com o aumento da concentração de biodiesel. Equações empíricas foram usadas para correlacionar a densidade e a viscosidade para as misturas de biodiesel com petrodiesel e de biodiesel com benzeno.

Barabás e Todorut (2011) estudaram experimentalmente blendas ternárias de diesel, biodiesel de óleo de canola e etanol. Foi utilizado o viscosímetro Stabinger fabricado pela Anton Paar (modelo SVM 3000), o qual permite realizar medidas de viscosidade dinâmica e

densidade, conforme procedimento das normas ASTM D7042 e EN ISO 12185, bem como o cálculo automático da viscosidade cinemática, atendendo as normas ISO 3104 e ASTM D445. As análises foram realizadas na faixa de temperatura entre 273 e 373 K para o diesel e biodiesel, e entre 273 e 343 K para o etanol e para as blendas ternárias.

Verduzco et al. (2011) determinaram dados experimentais de densidade e viscosidade cinemática de diferentes misturas volumétricas binárias de biodiesel de óleo de girassol e de biodiesel de óleo de amendoim, ambos misturados com diesel. A composição volumétrica das blendas foram B1, B5, B10, B15, B20 e B60. As temperaturas estudadas variaram entre 298,15 e 373,15 K. As medidas de densidade e viscosidade dinâmica foram realizadas utilizando um viscosímetro Stabinger fabricado pela Anton Paar (modelo 3000 SVM). Para todas as composições estudadas, a densidade e a viscosidade dinâmica do óleo diesel e de suas misturas diminuíram com o aumento da temperatura e aumentaram com o aumento da concentração do biodiesel nas blendas. Os autores propuseram uma correlação empírica para prever a densidade e a viscosidade cinemática das misturas.

Jimenez et al (2011) estudaram experimentalmente blendas de diesel, etanol e de misturas dos dois combustíveis. As amostras foram preparadas em base volumétrica com E05/D95 (5% de etanol e 95% de diesel), E10/D90 e E15/D85, e os testes atenderam a norma EN590 de 2003. Para medidas de densidade, foi utilizado um densímetro fabricado pela Anton Paar (modelo DMA 48), seguindo a norma EN ISO 12185. A faixa de temperatura estudada variou entre 253,15 e 308,15 K. A viscosidade cinemática a 313,15 K foi medida de acordo com a norma ISO 3104 utilizando um viscosímetro fabricado pela Walter Herzog GmbH (modelo MP-480). Os resultados obtidos demonstraram que a densidade diminuiu com o aumento da porcentagem de etanol na mistura, assim como, com o aumento da temperatura. Segundo os autores, a diminuição da densidade ocasiona um retardamento do tempo de injeção, o que pode causar um aumento nas emissões de poluentes, bem como uma diminuição significativa do desempenho do motor. A viscosidade das misturas diminuiu com o aumento da concentração de etanol na mistura. Embora os valores da viscosidade de misturas de combustível etanol/diesel tenham sido mais baixas do que o diesel puro, todos os valores ainda se mostraram estão dentro da faixa estabelecida na norma.

Santos et al. (2011) produziram, através da reação de transesterificação, biodiesel a partir de resíduos de óleo de fritura. Foram determinados dados experimentais de densidade e de viscosidade cinemática dos biocombustíveis puros e de misturas com diesel, em função da temperatura das amostras. As blendas foram preparadas em base volumétrica, variando de B0

até B100. Os dados experimentais de densidades e viscosidades foram correlacionados por meio de equações linear e polinomial empíricas e os resultados apresentaram excelente concordância entre os valores medidos e os estimados.

Nogueira et al. (2012) determinaram dados experimentais de densidade e viscosidade cinemática de diferentes misturas de diesel, biodiesel de soja e óleo de soja. A composição volumétrica das blendas foram B5, B7 e B20, em misturas binárias e ternárias. A faixa de temperatura estudada variou entre 293 e 373 K, com intervalo de 20 K. Os dados experimentais foram correlacionados usando modelos matemáticos encontrados na literatura e foi encontrada uma boa concordância entre os valores experimentais e os teóricos. Os valores da densidade apresentaram um comportamento linear em função da temperatura. Para os sistemas binários e ternários estudados, as viscosidades diminuíram exponencialmente com o aumento da temperatura.

Thomas, Birney e Auld (2012) produziram biodiesel, por meio de reações de transesterificação, usando como matéria-prima o óleo de mamona e óleo de cártamo utilizando as rotas metílica e etílica. Os biodiesel produzidos foram usados para estudar o comportamento da densidade e da viscosidade de misturas binárias de diesel/biodiesel. As blendas dos combustíveis foram preparadas em base volumétrica contendo (B0, B5, B10, B20, B40, B60, B80 e B100). Os autores concluíam que não houve aumento significativo da viscosidade nas blendas com até 20% de biodiesel de mamona na mistura. O biodiesel de óleo de cártamo, quando misturado ao biodiesel de mamona, provocou uma diminuição da viscosidade da mistura. Esse comportamento se repetiu com as blendas contendo diesel de petróleo.

Chhetri e Watts (2012) determinaram experimentalmente a densidade de três diferentes tipos de biodiesel puros e combinados com diesel. O estudo foi realizado a diferentes temperaturas e pressão. Como matérias primas para produção de biodiesel, foram utilizadas óleo de canola, pinhão manso e sabão. As blendas binárias foram preparadas nas frações volumétricas de B5, B20, B50 e B80. As densidades foram determinadas em uma faixa de temperatura variando entre temperatura ambiente e 523 K, e em uma faixa de entre 0,1 e 7 MPa. Os autores constataram que as densidades aumentaram linearmente com o aumento da pressão e diminuíram linearmente com o aumento da temperatura. As variações na composição dos ácidos graxos dos três biocombustíveis utilizados neste estudo não demonstraram variação significativa de densidade entre eles.

Verduzco, Rodríguez e Jacob (2012) desenvolveram correlações empíricas para analisar o número de cetano, densidade, viscosidade cinemática e poder calorífico de dois tipos de biodiesel produzidos a partir de sebo bovino e de óleo de soja. O número de cetano foi determinado comparando as suas características de combustão em um motor de teste, com aqueles combustíveis de referência, conforme a norma ASTM D 613-05. Para o cálculo da viscosidade cinemática foi medido o tempo para um volume de líquido fluir por gravidade por meio de um viscosímetro capilar de vidro calibrado a 40 °C seguindo a norma ASTM D445-04. Um analisador digital (APPAR) foi utilizado para medir a densidade de biodiesel a 293 K. O poder calorífico foi medido através de um equipamento da Leco AC-350 seguindo o método ASTM D-240-02. O objetivo deste estudo foi desenvolver métodos simples e confiáveis de cálculos que pudessem estimar algumas propriedades termodinâmicas de biocombustíveis. O desvio médio absoluto entre as correlações empíricas e os resultados experimentais para o índice de cetano, viscosidade cinemática, densidade, e poder calorífico foram, respectivamente, 5,95%, 2,57%, 0,11% e 0,21%. Os autores concluíram que as correlações empíricas propostas foram precisas para reproduzir as propriedades desses biodiesel.

Baroutian et al. (2012) determinaram a densidade e viscosidade cinemática, de diferentes misturas volumétricas de ésteres metílicos, ésteres etílicos e de diesel. Os ésteres foram obtidos por meio da reação de transesterificação do óleo de mamona. Os valores da viscosidade e densidade diminuíram, respectivamente, de forma não linear e linearmente com a variação da temperatura. Os resultados indicaram que, com o aumento da concentração de ésteres metílicos, houve aumento das densidades das misturas binárias e ternárias.

Murphy et al. (2012) produziram biodiesel sintético a partir de resíduos de plásticos e os resultados mostraram que o produto resultante foi essencialmente equivalente ao diesel de petróleo. Para validação do biodiesel sintético, foram estudadas experimentalmente a densidade e a viscosidade cinemática dos combustíveis puros e em composições contendo diesel e biodiesel sintético. As blendas foram preparadas em base volumétrica, contendo (B10, B20, B30, B40, B50 e B100) e medidas experimentais seguiram as normas EN 3104:1996 para a viscosidade e EN 3993:1996 para a densidade. A viscosidade e a densidade do biodiesel sintético foram menores do que os valores dessas propriedades oriundas do diesel de petróleo. Com o aumento da concentração de biodiesel nas blendas, a densidade e a viscosidade das misturas diminuíram. Os autores concluíram que para a densidade apenas as blendas com concentração entre B10 e B40 atenderam as especificações da norma EN

590:2004 (regulamenta os padrões de combustíveis utilizados na Europa). Contudo, para a viscosidade cinemática, todas as blendas atenderam essa norma.

Nikolic et al. (2012) determinaram experimentalmente valores de densidade e da velocidade do som de blendas de diesel e biodiesel de óleo de colza, em função da pressão. O objetivo deste estudo foi medir simultaneamente a velocidade do som e a densidade das blendas a pressões de até 160 MPa. Para todas as misturas estudadas, os resultados demonstraram que, com o aumento da pressão, houve um aumento significativo na velocidade do som e na densidade. Os autores destacaram que o conhecimento dos valores de propriedades dos combustíveis líquidos, tais como a densidade e velocidade do som, em função de pressão, são importantes para prever o comportamento dos sistemas de injeção do combustível em motores a diesel e também na otimização do mesmo.

Moradi, Karami e Mohadesi (2013) determinaram dados experimentais de densidade e viscosidade cinemática de blendas de diesel e biodiesel, em função da fração volumétrica e da temperatura das misturas. Como matéria prima para a produção do biodiesel, foram usados óleo de girassol, de canola, de soja e óleo de cozinha usado. O biodiesel foi produzido pelo processo de transesterificação utilizando a rota metílica. A densidade foi determinada de acordo com a norma ASTM D1298 e para as medidas da viscosidade cinemática foi seguida a norma ASTM D445. Analisando os dados experimentais, observou-se que com a diminuição da temperatura e com o aumento da fração de biodiesel na mistura, ocorreu um aumento na densidade. A viscosidade cinemática, tanto do biodiesel puro quanto das blendas apresentou o mesmo comportamento da densidade. Entretanto, a densidade variou linearmente com a temperatura, enquanto a viscosidade cinemática apresentou uma variação não linear. De acordo com os resultados experimentais e com a análise de estudos anteriores, foram propostas novas equações para estimar a densidade e viscosidade cinemática das misturas.

Mejia, Salgado e Orrego (2013) determinaram dados experimentais de viscosidade cinemática, ponto de névoa e ponto de fulgor de blendas binárias e ternárias de diesel com biodiesel. Biodiesel foi obtido através de reações de transesterificação do óleo de mamona e do óleo de palma. As blendas binárias de diesel/biodiesel de palma, diesel/biodiesel de mamona e biodiesel de palma / biodiesel de mamona foram preparadas em base volumétrica de B0 a B100 variando a cada 20%. Para as blendas ternárias, foram usadas as blendas binárias biodiesel de palma / biodiesel de mamona na proporção 80/20, 60/40, 40/60 e 20/80 com diesel na composição de B10 e B20. A viscosidade cinemática das amostras foi determinada de acordo com a norma ASTM D-445, o ponto de névoa seguiu a norma ASTM

D-4539 e para o ponto de fulgor utilizou-se a norma ASTM D-93. Os resultados das análises foram comparados com os resultados calculados através de equações encontradas na literatura e apresentaram boa concordância. Todavia, para o ponto de fulgor, os autores não encontraram na literatura equações para correlacionar esta propriedade.

Parente et al. (2011) determinaram dados experimentais de densidade e da viscosidade cinemática de blendas de diesel e biodiesel nas temperaturas de 293,15, 313,15, 333,15, 353,15 e 373,15 K. Como matéria prima usada na produção de biodiesel, foi utilizado óleo de girassol e óleo de peixe. Ambos os biocombustíveis foram produzidos através do processo de transesterificação utilizando a rota metílica e etílica. As blendas foram preparadas em frações volumétricas de B0, B5, B8, B20 e B100. As medidas da viscosidade e densidade foram realizadas utilizando um viscosímetro Stabinger fabricado pela Anton Paar (modelo SVM 3000). Os dados experimentais de densidade e viscosidade foram correlacionados, com boa concordância, utilizando equações polinomiais. Esses mesmos resultados foram usados para calcular o volume molar excesso e a o desvio da viscosidade dos sistemas estudados.

Freitas et al. (2013) determinaram experimentalmente a velocidade do som de misturas binárias e ternárias de diesel com biodiesel a diferentes temperaturas e à pressão atmosférica. Foram utilizados três tipos diferentes de biodiesel (soja, colza e palma) e a faixa de temperatura estudada variou entre 288,15 e 343,15 K, com intervalo de 5 K. Para cálculo da velocidade do som, foi utilizado equipamento da marca Anton Paar (modelo DSA 5000). Os resultados experimentais foram usados para propor um modelo matemático preditivo para o cálculo da velocidade do som. Os autores compararam a equação de Auerbach com a equação desenvolvida no presente estudo e o desvio médio relativo global foi de 1,64%.

Kumar et al. (2012) determinaram experimentalmente a densidade e a velocidade do som de misturas binárias de biodiesel com butanol e de biodiesel com pentanol. Como matéria prima para produção de biodiesel foi utilizado óleo de mamona. Para cálculo da densidade e da velocidade do som utilizou-se um equipamento da marca Anton Paar (modelo DSA 5000). As temperaturas estudadas variaram entre 288,15 e 308,15 K e as medidas foram realizadas à pressão atmosférica. Os autores concluíram que a adição de butanol e pentanol no biodiesel diminuiu a densidade da blenda. Além disso, os valores da densidade e da velocidade do som diminuíram com um aumento da temperatura. Os resultados obtidos da densidade foram utilizados ainda para calcular o volume molar em excesso. A equação polinomial de Redlich-Kister foi usada para correlacionar os resultados, e houve uma boa concordância entre os valores experimentais e calculados pelo polinômio.

Abolle, Loukou e Henri (2009b) determinaram experimentalmente a viscosidade de blendas de diesel com seis diferentes tipos de óleos vegetais. As matérias primas utilizadas foram óleo de palma, palmito, algodão, amendoim, coco e óleo de girassol. As blendas foram preparadas em base volumétrica contendo B0, B5, B10, B15, B20, B30, B40, B50 e B100. Os autores utilizaram os dados experimentais para desenvolver um modelo matemático para predição da viscosidade dessas blendas.

Dzida e Prusakiewicz (2008) determinaram experimentalmente a velocidade do som do diesel de petróleo tipo S10, de biodiesel puro e de blenda com composição volumétrica de 20% de biodiesel (B20). As faixas de pressão e temperatura estudadas variaram, respectivamente, entre 0,1 MPa e 101 MPa, e entre 293 e 318 K. Os resultados mostraram que, para uma pressão constante, a velocidade do som aumentou com o aumento da temperatura.

Andrade et al. (2011) determinaram o calor de combustão de blendas contendo diesel e biodiesel. Os autores usaram o óleo de soja como matéria prima na produção de biodiesel. Foram produzidos dois tipos de biodiesel, um pelo processo de transesterificação, denominado biodiesel, e outro por meio do processo de pirólise, denominado bio-óleo. Para análise dos dados experimentais utilizou-se um calorímetro estático modelo PARR 6272, seguindo a norma ASTM D240. As blendas foram preparadas, em base volumétrica, de B0 a B100, com variação a cada 20% de biocombustível na mistura. Os resultados obtidos demonstraram que o calor de combustão diminuiu linearmente com a adição de biocombustível no diesel fóssil. Este fato deve-se a maior cadeia orgânica do óleo vegetal quando comparada a do diesel fóssil. Os autores analisaram as blendas nesta proporção e concluíram que o B5, com bio-óleo/diesel, e o B5, com biodiesel/diesel, tiveram calor de combustão, respectivamente, de 99,7 e 99,5%, em comparação com o calor de combustão do diesel fóssil puro. Isto significa que, considerando a análise do calor de combustão, a mistura B5 praticamente não afeta o consumo de combustível do automóvel.

3 METODOLOGIA E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Materiais utilizados

Os combustíveis utilizados para realização deste estudo foram fornecidos pela Ipiranga Produtos de Petróleo S/A. O diesel S10 foi fornecido pela base abastecedora de Guarulhos - SP. O S500 foi fornecido pela base de São Caetano do Sul – SP, conforme certificado anexo nº 0148-13T do fornecedor Transpetro e o S1800 pela base de Paulínia. O B100 (biodiesel, preparado na proporção de 100% de origem vegetal - óleo de soja), foi fornecido pela base abastecedora de São Caetano do Sul - SP, conforme certificado nº 002/2013, do produtor BS Bios, emitido em 11/01/2013. Todas as amostras dos combustíveis utilizadas neste trabalho foram certificadas de acordo com a legislação vigente e normas da Agência Nacional de Petróleo (ANP).

As amostras foram preparadas em uma base volumétrica em diferentes composições, variando de B0 (0% de biodiesel e 100% de diesel) a B100 (100% de biodiesel e 0% de diesel). A Tabela 4 apresenta as composições volumétricas das amostras.

Tabela 4 – Composição volumétrica das amostras de diesel/biodiesel.

Sistema	Volume total (ml)	Volume diesel (ml)	Volume biodiesel (ml)	% Volumétrica de diesel	% Volumétrica de biodiesel
B0	200	200	0	100%	0%
B2	200	196	4	98%	2%
B5	200	190	10	95%	5%
B10	200	180	20	90%	10%
B20	200	160	40	80%	20%
B30	200	140	60	70%	30%
B40	200	120	80	60%	40%
B50	200	100	100	50%	50%
B60	200	80	120	40%	60%
B70	200	60	140	30%	70%
B80	200	40	160	20%	80%
B90	200	20	180	10%	90%
B100	200	0	200	0%	100%

Fonte: Autor

3.2 Descrição dos equipamentos utilizados

Todos os experimentos foram realizados no Laboratório de Combustíveis e Lubrificantes (LACOM) do Centro Universitário da FEI em São Bernardo do Campo – SP.

3.2.1 Equipamento para determinação da densidade e velocidade do som

Os dados de densidade e velocidade do som foram determinados utilizando um analisador de densidade e velocidade do som fabricado pela Anton Paar modelo (modelo DSA 5000), (figura 9). Esse equipamento determina simultaneamente a densidade e a velocidade do som. O princípio de funcionamento do equipamento baseia-se na variação da frequência do período de oscilação de um tubo oscilador em forma de U. Com a introdução da amostra muda-se a massa do tubo oscilador, causando variação na frequência e consequente variação no período de oscilação do tubo oscilador. Com o período de oscilação é possível calcular a densidade. A célula de medição da velocidade do som é delimitada de um lado por um transmissor de ultra-som e do outro lado por um receptor. O transmissor envia ondas de som de um período conhecido através da amostra e a velocidade do som é calculada por determinação do período das ondas sonoras recebidas, considerando a distância entre ambos. A resolução na medida de densidade é de $5 \times 10^{-6} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ para uma faixa de operação entre 0 e 3 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$. A resolução nas medidas da velocidade do som é de $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ para um faixa de operação entre 1000 e 2000 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. A faixa de temperatura e pressão do equipamento é de 0 a 70 °C e de 0 a 3 bar, respectivamente.



Figura 9 – Analisador de densidade e velocidade do som da Anton Paar (modelo DSA 5000).
Fonte: Autor

3.2.2 Equipamento para determinação da viscosidade

Os dados de viscosidade foram determinados utilizando um viscosímetro Stabinger fabricado pela Anton Paar (modelo SVM 3000), figura 10. Esse equipamento mede a viscosidade dinâmica e a densidade relativa, calculando assim automaticamente a viscosidade cinemática. O princípio de funcionamento baseia-se na medida da viscosidade rotacional. Um ímã girando produz um campo de corrente magnética com um torque de frenagem exata. O binário de corrente magnética é medido com resolução de 50 N·m de torque, combinado com um termostato integrado de alta precisão com estabilidade de 5×10^{-3} °C. A célula de medição contém um tubo que gira a uma velocidade constante e este tubo é preenchido com a amostra, fazendo um rotor de medição com um ímã embutido flutuar na amostra. A baixa densidade do rotor permite que ele seja centralizado. O rotor flutua livremente sem utilizar rolamentos e isento de fricção, permitindo que o instrumento seja insensível à vibração. Pouco depois do início da medição, o rotor atinge uma velocidade constante determinando o equilíbrio entre o efeito do travão de corrente de “*Foucault*” e as forças de cisalhamento. A viscosidade dinâmica é calculada a partir da velocidade do rotor e a viscosidade cinemática é encontrada dividindo a viscosidade dinâmica pela densidade.



Figura 10 – Viscosímetro Stabinger da Anton Paar (modelo SVM 3000).

Fonte: Autor

3.2.3 Equipamento para determinação do calor de combustão.

O calor de combustão foi determinado utilizando um calorímetro de combustão da marca IKA (modelo C2000, figura 11) acoplado a um banho termostato (modelo KV 600) do mesmo fabricante. O acessório KV 600 fornece água de resfriamento ao calorímetro. O sistema é validado de acordo com as normas DIN 51900, ISO 1928, ASTM D240, ASTM D4809, ASTM D5865, ASTM D1989, ASTM D5468 e ASTM E711. O princípio de funcionamento do equipamento ocorre da seguinte forma: uma amostra de combustível é colocada dentro de um cadinho e este é inserido dentro de um vaso de pressão (figura 12), que é imerso dentro do equipamento. Oxigênio puro é alimentado para dentro do vaso de pressão até que a pressão atinja 30 bar. A água do banho é aquecida até a temperatura de 25 °C e, após certo tempo, é atingido um equilíbrio térmico com o vaso de pressão. A amostra de combustível é inflamada eletricamente com um dispositivo de ignição. O aumento da temperatura da água dentro do recipiente é medido e o poder calorífico é determinado. A resolução da temperatura é de 1 °C. O equipamento foi calibrado utilizando ácido benzóico como padrão.

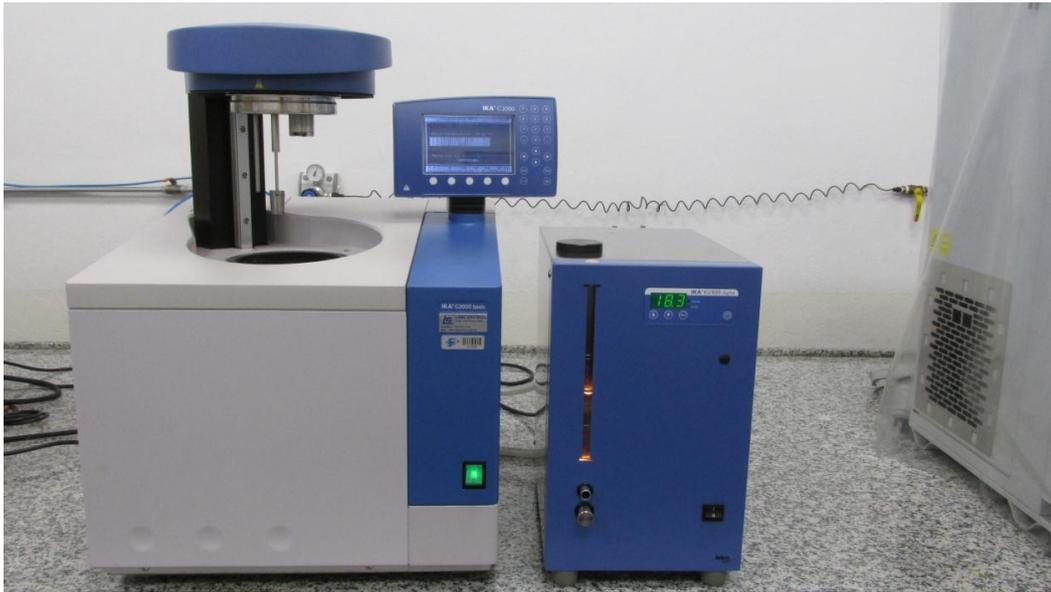


Figura 11 - Calorímetro de combustão da marca IKA (modelo C2000).

Fonte: Autor



Figura 12 - Vaso de pressão do calorímetro.

Fonte: Autor

3.3 Procedimento experimental

3.3.1 Procedimento experimental para determinação da densidade e velocidade do som

O procedimento de calibração adotado neste estudo seguiu como referência o procedimento descrito no manual do fabricante do equipamento. Os experimentos realizados atendem a ASTM D 1298.

Após a calibração, foram preparadas treze amostras, os dois componentes puros mais as onze misturas de biodiesel com os diferentes diesel, como apresentado na tabela 4. Para cada amostra, foi injetado um volume de 5 cm³ e após atingido o equilíbrio térmico nas temperaturas desejadas, as leituras da densidade e da velocidade do som foram lidas simultaneamente. Entre uma medida da densidade e da velocidade do som de cada uma das amostras, o equipamento era limpo com n-hexano e ar comprimido e iniciava-se uma nova medida.

3.3.2 Procedimento experimental para determinação da viscosidade

O procedimento de calibração adotado neste estudo seguiu como referência o procedimento descrito no manual do fabricante do equipamento. As medidas de viscosidade foram realizadas conforme a norma ASTM D 7042.

As amostras com volume de 4 cm³ foram injetadas no equipamento seguindo o mesmo procedimento adotado para as medidas de densidade e velocidade do som. Alcançado o equilíbrio térmico nas temperaturas desejadas, as leituras da viscosidade dinâmica e da densidade foram lidas simultaneamente. Com os valores destas propriedades, foi possível calcular a viscosidade cinemática. Entre uma medida das propriedades de cada uma das amostras, o equipamento era limpo com n-hexano e ar comprimido e iniciava-se uma nova medida.

3.3.3 Procedimento experimental para determinação do calor de combustão

O procedimento de calibração adotado neste estudo seguiu como referência o procedimento descrito no manual do fabricante do equipamento. Os experimentos foram efetuados conforme a norma ASTM D 240. O equipamento foi calibrado com ácido benzóico.

Utilizou-se uma balança digital científica da marca Ohaus (modelo AS 200) para as pesagens da amostra e do cadinho.

Após a calibração do calorímetro, inicialmente o valor da massa do cadinho foi inserido na entrada de dados do programa do calorímetro. Em seguida, o cadinho metálico contendo a amostra foi introduzido dentro do vaso de pressão, que foi devidamente fechado. O vaso foi colocado dentro do calorímetro e em seguida iniciou-se o funcionamento do calorímetro. Os resultados das medidas calculados pelo programa foram lidos na tela do equipamento e transportados manualmente para uma planilha do Excel. Todas as amostras foram analisadas em triplicatas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados experimentais

As Tabelas 5-14 apresentam valores de densidade, velocidade do som, viscosidade e calor de combustão dos sistemas estudados a diferentes composições e temperaturas.

Tabela 5 - Valores da densidade para o sistema biodiesel + diesel S10 a diferentes composições e temperaturas.

Composição	$\rho / \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$					
	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
B0	0,843633	0,836650	0,829646	0,822627	0,815602	0,808582
B2	0,844448	0,837442	0,830428	0,823400	0,816366	0,809325
B5	0,845615	0,838603	0,831577	0,824542	0,817499	0,810426
B10	0,848300	0,841400	0,834500	0,827400	0,820400	0,813300
B20	0,851929	0,844873	0,837810	0,830732	0,823656	0,816580
B30	0,856336	0,849260	0,842167	0,835068	0,827963	0,820837
B40	0,860865	0,853751	0,846633	0,839505	0,832377	0,825252
B50	0,865531	0,858387	0,851236	0,844081	0,836931	0,829792
B60	0,870307	0,863132	0,855957	0,848773	0,841597	0,834435
B70	0,874650	0,867446	0,860243	0,853036	0,845840	0,838669
B80	0,879169	0,871944	0,864717	0,857488	0,850263	0,843023
B90	0,883857	0,876598	0,869341	0,862090	0,854848	0,847609
B100	0,888585	0,881302	0,874018	0,866741	0,859466	0,852175

Fonte: Autor

Tabela 6 - Valores da densidade para o sistema biodiesel + diesel S500 a diferentes composições e temperaturas.

Composição	$\rho / \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$					
	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
B0	0,847448	0,840343	0,833220	0,826081	0,818930	0,811761
B2	0,848257	0,841146	0,834023	0,826880	0,819734	0,812576
B5	0,849371	0,842255	0,835126	0,827981	0,820832	0,813667
B10	0,852131	0,845033	0,837905	0,830762	0,823610	0,816433
B20	0,855510	0,848377	0,841225	0,834056	0,826888	0,819712
B30	0,859062	0,851901	0,844732	0,837554	0,830371	0,823179
B40	0,863267	0,856092	0,848909	0,841712	0,834513	0,827313
B50	0,867589	0,860394	0,853191	0,845979	0,838770	0,831569
B60	0,871804	0,864593	0,857374	0,850151	0,842932	0,835694
B70	0,876075	0,868844	0,861608	0,854372	0,847140	0,839910
B80	0,880501	0,873251	0,865997	0,858746	0,851502	0,844239
B90	0,884427	0,877158	0,869891	0,862623	0,855369	0,848121
B100	0,888585	0,881302	0,874018	0,866741	0,859466	0,852175

Fonte: Autor

Tabela 7 - Valores da densidade para o sistema biodiesel + diesel S1800 a diferentes composições e temperaturas.

Composição	$\rho / \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$					
	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
B0	0,859205	0,852174	0,845131	0,838076	0,831017	0,823951
B2	0,860003	0,852990	0,845958	0,838918	0,831873	0,824802
B5	0,860395	0,853347	0,846291	0,839227	0,832158	0,825091
B10	0,861940	0,854888	0,847824	0,840749	0,833676	0,826608
B20	0,865076	0,858000	0,850911	0,843817	0,836719	0,829600
B30	0,867589	0,860475	0,853355	0,846227	0,839100	0,831982
B40	0,870587	0,863453	0,856312	0,849159	0,842012	0,834846
B50	0,873990	0,866666	0,859675	0,852527	0,845351	0,838173
B60	0,876689	0,869504	0,862310	0,855115	0,847927	0,840740
B70	0,879631	0,872417	0,865196	0,857977	0,850769	0,843568
B80	0,882433	0,875193	0,867959	0,860724	0,853498	0,846280
B90	0,885390	0,878124	0,870866	0,863617	0,856368	0,849133
B100	0,888585	0,881302	0,874018	0,866741	0,859466	0,852175

Fonte: Autor

Tabela 8 - Valores da viscosidade cinemática para o sistema biodiesel + diesel S10 a diferentes composições e temperaturas.

Composição	$\nu / \text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$					
	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
B0	5,7673	4,4130	3,4153	2,7825	2,3121	1,9629
B2	5,8267	4,4601	3,4644	2,8083	2,3383	1,9862
B5	5,8744	4,4972	3,4938	2,8340	2,3600	2,0033
B10	6,0233	4,5564	3,5505	2,8987	2,4429	2,0645
B20	6,2165	4,7073	3,6914	2,9801	2,5008	2,1096
B30	6,4279	4,8866	3,8080	3,0996	2,5813	2,1922
B40	6,7235	5,0967	3,9623	3,2343	2,6888	2,2793
B50	7,1410	5,3826	4,1907	3,4448	2,8467	2,3613
B60	7,4347	5,5827	4,3271	3,5358	2,9345	2,4823
B70	7,7343	5,8129	4,4896	3,6721	3,0404	2,5697
B80	8,1730	6,0713	4,7159	3,8455	3,1831	2,6893
B90	8,6277	6,4323	4,9771	4,0995	3,3406	2,8147
B100	8,9320	6,6528	5,1616	4,2320	3,4925	2,9477

Fonte: Autor

Tabela 9 - Valores da viscosidade cinemática para o sistema biodiesel + diesel S500 a diferentes composições e temperaturas.

Composição	$\nu / \text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$					
	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
B0	4,7630	3,7621	2,9609	2,4435	2,0608	1,7699
B2	4,8212	3,7930	2,9977	2,4597	2,0845	1,7938
B5	4,9328	3,8726	3,0325	2,4907	2,0984	1,8053
B10	5,0287	3,9303	3,0935	2,5422	2,1380	1,8359
B20	5,3486	4,1644	3,2756	2,6837	2,2574	1,9383
B30	5,6525	4,3797	3,4364	2,8139	2,3594	2,0212
B40	6,0158	4,6385	3,6403	2,9763	2,4912	2,1279
B50	6,4516	4,9564	3,8560	3,1559	2,6346	2,2445
B60	6,9570	5,2812	4,1171	3,3755	2,8164	2,3885
B70	7,3772	5,5813	4,3380	3,5565	2,9549	2,5073
B80	7,8565	5,9454	4,6147	3,7756	3,1291	2,6517
B90	8,4105	6,3086	4,9023	4,0432	3,2955	2,7444
B100	8,9320	6,6528	5,1616	4,2320	3,4925	2,9477

Fonte: Autor

Tabela 10 - Valores da viscosidade cinemática para o sistema biodiesel + diesel S1800 a diferentes composições e temperaturas.

Composição	$\nu / \text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$					
	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
B0	6,5667	4,8832	3,7604	3,0231	2,4910	2,0928
B2	6,5594	4,9052	3,7695	3,0287	2,4973	2,1083
B5	6,6141	4,9337	3,7938	3,0582	2,5250	2,1344
B10	6,6767	5,0606	3,8862	3,1144	2,5755	2,1793
B20	6,8718	5,1414	3,9589	3,2061	2,6520	2,2543
B30	7,0986	5,2598	4,1284	3,3692	2,7921	2,3730
B40	7,2896	5,4539	4,2187	3,4303	2,8435	2,4037
B50	7,5184	5,6202	4,3517	3,5331	2,9182	2,4640
B60	7,7417	5,7886	4,4828	3,6544	3,0204	2,5502
B70	8,0482	6,0119	4,6527	3,8013	3,1404	2,6527
B80	8,2874	6,1835	4,7932	3,9198	3,2388	2,7351
B90	8,6088	6,4196	4,9640	4,0712	3,3620	2,8354
B100	8,9320	6,6528	5,1616	4,2320	3,4925	2,9477

Fonte: Autor

Tabela 11 - Valores da velocidade do som para o sistema biodiesel + diesel S10 a diferentes composições e temperaturas.

Composição	$c / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$					
	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
B0	1410,13	1372,39	1335,07	1298,03	1262,08	1226,83
B2	1410,72	1373,03	1335,71	1298,60	1262,61	1227,36
B5	1411,30	1373,61	1336,37	1299,79	1263,50	1228,27
B10	1412,63	1375,09	1337,89	1301,00	1265,18	1230,05
B20	1415,60	1378,23	1341,20	1304,44	1268,77	1233,79
B30	1419,02	1381,77	1344,95	1308,78	1272,87	1237,99
B40	1422,70	1385,63	1348,93	1312,87	1277,12	1242,40
B50	1426,70	1389,80	1353,24	1316,95	1281,70	1247,13
B60	1430,98	1394,22	1357,81	1322,05	1286,59	1252,14
B70	1435,01	1398,39	1362,11	1326,09	1291,11	1256,81
B80	1439,41	1402,90	1366,78	1331,30	1296,06	1261,83
B90	1444,11	1407,73	1371,69	1335,91	1301,18	1267,12
B100	1448,86	1412,57	1376,68	1341,45	1306,46	1272,48

Fonte: Autor

Tabela 12 - Valores da velocidade do som para o sistema biodiesel + diesel S500 a diferentes composições e temperaturas.

Composição	$c / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$					
	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
B0	1403,93	1365,93	1328,30	1291,34	1254,71	1219,01
B2	1404,46	1366,59	1329,01	1291,71	1255,52	1219,98
B5	1405,66	1367,79	1330,25	1292,97	1256,81	1221,37
B10	1408,63	1370,86	1333,55	1296,85	1260,43	1225,05
B20	1411,69	1374,05	1336,87	1299,91	1264,03	1228,82
B30	1414,96	1377,61	1340,52	1303,73	1268,01	1232,96
B40	1419,24	1382,07	1345,19	1308,59	1273,05	1238,18
B50	1424,09	1387,11	1350,39	1313,97	1278,60	1243,89
B60	1428,92	1392,05	1355,56	1319,68	1284,11	1249,54
B70	1433,93	1397,25	1360,90	1324,79	1289,75	1255,30
B80	1439,01	1402,48	1366,32	1330,79	1295,54	1261,28
B90	1443,64	1407,30	1371,27	1335,48	1300,75	1266,67
B100	1448,86	1412,57	1376,68	1341,45	1306,46	1272,48

Fonte: Autor

Tabela 13 - Valores da velocidade do som para o sistema biodiesel + diesel S1800 a diferentes composições e temperaturas.

Composição	$c / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$					
	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
B0	1417,84	1380,29	1343,07	1306,16	1270,35	1235,20
B2	1419,19	1381,56	1344,48	1308,02	1271,81	1236,64
B5	1419,46	1381,98	1344,79	1307,95	1272,17	1237,10
B10	1420,96	1383,44	1346,40	1309,63	1273,93	1238,90
B20	1423,89	1386,56	1349,70	1313,49	1277,53	1242,59
B30	1425,88	1388,75	1351,92	1315,39	1279,95	1245,18
B40	1428,90	1391,90	1355,26	1318,86	1283,53	1248,89
B50	1432,78	1395,86	1359,35	1323,11	1287,93	1253,41
B60	1435,28	1398,55	1362,10	1326,01	1290,95	1256,53
B70	1438,49	1401,89	1365,58	1329,61	1294,67	1260,36
B80	1441,56	1405,12	1368,97	1333,08	1298,26	1264,09
B90	1444,92	1408,63	1372,57	1336,82	1302,11	1268,04
B100	1448,86	1412,57	1376,68	1341,45	1306,46	1272,48

Fonte: Autor

Tabela 14 – Valores do calor de Combustão para os diferentes sistemas estudados a diferentes composições e a 25 °C.

Composição	Q / J·g ⁻¹		
	S10	S500	S180
B0	45768 ± 6,13	45661 ± 7,85	45424 ± 4,99
B2	45725 ± 4,11	45582 ± 6,13	45277 ± 6,53
B5	45508 ± 7,12	45351 ± 6,48	45175 ± 7,13
B10	45221 ± 6,02	45084 ± 5,10	44888 ± 6,16
B20	44599 ± 3,68	44491 ± 8,98	44297 ± 4,55
B30	44006 ± 4,55	43909 ± 3,86	43696 ± 2,87
B40	43429 ± 6,53	43314 ± 6,80	43157 ± 6,24
B50	42811 ± 4,32	42750 ± 7,36	42643 ± 4,32
B60	42184 ± 5,56	42091 ± 8,18	42030 ± 7,59
B70	41600 ± 6,60	41522 ± 8,38	41492 ± 9,00
B80	41006 ± 6,68	40976 ± 6,80	40898 ± 4,97
B90	40462 ± 4,99	40437 ± 6,24	40418 ± 6,94
B100	39885 ± 5,31	39885 ± 5,31	39885 ± 5,31

Fonte: Autor

As Figuras 13-15 mostram os valores das densidades dos sistemas estudados em função da composição a diferentes temperaturas. É possível notar que a densidade do biodiesel é maior do que as dos diesel S10, S500 e S180. A densidade foi correlacionada com a composição para as diferentes temperaturas por meio da seguinte equação empírica:

$$\rho / \text{g}\cdot\text{cm}^{-3} = aw + b, \quad (1)$$

onde ρ representa a densidade, a e b são os coeficientes da Equação 1 e w representa a fração volumétrica. As constantes a e b e os coeficientes de regressão, R^2 , são apresentados na Tabela 15.

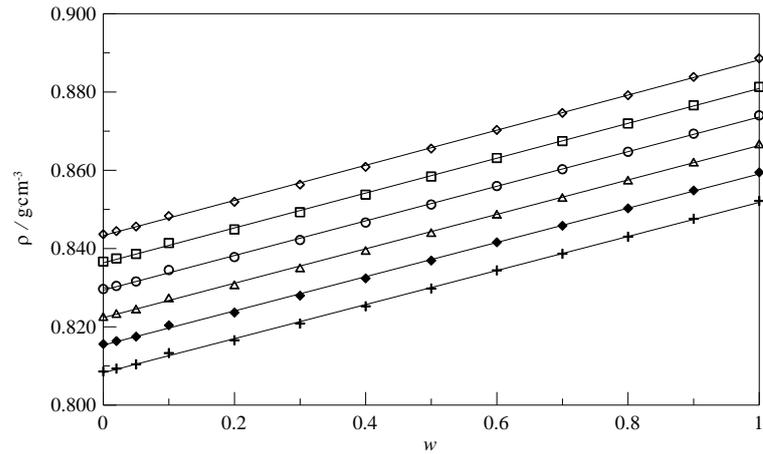


Figura 13 - Valores da densidade, em função da fração volumétrica de biodiesel, para o sistema biodiesel + diesel S10 a diferentes temperaturas: ◇, 10 °C; □, 20 °C; ○, 30 °C; △, 40 °C; ◆, 50 °C; +, 60 °C. (—) Equação (1). Fonte: Autor.

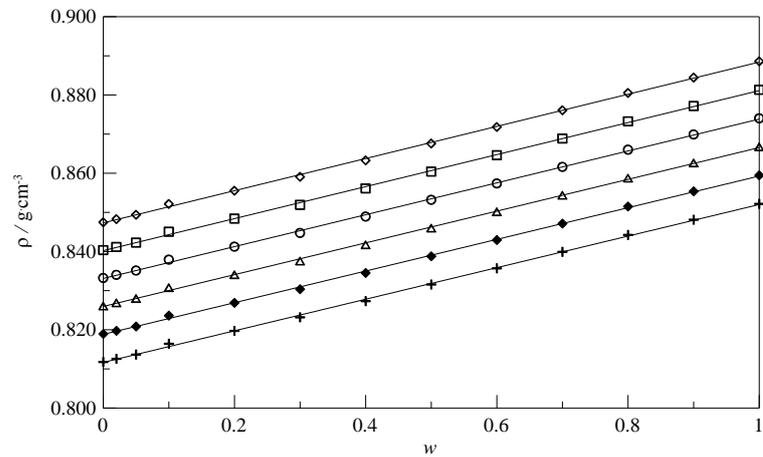


Figura 14 - Valores da densidade, em função da fração volumétrica de biodiesel, para o sistema biodiesel + diesel S500 a diferentes temperaturas: ◇, 10 °C; □, 20 °C; ○, 30 °C; △, 40 °C; ◆, 50 °C; +, 60 °C. (—) Equação (1). Fonte: Autor.

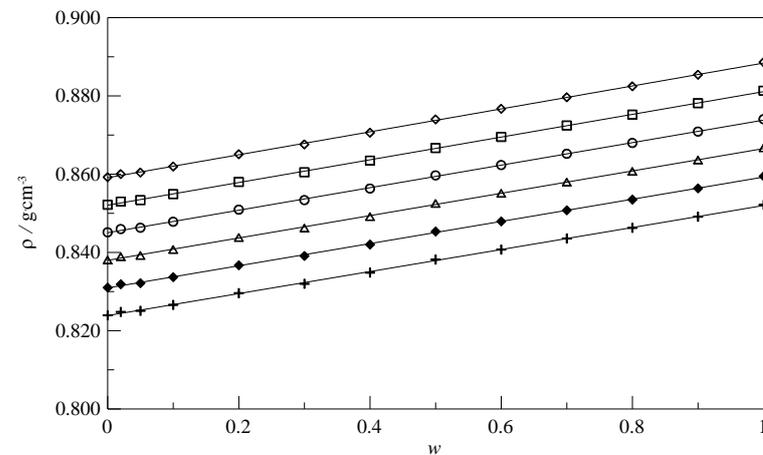


Figura 15 - Valores da densidade, em função da fração volumétrica de biodiesel, para o sistema biodiesel + diesel S1800 a diferentes temperaturas: ◇, 10 °C; □, 20 °C; ○, 30 °C; △, 40 °C; ◆, 50 °C; +, 60 °C. (—) Equação (1). Fonte: Autor.

Tabela 15 - Parâmetros da Equação 1 para os sistemas biodiesel + diesel a diferentes temperaturas.

Temperatura / °C	Regressão linear: $\rho / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3} = aw + b$		
	$a / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$b / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	R^2
Biodiesel + diesel S10			
10 °C	0,0448678778	0,8433316093	0,999617
20 °C	0,0445470031	0,8363585533	0,999563
30 °C	0,0442403540	0,8293734022	0,999494
40 °C	0,0439943287	0,8223411222	0,999509
50 °C	0,0437395110	0,8153214557	0,999476
60 °C	0,0435148378	0,8082790272	0,999492
Biodiesel + diesel S500			
10 °C	0,0410814560	0,8473233300	0,999454
20 °C	0,0408960478	0,8402229241	0,999435
30 °C	0,0407301210	0,8331040174	0,999428
40 °C	0,0405878984	0,8259664158	0,999418
50 °C	0,0404617973	0,8188219068	0,999409
60 °C	0,0403454991	0,8116634285	0,999419
Biodiesel + diesel S1800			
10 °C	0,0292937931	0,8591035825	0,999669
20 °C	0,0290212109	0,8520680658	0,999687
30 °C	0,0287824669	0,8450375123	0,999623
40 °C	0,0285536621	0,8379869309	0,999591
50 °C	0,0283332302	0,8309321468	0,999576
60 °C	0,0281249103	0,8238687115	0,999590

Fonte: Autor

As Figuras 16-18 mostram os valores das viscosidades dos sistemas estudados, em função da composição, a diferentes temperaturas. É possível notar que a viscosidade do biodiesel é maior do que as dos diesel S10, S500 e S1800. A viscosidade foi correlacionada com a composição para as diferentes temperaturas por meio da seguinte equação empírica:

$$v / \text{mm} \cdot \text{s}^{-2} = a \ln w + b, \quad (2)$$

onde v representa a viscosidade cinemática, a e b são os coeficientes da Equação 2 e w representa a fração volumétrica. As constantes a e b e os coeficientes de regressão, R^2 , são apresentados na Tabela 16.

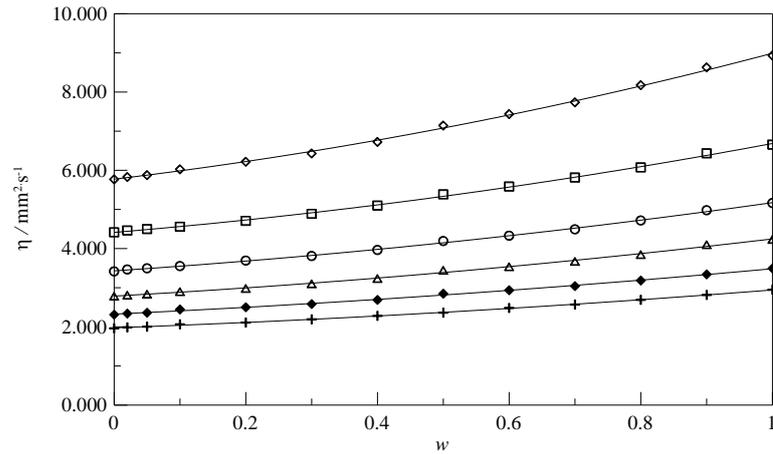


Figura 16 - Valores da viscosidade cinemática, em função da fração volumétrica de biodiesel, para o sistema biodiesel + diesel S10 a diferentes temperaturas: ◇, 10 °C; □, 20 °C; ○, 30 °C; △, 40 °C; ◆, 50 °C; +, 60 °C. (—) Equação (2). Fonte: Autor.

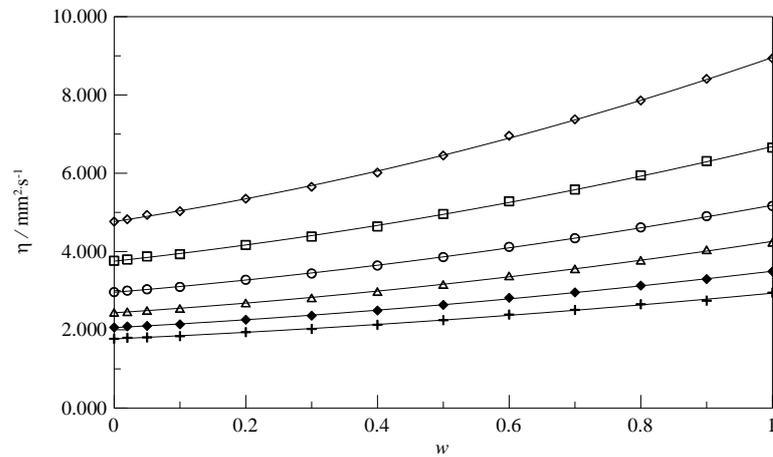


Figura 17 - Valores da viscosidade cinemática, em função da fração volumétrica de biodiesel, para o sistema biodiesel + diesel S500 a diferentes temperaturas: ◇, 10 °C; □, 20 °C; ○, 30 °C; △, 40 °C; ◆, 50 °C; +, 60 °C. (—) Equação (2). Fonte: Autor.

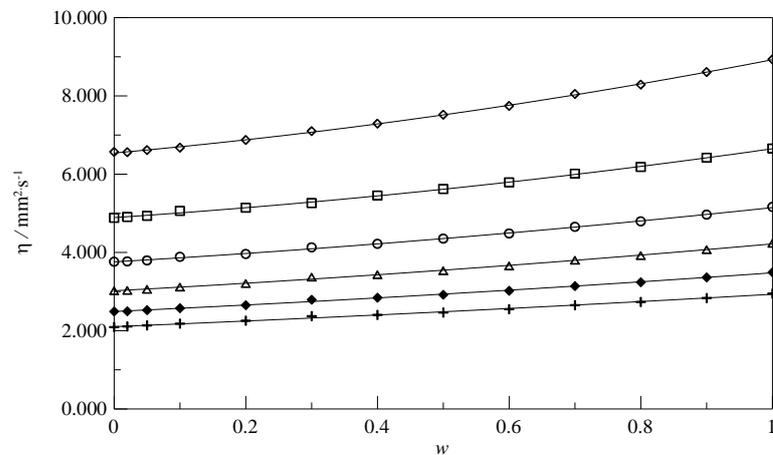


Figura 18 - Valores da viscosidade cinemática, em função da fração volumétrica de biodiesel, para o sistema biodiesel + diesel S1800 a diferentes temperaturas: ◇, 10 °C; □, 20 °C; ○, 30 °C; △, 40 °C; ◆, 50 °C; +, 60 °C. (—) Equação (2). Fonte: Autor.

Tabela 16 - Parâmetros da regressão da viscosidade para o sistema biodiesel + diesel a diferentes temperaturas.

Temperatura / °C	Regressão linear: $\eta / \text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1} = a \ln w + b$		
	$a / \text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$b / \text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	R^2
Biodiesel + diesel S10			
10 °C	0,4413290600	1,7445604104	0,996466
20 °C	0,4134141921	1,4756975081	0,996262
30 °C	0,4090607462	1,2251470895	0,997130
40 °C	0,4203129913	1,0168301685	0,996011
50 °C	0,4032840733	0,8381880608	0,997074
60 °C	0,3968600497	0,6724954491	0,997076
Biodiesel + diesel S500			
10 °C	0,6326799255	1,5543997640	0,998927
20 °C	0,5777869277	1,3157131453	0,998706
30 °C	0,5611449126	1,0770641752	0,998781
40 °C	0,5596037142	0,8797988554	0,997892
50 °C	0,5318318497	0,7117944771	0,998083
60 °C	0,5070381579	0,5626230841	0,997833
Biodiesel + diesel S1800			
10 °C	0,3082788530	1,8703063035	0,996188
20 °C	0,3049924941	1,5800683609	0,995872
30 °C	0,3125859003	1,3194974006	0,997750
40 °C	0,3335886032	1,1022056083	0,997903
50 °C	0,3338186450	0,9113089404	0,997620
60 °C	0,3324813990	0,7435821900	0,996040

Fonte: Autor

As Figuras 19-21 mostram os valores das velocidades do som dos sistemas estudados, em função da composição, a diferentes temperaturas. É possível notar que a velocidade do som do biodiesel é maior do que as dos diesel S10, S500 e S1800. A velocidade do som foi correlacionada com a composição para as diferentes temperaturas utilizando a seguinte equação empírica:

$$c / \text{m} \cdot \text{s}^{-1} = aw + b, (3)$$

onde c representa a velocidade do som, a e b são os coeficientes da Equação 3 e w representa a fração volumétrica. As constantes a e b e os coeficientes de regressão, R^2 , são apresentados na Tabela 17.

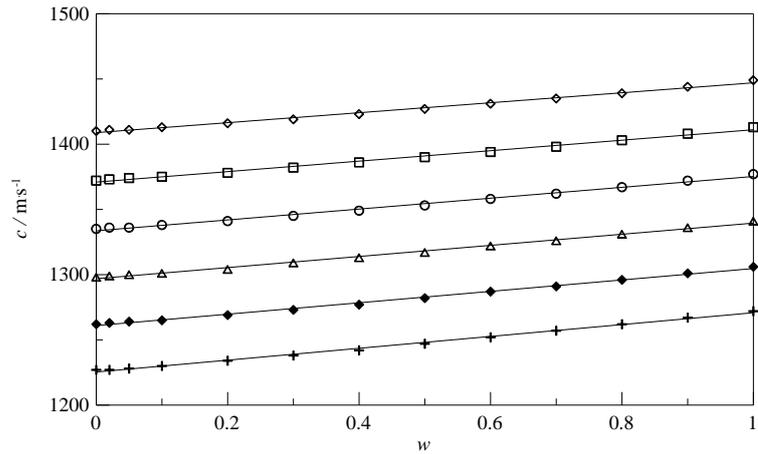


Figura 19 - Valores da velocidade do som, em função da fração volumétrica de biodiesel, para o sistema biodiesel + diesel S10 a diferentes temperaturas: ◇, 10 °C; □, 20 °C; ○, 30 °C; △, 40 °C; ◆, 50 °C; +, 60 °C. (—) Equação (3). Fonte: Autor.

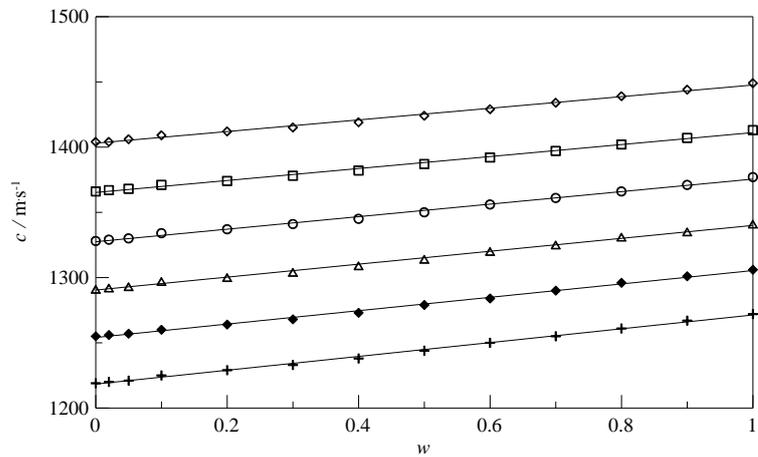


Figura 20 - Valores da velocidade do som, em função da fração volumétrica de biodiesel, para o sistema biodiesel + diesel S500 a diferentes temperaturas: ◇, 10 °C; □, 20 °C; ○, 30 °C; △, 40 °C; ◆, 50 °C; +, 60 °C. (—) Equação (3). Fonte: Autor.

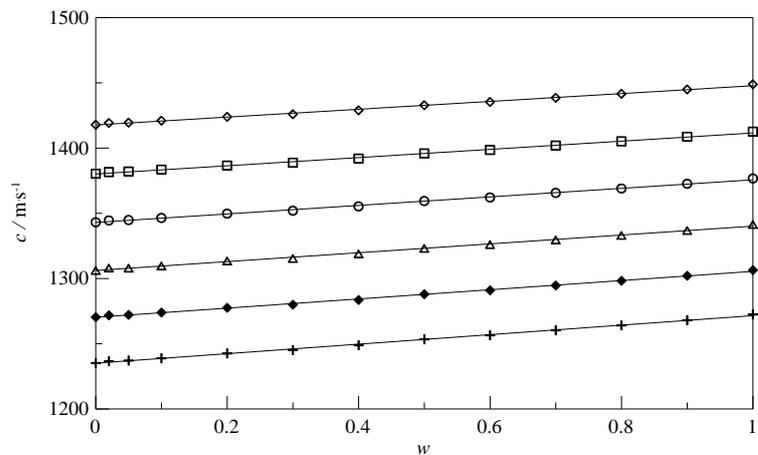


Figura 21 - Valores da velocidade do som, em função da fração volumétrica de biodiesel, para o sistema biodiesel + diesel S1800 a diferentes temperaturas: ◇, 10 °C; □, 20 °C; ○, 30 °C; △, 40 °C; ◆, 50 °C; +, 60 °C. (—) Equação (3). Fonte: Autor.

Tabela 17 - Parâmetros da regressão linear da velocidade do som para o sistema biodiesel + diesel a diferentes temperaturas.

Temperatura / °C	Regressão linear: $c / \text{m} \cdot \text{s}^{-1} = aw + b$		
	$a / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$b / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	R^2
Biodiesel + diesel S10			
10 °C	38,39458527	1408,716320	0,993501
20 °C	39,88653818	1371,014768	0,994373
30 °C	41,34712634	1333,702039	0,994996
40 °C	42,95655937	1296,768613	0,995657
50 °C	44,19279959	1260,698162	0,996004
60 °C	45,51477747	1225,437130	0,996329
Biodiesel + diesel S500			
10 °C	44,51277882	1403,006448	0,996041
20 °C	46,26149884	1365,075650	0,996626
30 °C	48,00062950	1327,495884	0,996879
40 °C	49,82074512	1290,289112	0,996418
50 °C	51,39186269	1253,962871	0,997396
60 °C	53,02726777	1218,397548	0,997671
Biodiesel + diesel S1800			
10 °C	30,04688189	1417,742221	0,997076
20 °C	31,44273664	1380,151074	0,997645
30 °C	32,70990620	1342,975063	0,997714
40 °C	33,97182471	1306,181303	0,996697
50 °C	35,23625071	1270,260314	0,998067
60 °C	36,44169272	1235,109982	0,998310

Fonte: Autor

A Figura 22 mostra os valores do calor de combustão dos sistemas estudados, em função da composição, a 25 °C. É possível notar que o calor de combustão do biodiesel é menor do que as dos diesel S10, S500 e S1800, significando que para mesma quantidade de energia será necessário uma quantidade maior de biodiesel. O poder calorífico foi correlacionado com a composição por meio da seguinte equação empírica:

$$Q / \text{J} \cdot \text{g}^{-1} = \sum_{j=0}^2 A_j w^j, \quad (4)$$

onde Q representa o poder calorífico, A_j são os coeficientes da Equação 4 e w representa a fração volumétrica. A Tabela 18 apresenta os coeficientes A_j e os coeficientes de regressão, R^2 .

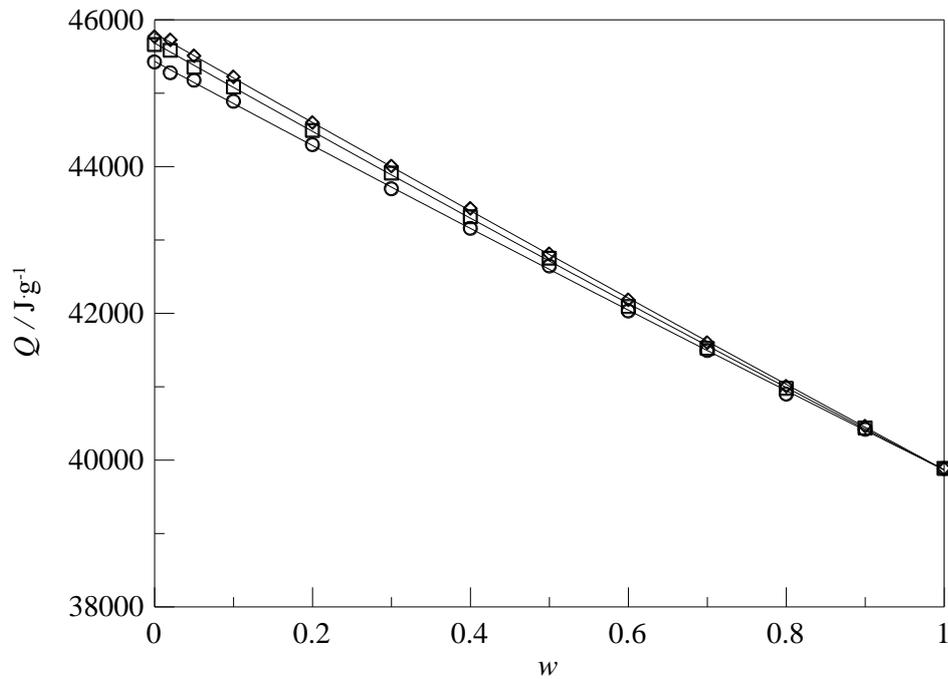


Figura 22 – Valores do calor de combustão, em função da fração volumétrica de biodiesel, para os sistemas estudados a 25 °C: \diamond , S10; \square , S500; \circ , S1800. (—), Equação 4. Fonte: Autor

Tabela 18 - Parâmetros da regressão do calor de combustão para o sistema biodiesel + diesel a 25 °C.

Sistema	Regressão; $Q/J \cdot g^{-1} = \sum_{j=0}^2 A_j w^j$			
	A_0	A_1	A_2	R^2
Biodiesel + diesel S10	45816,12547	-6109,928748	162,5924875	0,999948
Biodiesel + diesel S500	45682,21357	-6060,199388	243,8610469	0,999877
Biodiesel + diesel S1800	45434,19768	-5774,876341	207,9980758	0,999902

Fonte: Autor

4.2 Discussão dos resultados experimentais

Os resultados experimentais de densidade, viscosidade, velocidade do som e calor de combustão apresentaram comportamento semelhante aos estudos encontrados na literatura.

Foram comparados os resultados das propriedades termodinâmicas estudadas neste trabalho com as especificações técnicas contidas na resolução nº 65 de 9/12/2011 da ANP. A tabela 19 apresenta os limites para os valores da densidade estabelecidos pela norma a 20 °C.

Tabela 19 - Especificações da densidade para o óleo diesel de uso rodoviário - ANP

Tipos de Diesel	$\rho / \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$		
	S10	S500	S1800
Mínimo	0,8200	0,8200	0,8200
Máximo	0,8500	0,8650	0,8800

Fonte: Autor

Para o sistema contendo biodiesel S10, os valores de densidade a 20 °C que atenderiam a resolução do ANP seriam aqueles encontrados entre o B0 (0,83665 g·cm⁻³) e a mistura B30 (0,84926 g·cm⁻³).

Já para o sistema contendo o biodiesel S500, os valores de densidade a 20 °C que atenderiam a resolução do ANP seriam aqueles encontrados entre o B0 (0,840343 g·cm⁻³) e a mistura B60 (0,864593 g·cm⁻³).

Finalmente, para o sistema contendo o biodiesel S1800, os valores de densidade a 20 °C que atenderiam a resolução do ANP seriam aqueles encontrados entre o B0 (0,852174 g·cm⁻³) e a mistura B90 (0,878124 g·cm⁻³).

A tabela 20 apresenta os limites para os valores da viscosidade estabelecidos pela resolução nº 65 da ANP.

Tabela 20 - Especificações da viscosidade para o óleo diesel de uso rodoviário - ANP

Tipos de Diesel	$\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$		
	S10	S500	S1800
Mínimo	2,00	2,00	2,00
Máximo	4, 50	5,00	5,00

Fonte: Autor

Analisando a viscosidade na temperatura de 40 °C, que é a temperatura citada na norma, os três tipos de diesel encontram-se dentro dos limites estabelecidos pela norma. Portanto, para qualquer composição utilizada desses diesel com o biodiesel, os valores da viscosidade atenderiam a legislação brasileira

A legislação brasileira não apresenta valores limites para a velocidade do som e para o poder calorífico.

5 CONCLUSÕES

No presente estudo foram realizadas medidas experimentais de densidade, viscosidade, velocidade do som e calor de combustão de misturas de biodiesel com três tipos diferentes de diesel (S10, S500 e S1800), em toda faixa de composição, na faixa de temperatura entre 10 e 60 °C, com intervalos de 10 °C. Os resultados obtidos em todas as análises deste trabalho estão em concordância com os estudos encontrados na literatura.

Foi possível concluir que, os resultados de densidade encontram-se dentro de limites estabelecidos em normas brasileira até as misturas B30, B60 e B90, respectivamente, para os diesel S10, S500 e S1800. Para a viscosidade todas as misturas de biodiesel com os diesel estudados atendem a legislação brasileira em qualquer percentual de biodiesel no diesel. Portanto, sob o ponto de vista dessas duas propriedades, mesmo aumentando a concentração de biodiesel no diesel, hoje limitado por Lei a 5%, os valores da densidade e da viscosidade cinemática atenderiam os valores limites estabelecidos por normas brasileiras.

Os valores da densidade e da viscosidade cinemática aumentaram com o aumento da concentração de forma linear e não linear, respectivamente. Para a velocidade do som, o comportamento dessa propriedade com a concentração do biodiesel e com a temperatura foi semelhante ao da densidade.

Os resultados experimentais mostraram que o calor de combustão do biodiesel é 14,7% 14,5% e 13,9% menor do que o diesel fóssil, respectivamente, em comparação com o diesel S10, S500 e S1800. A adição de biodiesel no diesel resultou em uma redução linear do calor de combustão das blendas. Como a legislação vigente no Brasil normatiza a utilização de 5% de biodiesel, esta porcentagem não ocasionou uma variação significativa no calor de combustão da mistura. Para a mistura B5, os resultados demonstraram que a diferença do calor de combustão é de 0,6%; 0,7% e 0,6% menor do que o diesel fóssil, em comparação, respectivamente, com os diesel S10, S500 e S1800.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como continuidade do presente estudo, sugere-se para trabalhos futuros:

- a) Estudar outras propriedades dos sistemas aqui estudados, tais como: lubricidade, ponto de entupimento e ponto de fulgor de blendas;
- b) Estudar o efeito da substituição do biodiesel de origem vegetal (base de óleo de soja) por um biodiesel produzido usando gordura animal nas propriedades estudadas no presente trabalho;
- c) Estudar o efeito da substituição do biodiesel de óleo de soja por um biodiesel produzido a partir de outras oleaginosas nas propriedades estudadas no presente trabalho;
- d) Realizar testes dinâmicos das misturas estudadas com o objetivo de relacionar potência de motor com emissões.
- e) Avaliar os efeitos das misturas estudadas em motores com diferentes tecnologias, como EGR e SCR, por exemplo.

REFERÊNCIAS

ABOLLE, A.; LOUKOU, K.; HENRI, P. The density and cloud point of diesel oil mixtures with the straight vegetable oils (SVO): Palm, cabbage palm, cotton, groundnut, copra and sunflower. **Biomass and Bioenergy**, França, v. 33, p. 1653-1659, Dez, 2009a.

_____. The viscosity of diesel oil and mixtures with straight vegetable oils: Palm, cabbage palm, cotton, groundnut, copra and sunflower. **Biomass and Bioenergy**, França, v. 33, p. 1116-1121, Set, 2009b.

ANDRADE, R. D. A. et al. Heat of combustion of biofuels mixed with fossil diesel oil. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, Brasil, v. 106, p. 469-474, Nov, 2011.

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO - ANP, Gás Natural e Biocombustíveis – MME-BR **O biodiesel obrigatório: A ANP e o biodiesel**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/>>. Acesso em: 20 Jun. 2013.

ALPTEKIN, E.; CANAKCI, M. Characterization of the key fuel properties of methyl ester-diesel fuel blends. **Fuel**, Turquia, v. 88, 75-80, Jan, 2009.

_____. Determination of the density and the viscosities of biodiesel-diesel fuel blends. **Renewable Energy**, Turquia, v. 33, 2623-2630, Dez, 2008.

BARABÁS, I.; TODORUT, I. A. Predicting the temperature dependent viscosity of biodiesel-diesel-bioethanol blends. **Energy & Fuels**, Romênia, v. 25, 5767-5774, Nov, 2011.

BAROUTIAN, S. et al. Densities and viscosities of binary blends of methyl esters + ethyl esters and ternary blends of methyl esters + ethyl esters + diesel fuel from T = (293.15 to 358.15) K. **The Journal of Chemical & Engineering Data**, Nova Zelândia, v. 57, p. 1387-1395, Abr, 2012.

BAROUTIAN, S. et al. Viscosities and densities of binary and ternary blends of palm oil + palm biodiesel + diesel fuel at different temperatures. **The Journal of Chemical & Engineering Data**, Nova Zelândia, v. 55, p. 504-507, Nov, 2010.

BIODIESELBR – **As Estatísticas do Setor de Biodiesel**. Disponível em: <<http://www.biodieselbr.com>>. Acesso em: 22 Jun. 2013.

CHHETRI, A. B.; WATTS, K. C. Densities of canola, jatropha and soapnut biodiesel at elevated temperatures and pressures. **Fuel**, Canada, v. 99, p. 210-216, Set, 2012.

DUAILIBE A. et al. **Combustíveis no Brasil: desafios e perspectivas**. Rio de Janeiro: Synergia: Centro de Estudos de Energia e Desenvolvimento (CEEND), 2012.

DZIDA, M.; PRUSAKIEWICZ, P. The effect of temperature and pressure on the physicochemical properties of petroleum diesel oil and biodiesel fuel. **Fuel**, Polônia, v. 87, Ago, p. 1941-1948, 2008.

FREITAS, S. V. D. et al. Measurement and prediction of the speed of sound of biodiesel fuels. **Fuel**, Portugal, v. 103, p. 1018-1022, Jan, 2013.

GAZZONI, D. L. **Historia e Biodiesel**. Disponível em: <<http://www.biodieselbr.com/biodiesel/historia/biodiesel-historia.htm>>. Acesso em: 30 Jun. 2013.

JIMENEZ, E. T. et al. Physical and chemical properties of ethanol–diesel fuel blends. **Fuel**, Eslovênia, v. 90, p. 795-802, Fev, 2011.

KEGL, B. Numerical analysis of injection characteristics using biodiesel fuel. **Fuel**, Eslovênia, v. 85, p. 2377-2387, Dez, 2006.

KNOTHE, G.; GERPEN, J. H. V.; KRAHL, J. **Manual de Biodiesel**. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.

KNOTHE, G.; GERPEN, J. H. V.; KRAHL, J. **The Biodiesel Handbook**. Champaign: AOCS, 2005.

KUMAR, S. et al. Densities and speeds of sound of jatropha curcas biodiesel + (C₄–C₅) alkan-1-ol binary mixtures. **The Journal of Chemical & Engineering Data**, Índia, v. 57, p. 2236-2242, Jul, 2012.

LAPUERTA, M. et al. Stability, lubricity, viscosity, and cold-flow properties of alcohol-diesel blends. **Energy & Fuels**, Espanha, v. 24, 4497–4502, Jul, 2010.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME. **Matriz Energética**. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/sobre/economia/energia/matriz-energetica/biocombustiveis>>. Acesso em: 03 Jul. 2013.

MEJIA, J. D.; SALGADO, N.; ORREGO C. E. Effect of blends of diesel and palm-castor biodiesels on viscosity, cloud point and flash point. **Industrial Crops and Products**, Colômbia, v. 43, p. 791-797, Mai, 2013.

MORADI, G. R.; KARAMI, B.; MOHADESI, M. Densities and kinematic viscosities in biodiesel–diesel blends at various temperatures. **The Journal of Chemical & Engineering Data**, Irã, v. 58, p. 99-105, Jan, 2013.

MURPHY, F. et al. The evaluation of viscosity and density of blends of Cyn-diesel pyrolysis fuel with conventional diesel fuel in relation to compliance with fuel specifications EN 590:2009. **Fuel**, Irlanda, v. 91, p. 112-118, Jan, 2012.

NIKOLIC, B. D. et al. S. Determining the speed of sound, density and bulk modulus of rapeseed oil, biodiesel, and diesel fuel. **Thermal Science**, Eslovênia, v. 16, p. 505-514, 2012.

NITA, I.; GEACAI, S.; IULIAN, O. Measurements and correlations of physico-chemical properties to composition of pseudo-binary mixtures with biodiesel. **Renewable Energy**, Romênia, v. 36, p. 3417-3423, Dez, 2011.

NOGUEIRA, C. A. et al. Viscosities and densities of ternary blends of diesel + soybean biodiesel + soybean oil. **The Journal of Chemical & Engineering Data**, Brasil, v. 57, p. 3233-3241, Nov, 2012.

NOGUEIRA, C. A. et al. Densities and viscosities of binary mixtures of babassu biodiesel + cotton seed or soybean biodiesel at different temperatures. **The Journal of Chemical & Engineering Data**, Brasil, v. 55, p. 5305-5310, Nov, 2010.

PARENTE, E. J. S. **Biodiesel: Uma aventura tecnológica num país engraçado**. Fortaleza: TecBio, 2003.

PARENTE, R. C. et al. Excess volumes and deviations of viscosities of binary blends of sunflower biodiesel + diesel and fish oil biodiesel + diesel at various temperatures **The Journal of Chemical & Engineering Data**, Brasil, v. 56, p. 3061-3067, Jun, 2011.

PARKASH, S. **Petroleum fuels manufacturing handbook**. New York: The McGraw-Hill Companies, 2010. 423 p.

SANTOS, R. O. et al. Optimization of the transesterification reaction in biodiesel production and determination of density and viscosity of biodiesel/diesel blends at several temperatures. **The Journal of Chemical & Engineering Data**, Brasil, v. 56, p. 2030-2038, Mai, 2011.

SOM, S. et al. A comparison of injector flow and spray characteristics of biodiesel with petrodiesel. **Fuel**, Estados Unidos, v. 89, p. 4014-4024, Dez, 2010.

TAT, M. E. et al. The speed of sound and isentropic bulk modulus of biodiesel at 21°C from atmospheric pressure to 35 MPa. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, Estados Unidos, v. 77, p. 285-289, Mar, 2000.

TAT, M. E. et al. Effect of temperature and pressure on the speed of sound and isentropic bulk modulus of mixtures of biodiesel and diesel fuel. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, Estados Unidos, v. 80, p. 1127-1130, Nov, 2003.

TATE, R. E. et. al. The densities of three biodiesel fuels at temperatures up to 300 °C. **Fuel**, Canadá, v. 85, p. 1004-1009, Mai, 2006.

TEIXEIRA, L. S. G. et al. Characterization of beef tallow biodiesel and their mixtures with soybean biodiesel and mineral diesel fuel. **Biomass and bioenergy**, Brasil, v. 34, p. 438-441, Abr, 2010.

THOMAS, T. P.; BIRNEY D. M.; AULD D. L. Viscosity reduction of castor oil esters by the addition of diesel, safflower oil esters and additives. **Industrial Crops and Products**, Estados Unidos, v. 36, p. 267-270, Mar, 2012.

VERDUZCO, L. F. R. Density and viscosity of biodiesel as a function of temperature: Empirical models. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, México, v. 19, p. 652-665, Mar, 2013.

VERDUZCO, L. F. R.; RODRÍGUEZ, J. E. R.; JACOB, A. D. R. J. Predicting cetane number, kinematic viscosity, density and higher heating value of biodiesel from its fatty acid methyl ester composition. **Fuel**, México, v. 91, p. 102-111, Jan, 2012.

VERDUZCO, L. F. R.: et. al. Prediction of the density and viscosity in biodiesel blends at various temperatures. **Fuel**, México, v. 90, p. 1751-1761, Mai, 2011.