

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Pablo Carmélio Cardoso de Albuquerque

**DESEMPENHO DE UM CAMINHÃO SEMI-PESADO OPERANDO COM  
MISTURAS ÓLEO DIESEL-BIODIESEL-ETANOL**

Belo Horizonte  
2012

Pablo Carmélio Cardoso de Albuquerque

**DESEMPENHO DE UM CAMINHÃO SEMI-PESADO OPERANDO COM  
MISTURAS ÓLEO DIESEL-BIODIESEL-ETANOL**

Projeto de dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. José Ricardo Sodré, Ph.D.

Belo Horizonte  
2012

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

A345d Albuquerque, Pablo Carmélio Cardoso de  
Desempenho de um caminhão semi-pesado operando com misturas óleo diesel-  
biodiesel-etanol / Pablo Carmélio Cardoso de Albuquerque. Belo Horizonte,  
2012.  
107f.: il.

Orientador: José Ricardo Sodré  
Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.  
Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica.

1. Álcool. 2. Biodiesel. 3. Caminhões. 4. Motor diesel. 5. Desempenho. I.  
Sodré, José Ricardo. II. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

SIB PUC MINAS

CDU: 662.6

Pablo Carmélio Cardoso de Albuquerque

**DESEMPENHO DE UM CAMINHÃO SEMI-PESADO OPERANDO COM  
MISTURAS ÓLEO DIESEL-BIODIESEL-ETANOL**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

---

José Ricardo Ricardo Sodré, Ph.D. (Orientador) – PUC Minas

---

Sérgio de Moraes Hanriot, D.Sc. (Examinador Interno) – PUC Minas

---

Prof. Carlos Rodrigues Pereira Belchior, D.Sc. (Examinador Externo) – UFRJ

---

Prof. José Eduardo Mautone Barros, D.Sc (Examinador Externo) – UFMG

Belo Horizonte, 23 de março de 2012.

***Aos meus pais,  
pela dedicação e confiança no meu trabalho.***

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por permitir mais esta conquista.

À Iveco Latin America pela oportunidade de aperfeiçoamento e concessão do tempo dedicado para elaboração deste, principalmente aos engenheiros Márcio Santos, Daniel Maia e Cássio Brochado.

Ao Dr. Eng. Marco Liccardo, que com espírito empreendedor acreditou e conferiu subsídios para realização dos testes. Ao Eng. Evandro Carlos Odlevak pela ajuda e incentivo na realização das provas.

Ao Professor José Ricardo Sodré pela confiança, incentivo, motivação e orientação para realização deste e outros trabalhos.

Aos colegas do departamento de Validação do Produto da IVECO, bem como aos colegas da Engenharia do Cliente.

À PUC Minas pela oportunidade de estudo desde a graduação até a conclusão deste. Aos funcionários e professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, em especial à Valéria. Aos colegas de mestrado, em especial à Kamilla Ribeiro, pelo apoio e dedicação dispensados.

Ao Governo Federal, em especial a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), por acreditar e confiar na realização deste trabalho através da concessão da bolsa de estudos.

A todos familiares, colegas e amigos, pela paciência e colaboração espontânea para realização deste trabalho, deixo a minha sincera gratidão.

## RESUMO

O desempenho em estrada de um caminhão comercial meio-pesado com motor diesel de injeção direta e sistema de gerenciamento eletrônico foi investigado. Os parâmetros analisados foram: aceleração a partir do repouso, retomada de aceleração a partir de uma velocidade determinada, velocidade máxima e consumo de combustível. Foi utilizado óleo diesel metropolitano regular com 5% em volume de biodiesel (B5), como combustível base, e misturas de B5 com 2% em volume de etanol (B5E2) e 4% em volume de etanol (B5E4) sem a adição de agente emulsificante. A estratégia original da calibração da unidade de controle do motor (central eletrônica) foi mantida, para verificar a real influência das misturas testadas nos parâmetros analisados. Os testes de aceleração e velocidade máxima foram conduzidos embasados na norma SAE J1491, enquanto os testes de consumo de combustível empregaram a metodologia *back-to-back*, de acordo com o procedimento SAE J1321. Ao serem utilizadas misturas com concentração crescente de etanol, foram observados menores tempos de aceleração e retomada. Por possuir um menor poder calorífico, as misturas com etanol apresentaram aumento de consumo de combustível, quando comparadas com B5.

Palavras-chave: Etanol. Biodiesel. Caminhões. Desempenho. Motor diesel.

## ABSTRACT

The road performance of a commercial medium duty truck with direct injection diesel engine and electronic control system was investigated. The analyzed parameters were: acceleration from standstill, acceleration from a specific speed, maximum speed and fuel consumption. Regular N. 2 diesel oil with 5% v/v of biodiesel (B5), used as baseline, and blends of B5 with 2% v/v of ethanol (B5E2) and with 4% v/v of ethanol (B5E4), without emulsifying agent, were employed as fuels. The original calibration strategy of the engine electronic control unit was unmodified in order to verify the real influence of the fuel blends tested on the analyzed parameters. The acceleration and maximum speed tests were conducted based on SAE J 1491 procedure, while the fuel consumption tests used the back-to-back methodology described by SAE J 1321 standard. It was noticed decreasing acceleration times with the use of fuel blends with increasing ethanol concentration. Due to its lower heating value, the ethanol blends presented increased fuel consumption, when compared with diesel oil.

Keywords: Ethanol. Biodiesel. Trucks. Performance. Diesel Engine.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução da produção de biodiesel no Brasil.....	29
Figura 2 – Distribuição das oleaginosas no Brasil por região.....	30
Figura 3 – Produção de biodiesel na Alemanha.....	31
Figura 4 – Estados norte-americanos que concedem incentivos ao uso de biodiesel. .....	32
Figura 5 – Fábricas instaladas e em instalação nos EUA. ....	32
Figura 6 – Evolução da produção de biodiesel nos EUA. ....	33
Figura 7 – Evolução da produção de etanol no Brasil. ....	33
Figura 8 – Consumo de etanol e vendas de veículos bi-combustíveis (flex) no Brasil. .....	34
Figura 9 – Metas estabelecidas para consumo de etanol e biodiesel nos EUA. ....	34
Figura 10 – Dinamômetro do tipo “Freio de Prony”. ....	46
Figura 11 – Curvas características de um motor em plena carga. ....	47
Figura 12 – Curvas de consumo específico de um motor em cargas parciais. ....	48
Figura 13 – Percentual de elevação ( <i>grade</i> ) e equivalência em ângulo.....	50
Figura 14 – Resistência ao movimento. ....	51
Figura 15 – Quadro: efeitos da altitude na perda de potência.....	52
Figura 16 – Veículo avaliado. ....	61
Figura 17 – Quadro: detalhes do motor.....	61
Figura 18 – Curva do motor instalado no caminhão utilizado nos testes. ....	62
Figura 19 – Quadro: relações de caixa de marcha.....	62
Figura 20 – Anemômetro, e termohigrômetro Lutron LM-8010 (a), sistema de orientação via satélite – Racelogic VBOX II SX (b) e medidor de vazão de combustível Swissline AIC-6008 (c). ....	63
Figura 21 – HBM MGCplus utilizado para leitura da rotação e temperatura na exaustão.....	64
Figura 22 – Visão geral da instalação do termopar na exaustão do motor (a) e detalhe da instalação (b). ....	64
Figura 23 – Local de realização das provas: Rod. MG 674, km 24 – Lagoa dos Patos, MG. ....	67
Figura 24 – Triângulo Belo Horizonte-Rio de Janeiro-São Paulo. ....	68
Figura 25 – Variação da velocidade de aceleração de 0 a 80 km/h com o tempo. ...	70

Figura 26 – Variação da distância percorrida com o tempo durante a aceleração e 0 a 80 km/h.....	71
Figura 27 – Variação da velocidade de retomada de 40 a 80 km/h com o tempo.....	71
Figura 28 – Variação da distância percorrida com o tempo durante a retomada de 40 a 80 km/h.....	72
Figura 29 – Tempos de aceleração de 0 a 80 km/h e retomada de 40 a 80 km/h.....	72
Figura 30 – Distâncias percorridas durante a aceleração de 0 a 80 km/h e retomada de 40 a 80 km/h.....	73
Figura 31 – Quadro: redução do tempo e distância nos testes de aceleração e retomada. ....	73
Figura 32 – Variação da temperatura de exaustão com o tempo durante a aceleração de 0 a 80 km/h. ....	74
Figura 33 – Variação da temperatura de exaustão com o tempo durante a retomada de 40 a 80 km/h.....	75
Figura 34 – Variação da velocidade de rotação do motor com o tempo durante a aceleração de 0 a 80 km/h. ....	75
Figura 35 – Variação da velocidade de rotação do motor com o tempo durante a retomada de 40 80 km/h. ....	76
Figura 36 – Consumo de combustível das misturas contendo 2% e 4% etanol (B5E2 e B5E4) em relação à mistura de 5% de biodiesel em óleo diesel (B5). ....	77
Figura 37 – Quadro: Caracterização do combustível B5. ....	104
Figura 38 – Quadro: caracterização da mistura B5E2.....	105
Figura 39 – Quadro: caracterização da mistura B5E4.....	106
Figura 40 – Quadro: caracterização do etanol. ....	107

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores obtidos de velocidade máxima. ....	77
---	----

## LISTA DE SÍMBOLOS

- % v/v – Partes por cento em volume
- (A / F) – Relação ar/combustível (adimensional)
- (A / F)<sub>S</sub> – Relação ar/combustível estequiométrica (adimensional)
- $F_W$  – Resistência total ao movimento (N)
- $F_{Ro}$  – Resistência ao rolamento (N)
- $F_L$  – Arraste aerodinâmico (N)
- $F_{St}$  – Resistência ao *grade* (subidas) (N)
- $P_W$  – Potência de resistência ao rolamento (kW)
- $v_v$  – Velocidade do veículo (km/h)
- $f$  – Coeficiente de resistência ao rolamento (adimensional)
- $m$  – Massa do veículo (kg)
- $g$  – Aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>)
- $Q$  – Densidade do ar (kg/m<sup>3</sup>)
- $c$  – Coeficiente de arrasto, adimensional
- $A$  – Maior secção transversal do veículo (m<sup>2</sup>)
- $v$  – Velocidade do veículo (m/s)
- $v_0$  – Velocidade de proa (m/s)
- $P_L$  – Potência de arraste aerodinâmico (kW)
- $\alpha$  – Ângulo de inclinação da pista (°)
- $P_{St}$  – Potência de resistência à subida (kW)
- $p$  – Percentual de inclinação da rodovia (*grade*)
- $h$  – Altura da distância projetada (m)
- $l$  – Distância percorrida (m)
- $\lambda$  – Fator Lambda (adimensional)
- $\phi$  – Razão de equivalência combustível/ar

## LISTA DE ABREVIATURAS

APMS – Antes do ponto morto superior

B5 – Óleo diesel contendo 5% de biodiesel em v/v.

B5E2 – Óleo diesel contendo 5% de biodiesel e 2% de etanol em v/v.

B5E4 – Óleo diesel contendo 5% de biodiesel e 4% de etanol em v/v.

BSFC – *Brake specific fuel consumption*

BR – Rodovia brasileira federal

CAN – *Controller Area Network*

CEASA/MG – Centrais de Abastecimento de Minas Gerais

CEP – *Circle Error Probable*

CFR – *Cooperative Fuel Research Committee*

DC – *Direct current*

DI – *Direct injection* (injeção direta)

DGPS – *Differential Global Positioning System*

E85 – Mistura de gasolina, contendo 85% de etanol em v/v

EGNOS – *European Geostationary Navigation Overlay Service*

GPS – *Global positioning system*

MME – Ministério das Minas e Energia

MSAS – *Multi-functional Satellite Augmentation System*

NBB – *National Biodiesel Board*

PCI – Poder calorífico inferior

PCS – Poder calorífico superior

PMS – Ponto morto superior

Ppm – Partes por milhão

PWM – *Pulse width modulation*

RFS – *Renewable Fuel Standard*

SD – *Secure digital*

SBAS – *Satellite-based augmentation system*

SAE – *Society of Automotive Engineers*

VCI – *Virtual Can Interface*

WAAS – *Wide Area Augmentation System*

UNICA – União da Indústria da Cana-de-Açúcar

UTC – *Coordinated Universal Time*

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	27
1.1	Prólogo .....	27
1.2	Objetivos .....	27
1.3	Justificativa .....	28
1.4	Escopo da Dissertação .....	35
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	36
3	FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	45
3.1	Desempenho de um veículo em estrada .....	45
3.2	Torque e potência.....	45
3.3	<i>Gradeability</i> (capacidade de superar rampas e ladeiras).....	48
3.4	Dinâmica longitudinal .....	50
3.5	Propriedades dos combustíveis.....	53
3.5.1	<i>Cor</i> .....	53
3.5.2	<i>Teor de enxofre</i> .....	53
3.5.3	<i>Massa específica a 20 °C</i> .....	54
3.5.4	<i>Número de cetano</i> .....	54
3.5.5	<i>Corrosividade ao cobre</i> .....	55
3.5.6	<i>Viscosidade</i> .....	55
3.5.7	<i>Lubricidade</i> .....	56
3.5.8	<i>Ponto de fulgor</i> .....	56
3.5.9	<i>Poder calorífico</i> .....	56
3.5.10	<i>Ponto de névoa e fluidez</i> .....	57
3.5.11	<i>Destilação</i> .....	57
3.5.11.1	<u>Temperatura de destilação T<sub>10</sub></u> .....	58
3.5.11.2	<u>Temperatura de destilação T<sub>50</sub></u> .....	58
3.5.11.3	<u>Temperatura de destilação T<sub>85</sub></u> .....	58
3.5.11.4	<u>Temperatura de destilação T<sub>90</sub></u> .....	58
3.5.12	<i>Aspecto</i> .....	59
3.5.13	<i>Teor de cinzas</i> .....	59
3.5.14	<i>Teor de água e sedimentos</i> .....	59
3.5.15	<i>Resíduo de carbono Ramsbottom</i> .....	60
4	METODOLOGIA.....	61
4.1	Aparato Experimental.....	61
4.2	Procedimento Experimental .....	64
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	70
6	CONCLUSÕES .....	78
6.1	Observações deste trabalho.....	78
6.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	78
	REFERÊNCIAS.....	79
	APÊNDICES .....	85



## **INTRODUÇÃO**

### **1.1 Prólogo**

À medida que a demanda por petróleo aumenta, a produção dos grandes poços diminui de 4% a 5% anualmente. Por outro lado, o combustível produzido da biomassa é renovável e pode ser usados em veículos sem grandes modificações no motor. A situação ambiental sempre foi vista como um fator preponderante para a redução das emissões de poluentes e gases de efeito estufa, como o CO<sub>2</sub>, para o consumo racional de combustível e a utilização de combustíveis renováveis oriundos da biomassa (PARENTE, 2003). Além das questões ambientais, existem as razões econômicas, que mostram a alta dependência que a grande maioria dos países tem dos combustíveis fósseis, cujos preços são altamente sensíveis a instabilidades políticas dos grandes produtores, principalmente aqueles localizados no oriente médio. O uso de combustíveis alternativos pode satisfazer as necessidades de energias renováveis de baixo impacto ambiental.

Os combustíveis alternativos mais adequados para uso veicular, considerando o atual desenvolvimento tecnológico, são o etanol, o biodiesel e o hidrogênio. Este exige modificações mais significativas na construção do veículo. Há uma tendência dos motores leves a gasolina serem alimentados por combustíveis alternativos ou parcialmente substituídos por células a combustível ou motores híbridos. Os motores de ignição por compressão do ciclo diesel, para aplicações que requerem alta potência, também podem ser alimentados por combustíveis alternativos. Uma solução de combustível viável (ambientalmente correta) é o biodiesel, derivado de óleo vegetal ou gordura animal (RANDAZZO, 2009).

### **1.2 Objetivos**

O objetivo geral desta dissertação é comparar, através de testes em estrada, os parâmetros de aceleração, retomada, velocidade máxima e consumo de combustível de um veículo comercial meio-pesado, de 24 toneladas de capacidade, alimentado com misturas de óleo diesel metropolitano e etanol. Estudos anteriores a este, utilizando misturas com maior proporção de etanol (6% e 12%) levaram o

veículo a um funcionamento irregular, acentuados apresentando oscilações em marcha lenta. Além disso, durante a realização dos testes, foi possível observar que o motor teve seu funcionamento interrompido (fumaça branca e engripamento de pistão), e, após a sua desmontagem, foi percebido a presença de um pó claro nos pistões. A possível causa desse fenômeno foi a baixa lubricidade do etanol. Com base nesta experiência, foram utilizados como combustíveis, misturas de óleo diesel metropolitano convencional com 5% em volume de biodiesel (B5), com 500 ppm de enxofre (S500), e misturas de B5 com etanol, nas concentrações de 2% (B5E2) e 4% (B5E4). Este trabalho tem os seguintes objetivos específicos:

- a) comparar o desempenho de um caminhão semi-pesado operando com óleo diesel metropolitano convencional com 5% de biodiesel (B5) e misturas de B5 com 2% de etanol e 4% de etanol em testes de aceleração de 0 a 80 km/h;
- b) comparar o desempenho do veículo comercial operando com os mesmos combustíveis em testes de retomada de 40 a 80 km/h;
- c) verificar a influência da adição de baixas concentrações de etanol no combustível B5 sobre o consumo de combustível do caminhão semi-pesado.

### **1.3 Justificativa**

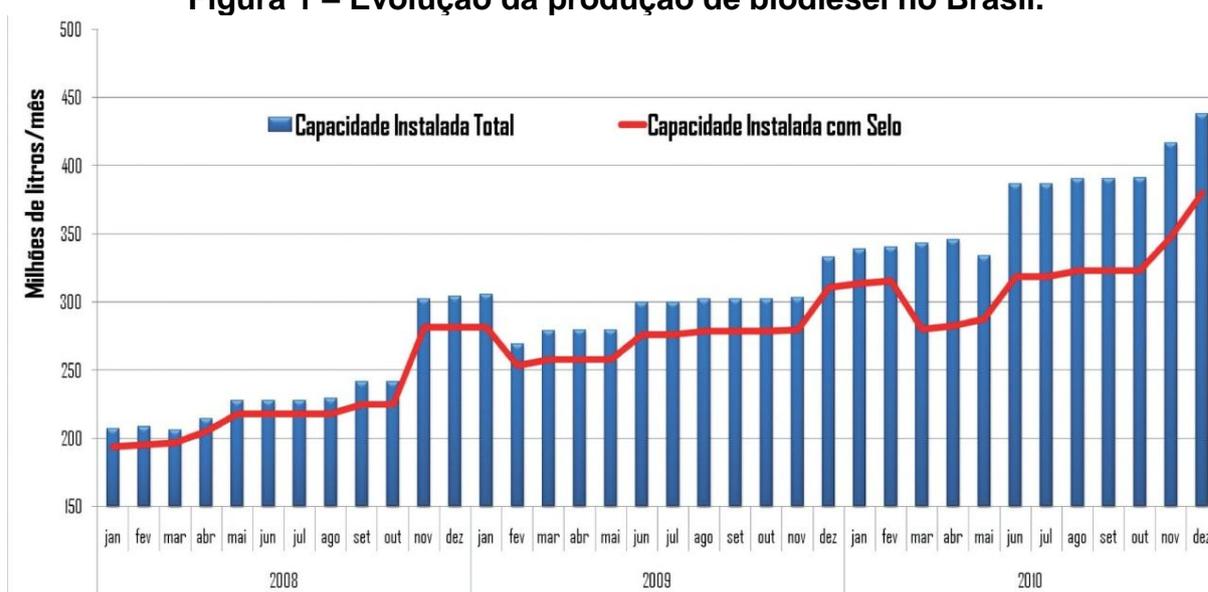
O uso de biodiesel em motores com ignição por compressão apresenta diversas vantagens. O biodiesel não é tóxico, a degradação do biodiesel é quatro vezes mais rápida que a do óleo diesel e o maior ponto de fulgor do biodiesel proporciona um armazenamento mais seguro. O biodiesel não produz o efeito estufa devido ao balanço entre a quantidade de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) emitida e a quantidade de  $\text{CO}_2$  absorvida pelas plantas que produzem óleo vegetal. Além disso, o biodiesel pode ser usado nos motores com ignição por compressão sem modificações significativas no motor (BARABÁS, 2010).

Nos últimos anos inúmeras pesquisas têm sido feitas para reduzir as emissões nocivas de motores do ciclo diesel. Algumas destas pesquisas estão relacionadas ao controle da injeção de combustível, do processo de combustão e ao tratamento pós-combustão dos gases de exaustão. Em complemento a estas

tecnologias, os combustíveis alternativos são outro caminho para a redução de gases de exaustão nocivos, sem impactos negativos na potência do motor e no consumo de combustível.

Com relação aos aspectos ambientais, o uso racional e eficiente de biocombustíveis é uma opção chave para alcançar os objetivos do protocolo de Kyoto para redução de emissões de gases do efeito estufa. A substituição parcial ou total de combustíveis fósseis com biocombustíveis renováveis é considerada uma meta para redução do efeito estufa, bem como a melhoria da economia da agricultura. Dentre os biocombustíveis oxigenados por natureza, o bioetanol e o biodiesel de óleos vegetais são considerados os mais promissores (RAKAPOULOS, 2008). A Figura 1 mostra a produção de biodiesel no Brasil entre 2008 e 2010, apresentando um incremento nestes anos recentes.

**Figura 1 – Evolução da produção de biodiesel no Brasil.**



Fonte: Ministério das Minas e Energia

Em se tratando de regiões do território nacional, existe uma grande variedade de opções para produção de biodiesel, dentre elas pode se destacar na região norte a palma (dendê) e o babaçu. Nas regiões centro-oeste, sul e sudeste pode-se optar por soja, girassol e amendoim e, finalmente, na região nordeste, há a mamona, que melhor se adequa ao clima semiárido da região. A mamona também se apresenta como uma alternativa nas demais regiões brasileiras. As principais oleaginosas

brasileiras para a produção de biodiesel estão distribuídas principalmente de acordo com a Figura 2.

O uso de biocombustíveis está presente na Europa desde a invenção a invenção do motor de ignição por compressão. No passado os combustíveis de origem vegetal representavam uma parte considerável do seu consumo. Como o preço dos combustíveis fósseis foi reduzido, o uso de combustíveis de origem vegetal ficou menos atraente. Devido à possibilidade de independência energética que os biocombustíveis conferem em relação ao petróleo, seu uso em larga escala foi estimulado principalmente a partir da crise do petróleo na década de 1970.

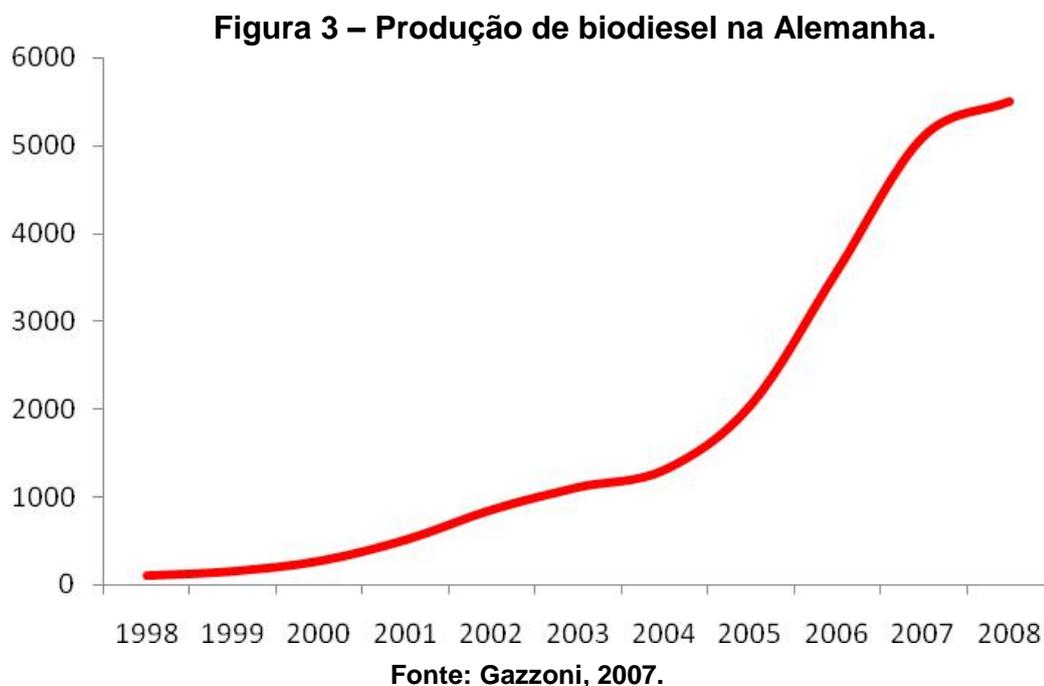
### Figura 2 – Distribuição das oleaginosas no Brasil por região.

*Atlas do Biodiesel - Potencialidade brasileira para produção e consumo de combustíveis vegetais*  
*Biodiesel Atlas - Brazil's potential for production and consumption of vegetable fuel*



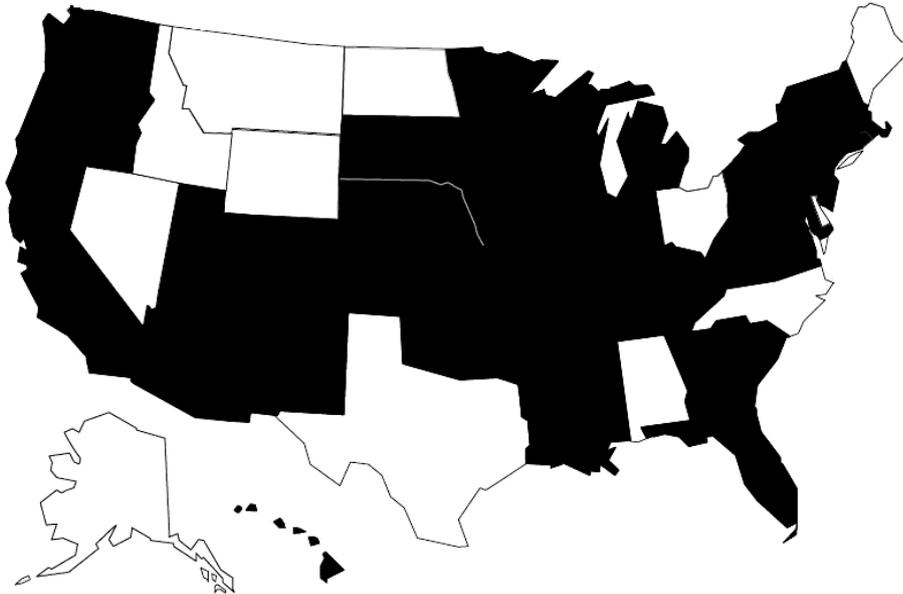
Fonte: Suarez, 2007.

A Alemanha é o maior produtor e consumidor de biodiesel, onde 90% da matéria-prima usada para a produção de biodiesel é o óleo de colza. Farelo proteico e ração são também gerados a partir da extração do óleo. A evolução da produção de biodiesel na Alemanha em bilhões de litros é apresentada na Figura 3.



O biodiesel nos Estados Unidos também é visto como uma solução para a dependência de combustíveis fósseis. Cogita-se a hipótese de se aumentar 2% na concentração de biodiesel presente no óleo diesel, passando para 5% nos próximos anos. Segundo o Conselho Nacional de Biodiesel dos EUA (NBB) alguns estados concedem incentivos fiscais para a utilização de biodiesel. A Figura 4 mostra os estados que concedem estes incentivos.

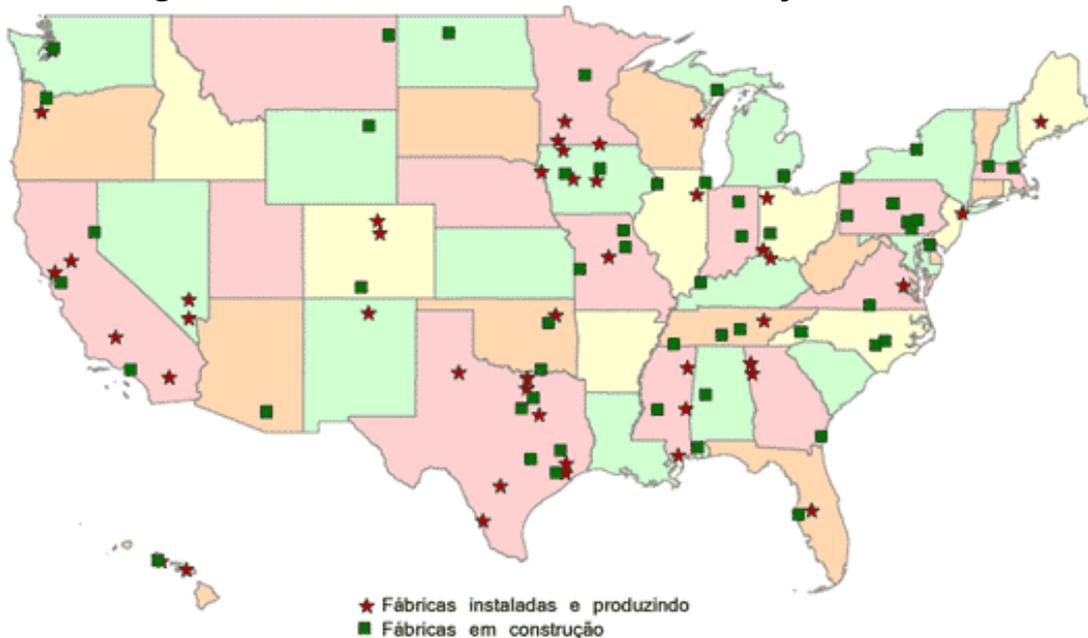
**Figura 4 – Estados norte-americanos que concedem incentivos ao uso de biodiesel.**



Fonte: National Biodiesel Board, 2006.

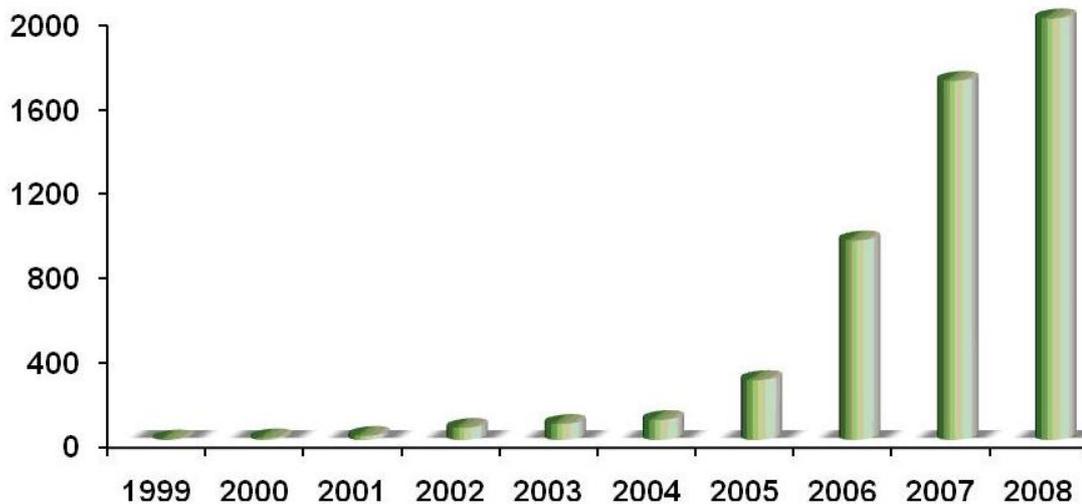
Há ainda o uso de concentrações maiores de biodiesel em veículos do governo e das forças armadas. A Figura 5 mostra as fábricas de biodiesel instaladas e em instalação nos EUA. A evolução da produção de biodiesel nos EUA é apresentada na Figura 6.

**Figura 5 – Fábricas instaladas e em instalação nos EUA.**



Fonte: National Biodiesel Board, 2005.

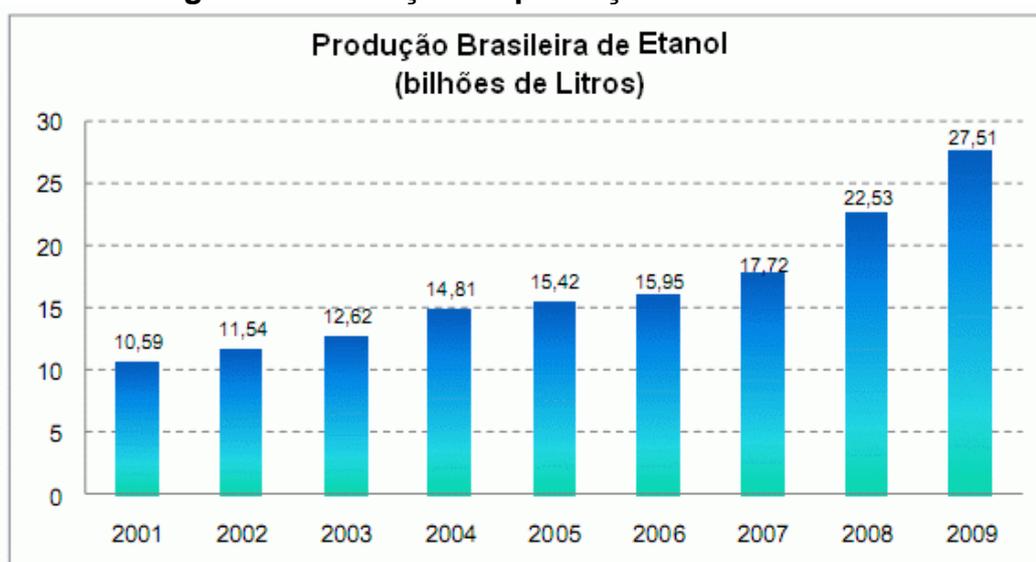
**Figura 6 – Evolução da produção de biodiesel nos EUA.**  
Milhões de litros / ano



Fonte: Gazzoni, 2008.

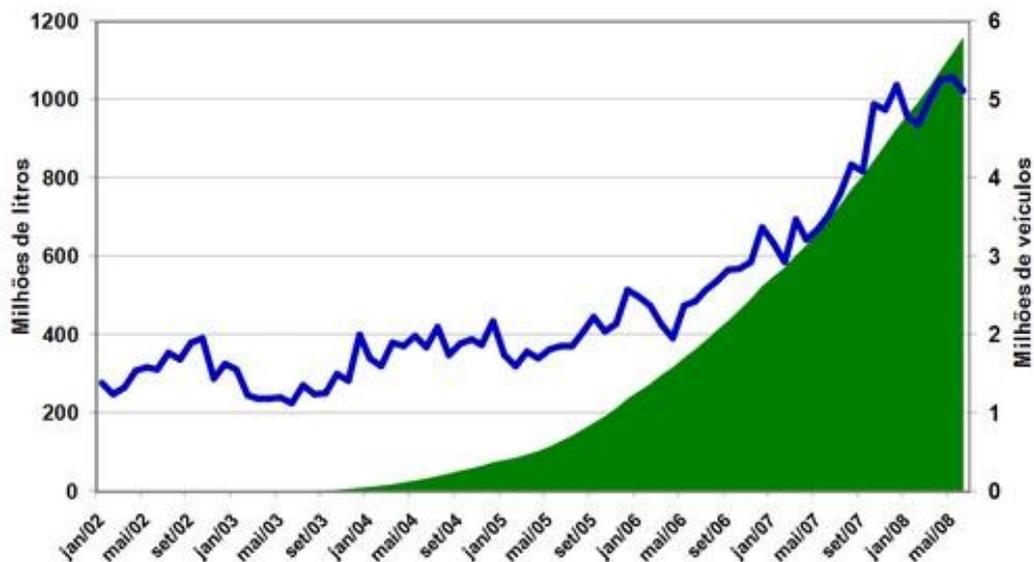
O uso de etanol no Brasil é tido como uma alternativa à gasolina no abastecimento de veículos de passageiros e comerciais leves. A Figura 7 mostra a evolução da produção de etanol no Brasil, onde percebe-se a tendência de uso crescente deste combustível renovável. Tal afirmação vem ao encontro da tendência observada na Figura 8, que demonstra a progressão das vendas de veículos bicompostíveis (*flex fuel*) no Brasil.

**Figura 7 – Evolução da produção de etanol no Brasil.**



Fonte: União da Indústria de Cana-De-Açúcar, 2008.

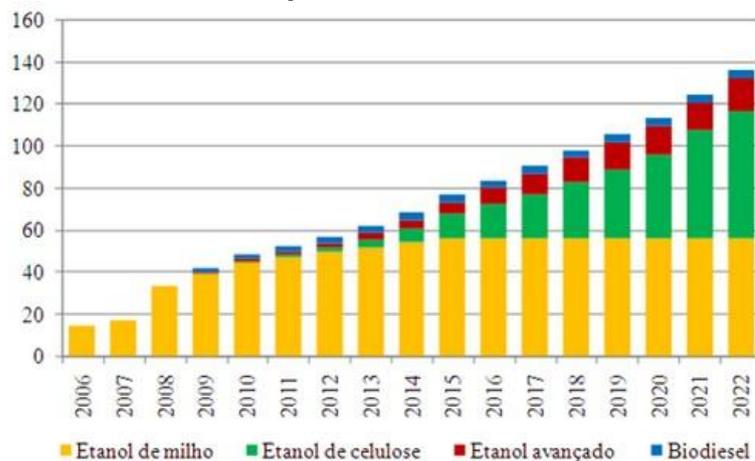
**Figura 8 – Consumo de etanol e vendas de veículos bi-combustíveis (flex) no Brasil.**



Fonte: União da Indústria de Cana-De-Açúcar, 2008.

Os EUA se tornaram o maior produtor de etanol em 2005. Em 2010 os EUA produziram 29,2 bilhões de litros de etanol que, junto com a produção do Brasil, somam 88% da produção global daquele ano. Nos EUA, o etanol é principalmente usado como um aditivo oxigenado na gasolina, em formas de mistura de baixa concentração, até 10% e aumentando até E85 (85% de concentração na gasolina) em veículos bicombustíveis (*flex fuel*). A Figura 9 mostra a meta de consumo de etanol nos próximos anos nos EUA, em bilhões de litros para redução do uso de combustíveis fósseis.

**Figura 9 – Metas estabelecidas para consumo de etanol e biodiesel nos EUA.**



Fonte: União da Indústria de Cana-De-Açúcar, 2008.

#### **1.4 Escopo da Dissertação**

O Capítulo 2 revisa as referências bibliográficas relevantes para este trabalho, apresentando resultados de pesquisas realizadas com misturas de óleo diesel, biodiesel e etanol e sua influência nos motores de combustão interna para aplicações comerciais. O Capítulo 3 descreve os fundamentos teóricos desta dissertação. A metodologia experimental, o sistema de aquisição de dados, métodos e procedimentos adotados para a realização dos testes são abordados no Capítulo 4. O Capítulo 5 apresenta os resultados parciais dos testes realizados e das verificações comparativas. O Capítulo 6 aborda as conclusões obtidas a partir dos resultados apresentados e sugere trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Ajav et al. (1999) analisaram o comportamento de um motor diesel monocilíndrico com rotação constante abastecido por misturas de 5%, 10%, 15% e 20% em volume de etanol em óleo diesel. Não houve reduções significativas na potência e eficiência térmica do motor ao ser abastecido pelas misturas, em cargas parciais ou carga total. Percebeu-se também um aumento no consumo específico do motor devido ao fato das misturas contendo etanol possuírem densidade e poder calorífico menor que o óleo diesel. Como o etanol é parcialmente oxidado devido à presença de radicais OH, por queimar em temperaturas mais baixas e devido ao seu baixo poder calorífico em relação ao óleo diesel, o aumento da concentração de etanol na mistura reduz a temperatura de exaustão.

Hansen et al. (2005) estudaram diversos parâmetros de misturas óleo diesel-etanol, constatando que a solubilidade e estabilidade da mistura são influenciadas principalmente pela temperatura e concentração de água e etanol presentes na mistura. Considerando a compatibilidade do etanol com diversos componentes do motor, verificou-se que não só os materiais metálicos apresentam problemas de corrosão, mas também os não-metálicos como borracha e plástico que, na presença do etanol, tendem a se romper e ressecar. Para não penalizar severamente a desempenho do motor é necessário manter pelo menos 90% a 95% de óleo diesel na mistura, uma vez que o etanol possui menor calor específico que o óleo diesel e, assim, diminui o conteúdo energético da mistura. Por possuir baixo número de cetano, o etanol promove maior atraso da ignição, podendo afetar os índices de emissões, principalmente HC, e desempenho do motor. Como o etanol possui maior teor de oxigênio que o óleo diesel, as emissões de CO são reduzidas. Há um indicativo que as misturas de óleo diesel-etanol não influenciam negativamente o desgaste do motor, mas investigações posteriores foram recomendadas.

Utilizando um dispositivo óptico com luz infravermelha, especialmente desenvolvido para caracterização de emulsões líquidas em suspensão e soluções, Lapuerta et al. (2007) caracterizaram a estabilidade de misturas de etanol e óleo diesel levando em consideração a concentração de etanol, água e aditivos e temperatura. Ficou evidenciado que a presença de água nas misturas favorece a separação de fase do etanol. Também foi percebido que, conforme a concentração de água aumenta, a separação de fase ocorre com baixa concentração de etanol. A

presença de aditivos causa um efeito oposto, pois, conforme a sua concentração aumenta, a zona de estabilidade fica mais ampla. Este efeito também foi percebido durante as avaliações da solubilidade da mistura. Conforme a concentração de água aumenta, a solubilidade diminui e a presença de aditivos causa um efeito oposto. Além disso, percebeu-se que, à medida que a temperatura da mistura aumentava, a mesma ficava mais estável, aumentando também a solubilidade do etanol no óleo diesel. Este efeito também foi observado para diferentes concentrações de água e etanol, percebendo-se que a sensibilidade do efeito do conteúdo da água, bem como o efeito do conteúdo do aditivo, ficou maior com o aumento da temperatura. Desta forma, concluiu-se que a concentração de etanol na mistura deve ser reduzida em países com inverno mais rigoroso, podendo ser aumentada em países tropicais.

Para entender as diferenças entre as colisões de gotas de óleo diesel e mistura óleo diesel-etanol, comparando com gotas de tetradecano, Chen (2007) usou um gerador de gotas, uma lâmpada estroboscópica (na mesma frequência de injeção) e uma câmera de alta velocidade para registrar o comportamento das colisões. As colisões da gota de óleo diesel se comportaram de forma semelhante às das de tetradecano. Para as colisões de óleo diesel-etanol verificou-se que a união das gotas é dependente da diferença das tensões superficiais. Com a redução do tamanho da gota, as colisões ficaram mais sensíveis às propriedades físico-químicas dos combustíveis que regem a tensão superficial.

Ren et al. (2008) investigaram as características de combustão de um motor diesel de injeção direta operando com misturas oxigenadas. Para tal, óleo diesel comum foi usado como combustível base e dimetoximetano (DMM), diglima (DGM), dimetil carbonato (DMC), dietil carbonato (DEC), dietil adipato (DEA) e etanol como aditivos. A taxa de liberação de calor comportou de maneira semelhante para todos os aditivos, exceto para o DGM. O alto número de cetano do DGM acarreta em um avanço da fase inicial de combustão e diminuição da taxa máxima de liberação de calor. A taxa de liberação de calor, a fase da combustão e o atraso da ignição são dependentes do número de cetano do aditivo oxigenado. O atraso da ignição da mistura diminui com o uso de DGM, mas aumenta com o uso dos demais aditivos. À medida que aumenta a fração de oxigênio na mistura o consumo específico de combustível é aumentado, devido ao menor poder calorífico das misturas

oxigenadas. A eficiência térmica aumentou com o incremento da fração de oxigênio, indicando que combustíveis oxigenados diminuem o calor rejeitado.

Usando um motor diesel Mercedes-Benz OM 336-LA, com seis cilindros, turbo alimentado, injeção direta e com *aftercooler*, Rakopoulos et al. (2008) investigaram a influência de misturas de óleo diesel convencional e 5% ou 10% de etanol nos parâmetros de desempenho e emissões do motor em um dinamômetro hidráulico. Este motor era o mesmo utilizado no departamento de transporte do governo da Grécia, nas aplicações de ônibus urbanos, o que justifica o interesse nestes experimentos. Tais experimentos foram conduzidos utilizando um aditivo emulsificante para garantir a estabilidade de homogeneidade da mistura. Observou-se um aumento na eficiência térmica e no consumo específico à medida que se aumenta a concentração do etanol. O aumento da eficiência térmica pode ser justificado pela elevada parcela de combustão pré-misturada das misturas de etanol, que acarreta em uma combustão mais rápida e menor perda calórica. O baixo poder calorífico das misturas contendo etanol justifica o aumento do consumo específico.

A influência do avanço do tempo de injeção e da concentração de etanol em misturas com óleo diesel nos parâmetros de desempenho de um motor diesel monocilíndrico de injeção direta (DI) foi investigada por Sayin e Uslu (2008). Os resultados mostraram que houve um aumento no consumo específico de combustível com o aumento da concentração de etanol na mistura, devido ao baixo poder calorífico do etanol. Foi verificado também que o consumo específico de combustível também aumentou quando houve o avanço do tempo de injeção. Isto ocorreu devido ao fato de que o atraso na ignição ficou mais longo e a velocidade de chama menor, causando redução na pressão máxima e na potência do motor. Conforme se aumentava a concentração de etanol a eficiência térmica diminuía, apresentando comportamento similar ao consumo específico. Ao avançar o tempo de injeção de combustível, percebeu-se uma queda na eficiência térmica. Isso ocorreu porque a eficiência térmica é dependente do consumo específico. À medida que o consumo de combustível aumentou, a eficiência diminuiu.

Kikuchi et al. (2009) realizaram um estudo sobre o ciclo de energia e impactos ambientais causados pelo etanol como um potencial substituto de combustíveis fósseis. Foi verificado que a produção de etanol a partir do milho torna-se inviável, pois gasta-se mais energia no cultivo e produção do etanol que a energia líquida fornecida pelo etanol depois de pronto. Além disso, verificou-se também a

possibilidade de produzir etanol a partir de resíduos (descarte) de madeira. A produção de etanol pode ajudar a resolver os problemas de descarte de tais resíduos. A solução mais viável e ecologicamente amigável é a produção de etanol de origem de celulose, por ser a biomassa mais abundante do planeta, mesmo considerando a sua resistência contra hidrólise enzimática e insolubilidade na maioria dos solventes. Foi concluído que há a necessidade de diminuir o uso de etanol derivado de plantas alimentícias (como o milho) pelo de origem não alimentícia. Os resíduos de madeira devem ser considerados para produção de biocombustíveis e o uso de etanol derivado de celulose torna-se viável e mais ecologicamente correto devido à redução de gases que influenciam o efeito estufa.

Huang et al. (2009) verificaram a estabilidade da mistura de óleo diesel e etanol com ou sem o auxílio de n-butanol (normal butanol) como aditivo. Observou-se a separação de fases da mistura após 72 horas. Esta situação não foi percebida após a inserção do aditivo, que sustentou a mistura por até 11 dias sem a separação de fases. As misturas contendo o aditivo foram testadas em um motor monocilíndrico de injeção direta (DI) para verificar sua influência nos parâmetros de desempenho. Conforme se aumentava o percentual de etanol na mistura, havia um aumento no consumo específico. A eficiência térmica do motor operando com a mistura óleo diesel-etanol, quando comparado com o funcionamento apenas com óleo diesel, era menor em baixas cargas e maior em cargas elevada.

Labeckas e Slavinskas (2009) avaliaram o comportamento de um motor diesel de injeção direta (DI), 4 cilindros em linha, de aplicação agrícola, alimentado com biodiesel puro de colza, misturas biodiesel-etanol, biodiesel-gasolina e biodiesel-etanol-gasolina, montado em um dinamômetro de corrente alternada. Para impedir a separação de fases e garantir a homogeneidade, a mistura foi agitada no tanque antes da sucção para o motor. Durante os testes com misturas mais pobres houve um aumento na pressão média efetiva do motor, ocasionado pelo menor peso molecular e pela menor viscosidade dos aditivos. Para misturas mais ricas e com maior concentração de aditivos (gasolina e etanol) houve uma redução na pressão média efetiva, que se justifica devido ao menor poder calorífico da mistura quando comparada com biodiesel puro. A mistura de biodiesel-etanol-gasolina apresentou maior consumo específico durante o funcionamento do motor com mistura pobre, devido à redução do número de cetano e maior atraso da ignição que a gasolina e o

etanol proporcionam. A baixa autoignição das misturas e a combustão penalizada das moléculas pesadas de biodiesel puro influenciam negativamente o consumo de combustível. Foi percebido um pequeno aumento da eficiência térmica com as misturas avaliadas, sendo mais significativo a altas rotações, que proporcionaram uma melhor interação dos aditivos com o ar e melhor combustão.

Aydin e Ilkiliç (2010) verificaram a influência de misturas de biodiesel (obtido de girassol) com etanol e biodiesel com óleo diesel puro nos parâmetros de desempenho de um motor diesel monocilíndrico. Foi observado que, ao se usar misturas com 80% de biodiesel e 20% de etanol, houve um aumento de torque e potência, bem como um aumento de consumo específico. Este aumento de torque e potência foi devido à obtenção de uma combustão mais completa e ao enriquecimento de oxigênio contido na mistura. O consumo específico elevado foi devido ao poder calorífico da mistura, que é menor que o do óleo diesel puro. Em todas as avaliações, o motor apresentou os piores resultados durante o funcionamento com biodiesel (20%). O baixo poder calorífico do biodiesel, bem como sua elevada viscosidade em relação ao óleo diesel, pode explicar tal fato.

Barabás et al. (2010) verificaram a influência do uso de misturas de óleo diesel, biodiesel e etanol nos parâmetros de desempenho de um motor diesel de injeção direta (DI), com 4 cilindros em linha, instalado em um dinamômetro hidráulico, com foco em aplicações agrícolas. Para evitar o mau funcionamento do motor durante as avaliações, a densidade e viscosidade das misturas foram mantidas bem próximas daquelas do óleo diesel puro. Foram avaliados três tipos de misturas, assim caracterizadas: 85% óleo diesel, 10% biodiesel e 5% etanol; 70% óleo diesel, 25% biodiesel e 5% etanol; e 80% óleo diesel, 10% biodiesel e 5% etanol. Após os testes, ficou evidenciado um aumento no consumo específico em todas as misturas, quando comparado com o óleo diesel. Este aumento ficou mais destacado durante o funcionamento em baixas cargas. Isto se deve ao baixo poder calorífico e maior viscosidade das misturas contendo biodiesel e etanol. Em altas cargas, foi percebido que a mistura contendo uma maior quantidade de etanol e menor quantidade de biodiesel apresentou uma eficiência térmica similar à do óleo diesel puro, devido à elevada viscosidade e baixo poder calorífico da mistura.

Sayin (2010), usando misturas de metanol-óleo diesel e etanol-óleo diesel, investigou os parâmetros de desempenho de um motor diesel monocilíndrico em dinamômetro. Foram testados dois tipos de configurações para cada mistura: 5% e

10% de etanol (E5 e E10), e 5% e 10% de metanol (M5 e M10). Para evitar separação de fases e garantir a homogeneidade das misturas avaliadas, foi adicionado 1% em volume de dodecanol. Após as avaliações, verificou-se que o consumo específico aumenta à medida que se aumentava a quantidade de etanol e metanol. Por possuir um poder calorífico menor que o etanol, as misturas de metanol apresentaram maiores consumos, sendo o consumo da mistura E10 próximo ao da mistura M10 a 1800 rpm, maior rotação avaliada. Conforme aumentava a concentração de etanol/metanol nas misturas, a eficiência térmica diminuía. As eficiências térmicas mais baixas ocorreram com misturas M10 e E10.

Karthikeyan e Srithar (2010) usaram um motor diesel monocilíndrico com uma vela aquecida para verificar a influência de baixa rejeição térmica neste motor quando abastecido apenas com etanol. Para obter uma boa isolamento térmica e um ambiente mais quente para combustão, foi aplicada uma camada de ítrio e óxido de zircônio na superfície do pistão, válvulas de admissão e exaustão e na própria câmara de combustão. Foram realizados experimentos com óleo diesel e camada isolante, óleo diesel sem camada isolante, etanol com camada isolante e etanol sem camada isolante. Foi constatado que ao utilizar etanol com a camada isolante, obteve-se o maior rendimento térmico, devido à melhor utilização da energia conservada dentro da câmara de combustão. O menor rendimento térmico foi obtido ao utilizar etanol sem a camada isolante, devido ao baixo número de cetano do etanol e sua elevada temperatura de autoignição. A eficiência volumétrica ao utilizar etanol com a camada isolante diminuiu devido à elevada temperatura do cilindro. Este fenômeno não foi percebido ao utilizar o motor sem a camada isolante. Ao se utilizar etanol com a camada isolante obteve-se os menores consumos específicos, devido à temperatura elevada favorecer uma melhor mistura do jato de etanol com o ar, fazendo com que a mistura ficasse pronta para queima mais rapidamente.

Park et al. (2010a) verificaram a influência das misturas de óleo diesel-etanol na penetração e ângulo do cone do jato de combustível injetado em um motor diesel de injeção direta (DI) e 4 cilindros. Além disso, foram investigadas as características da ignição alterando o ponto de injeção das misturas. Ficou evidenciado que a presença de etanol nas misturas minimiza a penetração do jato de combustível e aumenta seu ângulo de cone. Por possuir menor densidade, o etanol causa tais mudanças nas características do jato. Quando as misturas com etanol foram

injetadas próximo do ponto morto superior (PMS), percebeu-se que a ignição ficou instável. Isto acontece porque o etanol causa um maior atraso na ignição. Ao injetar as misturas antes do ponto morto superior (APMS), percebeu-se uma maior pressão de combustão, devido a uma maior duração da combustão. Concluiu-se que o ponto de injeção é diretamente influenciado pela concentração de etanol na mistura.

Usando uma bancada especialmente desenvolvida para verificar as características de injeção e atomização de misturas contendo biodiesel-etanol, Park et al. (2010b) verificaram o comportamento e parâmetros geométricos do jato do combustível injetado. Foi constatado que, durante a avaliação das características de injeção, a mistura contendo uma maior concentração de etanol apresentou uma menor pressão de injeção e maior atraso de injeção, definido pelo período entre o momento em que o injetor recebe o sinal de abertura e o momento em que o combustível é injetado. Este resultado ocorreu devido à baixa viscosidade dinâmica do etanol, que diminui o atrito entre o combustível e a parede do injetor. A área efetiva de injeção do fluxo de combustível do injetor diminuiu com o aumento da concentração de etanol, devido à ocorrência de cavitação no injetor. Tal resultado demonstra que as características do fluxo dentro do injetor foram afetadas pela viscosidade dinâmica e densidade do combustível. A presença do etanol favoreceu a atomização do combustível. A mistura contendo maior concentração de etanol possui menor viscosidade cinemática, levando à redução do tamanho da gotícula de combustível injetado e a uma interação mais ativa com o gás na câmara.

Huwan et al. (2011) usaram um motor diesel de três cilindros com injeção direta para avaliar as influências de misturas contendo elevadas concentrações de etanol nos parâmetros de desempenho do motor. Foram usadas três misturas com os seguintes conteúdos: 70% de óleo diesel, 20% de etanol e 10% de biodiesel; 50% de óleo diesel, 30% de etanol e 20% de biodiesel; e 50% de óleo diesel, 40% de etanol e 10% de biodiesel. Para as duas últimas misturas o ponto de injeção sofreu uma alteração de 13 °APMS para 21 °APMS devido ao baixo número de cetano do etanol, que influenciou diretamente as características de combustão do motor, fazendo com que o motor não funcionasse na configuração original. Observou-se um atraso na combustão e um aumento na pressão interna do cilindro à medida que se aumentava a concentração de etanol, tanto para altas cargas quanto para baixas cargas. Também se observou um aumento da eficiência térmica com a variação da rotação, carga e ponto de injeção, devido à combustão pré-misturada ter sido mais

rápida graças ao atraso de ignição das misturas de etanol, ao enriquecimento de oxigênio, que aumenta a parcela de combustão a volume constante, e à menor perda energética, que empobrece a combustão. Em todas as avaliações o consumo específico aumentou devido ao baixo poder calorífico do etanol.

Torres-Jimenez et al. (2011a) analisaram as propriedades físico-químicas de misturas de 5%, 10% e 15% v/v de etanol em óleo diesel, com o objetivo de verificar seus impactos sobre a operação de motores. Foi observado que a separação de fases é dependente da concentração de etanol, temperatura e quantidade de água presente na mistura, podendo causar variação da quantidade de combustível injetado no motor. Além disso, percebeu-se que, ao aumentar a quantidade de etanol na mistura, diminuía-se a densidade, causando maior atraso na injeção de combustível, que pode causar perda de desempenho do motor e aumento nas emissões. Verificou-se que, ao aumentar a concentração de etanol na mistura, diminuiu-se a viscosidade, que pode interferir na atomização do combustível e afetar ligeiramente a potência do motor. De uma forma geral, as características físico-químicas das misturas mostraram-se similares àquelas do óleo diesel regular.

Usando um motor diesel de quatro cilindros, de injeção direta, preparado para EURO V, Zhu et al. (2011) investigaram os parâmetros de desempenho do motor alimentado com misturas de biodiesel e etanol, nas proporções volumétricas de 5%, 10% e 15%. Foi percebido que a pressão no cilindro obtida com a queima das misturas aumentava com a concentração de etanol. Isso ocorre devido ao atraso no início da combustão que o etanol proporciona, fazendo com que mais combustível seja queimado na fase de pré-mistura, resultando em maior pressão e maior taxa de liberação de calor. Foi constatado também que o consumo específico das misturas com etanol foi maior que a operação do motor com óleo diesel, devido ao menor poder calorífico do etanol. A eficiência térmica aumentou com o aumento da carga devido à presença de oxigênio no etanol, que favoreceu sua mistura com o ar durante o processo de combustão, comportando-se de maneira similar para as diferentes concentrações de etanol.

Para avaliar as características de injeção de misturas de biodiesel-óleo diesel e biodiesel-etanol, Torres-Jimenez et al. (2011b) utilizaram um sistema pressurizado especialmente desenvolvido para o experimento. Foi observado que a presença de etanol na mistura com o biodiesel é benéfico para a manutenção dos parâmetros de

injeção, pois confere à mistura características de viscosidade semelhantes às do óleo diesel. O tempo de injeção e o atraso de injeção são significativamente influenciados pelo tipo do sistema de injeção (em linha ou *common-rail*). Ao utilizar sistema de injeção de baixa pressão o tempo de injeção do biodiesel é retardado com a adição do etanol. O tempo de injeção é avançado e o atraso da injeção é diminuído quando é aumentado o conteúdo de etanol no biodiesel, devido à menor viscosidade do etanol.

As pesquisas citadas neste capítulo ilustram e enfatizam que o uso de combustíveis renováveis, especialmente o biodiesel e etanol, bem como suas misturas se apresentam como uma solução viável para alimentação de motores de combustão interna, diminuindo desta forma, a dependência exclusiva de combustíveis fósseis para tal aplicação. As publicações revisadas neste capítulo se referem a pesquisas que avaliam parâmetros de desempenho de motores diesel abastecidos com misturas de óleo diesel-etanol em testes desenvolvidos em bancadas dinamométricas. Em nenhuma das referências revisadas os parâmetros de desempenho foram avaliados em testes de estrada, o que elucida a contribuição desta pesquisa.

### **3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

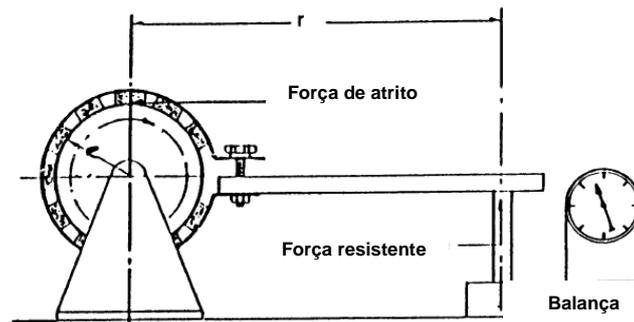
Neste capítulo, serão apresentados os fundamentos de parâmetros de desempenho de veículos comerciais em estrada, bem como princípios de combustão nos motores diesel e características do óleo diesel, biodiesel e do etanol.

#### **3.1 Desempenho de um veículo em estrada**

Para entender o desempenho do veículo é necessário antes o entendimento de conceitos fundamentais de engenharia que regem o desempenho de um caminhão. Desempenho de um veículo é julgado com base na sua habilidade de realizar trabalho útil. Para as máquinas, uma unidade precisa para a medição de trabalho é necessária. Isso é realizado ao determinar uma unidade de valor para a quantidade de trabalho realizado. A quantidade de trabalho realizado deve ser avaliada de formas diferentes. A potência está associada com o desempenho, e é considerada como a taxa em que o trabalho é realizado com o tempo (Fitch, 1993).

#### **3.2 Torque e potência**

O torque significa a torção ou a tendência de se produzir uma rotação. O torque pode estar ligado diretamente ao termo trabalho. A diferença principal entre torque e potência é que o torque não leva o elemento tempo em consideração enquanto a potência o faz. Conhecendo o elemento de tempo através do qual uma quantidade de torque é gerada, é possível calcular a potência. Este é o princípio de funcionamento do dinamômetro de freio de Prony.

**Figura 10 – Dinamômetro do tipo “Freio de Prony”.**

Fonte: Fitch, 1993.

Com o conhecimento das unidades de energia do motor é possível considerar a sua curva de potência e definir suas características. As curvas de potência e torque do motor são normalmente emitidas pelos seus fabricantes (Figura 11). A rotação máxima do motor geralmente depende do tamanho e tipo do motor: quanto maior o motor, menor a rotação. Rotações do motor elevadas implicam em acúmulo de tensões nas partes alternativas do motor. Entretanto, a maioria dos motores grandes (por exemplo, motores que possuem diâmetro e curso elevados) é governada ou restringida a trabalhar com rotações mais baixas que os motores menores. A curva de potência se eleva diretamente com a rotação do motor. A curva torna-se plana em um ponto que é equivalente a 75% da rotação máxima. Isso indica que mais potência é necessária para superar o atrito em rotações elevadas e que a eficiência volumétrica do motor também diminui conforme a rotação do motor aumenta.

**Figura 11 – Curvas características de um motor em plena carga.**



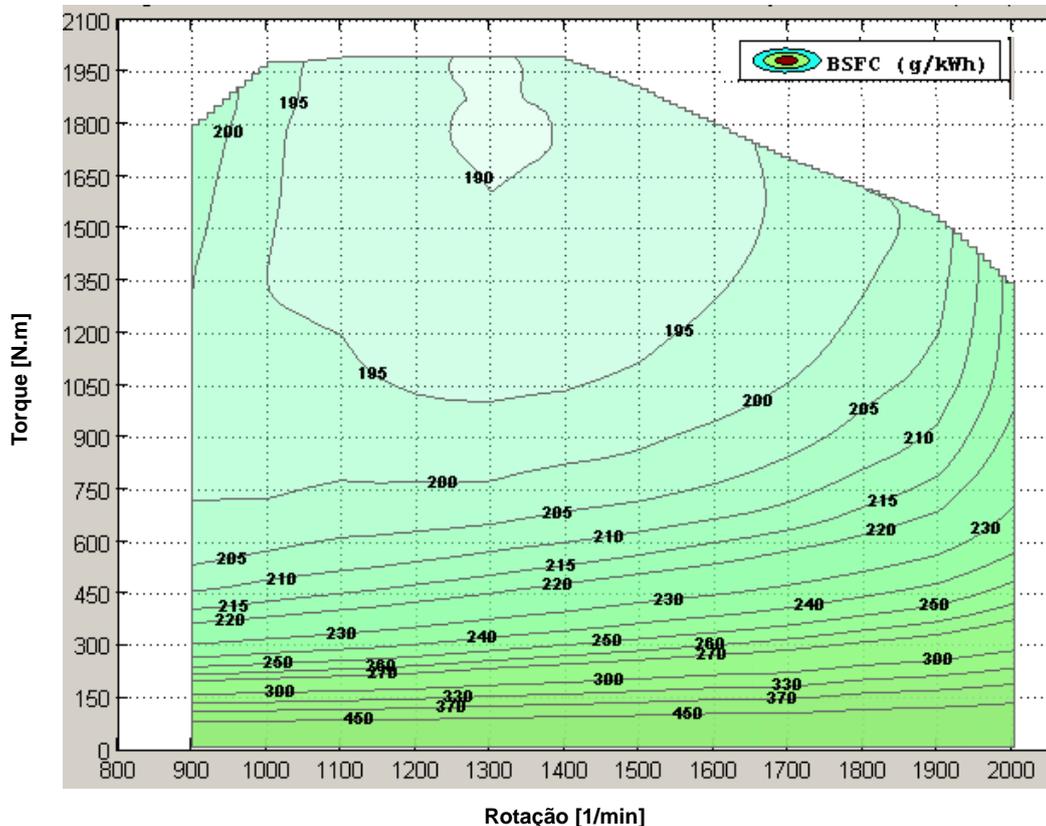
**Fonte: IVECO Motorenforschung Aktiengesellschaft.**

A curva de torque é, geralmente, mais plana que a curva de potência. Essa característica é desejada porque indica uma maior quantidade de torque ou trabalho disponível em uma faixa maior do campo de operação (rotações) do motor. Quando instalado em um veículo comercial, o motor ao ser operado em regiões de maior torque, confere ao veículo uma dirigibilidade mais econômica, ou seja, pode-se desenvolver ou manter a velocidade do veículo em diferentes condições topográfica (*grade*), com uma menor demanda de carga (posição do pedal do acelerador), e, conseqüentemente, obtém-se um menor consumo de combustível.

A curva de consumo específico representa o combustível consumido durante a operação do motor e indica a massa de combustível consumida para uma potência em um determinado tempo. Tal curva é elaborada na maioria dos casos em plena carga. A Figura 12 indica o consumo específico de um motor para determinadas

condições de carga. De acordo com a carga, torque e consumo específico, é possível selecionar o conjunto motopropulsor que mais se adequa àquela aplicação.

**Figura 12 – Curvas de consumo específico de um motor em cargas parciais.**



Fonte: IVECO Motorenforschung Aktiengesellschaft.

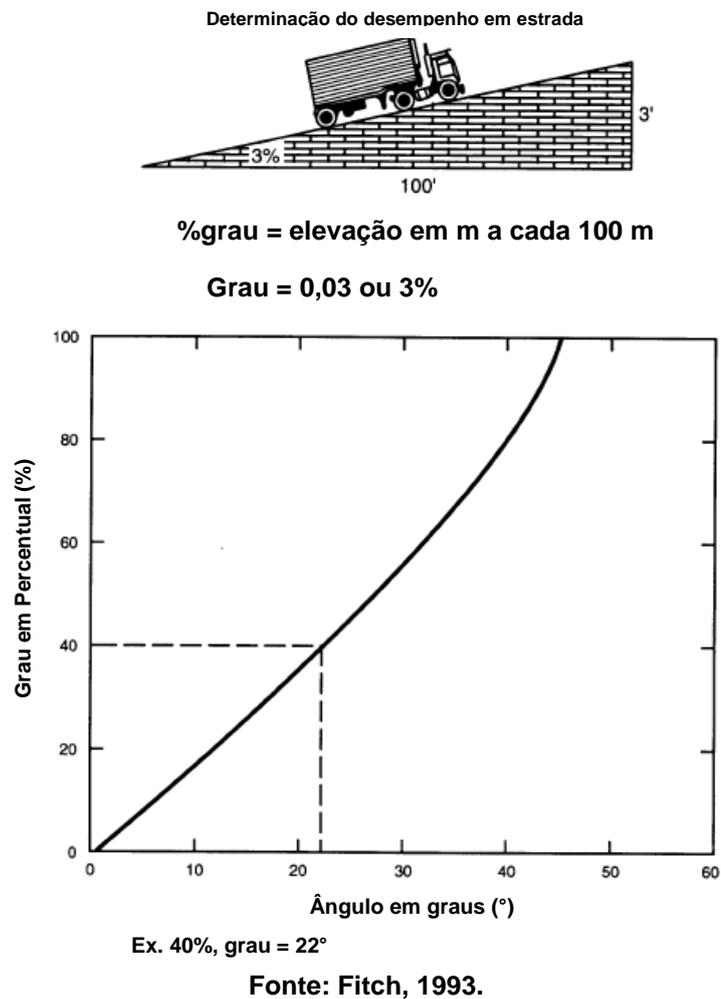
### 3.3 *Gradeability* (capacidade de superar rampas e ladeiras)

O teste de *gradeability* representa a rampa que o veículo pode superar sem perda de velocidade e é uma medida de desempenho com base na potência do motor. Não é sempre possível ter um veículo disponível com a quantidade de peso necessária para determinar seu *gradeability* verdadeiro. E <sup>60% carga</sup>, uma solução matemática deve ser usada para fornecer a informação de <sup>50% carga</sup> lá correlações disponíveis para cálculo do *gradeability* de veículos que provaram possuir uma acurácia razoável. Essas expressões irão determinar as cargas máximas e rampas que poderão ser superadas com  $\frac{\text{Potência}}{\text{Velocidade (rpm)}}$  máximo torque e potência do motor. A velocidade máxima com as cargas máximas a serem superadas também poderão

ser determinadas da mesma forma, pela seleção do torque do motor disponível ou potência na rotação máxima e segura do motor.

Para obter uma solução padrão ou correlação para solucionar várias situações de *gradeability* necessárias, alguns critérios e fatores deverão ser observados: curva padrão do motor, com informações de torque, potência e rotação; relações de transmissão em todas as velocidades; relações das transmissões auxiliares; relação do eixo traseiro; tamanho do pneu e raio de rolagem; e peso bruto total do veículo. Outros fatores secundários como temperatura, condições da estrada, condições atmosféricas e altitude são consideradas para uma solução mais precisa. O *gradeability* é geralmente expressado em termos percentuais, fornecendo a quantidade de elevação em metros para cada metro de comprimento deslocado.

**Figura 13 – Percentual de elevação (*grade*) e equivalência em ângulo.**



### 3.4 Dinâmica longitudinal

De uma forma geral, ao determinar a potência que um veículo deverá ter para garantir o movimento a equação da resistência total ao movimento (Figura 14) deverá ser considerada:

$$F_W = F_{Ro} + F_L + F_{St} \quad (1)$$

onde  $F_W$  é a força de resistência ao movimento (N),  $F_{Ro}$  é a força de resistência ao rolamento (N),  $F_L$  é a força de arraste aerodinâmico (N) e  $F_{St}$  é a força de resistência a subidas (N).

Desta forma determina-se a potência de resistência ao movimento, que tem como definição a potência que deverá ser transmitidas às rodas de acionamento para superação da resistência total ao movimento, é definida por:

$$P_W = F_W v \quad (2)$$

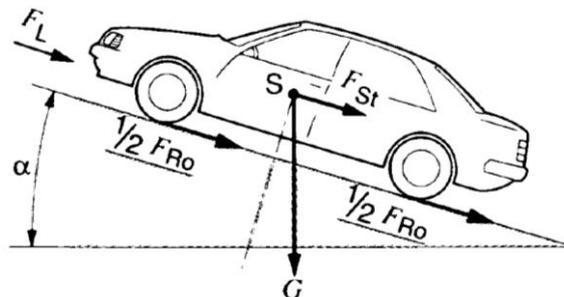
onde  $v$  é a velocidade do veículo (m/s).

A potência de resistência ao rolamento é dada por:

$$P_{Ro} = \frac{F_{Ro} v}{3600} \quad (3)$$

A resistência ao rolamento do veículo é dada pelo produto de processos de deformação que ocorrem no contato entre a banda de rodagem do pneu e a superfície da estrada:

**Figura 14 – Resistência ao movimento.**



Fonte: Bosch, 2005.

$$F_{Ro} = f m g \cos \alpha \quad (4)$$

onde  $f$  é o fator de resistência ao rolamento,  $m$  é a massa do veículo (kg),  $g$  é a aceleração da gravidade ( $9,80656 \text{ m/s}^2$ ) e  $\alpha$  é o ângulo de inclinação da rampa (grau).

A força de arraste aerodinâmico é calculada por:

$$F_L = 0,05 Q c_A (v + v_0)^2 \quad (5)$$

onde  $Q$  é a densidade do ar ( $\text{kg/m}^3$ ),  $c$  é coeficiente de arrasto (adimensional),  $A$  é a área frontal projetada do veículo ( $\text{m}^2$ ),  $v$  é a velocidade do veículo ( $\text{m/s}$ ) e  $v_0$  é velocidade de proa ( $\text{m/s}$ ).

De forma análoga, a potência do arraste aerodinâmico  $P_L$  é definida como:

$$P_L = F_L v \quad (6)$$

A força de resistência a subidas pode ser calculada como:

$$F_{St} = mg \sen \alpha \quad (7)$$

A potência de resistência à subida Eq. (8) é definida como:

$$P_{St} = \frac{F_{St}v}{3600} \quad (8)$$

A altitude também é levada em consideração, uma vez que a potência do motor diminui devido à redução da densidade do ar. Os motores sobrealimentados não são afetados pela altitude, uma vez que o turbocompressor compensa a redução de densidade com a altitude.

**Figura 15 – Quadro: efeitos da altitude na perda de potência.**

Altitude a cada 304,8 m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
% de perda	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30

**Fonte: Fitch, 1993.**

A temperatura, pressão atmosférica (barométrica) e a humidade também afetam o desempenho de um motor diesel. Entretanto, um fator de correção é necessário para fornecer a potência líquida disponível e para estabelecer uma base comum para comparação de motores. As condições padrão para testes em motores são: pressão atmosférica 99 kPa, temperatura 29.4°C, pressão de vapor da água 13 kPa e pressão atmosférica em base seca 97.9 kPa. Para temperaturas acima de 29.4 °C, uma perda de 1% para cada 5.5°C deve ser considerada para corrigir a potência líquida do motor. Em caso de temperaturas abaixo daquele valor, ganhos de 1% na potência devem ser considerados a cada 5.5°C.

### 3.5 Propriedades dos combustíveis

A capacidade que um combustível possui de entrar em combustão chama-se combustibilidade. Nos motores diesel a combustibilidade é diretamente ligada ao número de cetano do combustível. O número de cetano pode ser caracterizado como a facilidade com que o combustível se inflama quando submetido a altas pressões. Existem fatores secundários que influenciam diretamente a combustão, como a viscosidade cinemática e a tensão superficial, que definem as características de pulverização (como tamanho e geometria do jato injetado), bem como sua miscibilidade com o ar. Em países de clima muito frio, o ponto de fluidez, que está diretamente ligado à capacidade de partida a frio, é um fator determinante para a qualidade do combustível. No que diz respeito à segurança ao transporte, bem como ao manuseio do combustível, o ponto de fulgor, corrosividade e toxicidade é determinante para sua qualificação. O óleo diesel possui alguns requisitos que devem ser atendidos para garantir uma combustão adequada no motor, assegurando boa performance e a diminuição da formação de poluentes no processo de combustão.

#### 3.5.1 Cor

As alterações nesta característica podem indicar uma degradação, contaminação ou até mesmo falha no processo produtivo do óleo diesel. A degradação pode ocorrer quando o óleo diesel é armazenado por períodos extensos, sob temperaturas superiores à ambiente ou quando há a contaminação por um material estranho, como ferrugem. A cor é determinada seguindo os métodos prescritos nas normas NBR 14483, (ABNT, 2008) e ASTM D 1500 (ASTM, 2001).

#### 3.5.2 Teor de enxofre

O enxofre é um elemento corrosivo, portanto sua presença nos combustíveis é indesejada. Além do aspecto corrosivo, a combustão do enxofre gera a formação de gases tóxicos como o  $\text{SO}_2$  (dióxido de enxofre) e  $\text{SO}_3$  (trióxido de enxofre). Este

último, quando em contato com água, causa a formação de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), que é corrosivo para os componentes metálicos (PETROBRAS, 2000).

### **3.5.3 Massa específica a 20°C**

A massa específica é obtida na relação 20/4 °C. Trata-se da relação entre a massa específica do óleo diesel na temperatura de 20 °C e a massa específica da água na temperatura de 4°C. As normas que prescrevem o procedimento para determinação da massa específica são: ASTM D 1298 (ASTM, 2009a), ASTM D 4052 (ASTM, 2009b) e NBR 7148 (ABNT, 2001). O sistema de gerenciamento de controle do motor é calibrado para operar com uma massa específica do combustível previamente acertada, devido ao controle do seu volume injetado. Quando a massa específica sofre variações, ocorrem variações na massa de combustível injetada. Conseqüentemente, há alterações na relação ar/combustível, fazendo com que, no caso de uma massa específica do combustível elevada, a mistura fique enriquecida. Esta condição aumenta as emissões de poluentes, como monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos e material particulado. Combustíveis com massa específica baixa causam a perda de potência do motor, bem como um aumento do consumo de combustível (PETROBRAS, 2000).

### **3.5.4 Número de cetano**

O número do cetano do óleo diesel é um indicativo da ignição do óleo diesel, bem como sua influência na partida a frio do motor e funcionamento em plena carga. O número de cetano é determinado segundo o procedimento da norma ASTM D613 (ASTM, 2009c). Tal procedimento menciona a utilização de um motor padrão CFR (*Cooperative Fuel Research*) com a razão de compressão variável, operando de acordo com as solicitações prescritas. Quanto maior for o número de cetano do óleo diesel, mais completa e de maior qualidade será sua combustão no motor.

O número de cetano tem relação direta com o atraso da ignição. Quanto menor for o número de cetano, maior será o atraso da ignição, que causa uma queima mais lenta e, conseqüentemente, leva a um mau funcionamento do motor. O baixo número de cetano causa um pico de energia, que faz com que o pistão realize o movimento até o ponto morto inferior de forma mais abrupta, gerando forças e

tensões anormais no pistão e podendo causar perda de potência e danos mecânicos. Um baixo número de certano pode também causar dificuldades na partida a frio e depósitos de carbono nos pistões (PETROBRAS, 2000).

### **3.5.5 Corrosividade ao cobre**

A corrosividade ao cobre indica o quão corrosivo o óleo diesel pode ser. Este parâmetro é determinado pelas normas NBR 14359 (ABNT, 2005) e ASTM D130 (ASTM, 2009d). A corrosividade influencia diretamente a integridade de componentes metálicos e tanques de armazenamento, podendo ser associada à presença de enxofre (S) e gás sulfídrico (H<sub>2</sub>S).

### **3.5.6 Viscosidade**

A viscosidade indica a resistência ao escoamento de um fluido, tendo influência direta na geometria do jato de combustível injetado, bem como na sua atomização e, conseqüentemente, na combustão. Um combustível com a viscosidade fora daquela especificada pode causar o desgaste excessivo das peças e componentes que utilizam o combustível como agente lubrificante, além de vazamento da bomba de combustível e danos ao pistão do motor. Quando o valor de viscosidade encontra-se acima daquele especificado, pode causar um aumento no trabalho da bomba de combustível e a atomização incorreta, que acarreta também em combustão incompleta e níveis de fumaça. Os procedimentos para a determinação da viscosidade estão prescritos nas normas ASTM D 445 (ASTM, 2009e) e NBR 10441 (ABNT, 2007).

Os óleos vegetais e gorduras animais devem ser convertidos em biodiesel, para que sua viscosidade cinemática se aproxime do óleo diesel derivado de petróleo. Knothe et al. (2007) descrevem a viscosidade cinemática dos óleos vegetais maior que aquela dos derivados do petróleo. As matérias primas e graxas não transformadas causam uma atomização inadequada durante a injeção de combustível, causando problemas no funcionamento dos motores diesel, bem como o aparecimento de depósitos nos componentes internos do motor. Por possuir

viscosidade cinemática menor que a do biodiesel, o etanol, quando adicionado à mistura, diminui sua viscosidade.

### **3.5.7 Lubricidade**

A lubricidade é a propriedade que rege o poder de lubrificação do combustível, sendo dependente de várias propriedades físicas, como a viscosidade e tensão superficial. Os motores diesel demandam uma lubricidade elevada do combustível para que ocorra uma lubrificação adequada das partes móveis internas, como os injetores, válvulas reguladoras e a bomba de alta pressão. Na norma ASTM D6079 (ASTM, 2009f) estão prescritos os procedimentos necessários para execução da prova de lubricidade do combustível (PETROBRAS, 2000).

### **3.5.8 Ponto de fulgor**

O ponto de fulgor é uma propriedade que está relacionada à inflamabilidade do combustível. Trata-se da menor temperatura na qual o combustível produz vapores que se inflamam sob a ação de uma chama. O ponto de fulgor serve como um indicativo para o manuseio, transporte e armazenagem do combustível. O ponto de fulgor é dependente da concentração de hidrocarbonetos leves presentes no óleo diesel. Os métodos para a determinação do ponto de fulgor são previstos nas normas ASTM D93 (ASTM, 2009g) e ISO 2719 (ISO, 2002).

### **3.5.9 Poder calorífico**

O poder calorífico é a quantidade de calor desprendida durante a combustão estequiométrica do combustível. Este parâmetro é determinado em laboratório, com a utilização de um calorímetro e uma bomba de combustão. Se a água gerada como produto de combustão estiver na fase vapor, a quantidade de calor liberada neste caso é chamada de poder calorífico inferior (PCI). Se a água gerada estiver completamente condensada na fase líquida, a energia que foi desprendida pode ser chamada de poder calorífico superior (PCS). A diferença entre o PCS e o PCI é considerada como a entalpia de vaporização da água formada no processo de

combustão (GARCIA, 2002). Em processos de combustão, o PCI é o mais utilizado, porque a água encontrada nos produtos da combustão sob alta temperatura encontra-se na fase vapor.

### **3.5.10 Ponto de névoa e fluidez**

O ponto de névoa pode ser definido como a temperatura na qual o combustível líquido, ao ser refrigerado, fica turvo. O ponto de fluidez é a temperatura na qual o combustível líquido não é mais capaz de escoar livremente. Estas são propriedades importantes, principalmente no que tange à utilização e armazenamento do combustível. Ao ultrapassar o ponto de fluidez de um combustível, ocorre a perda de carga nos filtros, além de aumentar o tamanho das gotas de combustível do jato que sai dos bicos injetores. Quando ocorrem tais condições, o desempenho do motor é reduzido, além da emissão de materiais particulados. Os procedimentos indicados para a determinação do ponto de névoa estão prescritos na norma ASTM D2500 (ASTM, 2009h) e ABNT 11347 (ABNT, 2007). Já para determinação do ponto de fluidez, utilizam-se as normas ASTM D97 (ASTM, 2009i) e NBR 11349 (ABTN, 2009) (PETROBRAS, 2000).

### **3.5.11 Destilação**

A destilação é o processo de separação mais utilizado na indústria petrolífera. O óleo diesel, como outros combustíveis, é uma mistura de hidrocarbonetos e cada um deles possui um ponto de ebulição específico. O teste realizado para levantar a curva de destilação de um combustível tem como objetivo a avaliação das características de volatilidade, onde se define a temperatura que uma parcela de combustível sob a fase líquida se evapora. A curva de destilação possui três pontos chave:  $T_{10}$ ,  $T_{50}$  e  $T_{85}$  (ou  $T_{90}$ ). Estes representam as temperaturas onde ocorrem 10%, 50% e 85% (ou 90%) de vaporização do volume inicial do combustível. Esses pontos caracterizam a volatilidade de frações leves, médias e pesadas de hidrocarbonetos presentes no combustível avaliado. Os procedimentos para levantamento da curva de destilação do combustível estão descritos nas normas NBR 9619 (ABNT, 2009) e ASTM D86 (ASTM, 2009j).

#### **3.5.11.1 Temperatura de destilação $T_{10}$**

A temperatura em que 10% do volume do produto é destilado é chamada de  $T_{10}$ . Sua análise tem como objetivo controlar o teor de frações leves de hidrocarbonetos. Além disso, a temperatura  $T_{10}$  influencia diretamente a partida a frio e quente do motor, pois favorece o processo de atomização do combustível na câmara de combustão (KEITH, 1995).

#### **3.5.11.2 Temperatura de destilação $T_{50}$**

De forma similar à temperatura de destilação  $T_{10}$ , a temperatura  $T_{50}$  é referente a 50% do volume inicial do produto destilado. A temperatura  $T_{50}$  controla a relação entre as concentrações de hidrocarbonetos leves e pesados no combustível. Esta temperatura é importante para assegurar um desempenho adequado do motor em regime permanente e quando solicitado em retomadas. Essa característica nos combustíveis tem influência direta na fase de aquecimento, pois está relacionada à capacidade de ignição do combustível (KEITH, 1995).

#### **3.5.11.3 Temperatura de destilação $T_{85}$**

A temperatura  $T_{85}$  refere-se a 85% do volume inicial do combustível destilado. Esta temperatura visa o controle das frações pesadas de hidrocarbonetos no óleo diesel, que tem como alvo minimizar a formação de depósitos no motor, emissões de hidrocarbonetos não queimados e fumaça preta (KEITH, 1995).

#### **3.5.11.4 Temperatura de destilação $T_{90}$**

A temperatura  $T_{90}$  representa ocorre quando 90% do volume inicial do combustível é destilado. Nesta temperatura, visa-se o controle das frações pesadas de hidrocarbonetos no combustível. De forma análoga à temperatura  $T_{85}$ , a temperatura  $T_{90}$  tem como objetivo a redução da formação de depósitos no motor, emissões de hidrocarbonetos, fumaça preta (neste caso, para o motor diesel) e óxidos de nitrogênio. A volatilidade das frações pesadas impacta diretamente no consumo de combustível (KEITH, 1995).

### **3.5.12 Aspecto**

O aspecto é uma característica que permite a realização de uma avaliação visual rápida da qualidade do combustível, podendo assim identificar a presença de possíveis agentes contaminantes. O óleo diesel deve possuir um aspecto límpido e sem materiais em suspensão. Quando há contaminantes presentes, a vida útil dos filtros de combustível pode ser reduzida. Os procedimentos para a determinação do aspecto dos combustíveis estão descritos nas normas NBR 14954 (ABNT, 2003) e ASTM D 4176 (ASTM, 2002).

### **3.5.13 Teor de cinzas**

Esta característica corresponde à concentração de resíduos inorgânicos, que não são combustíveis e são apurados após a queima de uma amostra do combustível. As normas ASTM D 482 (ASTM, 2009) e NBR 9842 (ABNT, 2009) descrevem os procedimentos utilizados para determinar o teor de cinzas de um combustível. Sua avaliação tem como objetivo a garantia que os sais e óxidos metálicos presentes no combustível não prejudiquem alguns componentes do motor, principalmente os pistões e a câmara de combustão. O teste prevê a queima de uma amostra de combustível seguida de uma calcinação do resíduo. O material resultante após a calcinação é caracterizado como cinzas, sendo possível o cálculo do teor de cinzas do combustível (PETROBRAS, 2000).

### **3.5.14 Teor de água e sedimentos**

Esta verificação é referente à concentração de água e contaminantes sólidos ou material particulado em suspensão presentes no combustível. Quando a presença destes contaminantes supera o limite máximo permitido, a combustão dentro da câmara fica prejudicada, além de saturar prematuramente os filtros de combustível. A presença de água no óleo diesel armazenado causa a deterioração do mesmo devido ao aparecimento de colônias de bactérias. O teor de água e sedimentos é determinado pelos procedimentos descritos nas normas ASTM D1796 (ASTM, 2009m) e NBR 14647 (ABNT, 2001) (PETROBRAS, 2000).

### **3.5.15 Resíduo de carbono Ramsbottom**

Após a evaporação das frações voláteis do combustível, obtém-se o teor do resíduo de carbono. O teor do resíduo de carbono tem relação com a quantidade de depósitos que são formados pelo óleo diesel na câmara de combustão. Os valores elevados de carbono pode causar a formação de resíduos de carbono dentro da câmara de combustão, além de maiores índices de emissões de fumaça. Além disso, favorece a contaminação do óleo lubrificante por fuligem. Os procedimentos para a determinação do resíduo de carbono estão descritos nas normas NBR 14318 (ABNT, 1999) e ASTM D524 (ASTM, 2009n) (PETROBRAS, 2000).

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Aparato Experimental

Um caminhão comercial de 24 toneladas de peso bruto equipado com um motor diesel de injeção direta com sistema de gerenciamento eletrônico foi usado neste estudo (Figura 16). Os detalhes do motor são mostrados no quadro da figura 17. A Figura 18 mostra as curvas de potência e torque do motor. O veículo foi carregado com 6400 kg no eixo dianteiro e 18340 kg nos eixos traseiros. Uma caixa de transmissão direta foi usada com dados descritos no quadro da Figura 19, com duas relações finais: 4.56:1 e 6.21:1. Os aros e pneus foram 275/80 R22.5.

**Figura 16 – Veículo avaliado.**



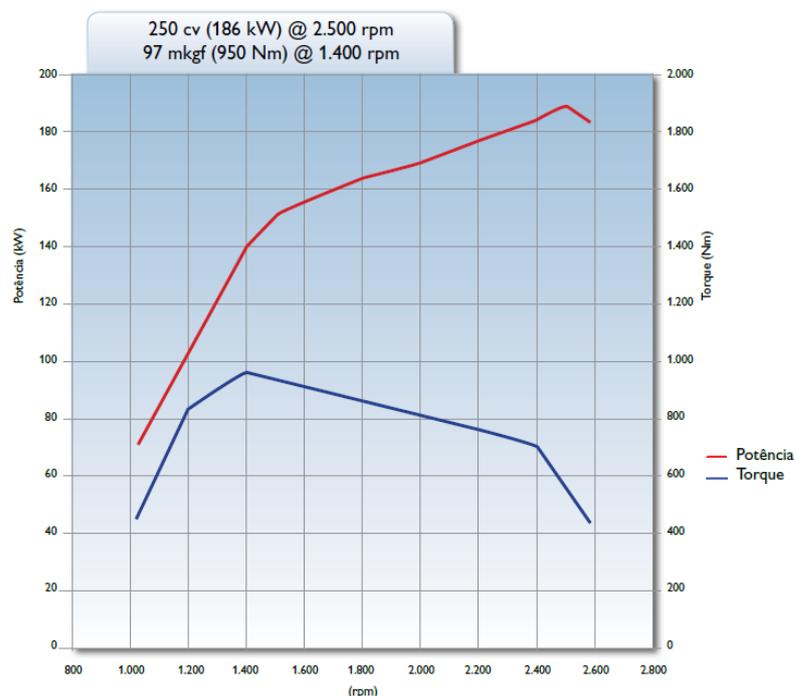
Fonte: Fotos do autor.

**Figura 17 – Quadro: detalhes do motor.**

PARAMETROS	VALOR
Nº de Cilindros	6
Diâmetro x Curso	102 mm x 120 mm
Razão de compressão	17:1
Potência máxima /rotação	186 kW @ 2500 rpm
Torque máximo /rotação	950 N.m @ 1400 rpm

Fonte: IVECO Latin America.

**Figura 18 – Curva do motor instalado no caminhão utilizado nos testes.**



Fonte: IVECO Latin America.

**Figura 19 – Quadro: relações de caixa de marcha.**

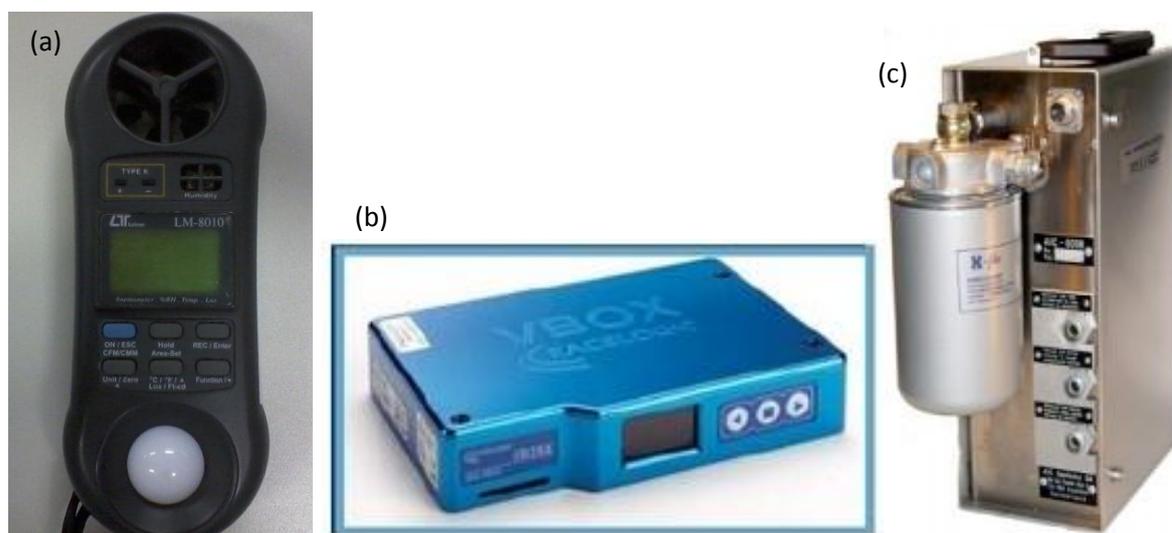
MARCHA	RELAÇÃO
1ª	8.030
2ª	5.060
3ª	3.090
4ª	1.960
5ª	1.310
6ª	1.000
R	7.700

Fonte: IVECO Latin America e Eaton Corporation.

Para monitorar as condições ambientais nos testes de aceleração e retomada, um anemômetro e termohigrômetro Lutron LM-8010 foi utilizado (Figura 20a). As medições foram realizadas no meio da pista de testes, a 1 km das extremidades. Somente quando as condições de velocidade do vento e umidade relativa do ar eram satisfeitas, a prova era iniciada. Um equipamento orientado por GPS (*Global Positioning System*) foi utilizado para realização das medidas de

aceleração e retomada (Figura 20b). O Racelogic VBOX (modelo VB2SX) utiliza satélites que informa todo o deslocamento e tempo utilizado para realização dos testes. Todas as aquisições via GPS foram realizadas com uma taxa de amostragem de 20 Hz. Para medir o consumo de combustível, um medidor de vazão Swissline AIC-6008 foi utilizado (Figura 20c). O medidor de vazão foi ligado na tubulação de combustível do veículo, sendo capaz de medir a vazão de combustível de alimentação do motor e a vazão do combustível que retorna para o tanque, informando o volume consumido em um determinado trecho da rota.

**Figura 20 – Anemômetro, e termohigrômetro Lutron LM-8010 (a), sistema de orientação via satélite – Racelogic VBOX II SX (b) e medidor de vazão de combustível Swissline AIC-6008 (c).**



Fonte: Fotos do autor.

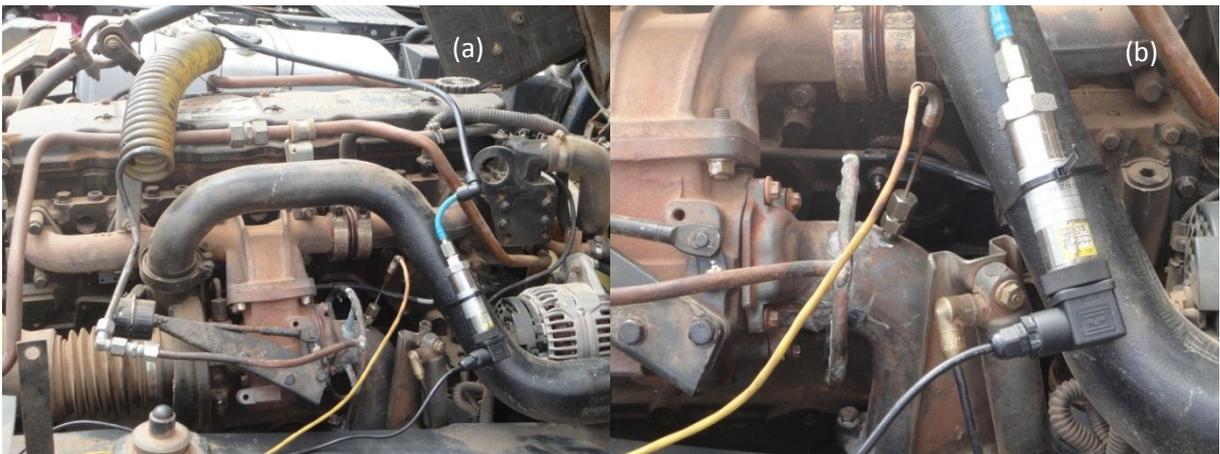
Para medir a velocidade de rotação do motor e a temperatura dos gases de exaustão, um sistema de aquisição de dados HBM MGCplus foi utilizado, com uma taxa de amostragem de 10 Hz (Figura 21). A temperatura foi monitorada como um parâmetro de verificação de plena carga do motor durante a aceleração máxima. Foi instalado um sensor indutivo na polia da árvore de manivelas do motor, além de um termopar tipo K na exaustão, logo após a saída do turbo-compressor (Figura 22). O sensor de rotação foi ligado a uma placa modelo AP460i, enquanto o termopar foi ligado a uma placa modelo AP809 do HBM MGCplus.

**Figura 21 – HBM MGCplus utilizado para leitura da rotação e temperatura na exaustão.**



Fonte: Foto do autor.

**Figura 22 – Visão geral da instalação do termopar na exaustão do motor (a) e detalhe da instalação (b).**



Fonte: Fotos do autor.

## 4.2 Procedimento Experimental

Os testes de aceleração a partir do repouso, aceleração a partir de uma velocidade constante (retomada) e velocidade máxima foram realizadas de acordo com a norma SAE J1419. Para realização dos testes as seguintes premissas foram levadas em consideração:

- secção de testes com inclinação máxima (grau) de 0.3%;
- funcionamento correto do velocímetro e tacômetro;
- convergência das rodas direcionais conforme especificações de projeto;

- desgaste máximo dos pneus de 30% (diferença na altura dos sulcos especificada para pneus novos);
- período mínimo de pré-rodagem (amaciamento) de 6000 km;
- entradas de ar e ventilação interna, bem como janelas completamente fechadas;
- velocidade do vento menor que 4 m/s;
- superfície da pista limpa e seca;
- temperatura ambiente entre 5°C e 35°C; e
- ausência de precipitações e neblina.

De acordo com a norma SAE J1419, os testes aceleração, retomada e velocidade máxima devem ser conduzidos de acordo com o procedimento descrito a seguir. Nos testes de aceleração, verifica-se inicialmente, de uma forma subjetiva, a melhor marcha para partir, bem como a melhor sequência de trocas (escalonamento). Inicia-se a aquisição de dados no momento da partida (arrancada), realizando as medições em ambos os sentidos da seção de testes, chamados de *downstream* (a favor da inclinação) e *upstream* (contra a inclinação). Os testes somente são conduzidas quando as condições ambientais necessárias estão satisfeitas. A temperatura ambiente, humidade relativa e velocidade do vento são medidas na parte central da seção de testes, em ambos os sentidos, e então as acelerações são realizadas.

Para avaliar a retomada, escolhe-se também, de uma forma subjetiva, a marcha adequada para fazer a avaliação. A velocidade de partida é estabilizada por um determinado trecho da seção de teste (500 m) e somente após este trecho a retomada é avaliada. Da mesma forma que os testes de aceleração a partir da imobilidade, nos testes de retomada são realizadas medições a favor e contra a inclinação da pista. O sistema de coleta de dados permanece ligado do início da estabilização da velocidade até o final da tomada de velocidade.

Os testes de velocidade máxima, seguindo as mesmas condições estabelecidas para os testes de aceleração e retomada, também devem ser realizados em ambos os sentidos da seção de testes. Um trecho com 2 km de extensão é usado para estabilizar a máxima velocidade alcançada e, conseqüentemente, estabilizar a leitura.

Os testes de consumo de combustível foram realizados de acordo com a norma SAE J 1321, que determina de forma quantitativa a diferença percentual do consumo de combustível entre o veículo avaliado (chamado pela norma de “veículo de teste”) e o veículo de controle, que serve apenas como referência para verificação do consumo de combustível. O veículo de controle utilizado deve ser semelhante ao veículo avaliado, principalmente no que tange aos aspectos construtivos do motor, rodas e pneus, relação do eixo traseiro, e caixa de marchas. O veículo de controle também deve ser carregado com o mesmo peso e distribuição do veículo de teste. Para verificar se os veículos estão submetidos às mesmas forças resistivas ao rolamento e à mesma força aerodinâmica, uma verificação de *coastdown* (desaceleração livre) dos veículos deve ser realizada, de forma a garantir que os tempos de desaceleração de ambos os veículos estejam próximos. Caso esteja discrepante, a distribuição de carga do veículo é uniformizada e o teste é realizado novamente.

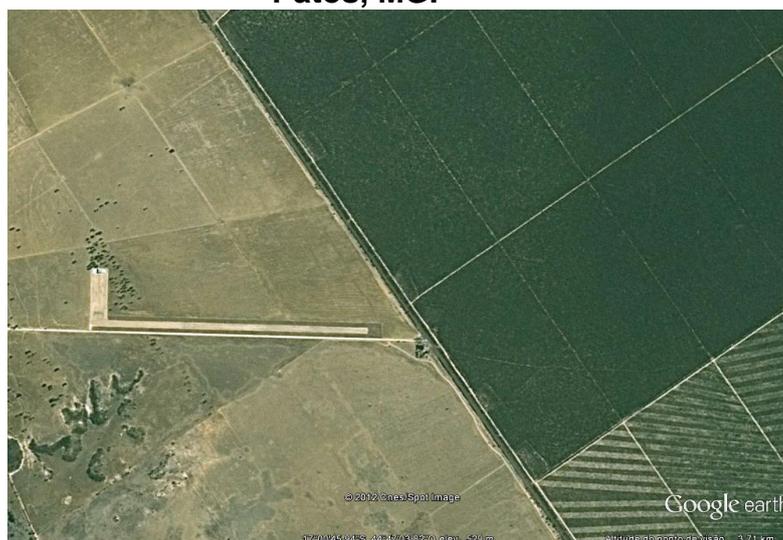
Os veículos são submetidos a um mesmo padrão de condução (velocidade objetiva, que, no presente trabalho, foi 90 km/h), previamente determinado, para que as diferenças encontradas entre os veículos não sejam exclusivamente dependentes do motorista. Após as principais verificações citadas, o consumo de combustível na rota pré-determinada é verificado, com ambos os veículos sendo submetidos às mesmas condições ambientais, tráfego, superfície da estrada, dentre outros. Desta forma os fatores subjetivos que podem influenciar os testes ficam comuns entre os veículos.

Para entender a real influência das misturas no consumo de combustível, duas verificações para cada condição foram realizadas: duas para o combustível B5 (levantamento da diferença natural entre os veículos e influência de motoristas), duas para o B5E2 e, finalmente, duas para o combustível B5E4. Os resultados encontrados são comparados percentualmente com aqueles obtidos do veículo de referência abastecido com B5. As misturas avaliadas foram armazenadas em três tanques distintos, com tubulação e sistema de filtragem completamente independentes. Para evitar a existência de vestígios de outras misturas entre as avaliações, a cada mudança o sistema de alimentação do motor era completamente esgotado (linha de alimentação e retorno) e então abastecido com a mistura a ser testada.

O veículo testado foi abastecido com três misturas de combustível: óleo diesel metropolitano com 5% de biodiesel de soja (B5), mistura B5 com 2% de etanol (B5E2) e mistura B5 com 4% de etanol (B5E4). Nenhum agente emulsificante foi usado. Para separar as misturas de combustível, três tanques de combustível foram instalados, todos com sistemas de filtros independentes. A estratégia original de controle do sistema de gerenciamento do motor foi mantida para a operação com B5 e para os outros combustíveis. Usando este procedimento, foi possível verificar a influência real das misturas testadas nos parâmetros analisados. O veículo foi avaliado em testes de estrada de acordo com a norma SAE J 1491.

Os testes foram realizados em uma pista de testes na rodovia MG 674, km 24 no município de Lagoa dos Patos, MG (coordenadas: 17°00'55.82 S 44°47'00.49 O) (Figura 23). A pista, com inclinação (grau) de 0.1%, foi marcada a 500 m a partir da linha de partida como uma referência para os testes de aceleração a partir de velocidade constante (retomada) e a 2000 m a partir da linha de partida para delimitar o fim dos testes. Durante todas as medições de aceleração a relação de marcha 4.56:1 foi utilizada, para evitar o fator subjetivo de teste e manter a dirigibilidade do veículo.

**Figura 23 – Local de realização das provas: Rod. MG 674, km 24 – Lagoa dos Patos, MG.**



Fonte: Google Earth®.

Para os testes de consumo a metodologia *back-to-back*, prescrita na norma SAE J 1321, foi utilizada. O percurso utilizado foi o trajeto compreendido entre o



Durante a prova *back-to-back*, ambos os veículos foram submetidos às mesmas condições climáticas e de tráfego, além de possuírem o mesmo parâmetro de condução (forma de dirigir). Para levar em consideração as diferentes formas de dirigir entre os motoristas, os mesmos foram trocados no levantamento dos resultados. Para ajustar o peso dos veículos, bem como equalizá-los sob a ótica da resistência ao rolamento, uma avaliação de *coastdown* (desaceleração) foi realizada para obter os parâmetros de aceleração e direcionamento para o acerto da carga (mesma distribuição de peso para ambos os veículos).

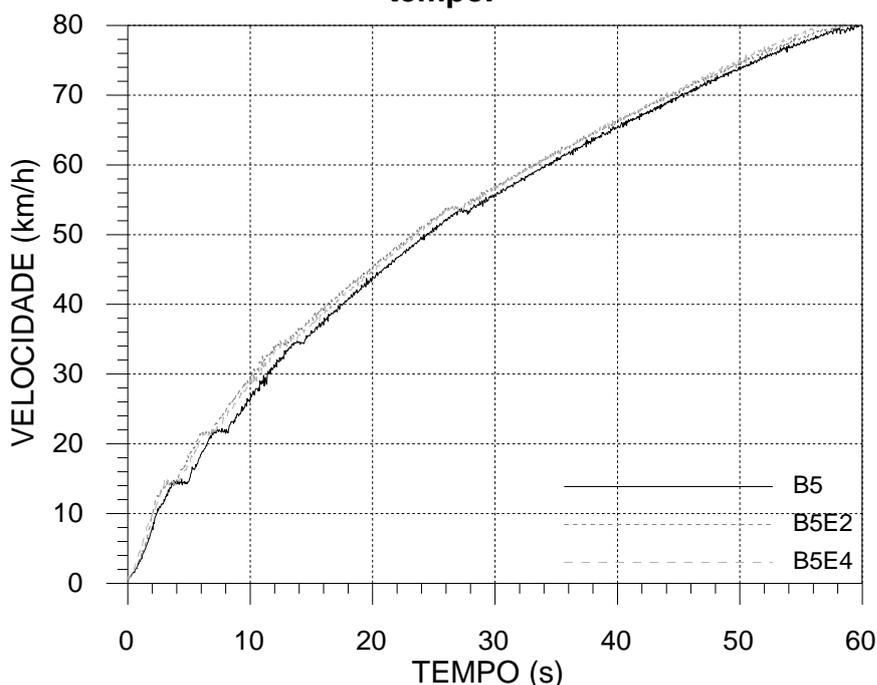
Para a realização da prova de *coastdown* foi utilizado um trecho retilíneo, com inclinação menor que 0.3%. O pedal de embreagem foi acionado de forma a garantir que não houvesse influência da inércia do conjunto motor-caixa de marchas na avaliação. A desaceleração padrão consistiu de reduções de 80 km/h a 20 km/h, tendo estas sido realizadas de uma só vez ou compostas de 87 km/h a 48 km/h e de 54 km/h a 18 km/h. Esses valores foram utilizados para compor as forças resistivas ao rolamento e a força aerodinâmica. O *coastdown* foi realizado em partes conforme explicitado devido a ausência de um trecho retilíneo com inclinação constante com extensão superior a 8 km (para proporcionar a realização da desaceleração em apenas uma parte, 80 a 20 km/h).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados dos testes de aceleração de 0 a 80 km/h e retomadas de 40 a 80 km/h mostram que o abastecimento do veículo com misturas que contêm etanol proporcionou maior aceleração quando comparado ao veículo abastecido com óleo diesel metropolitano comum (B5) (Figuras 25 a 27). A mistura com a maior concentração de etanol (B5E4) foi a que proporcionou os menores tempos de aceleração de 0 a 80 km/h e de retomada de 40 km/h a 80 km/h (Figuras 25 e 27). Conseqüentemente, ao atingir a velocidade objetivo (80 km/h) na aceleração a partir da inércia e na retomada a partir de 40 km/h o veículo abastecido com B5E4 percorre uma distância mais curta (Figura 28).

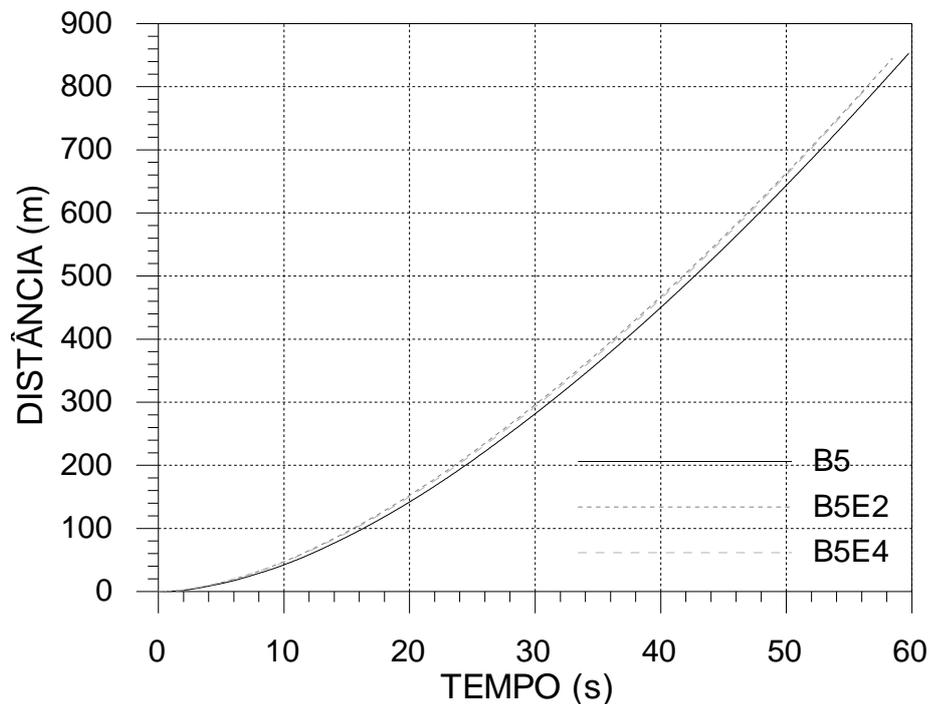
Estes resultados são justificados pelo oxigênio presente no etanol, favorecendo a combustão mais completa, e pela sua maior velocidade da chama (STONE, 1999). Além disso, a combustão mais rápida causa menor perda de calor pelas paredes dos cilindros do motor com o conseqüente aumento da eficiência térmica (RAKAPOULOS, 2007). Assim, com a melhoria da eficiência de conversão de combustível, maior potência é disponível no eixo do motor e transmitida para as rodas do veículo, possibilitando acelerações mais rápidas.

**Figura 25 – Variação da velocidade de aceleração de 0 a 80 km/h com o tempo.**



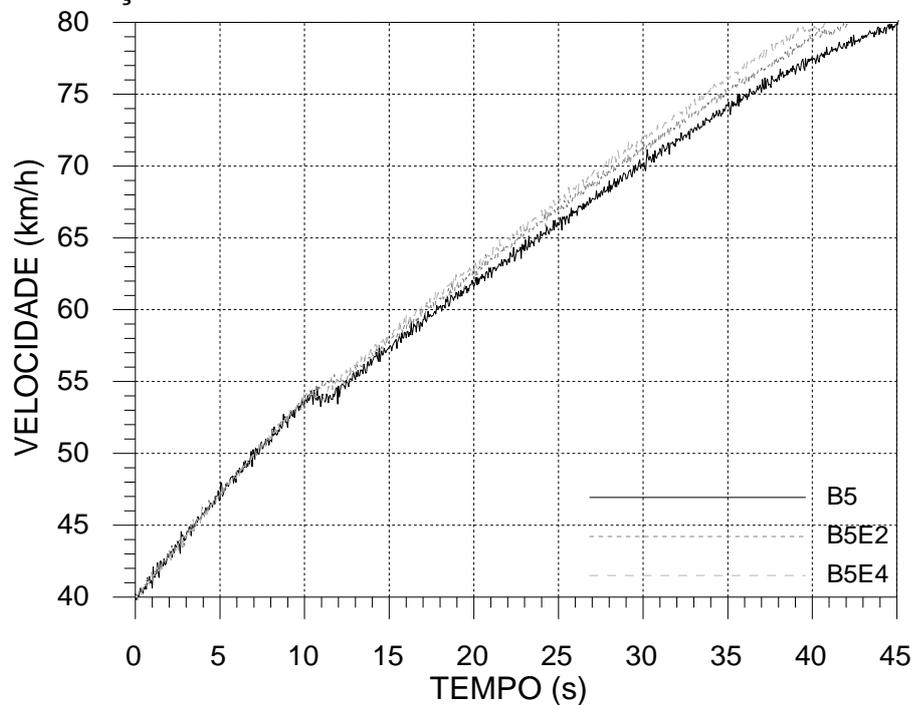
Fonte: Dados da pesquisa.

**Figura 26 – Variação da distância percorrida com o tempo durante a aceleração e 0 a 80 km/h.**



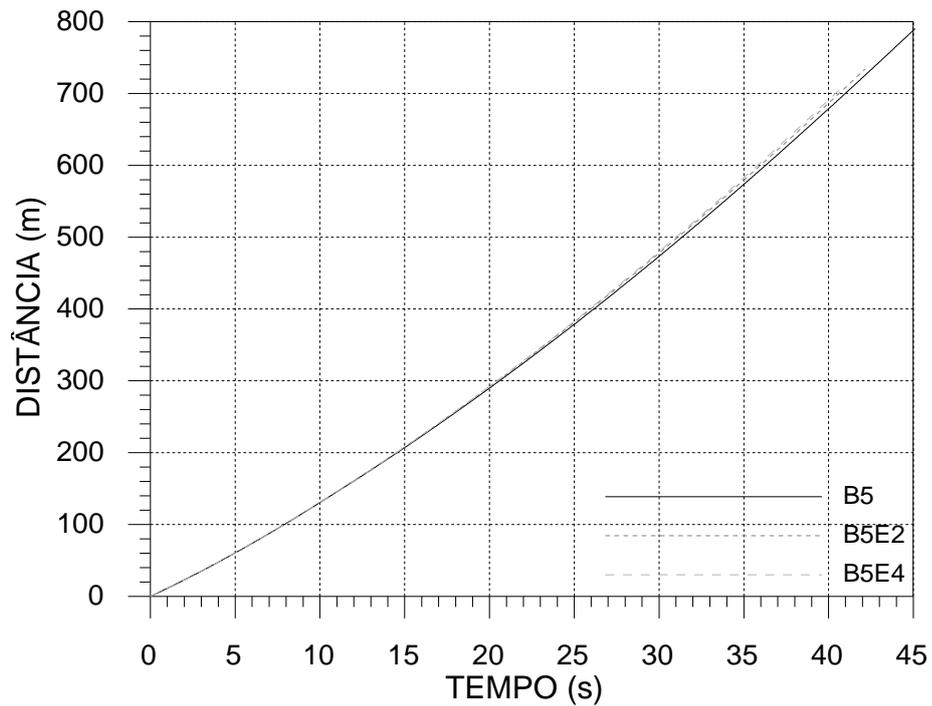
Fonte: Dados da pesquisa.

**Figura 27 – Variação da velocidade de retomada de 40 a 80 km/h com o tempo.**



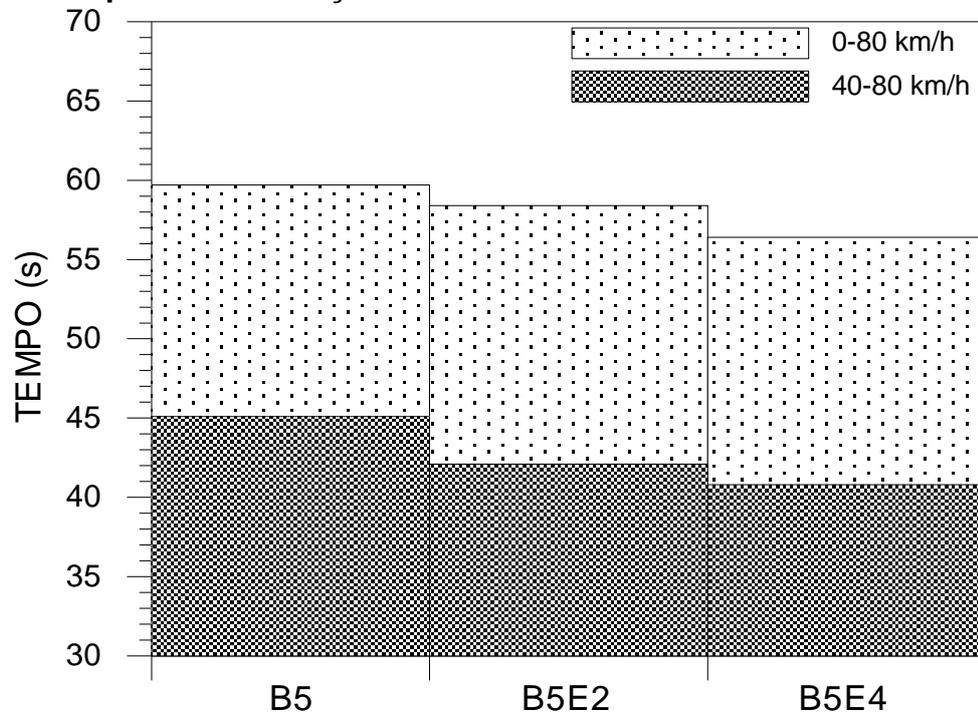
Fonte: Dados da pesquisa.

**Figura 28 – Variação da distância percorrida com o tempo durante a retomada de 40 a 80 km/h.**



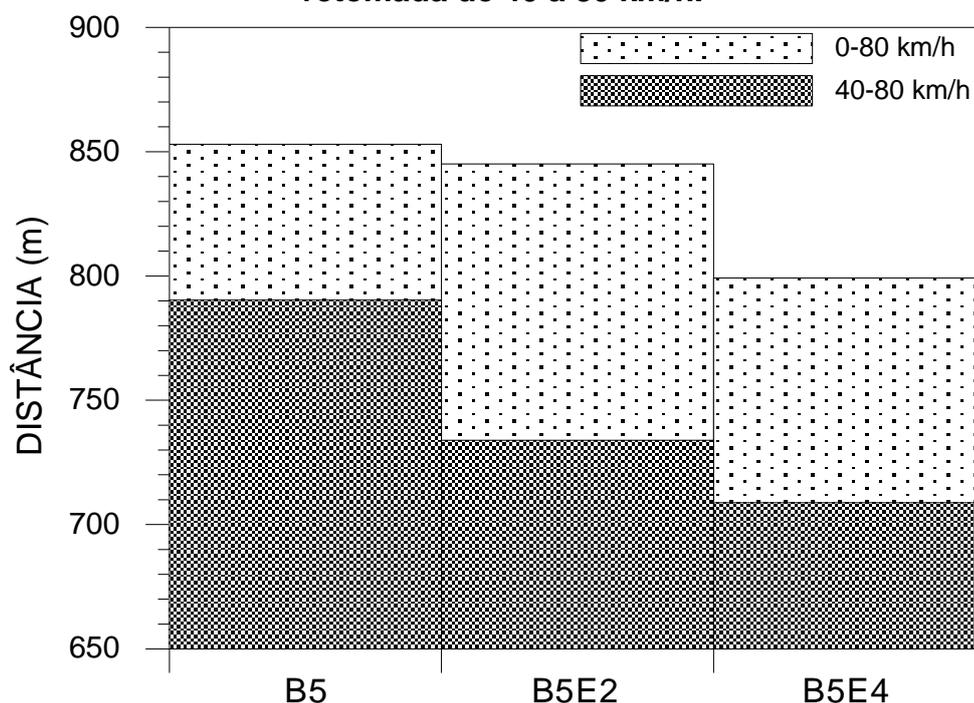
Fonte: Dados da pesquisa.

**Figura 29 – Tempos de aceleração de 0 a 80 km/h e retomada de 40 a 80 km/h.**



Fonte: Dados da pesquisa.

**Figura 30 – Distâncias percorridas durante a aceleração de 0 a 80 km/h e retomada de 40 a 80 km/h.**



Fonte: Dados da pesquisa.

Das Figuras 25 à 29 observa-se que a adição de 2% de etanol no combustível proporcionou uma redução de 2.2% no tempo e de 0.93% na distância percorrida nos testes de aceleração de 0 a 80 km/h. O uso de 4% de etanol no combustível reduziu o tempo em 5.5% e a distância percorrida em 6.3% nos testes de aceleração de 0 a 80 km/h. Nos testes de retomada de 40 km/h a 80 km/h, a utilização de 2% de etanol no combustível reduziu o tempo em 6.7 % e a distância percorrida em 7.1%. Nestes testes, o emprego de 4% de etanol como aditivo no combustível reduziu o tempo do percurso em 9.5% e a distância percorrida em 10.3%. Estes resultados são sumarizados no quadro da Figura 31.

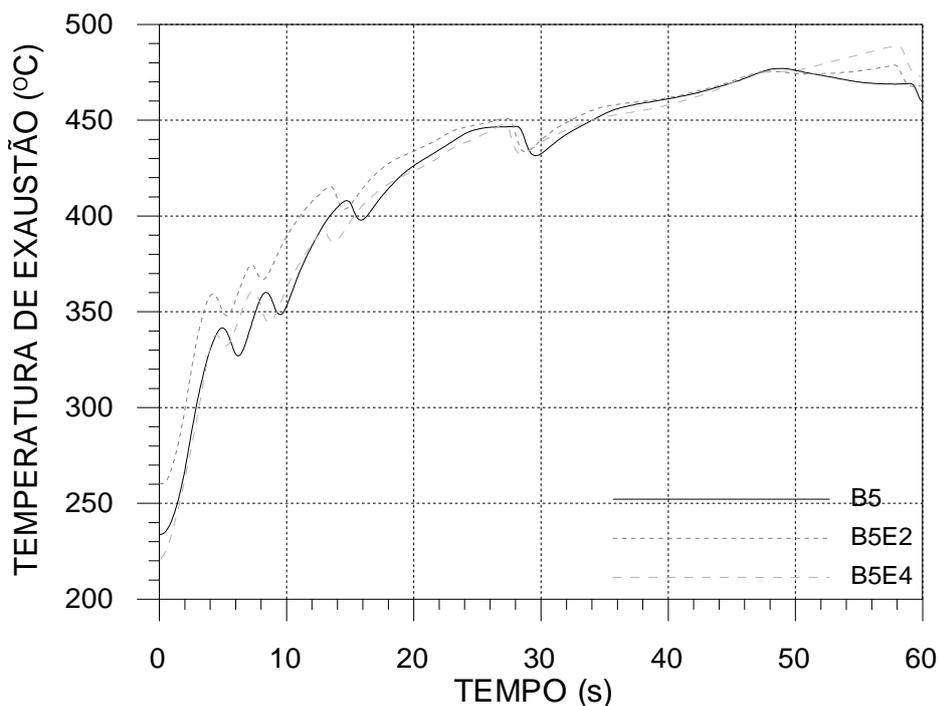
**Figura 31 – Quadro: redução do tempo e distância nos testes de aceleração e retomada.**

ACELERAÇÃO	0 km/h - 80 km/h		40 km/h - 80 km/h	
COM BUSTÍVEL	TEMPO (s)	DISTÂNCIA (m)	TEMPO (s)	DISTÂNCIA (m)
B5	59.7	853.0	45.1	790.3
B5E2	-2.2%	-0.93%	-6.7%	-7.1%
B5E4	-5.5%	-6.3%	-9.5%	-9.3%

Fonte: Dados da pesquisa.

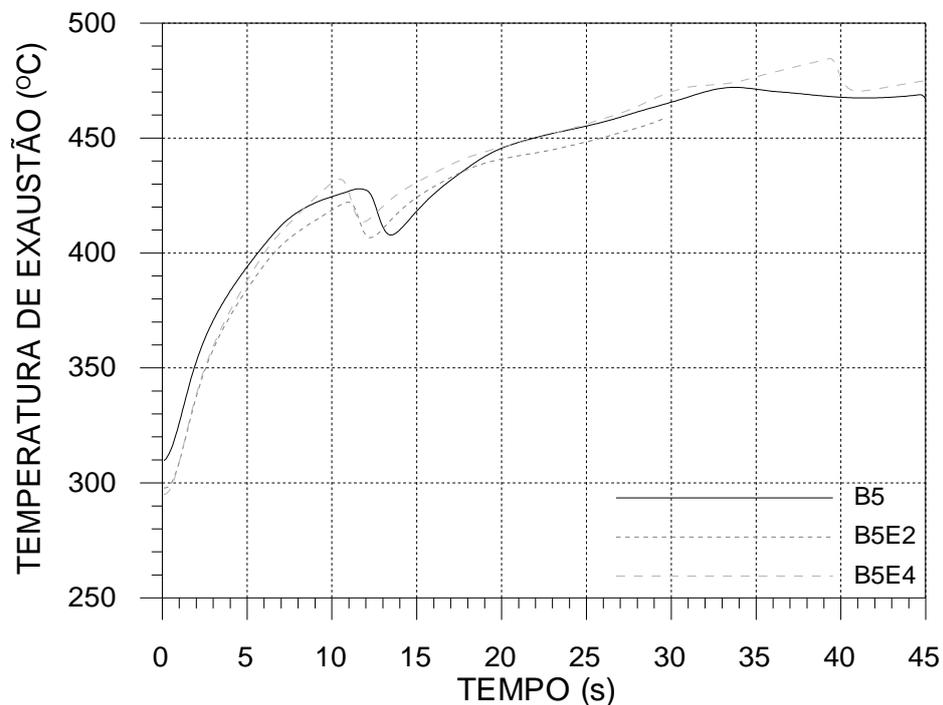
A temperatura na exaustão aumentou com a utilização de etanol como aditivo no combustível no início da aceleração de 0 a 80 km/h (Figura 32). A razão para este resultado é o provável atraso da ignição ocasionado pela presença do etanol. O atraso da ignição é esperado, dado que o número de cetano do etanol é muito menor que o do óleo diesel (Hansen et al., 2005; Sayin e Uslu, 2008; Labeckas e Slavinskas, 2009; Park et al., 2010a; Park et al., 2010b; Huwan et al., 2011; Torres-Jimenez et al., 2011a; Zhu et al., 2011; Torres-Jimenez et al., 2011b). Contudo, nos testes de retomada de 40 km/h a 80 km/h a utilização de etanol como aditivo ao combustível diesel não alterou significativamente a temperatura de exaustão. Diferentemente dos testes de aceleração de 0 a 80 km/h, nos quais o veículo parte do repouso e com velocidades de rotação menores (Figura 33), nos testes de retomada de 40 km/h a 80 km/h o veículo já se encontra em movimento e com velocidades de rotação maiores no início dos testes (Figura 34). A maior taxa de retorno de combustível nestes testes causa maior agitação do combustível no tanque e, conseqüentemente, maior uniformidade da mistura contendo etanol que é injetada na câmara de combustão. A baixa concentração de etanol, neste caso, não afeta significativamente o atraso da ignição do combustível.

**Figura 32 – Variação da temperatura de exaustão com o tempo durante a aceleração de 0 a 80 km/h.**



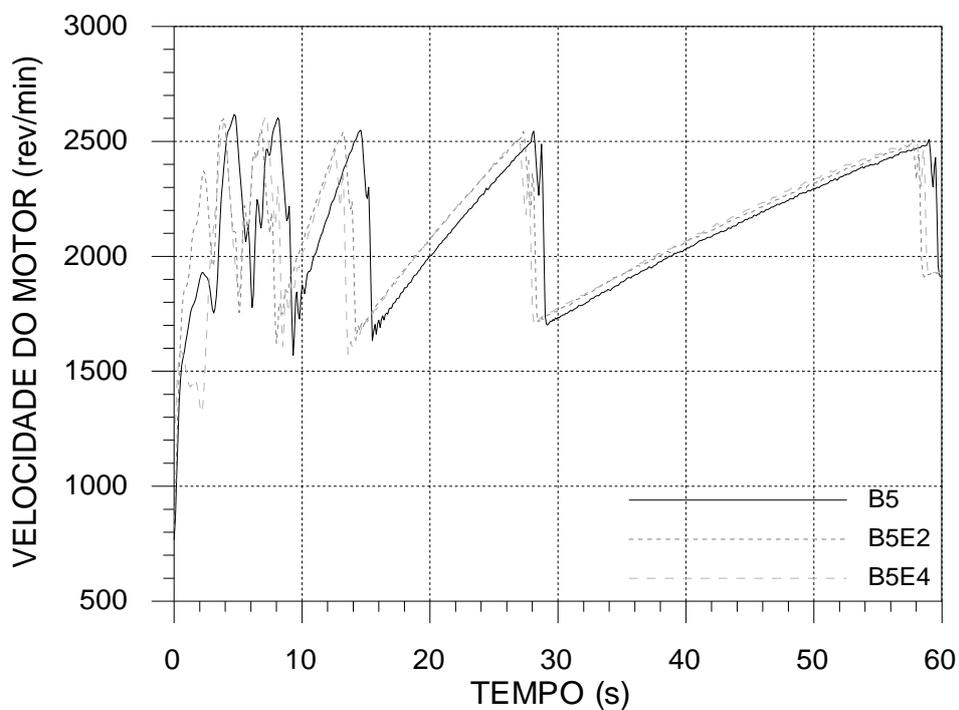
Fonte: Dados da pesquisa.

**Figura 33 – Variação da temperatura de exaustão com o tempo durante a retomada de 40 a 80 km/h.**



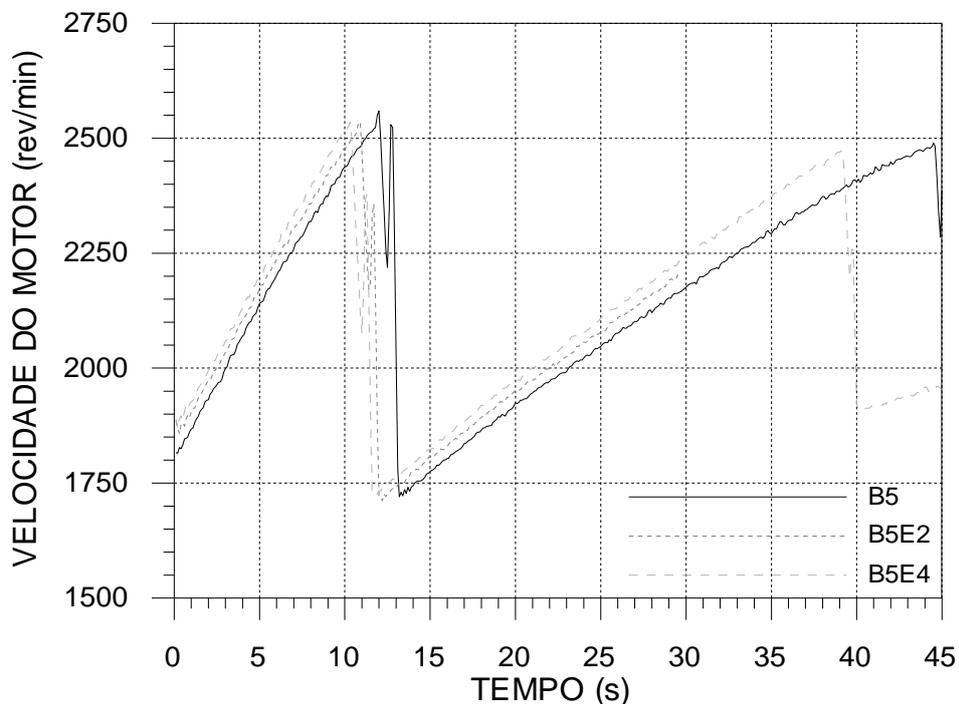
Fonte: Dados da pesquisa.

**Figura 34 – Variação da velocidade de rotação do motor com o tempo durante a aceleração de 0 a 80 km/h.**



Fonte: Dados da pesquisa.

**Figura 35 – Variação da velocidade de rotação do motor com o tempo durante a retomada de 40 80 km/h.**



Fonte: Dados da pesquisa.

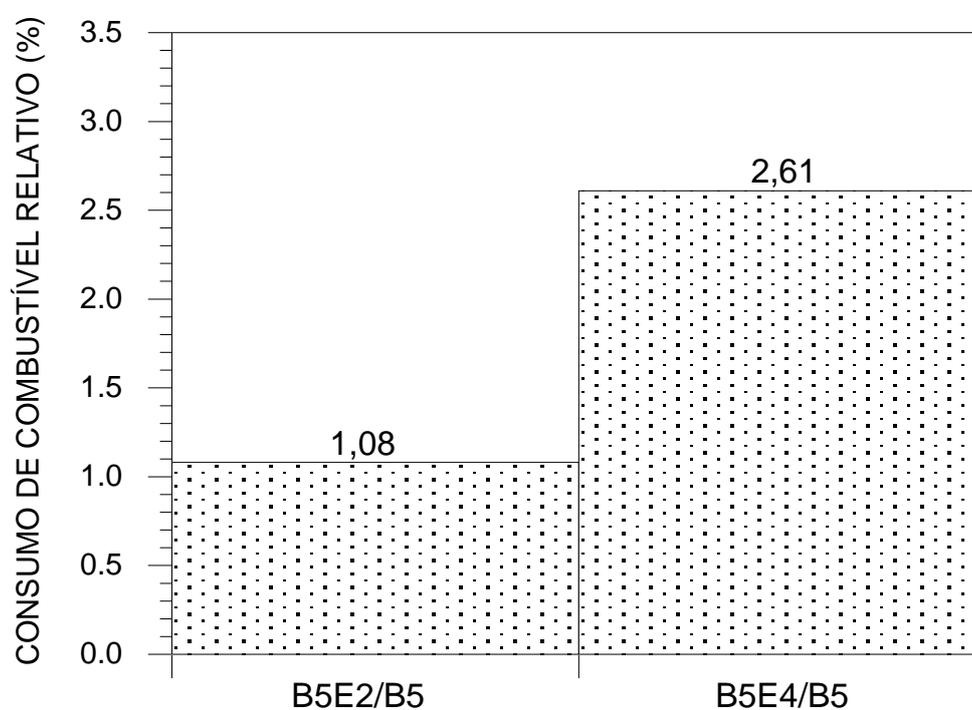
A velocidade máxima atingida pelo veículo ao longo de 2 km de percurso, partindo do repouso, foi também avaliada para verificar os efeitos da utilização do etanol como aditivo no combustível diesel. A Tabela 1 mostra, contudo, que os resultados foram similares para todos os combustíveis utilizados. A elevada inércia do veículo e as características do conjunto propulsor (motor e sistema de transmissão) podem ter limitado a velocidade máxima atingida ao longo do percurso definido, não permitindo que os efeitos do uso do etanol fossem significativos.

A Figura 36 apresenta os resultados do consumo de combustível medido de acordo com a metodologia *back-to-back*. Com base nos valores, é possível perceber que o consumo de combustível aumentou à medida que se aumentou a concentração de etanol na mistura. O aumento no consumo de combustível seguiu as tendências dos resultados obtidos em testes de motores em dinamômetro por RAKAPOULOS (2008) e LABECKAS (2009). Devido ao etanol possuir menor poder calorífico que o óleo diesel, maior massa de combustível deve ser injetada na câmara de combustão para suprir a demanda da carga quando o etanol é utilizado como aditivo no combustível.

**Tabela 1 – Valores obtidos de velocidade máxima.**

COMBUSTÍVEL	VELOCIDADE MÁXIMA (km/h)
B5	106
B5E2	107
B5E4	107

Fonte: Dados da pesquisa.

**Figura 36 – Consumo de combustível das misturas contendo 2% e 4% etanol (B5E2 e B5E4) em relação à mistura de 5% de biodiesel em óleo diesel (B5).**

Fonte: Dados da pesquisa.

## **6 CONCLUSÕES**

### **6.1 Observações deste trabalho**

Foi possível constatar que a aceleração e retomada do veículo em estrada foi sensivelmente afetada pela presença de etanol no combustível. Misturas contendo maior concentração volumétrica de etanol proporcionaram melhores resultados. A melhoria nos índices proporcionada pelo etanol foi devida à maior presença de oxigênio na mistura, que favoreceu a ocorrência de combustão mais completa e mais rápida, proporcionando menor perda de calor pelas paredes do cilindro. Com o aumento da eficiência térmica, maior potência era disponível no eixo do motor e transmitida para as rodas do veículo para aceleração mais rápida. Devido às limitações impostas pelo conjunto de transmissão de potência, a velocidade máxima não sofreu variações significativas com a presença de etanol no combustível. Conforme foi aumentada a concentração de etanol no combustível, percebeu-se um aumento no consumo de combustível devido ao baixo poder calorífico do etanol presente na mistura. O consumo foi elevado porque, para ser obtido com as misturas de etanol o mesmo desempenho obtido com o combustível B5, foi necessário um maior período de injeção, conseqüentemente ocorrendo o aumento da massa de combustível consumido.

### **6.2 Sugestões para trabalhos futuros**

Como trabalho futuro, sugere-se realizar uma investigação semelhante à deste trabalho incrementando-se a concentração de etanol até o limite em que a presença de agentes surfactantes se faz necessária. Sugere-se também investigar o uso de concentrações elevadas de etanol (acima de 10% v/v) com a presença de aditivos surfactantes. Propõem-se verificações dos níveis de emissões de um veículo comercial usando misturas de óleo diesel-biodiesel-etanol, submetido a um ciclo padrão de operação. Finalmente, sugere-se que sejam realizadas investigações similares em veículos pesados, para verificar os parâmetros de desempenho, consumo de combustível e emissões, principalmente para operação em plena carga.

## REFERÊNCIAS

AJAV E.A, Bachchan Singh, T.K. Bhattacharya. Experimental study of some performance parameters of a constant speed stationary diesel engine using ethanol-diesel blends as fuel. **Biomass and Bioenergy** v. 17, p. 357-365, 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D1500: Standard Test Method for ASTM Color of Petroleum Products (ASTM Color Scale). **Annual Book of ASTM Standards**. West Conshohocken, 2001.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D1298: Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), or API Gravity of Crude Petroleum and Liquid Petroleum Products by Hydrometer Method. **Annual Book of ASTM Standards**. West Conshohocken, 2009a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D4052: Standard Test Method for Density and Relative Density of Liquids by Digital Density Meter. **Annual Book of ASTM Standards**. West Conshohocken, 2009b.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D613: Standard Test Method for Cetane Number of Diesel Fuel Oil. **Annual Book of ASTM Standards**. West Conshohocken, 2009c.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D130: Standard Test Method for Corrosiveness to Copper from Petroleum Products by Copper Strip Test. **Annual Book of ASTM Standards**. West Conshohocken, 2009d.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D445: Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity). **Annual Book of ASTM Standards**. West Conshohocken, 2009e.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D6079: Standard

Test Method for Evaluating Lubricity of Diesel Fuels by the High-Frequency Reciprocating Rig (HFRR). **Annual Book of ASTM Standards**. West Conshohocken, 2009f.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D93: Standard Test Methods for Flash Point by Pensky-Martens Closed Cup Tester. **Annual Book of ASTM Standards**. West Conshohocken, 2009g.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D2500: Standard Test Method for Cloud Point of Petroleum Products. **Annual Book of ASTM Standards**. West Conshohocken, 2009h.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D97: Standard Test Method for Pour Point of Petroleum Products. **Annual Book of ASTM Standards**. West Conshohocken, 2009i.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D86: Standard Test Method for Distillation of Petroleum Products at Atmospheric Pressure. **Annual Book of ASTM Standards**. West Conshohocken, 2009j.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D4176: Standard Test Method for Free Water and Particulate Contamination in Distillate Fuels (Visual Inspection Procedures). **Annual Book of ASTM Standards**. West Conshohocken, v. 5, n. 2, 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D482: Standard Test Method for Ash from Petroleum Products. **Annual Book of ASTM Standards**. West Conshohocken, 2009l.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D1796: Standard Test Method for Water and Sediment in Fuel Oils by the Centrifuge Method (Laboratory Procedure). **Annual Book of ASTM Standards**. West Conshohocken, 2009m.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D524: Standard

Test Method for Ramsbottom Carbon Residue of Petroleum Products. **Annual Book of ASTM Standards**. West Conshohocken, 2009n.

ANAND, K. et al. Experimental investigations on combustion, performance and emissions characteristics of neat karanja biodiesel and its methanol blend in a diesel engine. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, p. 533-541, 2011.

AYDIN, H., Cumali İlkılıç. Effect of ethanol blending with biodiesel on engine performance and exhaust emissions in a CI engine. **Applied Thermal Engineering**, v. 30, p. 1199–1204, 2010.

BARABÁS, István; Todorut, Adrian; Baldean, Doru. Performance and emissions characteristics of a CI engine fueled with diesel-biodiesel-bioethanol blends. **Fuel** (2010), doi:10.1016/j.fuel.2010.07.011.

BOSCH, Robert. **Manual de Tecnologia Automotiva/Robert Bosch**. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.

CHEN, Rong-Horng. Diesel–diesel and diesel–ethanol drop collisions. **Applied Thermal Engineering**, v. 27, p. 604–610, 2007.

FITCH, J. W. **Motor Truck Engineering Handbook**. Warrendale, PA. 1993

GARCIA, Roberto. **Combustíveis e combustão industrial**. Rio de Janeiro: Interciência, 2002. 202p.

HANSEN, Alan C.; ZHANG, Qin; LYNE, Peter W. L.. Ethanol-diesel fuel blends - a review. **Bioresource Technology**, v. 96, n. 3, p. 277-285, 2005.

HUANG, J. et al. Experimental investigation on the performance and emissions of a diesel engine fuelled with ethanol–diesel blends. **Applied Thermal Engineering**, v. 29, p. 2484–2490, 2009.

HUANG, Z. et al. Combustion behaviors of a compression-ignition engine fuelled with diesel/methanol blends under various fuel delivery advance angles. **Bioresource Technology**, v. 95 p. 331–341, 2004.

HULWAN, D. B., Satishchandra V. Joshi. Performance, Emission and combustion characteristic of a multicylinder DI diesel engine running on diesel–ethanol–biodiesel blends of high ethanol content. **Applied Energy**, v. 88, p. 5042–5055, 2011.

KARTHIKEYKAN, B., K Srithar. Performance characteristics of a glowplug assisted low heat rejection diesel engine using ethanol. **Applied Energy** (2010) doi: 10.1016/j.apenergy.2010.07.011.

KEITH, Owen; COLEY, Trevor. **Automotive Fuels and Reference Book**. 2 Ed. SAE International, 1995.

KICUCHI, R. et al. Energy lifecycle assessment and enviromental impacts of ethanol biofuel. **International Journey of Engine Research**, v. 33, p. 186-193, 2008.

KNOTHE, G. et al.. **Manual de Biodiesel**. São Paulo: Edgard Blucher, 2006. 340p.

KLINE, S. J; MCCLINTOCK, F.A. **Describing Uncertainties in Single Sample Experiments**. Mechanical Engineering, vol 75, pág. 3-8, 1953.

LABECKAS G., Stasys Slavinskas. Comparative performance of direct injection diesel engine operating on ethanol, petrol and rapeseed oil blends. **Energy Conversion and Management**, v.50, p. 792–801, 2009.

LAPUERTA, M. et al. Stability of diesel–bioethanol blends for use in diesel engines. **Fuel**, v. 86, p. 1351–1357, 2007.

PARENTE, Expedito José de Sá. **Biodiesel - Uma aventura tecnológica num país engraçado**. Fortaleza, 66 p., 30 mar. 2003.

PARK S. et al. Influence of ethanol blends on the combustion performance and exhaust emission characteristics of a four-cylinder diesel engine at various engine loads and injection timings. **Fuel** (2010), doi:10.1016/j.fuel.2010.08.029.

PARK S. et al. Nozzle flow and atomization characteristics of ethanol blended biodiesel fuel. **Renewable Energy**, v. 35, p. 144–150, 2010.

PETROBRAS. **Produtos Petrobras – Óleo Diesel**. 6. ed., 79 p., nov. 2000. Belo Horizonte: 2000.

RAKAPOULOS, C. D., et al. Study of the performance and emissions of a high-speed direct injection diesel engine operating on ethanol–diesel fuel blends. **International Journal of Alternative Propulsion**, v. 1, p. 309–24, 2007.

RAKAPOULOS, D.C.; Rakapoulos, C.D.; Kakaras, E.C.; Giakoumis, E.G. Effects of ethanol-diesel fuel blends on the performance and exhaust emissions of heavy duty DI diesel engines. **Energy Conversion and Management**. v. 49, p-3155-3162, 2008.

RANDAZZO, Mario Luciano. **Emissões e performance de um veículo operando com misturas de óleo diesel, biodiesel e etanol**. 2009. 175f. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

REN, Y. et al. Combustion and emissions of a DI diesel engine fuelled with diesel-oxygenate blends. **Fuel**, v. 87, p. 2691–2697, 2008.

SAYIN C. Engine performance and exhaust gas emissions of methanol and ethanol–diesel blends. **Fuel**, 89, p. 3410–3415, 2010.

SAYIN C., Kadir Uslu. Influence of advanced injection timing on the performance and emissions of CI engine fueled with ethanol-blended diesel fuel. **International Journey of Engine Research**, v. 32 p. 1006-1015, 2008.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. SAE J 1321. Joint TMC/SAE Fuel Consumption Test Procedure - Type II. **2005 SAE Handbook**. Warrendale, PA. 1986.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. SAE J 1491. Vehicle Acceleration Measurement. **2005 SAE Handbook**. Warrendale, PA. 1986.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. SAE J 2188. Commercial Truck and Bus SAE Recommended Procedure for Vehicle Performance Prediction and Charting. **2005 SAE Handbook**. Warrendale, PA. 1986.

STONE, R. **Introduction to internal combustion engines**. 3<sup>rd</sup> ed. London: Macmillan; 1999.

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

TORRES-JIMENEZ, E. et al. Experimental investigation on injection characteristics of bioethanol–diesel fuel and bioethanol–biodiesel blends. **Fuel**, v. 90 p. 1968–1979, 2011b.

ZHU, L. et al. Combustion, performance and emission characteristics of a DI diesel engine fueled with ethanol–biodiesel blends. **Fuel**, v. 90, p. 1743–1750, 2011.

## APÊNDICE A – ANÁLISE DE INCERTEZA

Para garantir a correta condição ambiental para realização das provas, a temperatura ambiente, velocidade do vento e umidade relativa foram avaliadas antes das acelerações. Além disso, as incertezas de outros parâmetros medidos também foram avaliadas.

### A.1 Incerteza da medição da temperatura ambiente do local da realização da prova

O termohigrômetro Lutron LM-8010 foi utilizado para leitura da temperatura ambiente. Como foi realizada 12 (doze) verificações ao todo (em ambos os sentidos, considerando as provas de aceleração e retomada – 03 acelerações e 03 retomadas):

$$I_{Temp} = \frac{t_{Temp} * S_{Temp}}{\sqrt{n_{Temp}}}$$

Onde:

$I_{Temp}$  – Incerteza máxima da temperatura ambiente medida durante as verificações (°C)

$t_{Temp}$  – O número de Student, obtido na tabela em função do número de medidas realizadas e da confiança da medição que neste caso garante que 97.5% das medições terão a incerteza calculada (adimensional)

$s_{Temp}$  – maior desvio padrão das medidas de temperatura realizadas durante as verificações (°C)

$n_{Temp}$  – número de medições (adimensional)

$$I_{temp} = \frac{2.179 * 0.358}{\sqrt{12}} = 0.23 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Além da incerteza calculada pelo número de provas, deve-se levar em consideração a própria incerteza do equipamento, que é 1.2 °C, obtendo uma

incerteza total de 1.43 °C, o que valida a realização da prova que exige uma temperatura ambiente maior que 15 °C.

## **A.2 Incerteza da medição da umidade relativa do ar ambiente do local da realização da prova**

De forma análoga à medição da temperatura ambiente, o termohigrômetro Lutron LM-8010 foi utilizado para leitura da umidade relativa do ar. Como foi realizada 12 (doze) verificações ao todo (em ambos os sentidos, considerando as provas de aceleração e retomada – 03 acelerações e 03 retomadas):

$$I_{RH\%} = \frac{t_{RH\%} * S_{RH\%}}{\sqrt{n_{RH\%}}}$$

Onde:

$I_{RH\%}$  – Incerteza máxima da umidade relativa do ar medida durante as verificações (%)

$t_{RH\%}$  – O número de Student, obtido na tabela em função do número de medidas realizadas e da confiança da medição que neste caso garante que 97.5% das medições terão a incerteza calculada (adimensional)

$s_{RH\%}$  – maior desvio padrão das medidas de umidade relativa do ar realizadas durante as verificações (%)

$n_{RH\%}$  – número de medições (adimensional)

Desta forma, obtém-se:

$$I_{RH\%} = \frac{2.179 * 0.171}{\sqrt{12}} = 0.11 \%$$

Deve-se ainda incluir a incerteza do próprio equipamento, que é 4%. A incerteza total da umidade relativa é de 4.11%.

### A.3 Incerteza da medição da velocidade do vento no local da realização da prova

O termohigrômetro e anemômetro Lutron LM-8010 foi utilizado para medir a velocidade do vento. Da mesma forma, considerando que foram realizadas 12 (doze) verificações ao todo (em ambos os sentidos, considerando as provas de aceleração e retomada – 03 acelerações e 03 retomadas):

$$I_{WIND\_SPD} = \frac{t_{WIND\_SPD} * S_{WIND\_SPD}}{\sqrt{n_{WIND\_SPD}}}$$

Onde:

$I_{WIND\_SPD}$  – Incerteza máxima da velocidade do vento medida durante as verificações (m/s)

$t_{WIND\_SPD}$  – O número de Student, obtido na tabela em função do número de medidas realizadas e da confiança da medição que neste caso garante que 97.5% das medições terão a incerteza calculada (adimensional)

$S_{WIND\_SPD}$  – maior desvio padrão das medidas de velocidade do vento realizadas durante as verificações (m/s)

$n_{WIND\_SPD}$  – número de medições (adimensional)

Desta forma, obtém-se:

$$I_{WIND\_SPD} = \frac{2.179 * 0.171}{\sqrt{12}} = 0.11 \text{ m/s}$$

Incerteza do próprio equipamento é de 3% para velocidades de até 30 m/s. Como todas as provas foram realizadas de acordo com norma, que determina uma velocidade de vento inferior à 2 m/s, obtém-se uma incerteza total de 3.0 % nos valores de velocidade do vento acrescidos de 0.11 m/s.

### A.4 Incerteza da velocidade de acelerações e retomadas

A incerteza da velocidade percorrida, segundo o fabricante Racelogic, pode ser devida à comunicação entre sistema de coleta de dados VBOX II SX e os

satélites de posicionamento. De acordo com o fabricante Racelogic para a velocidade é 0,1 km/h usando uma taxa de coleta de dados, especificado a 20Hz.

#### **A.5 Incerteza das distâncias percorridas durante as acelerações e retomadas**

De uma forma similar àquela mencionada para a velocidade, o fabricante Racelogic afirma que a incerteza da distância percorrida depende da qualidade e confiabilidade da comunicação entre o sistema e o satélite. Para a distância percorrida usando uma aquisição a 20Hz, há uma incerteza de 0,05% (50 cm por km percorrido).

#### **A.6 Incerteza do tempo lido para a as acelerações e retomadas**

De acordo com o fabricante, ao realizar avaliações de aceleração retomada ou provas de frenagem, há uma incerteza (já explicada anteriormente) de 0.01s para aceleração, retomada e frenagem.

#### **A.7 Incerteza da rotação do motor**

Conforme descrito no capítulo 4, para medir a rotação do motor, foi utilizado um equipamento de aquisição de dados HBM MGCplus (Hottinger Baldwin Messtechnik). Para tal, uma placa de aquisição, modelo AP460i foi utilizada. A incerteza a ser considerada será a própria incerteza da placa AP460i, que neste caso é de 0.01% (uma vez que o sinal não é oriundo de largura de pulso – PWM).

#### **A.8 Incerteza da medição da temperatura dos gases na exaustão**

A incerteza na medição da temperatura nos gases da exaustão do motor pode ser considerada como sendo a própria incerteza da placa de aquisição AP809, neste caso, 0.06°C, somada à própria incerteza do termopar tipo K, de 1.5°C, obtendo 1.56 °C de incerteza.

#### **A.9 Incerteza do consumo de combustível**

A incerteza do consumo de combustível foi calculada a partir dos valores retornados pelo medido de vazão (flowmeter). Os valores encontrados se seguem:

$$I_{FUEL\_CONS} = \frac{t_{FUEL\_CONS} * S_{FUEL\_CONS}}{\sqrt{n_{FUEL\_CONS}}}$$

Onde:

$I_{FUEL\_CONS}$  – Incerteza máxima do consumo de combustível medido após as provas (litros)

$t_{FUEL\_CONS}$  – O número de Student, obtido na tabela em função do número de medidas realizadas e da confiança da medição que neste caso garante que 97.5% das medições terão a incerteza calculada (adimensional).

$S_{FUEL\_CONS}$  – maior desvio padrão das medidas de consumo de combustível após as provas (litros)

$n_{FUEL\_CONS}$  – número de medições (adimensional). Nesta avaliação, 2 (duas) vezes para cada combustível utilizado, para o veículo de controle e o veículo de teste, totalizando 12 (doze) medições.

Desta forma, obtém-se:

$$I_{FUEL\_CONS} = \frac{2.179 * 0.723}{\sqrt{12}} = 0.45 L$$

## **APÊNDICE B – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO APARATO EXPERIMENTAL**

### **B.1 Sistema de medição orientado via satélite Racelogic VBOX II SX**

#### ***B.1.1 Especificações para velocidade***

Velocidade: 0 a 1600 km/h

Velocidade mínima: 0.1 km/h

Incerteza: 0.1 km/h

Taxa de atualização: 20 Hz

Resolução: 0.01 km/h

Latência: 0.45 ms

#### ***B.1.2 Especificações para a distância***

Incerteza: 0.05% (50 cm por km percorrido)

Unidades de trabalho: metros (m) e pés (ft)

Taxa de atualização: 20 Hz

Resolução: 1 cm

#### ***B.1.3 Especificações para o tempo***

Resolução: 0.01 s

Incerteza: 0.01 s

#### ***B.1.4 Especificações para o posicionamento absoluto***

Incerteza: 3 m para 95% de CEP (Circle for Error Probable)

Incerteza com SBAS DGPS

- Europa (EGNOS): < 1 m para 95% de CEP (Circle for Error Probable)
- EUA (WAAS) + ASIA (MSAS): < 1.8 m para 95% de CEP (Circle for Error Probable)
- Incerteza com antena de base: 40 cm para 95% de CEP (Circle for Error Probable)
- Incerteza com atualização local: 20 cm para 95% de CEP (Circle for Error Probable)

- Taxa de atualização: 20 Hz

Resolução: 1 cm

### ***B.1.5 Especificações para a altitude e altura***

Incerteza de altura: 6 m para 95% de CEP (Circle for Error Probable)

Incerteza de altura com SBAS: 2 m para 95% de CEP (Circle for Error Probable)

### ***B.1.6 Memória***

Memoria: Cartão SD

Tempo de gravação: Depende da capacidade do cartão SD. Aproximadamente 4.4 megabytes por cada hora em uso enquanto armazena todos os canais de GPS.

### ***B.1.7 Entradas***

Entrada VCI CAN: Permite ao usuário gravar dados oriundos da rede CAN de outros sistemas. Nota: A unidade não conecta a outros módulos Racelogic de CAN quando a entrada em VCI CAN está ativa.

Entrada de freio / eventos: Entrada de amostras para módulo de gatilho externo.

### ***B.1.8 Saídas (Barramento CAN)***

Taxa de bits: 125 kbit/s, 250 kbit/s, 500 kbit/s e 1 Mbit/s dependendo da velocidade de transferência escolhida.

Tipo do identificador: padrão 11 bit estendido 29 bit.

Dados disponíveis: visualização de satélites, tempo UTC, latitude, longitude, velocidade, rotação angular, altitude, velocidade vertical, distância, aceleração longitudinal, aceleração lateral, distância a partir de um sinal, tempo de sinal, velocidade de sinal.

### ***B.1.9 Saídas (analógica)***

Intervalo de tensão: -5 a +5 volts, aceleração longitudinal e aceleração lateral. 0 a +5 volts para velocidade.

Ajuste padrão: 0.0125 volts para cada km/h (0 a 400 km/h)

Incerteza: 0.1 km/h a 100 km/h.

### ***B.1.10 Saídas (digital)***

Intervalo de frequência: DC para 50 kHz

Ajuste padrão: 90 pulsos por metro (igual a 25Hz por km/h de 0 a 400 km/h)

Resolução: 0.1 km/h a 100 km/h

### ***B.1.11 Alimentação***

Intervalo de entrada de tensão: 6-30 volts DC

Corrente: tipicamente 560 mA

### ***B.1.12 Características físicas e de ambiente***

Peso: aproximadamente 500g

Tamanho: 154mm x 112mm x 30mm

Temperatura de operação: -30 °C a +60 °C

Temperatura de armazenamento: -40 °C a +85 °C

## **B.2 Características do HBM MGCplus**

### ***B.2.1 Características gerais***

Entrada de tensão nominal: V DC 10 – 50 volts; 12, 24 e 42 volts (adequado para todos os sistemas elétricos comuns automotivos)

Tensão de saída:  $28 \pm 2\%$  volts

Corrente contínua máxima de saída: 3.5 ampères

Número máximo de módulos MGC conectáveis: 10

Partida a partir do modo “stand-by”: mensagem via CAN e sinal de controle digital

Consumo de energia em modo “stand-by”: 1.2 W

Comunicação com o hardware da rede CAN: padrão, conforme definido pela ISO 11898

Velocidade de comunicação: 250 kbit/s

Isolação elétrica da entrada digital: tipicamente 500 V DC

Intervalo de tensão da entrada digital: 0 a 50 V DC

Menor nível da entrada digital:  $V < 1$

Maior nível da entrada digital:  $V > 3$

Proteção contra operação incorreta: à prova de curto-circuito, proteção contra polaridade reversa, desligamento em caso de excesso de temperatura.

Grau de proteção: IP 65

Intervalo de temperatura de operação: -20 °C a 60 °C

Umidade relativa permissível: 100 %

Conexões: entrada de alimentação, linha de comando, entrada digital da rede CAN.

Técnicas de conexão: minisnap ODU série B, projeto S3, tamanho 2.

Alimentação: 4 pinos, codificação de 60°.

Linha de comando: 16 pinos sem codificação

Entrada digital / CAN: 60 pinos, codificação de 30°.

Peso: 3.15 kg

Dimensões: 482 mm x 133 mm x 175 mm

### ***B.2.2 Características da placa AP 809 (medição de temperatura)***

Erro de linearização:  $< 0.06$  °C

Intervalo de linearização: NiCr-Ni (K) -158 °C a 1414 °C

Fe-CuNi (J) -167 a 1192 °C

Cu-CuNi (T) -210 a 393 °C

Intervalo de temperatura da junta fria: -20 °C a +60 °C

Variação a longo prazo maior que 48 horas com/sem autocalibração: K, J, T e K: 0.2 e 0.4 K.

Ruído com filtro de 1.25 Hz, K, J e T:  $< 0.1$  K

### ***B.2.3 Características da placa AP 460i (rotação)***

Classe de incerteza: 0.01%, 0.05% em caso de sinal PWM.

Fontes de sinal de frequência com onda quadrada ou onda senoidal, transdutores de incremento: 0.0001 a 500 kHz.

Dispositivos indutivos de medição da rotação (bobinas T-R), utilizando filtros de entrada: 0.5 a 200 kHz.

Medição de frequência: 0 a 20, 0 a 200 e 0 a 500 kHz.

Incerteza: relacionada ao valor total da escala 0.01 % e 0.05 em caso de sinal PWM

Contagem de pulsos: 100 a 1000000

Máxima taxa de impulso durante a contagem de pulsos: 500000 imp./s

Precisão: 0.001 Kimp.

Frequência de PWM: 1 a 10000 Hz

Precisão: 0.05 %/kHz

Duração de pulso: 0 a 2500 ms

Precisão: 0.001 ms

Intervalo de entrada de frequência: 0.25 a 10000 Hz

Número de subcanais: 4

Classe de incerteza: 0.01

Sinais por subcanal:

- F1 – frequência, pulso ou PWM.
- F2 – 90° de mudança de fase relativo à F1 (detecção de direção)
- Índice zero – detecção da posição zero na contagem de pulsos

Separação elétrica de todas as entradas entre si e do massa do MGC: 500 volts

Intervalo de entrada de frequência: 0 a 500 kHz

Intervalo nominal de temperatura: -20 a +60 °C

Intervalo de temperatura de operação: -20 a +60 °C

Intervalo de armazenagem de temperatura: -25 a +70 °C

Entrada de sinais

- entradas diretas, sinais diferentes (intervalo de tensão de entrada): 0.4 a 30 V
- entradas diretas, bipolar (intervalo de tensão de entrada): 0.4 a 30 V
- entradas diretas, unipolar (intervalo de tensão de entrada): 5 a 30 V

Largura de pulso mínima: 3  $\mu$  s

Entrada para os sensores indutivos, filtrados (apenas sinais F1)

- 500 Hz: 50 mV

- 1 kHz: 100 mV
- 10 kHz: 750 mV
- 25 kHz: 1 V
- 50 kHz: 1.5 V
- 75 kHz: 2 V
- 100 kHz: 2.5 V
- 125 kHz: 3 V
- 150 kHz: 4 V
- 175 kHz: 5 V
- 200 kHz: 7 V

Máxima tensão de entrada: 30 V

Resistência de entrada do sinal F1: aprox. 6 k $\Omega$

### **B.3 Especificações do medidor de vazão (flowmeter) AIC 6008 Swissline**

#### ***B.3.1 Características gerais***

Valor da contrapressão da linha de retorno: nenhum

Máxima viscosidade admitida: 100 mPa.s

Precisão: 1%

Repetibilidade: 0.2%

Intervalo de pressão: -1 a 6 bar

Intervalo de temperatura: -30 a 90 °C

Proteção: IP 65

Alimentação: 24 V DC

#### ***B.3.2 Características específicas***

Dimensões: 390 x 135 x 310 mm

Peso: 14.300 kg (com o filtro incluso)

Intervalo de medição: 4 a 200 l/h

Taxa de pulso: 800 ppl

### **B.3 Especificações do termohigrômetro Lutron LM-8010**

#### ***B.3.1 Especificações para velocidade do vento***

Intervalo de medição da velocidade do vento: 0.4 a 30 m/s

Resolução da velocidade do vento: 0.1 m/s

Incerteza: 0.4 a 30 m/s  $\pm$  3%

#### ***B.3.2 Especificações para temperatura ambiente***

Temperatura de medição (interna): 0 a 50 °C

Resolução da temperatura: 0.1 °C

Incerteza:  $\pm$  1.2 °C

#### ***B.3.3 Especificações para humidade relativa***

Intervalo de medição da humidade relativa do ar: 10% a 95%

Resolução: 0.1%

Incerteza:  $\pm$  4%

## ANEXO A – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO ÓLEO DIESEL METROPOLITANO

Diesel fuel specification for Brazil / Metropolitan		
<b>Year of implementation</b>	July/09	
<b>Spec name</b>	Portaria ANP N° 15, 2006	
Property		Test method
Cetane number, min	42	ASTM D 613
Sulfur, ppm, max	500	ASTM D 2622/ASTM D 1552/ASTM D 4294/ASTM D 5453/ABNT NBR 14875/ABNT NBR 14533
Density @ 20 °C, kg/m <sup>3</sup> , min	820	ASTM D 1298/ASTM D 4052/ABNT NBR 7148/ABNT NBR 14065
Density @ 20°C, kg/m <sup>3</sup> , max	865	ASTM D 1298/ASTM D 4052/ABNT NBR 7148/ABNT NBR 14065
Viscosity @ 40°C, cSt, min	2	ASTM D 445/ABNT NBR 10441
Viscosity @ 40°C, cSt, max	5	ASTM D 445/ABNT NBR 10441
Distillation		
T50, °C, min	245	ABNT NBR 9619/ASTM D 86
T50, °C, max	310	ABNT NBR 9619/ASTM D 86
T85, °C, max	360	ABNT NBR 9619/ASTM D 86
Flash Point, °C, min	38	ASTM D 56/ASTM D 93/ASTM D 3828/ABNT NBR 7974/ABNT NBR 14598
Carbon residue 10%, wt%, max	0.25	ASTM D 524/ABNT NBR 14318
Cold Filter Plugging Point (CFPP), °C, max	(1)	ASTM D 6371/ABNT NBR 14747
Water and sediment, vol%, max	0,05	ASTM D 1796/ABNT NBR 14647
Ash, wt%, max	0,01	ASTM D 482/ABNT NBR 9842
Lubricity, HFRR wear scar diam @ 60°C, micron, max	460	ASTM D 6079
Copper corrosion, 3hr @ 50°C, merit (class), max	1	ASTM D 130/ABNT NBR 14359
Color, max	3	ASTM D 1500/ABNT NBR 14483
Appearance	Free of impurities	
FAME content, vol%, min	(2) (3)	
<b>Notes:</b>		
1. Varies based on season and region: values are listed in Table 2 of the ANP Resolução no. 15, issued July 17th, 2006.		
2. Compulsory addition of biodiesel in percentage determined by current legislation.		
3. Diesel fuel is required to be blended with 3 vol% biodiesel as of July 2008 and with 4 vol% biodiesel as of July 2009.		

**Fonte: International Fuel Quality Center,2009**

## ANEXO B – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO BIODIESEL B100 (ANP)

(continua)

<b>Biodiesel Fuel Specification for Brazil</b>		
<b>Year of implementation</b>	March/08	
<b>Spec name</b>	Resolução ANP Nº 7, 2008	
<b>Property</b>	<b>B100</b>	<b>Test method</b>
Cetane number, min	Report(1)	ASTM D 613 / EN ISO5165 / ASTM D 6890
Ester content (concentration), wt%, min	96.5(2)(3)	ABNT NBR 15342 / EN 14103 / ASTM D 5453 / ISO 20846 / ISO20884
Sulfur, ppm, max	50	ASTM D 5453/ISO 20846/ISO 20884
Density @ 20°C, kg/m3, min	850	ABNT NBR 7148/ABNT NBR 14065/ASTM D 1298 / ASTM D 4052/EN ISO 3675/EN ISO 12185
Density @ 20°C, kg/m3, max	900	ABNT NBR 7148/ABNT NBR 14065/ASTM D 1298/ASTM D 4052/EN ISO 3675/EN ISO 12185
Viscosity @ 40°C, cSt, min	3	ASTM D 445/ABNT NBR 10441/EN ISO 3104
Viscosity @ 40°C, cSt, max	6	ASTM D 445/ABNT NBR 10441/EN ISO 3104
Flash Point, °C, min	100(4)	ASTM D 93/ABNT NBR 14958/EN ISO 3679
Carbon residue 100% (CCR), wt%, max	0,05	ASTM D 4530
Water, vol%, max	.044(5)(6)	ASTM D6304 / EN ISO 12937
Sulfated Ash, wt%, max	0,02	ABNT NBR 6294/ASTM D 874/EN ISO 3987
Total contamination, ppm, max	24	EN ISO 12662
Copper corrosion, 3hr @ 100°C, max	1	ABNT NBR 14359/ASTM D 130/EN ISO 2160
Acid value, mg KOH/g, max	0,5	ASTM D 664/ABNT 14448/EN 14104
Methanol, vol%, max	0.20(7)	ABNT NBR 15343/EN 14110
Ethanol, vol%, max	0.20(8)	ABNT NBR 15343/EN 14110
Monoglycerides, wt%, max	Report(9)(10)(11)	ABNT NBR 15342/ASTM D 6584/EN 14105
Diglycerides, wt%, max	Report(12)(13)(11)	ABNT NBR 15342/ASTM D6584/EN 14105
Triglycerides, wt%, max	Report(14)(11)(10)	ABNT NBR 15342/ABNT 15344/ASTM D6584/EN 14105
Glycerol	.025(14)(10)	ABNT NBR 15344/ASTM D 6584/EN 14105
Free Glycerol, wt%, max	0.02(15)(10)	ABNT NBR 15341/ASTM D6584/EN 14105/EN 14106
Total, wt%, max	0,25	ABNT NBR 15341/ASTM D6584/EN 14105/EN 14106
Iodine number, g/100g, max	Report(11)	EN 14111
<b>Year of implementation</b>	March/08	
<b>Spec name</b>	Resolução ANP Nº 7, 2008	
<b>Property</b>	<b>B100</b>	<b>Test method</b>
Phosphorus, ppm, max	10	ABNT NBR 15553/ASTM D 4951/EN 14107

(conclusão)

Alkali, Group I (Na, K), ppm, max	5	ABNT NBR 15554/ABNT NBR 15555/ABNT NBR 15553/ABNT NBR 15556/EN 14108/EN 14109/EN 14538
Metals, Group II (Ca, Mg), ppm, max	5	ABNT NBR 15553/ABNT NBR 15556/EN 14538
Distillation T90, °C, max		
Cold Filter Plugging Point (CFPP), °C, max	19(16)(17)	ABNT 14747/ASTM D6371/EN 116
Oxidation stability @ 110°C, hour, min	6	EN 14112(18)
Others (use of additives etc.)	(19)	

**Notes:**

1. Cetane number, monoglycerides, diglycerides, triglycerides and iodine number must all be analyzed together every trimester. The results of these tests must be sent by the biodiesel producer to ANP, and must be based on a sample of the biodiesel sold by the producer during each corresponding trimester. If the producer changes the feedstock(s) used in the biodiesel, the producer must then submit analyses of a number of samples corresponding to each of the different feedstocks used. If the producer changes the feedstock(s) used in the biodiesel, the producer must then submit analyses of a number of samples corresponding to each of the different feedstocks used.
2. For biodiesel samples derived from animal fats, method ABNT NBR 15342 can be used.
3. If the biodiesel being tested includes castor oil AND is the product of more than one feedstock, ABNT NBR 15342 should be used to test ester content.
4. If flash point is greater than 130 degrees Celsius, the methanol/ethanol limit is waived.
5. Resolução ANP N° 7 actually limits water content to 500mg/Kg; assuming a biodiesel density of 880Kg/m<sup>3</sup>, the resulting water content by volume is 0.044%.
6. This water content limit must be met by whomever is responsible for obtaining certification, be it the producer or the importer.
7. This limit is for sum total of methanol and ethanol.
8. This limit is for the sum total of methanol and ethanol.
9. If the biodiesel being tested includes castor oil AND is the product of more than one feedstock, ABNT NBR 15342 should be used to test monoglyceride content.
10. The EN/ISO & ASTM test methods apply to feedstocks whose processing involves methods and/or routes other than ethyl (ethanol) route.
11. Cetane number, monoglycerides, diglycerides, triglycerides and iodine number must all be analyzed together every trimester. The results of these tests must be sent by the biodiesel producer to ANP, and must be based on a sample of the biodiesel sold by the producer during each corresponding trimester. If the producer changes the feedstock(s) used in the biodiesel, the producer must then submit analyses of a number of samples corresponding to each of the different feedstocks used.
12. If the biodiesel being tested includes castor oil AND is the product of more than one feedstock, ABNT NBR 15342 should be used to test diglyceride content.
13. The EN/ISO & ASTM test methods apply to feedstocks whose processing involves methods and routes other than ethyl (ethanol) route.
14. If the biodiesel being tested includes castor oil AND is the product of more than one feedstock, ABNT NBR 15344 should be used to test triglyceride content.
15. If the biodiesel being tested includes castor oil AND is the product of more than one feedstock, ABNT NBR 15341 should be used to test triglyceride content.
16. The 19°C limit applies to the South, Southeast and Midwest Regions and the state of Bahia. For other regions, the biodiesel may be delivered at temperatures above 19°C, provided that both buyer and seller agree to this stipulation before the sale.
17. The test methods listed in this specification cannot be used for testing biodiesel made entirely from castor beans.
18. This EN/ISO test method applies to feedstocks whose processing involves methods and/or routes other than ethyl (ethanol) route.
19. Biodiesel must appear clear and free of impurities.

Fonte: International Fuel Quality Center,2009

## ANEXO C – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO BIODIESEL B100 (EN 14214)

(continua)

Biodiesel Fuel specification for EU /FAME (Fatty Acid Methyl Esters)		
Year of implementation	mai/09	
Spec name	EN 14214:2008	
Property		Test method
Cetane number, min	51	EN ISO 5165
Ester content (concentration), wt%, min	96,5	EN 14103(1)
Sulfur, ppm, max	10	EN ISO 20846, EN ISO 20884
Density @ 15°C (60°F), kg/m3, min	860	EN ISO 3675/EN ISO 12185/(2)
Density @ 15°C (60°F), kg/m3, max	900	EN ISO 3675/EN ISO 12185/(2)
Density @ 20°C, kg/m3, min	(3)	
Density @ 20°C, kg/m3, max	(3)	
Viscosity @ 40°C, cSt, min	3,5	EN ISO 3104
Viscosity @ 40°C, cSt, max	5	EN ISO 3104
Flash Point, °C, min	101	EN ISO 2719, EN ISO 3679
Carbon residue 10%, wt%, max	0,3	EN ISO 10370
Water, vol%, max	500	EN ISO 12937
Sulfated Ash, wt%, max	0,02	ISO 3987
Total contamination, ppm, max	24	EN 12662 (1)
Copper corrosion, 3hr @ 100°C, max	class 1 (4)	EN ISO 2160
Acid value, mg KOH/g, max	0,5	EN 14104
Alcohol Methanol, vol%, max	0,2	EN 14110
Ethanol, vol%, max	0,2	EN 14110
Monoglycerides, wt%, max	0,8	EN 14105
Diglycerides, wt%, max	0,2	EN 14105
Triglycerides, wt%, max	0,2	EN 14105 (1)
Glycerol Free Glycerol, wt%, max	0,02	EN 14105 / EN 14106 (1)
Total, wt%, max	0,25	EN 14105
Linolenic acid methyl ester, wt%, max	12	EN 14103
Polyunsaturated methyl esters, wt%, max	1	
Iodine number, g/100g, max	120	EN 14111
Phosphorus, ppm, max	4	EN 14107

**(conclusão)**

Alkali, Group I (Na, K), ppm, max	5	EN 14108, EN 14109, EN 14538(1)
Metals, Group II (Ca, Mg), ppm, max	5	EN 14538
Oxidation stability @ 110°C, hour, min	6	prEN 15751, EN 14112
Others (use of additives etc.)	(5)	
<b>Notes:</b>		
<p>(1) Current methods do not meet the 2R requirement of EN ISO 4259 at the limit values specified in this standard.</p> <p>(2) Density may be measured by EN ISO 3675 over a range of temperatures from 20°C to 60°C. A factor of 0.723 kg/m<sup>3</sup> may be used to convert observed density to density at 15°C.</p> <p>(3) Density may be measured over a range of temperatures from 20°C to 60°C.</p> <p>(4) The use of dyes and markers is allowed.</p>		

**Fonte: International Fuel Quality Center,2009**

## ANEXO D – ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO ETANOL

(continua)

Ethanol Fuel specification for Brazil		
Year of implementation	jul/09	
Spec name	Resolução ANP N° 36, 2005	
Property	Anhydrous Ethanol	Test method
Ethanol, vol%, min	99.6(1)	ASTM D 5501
Density @ 20°C, kg/m3, max	791,5	ASTM D 3505/ASTM D 4052
Chloride, ppm, max		
Copper, ppm, max	7(4)(5)	ABNT NBR 10893
Iron, g/l		
Acetic Acid, g/l, 100% EtOH, max	0,03	ASTM D 1613/ABNT NBR 9866
Alcohol, wt%, min	99,3	ABNT NBR 5992
Non-volatile matter, g/100ml, max		
Color, APHA, max	Colorless(8)	Visual
Sulfate, ppm, max	4(4)	ABNT NBR 10894/ABNT NBR 12120
Electrical Conductivity, uS/m, max	500	ASTM D 1125/ABNT NBR 10547
Appearance	Clear, free of impurities(9)	Visual
pH, max		
Aromatics, vol%, max	3	ABNT NBR 13993
Sodium, ppm, max		
Year of implementation		
Spec Name		
Property	Hydrous Ethanol	Test Method
Ethanol, vol%, min	95.1(1)	ASTM D 5501
Density @ 20°C, kg/m3, min	807.6(2)	ASTM D 3505/ASTM D 4052
Density @ 20°C, kg/m3, max	811.0(2)	ASTM D 3505/ASTM D 4052
Chloride, ppm, max	1(3)	ABNT NBR 10894/ABNT NBR 10895/ASTM D 512
Copper, ppm, max		
Iron, g/l	3.95(6)(4)	ABNT NBR 11331
Acetic Acid, g/l, 100% EtOH, max	0,03	ASTM D 1613/ABNT NBR 9866
Alcohol, wt%, min	92.6(7)	ABNT NBR 5992
Non-volatile matter, g/100ml, max		
Color, APHA, max	Colorless	Visual
Sulfate, ppm, max	4.0(4)	ABNT NBR 10894/ABNT NBR 12120
Electrical Conductivity, uS/m, max	500	ASTM D 1125/ABNT NBR 10547
Appearance	Clear, free of impurities	Visual

**(conclusão)**

pH, min	6	ABNT NBR 10891
pH, max	8	ABNT NBR 10891
Aromatics, vol%, max	3(3)	ABNT NBR 13993
Sodium, ppm, max	2(4)	ABNT NBR 10422
<b>Notes:</b>		
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Compliance with this specification is mandatory for ethanol that is not derived from fermentation of sugar cane and in cases where there is suspicion that the ethanol in question is contaminated with other types of alcohol.</li> <li>2. In the case of importation, distribution and resale of ethanol the minimum and maximum density limits are 805.0 and 811.0, respectively.</li> <li>3. Testing for and meeting limits for distillation residue, aromatics and chloride is required for importation, distribution and resale of ethanol; it is NOT required of producers in the process of issuing a Certificate of Quality for their ethanol.</li> <li>4. The producer will have to write into to the Certificate of Quality the test results for sulfate, iron, sodium obtained in the latest biweekly set of tests, as detailed in Article 5, § 1 of Resolução ANP N° 36, 2005.</li> <li>5. Must be measured on Anhydrous Ethanol that has come into contact with equipment and/or piping containing copper or copper alloys during transportation and/or production.</li> <li>6. Actual limit is 5 mg/kg. In volume terms, limit is 3.95 mg assuming that ethanol density is equal to 789 g/l.</li> <li>7. This specification also includes a maximum alcohol limit of 93.8% by weight for Hydrous Ethanol.</li> <li>8. Colorless before a dye's addition, as specified in Table II of the Technical Rules, which must be added at a concentration of 15 mg/L giving the product an orange color.</li> <li>9. Clean and without impurities.</li> <li>10. Examination of the heater tube to determine the visual tube rating using the Visual Tuberator shall be carried out within 120 minutes of completion of the test.</li> <li>11. Hydrocarbon content is limited to a maximum of 3.0 vol% per ABNT/NBR 13993</li> <li>12. There is a maximum limit for sodium content at 2.0 ppm as measured by ABNT/NBR 10422.</li> <li>13. There is a requirement for total alcohol, °INPM of between 92.6 and 93.8 vol% as measured by ABNT/NBR 5992.</li> </ol>		

**Fonte: International Fuel Quality Center,2009**

## ANEXO E – CARACTERIZAÇÃO DO COMBUSTÍVEL B5

**Figura 37 – Quadro: Caracterização do combustível B5.**

CARACTERÍSTICA	RESULTADO	ESPECIFICAÇÃO Resolução nº 65/2011	MÉTODO
Massa Específica a 20° C kg/m <sup>3</sup>	855,1	S1800- 820 a 880 S500 – 820 a 865 S10 e S50 – 820 a 850 (11)	D4052
Destilação - 10%vol. Recuperados	207,2	S10 180,0 (min) S50, S500 e S1800 – anotar	D86
Destilação - 50%vol. Recuperados	283,6	S10 245,0 a 295,0 S50, S500 e S1800 – 245,0 a 310,0	D86
Destilação - 85% vol. Recuperados, máx.	341,8	S500 – 360,0 S1800 – 370,0	D86
Destilação - 90% vol. Recuperados, máx.	354,3	S50 – 360,0 (máx) S500 e S1800 – anotar	D86
Destilação - 95% vol. Recuperados, máx.	376,4	S10 - 370,0	D86
Ponto de Fulgor, °C, mín	-	38,0	D93
Aspecto	-	Límpido e isento de impurezas	D4176
Cor ASTM, máx	-	3,0 (7)	D1500
Cor	-	S10/S50 incolor e amarelado (4) S500 (5) S1800 – Vermelho (6)	-
Enxofre Total, mg/kg, máx.	-	S1800 - 1800 S500 – 500 S50 – 50 S10 – 10	NBR14533
Teor de Biodiesel (%v/v)	-	5,0% ± 0,5 (9)	EN 14078
Água e Sedimentos (% v/v) máx.	-	0,05	D1796
Viscosidade a 40°C (mm <sup>2</sup> ) máx.	3,326	S10 – 2,0 a 4,5 S50, S500 e S1800 - 2,0 a 5,0	D445

**Fonte: Dados da pesquisa / Laboratório de Ensaios de Combustíveis da Universidade Federal de Minas Gerais.**

## ANEXO F – CARACTERIZAÇÃO DA MISTURA B5E2

**Figura 38 – Quadro: caracterização da mistura B5E2.**

CARACTERÍSTICA	RESULTADO	ESPECIFICAÇÃO Resolução n° 65/2011	MÉTODO
Massa Específica a 20° C kg/m <sup>3</sup>	854,7	S1800- 820 a 880 S500 – 820 a 865 S10 e S50 – 820 a 850 (11)	D4052
Destilação - 10%vol. Recuperados	200,8	S10 180,0 (min) S50, S500 e S1800 – anotar	D86
Destilação - 50%vol. Recuperados	284,6	S10 245,0 a 295,0 S50, S500 e S1800 – 245,0 a 310,0	D86
Destilação - 85% vol. Recuperados, máx.	343,3	S500 – 360,0 S1800 – 370,0	D86
Destilação - 90% vol. Recuperados, máx.	356,7	S50 – 360,0 (máx) S500 e S1800 – anotar	D86
Destilação - 95% vol. Recuperados, máx.	378,7	S10 - 370,0	D86
Ponto de Fulgor, °C, mín	-	38,0	D93
Aspecto	-	Límpido e isento de impurezas	D4176
Cor ASTM, máx	-	3,0 (7)	D1500
Cor	-	S10/S50 incolor e amarelado (4) S500 (5) S1800 – Vermelho (6)	-
Enxofre Total, mg/kg, máx.	-	S1800 - 1800 S500 – 500 S50 – 50 S10 – 10	NBR14533
Teor de Biodiesel (%v/v)	-	5,0% ± 0,5 (9)	EN 14078
Água e Sedimentos (% v/v) máx.	-	0,05	D1796
Viscosidade a 40°C (mm <sup>2</sup> ) máx.	3,195	S10 – 2,0 a 4,5 S50, S500 e S1800 - 2,0 a 5,0	D445

**Fonte: Dados da pesquisa / Laboratório de Ensaios de Combustíveis da Universidade Federal de Minas Gerais..**

## ANEXO G – CARACTERIZAÇÃO DA MISTURA B5E4

**Figura 39 – Quadro: caracterização da mistura B5E4.**

CARACTERÍSTICA	RESULTADO	ESPECIFICAÇÃO Resolução nº 65/2011	MÉTODO
Massa Específica a 20° C kg/m <sup>3</sup>	854,1	S1800- 820 a 880 S500 – 820 a 865 S10 e S50 – 820 a 850 (11)	D4052
Destilação - 10%vol. Recuperados	198,3	S10 180,0 (min) S50, S500 e S1800 – anotar	D86
Destilação - 50%vol. Recuperados	279,8	S10 245,0 a 295,0 S50, S500 e S1800 – 245,0 a 310,0	D86
Destilação - 85% vol. Recuperados, máx.	341,9	S500 – 360,0 S1800 – 370,0	D86
Destilação - 90% vol. Recuperados, máx.	354,6	S50 – 360,0 (máx) S500 e S1800 – anotar	D86
Destilação - 95% vol. Recuperados, máx.	375,8	S10 - 370,0	D86
Ponto de Fulgor, °C, mín	-	38,0	D93
Aspecto	-	Límpido e isento de impurezas	D4176
Cor ASTM, máx	-	3,0 (7)	D1500
Cor	-	S10/S50 incolor e amarelado (4) S500 (5) S1800 – Vermelho (6)	-
Enxofre Total, mg/kg, máx.	-	S1800 - 1800 S500 – 500 S50 – 50 S10 – 10	NBR14533
Teor de Biodiesel (%v/v)	-	5,0% ± 0,5 (9)	EN 14078
Água e Sedimentos (% v/v) máx.	-	0,05	D1796
Viscosidade a 40°C (mm <sup>2</sup> ) máx.	3,267	S10 – 2,0 a 4,5 S50, S500 e S1800 - 2,0 a 5,0	D445

**Fonte: Dados da pesquisa / Laboratório de Ensaios de Combustíveis da Universidade Federal de Minas Gerais.**

## ANEXO H – CARACTERIZAÇÃO DO ETANOL

**Figura 40 – Quadro: caracterização do etanol.**

ENSAIO	MÉTODO	VALOR OBTIDO	Limite Resolução ANP Nº7/2011
Massa Específica a 20°C (kg/m <sup>3</sup> )	ASTM D4052	810,6	EAC: 791,5 máx EHC: 807,6 a 811,0
Teor Alcoólico °INPM	NBR 5992	92,7	EAC: 99,3 min. EHC: 92,5 a 93,8
Teor de hidrocarbonetos, %volume	NBR 13993	-	máx. 3
Potencial hidrogeniônico (pH)	NBR 10891	-	6,0 a 8,0
Aspecto	Visual	-	límpido e isento de impurezas
Cor	Visual	-	EAC: Laranja EHC: Isento de Corante
Condutividade Elétrica (µS/m)	NBR 10547	-	máx. 350

**Fonte: Dados da pesquisa / Laboratório de Ensaios de Combustíveis da Universidade Federal de Minas Gerais.**