

1 Introdução

O Brasil é um país emergente em que nos últimos anos, apesar da crise mundial de 2008, vem se fortalecendo através de um grande crescimento industrial. A cada ano vem atraindo investidores internacionais gerando milhares de oportunidades de emprego para a população brasileira. Acrescenta-se ainda, que sediará os dois principais eventos esportivos mundiais em 2014 e 2016, Copa do Mundo de Futebol e as Olimpíadas respectivamente, fornecendo ao país maior destaque mundial.

Este capítulo abordará uma análise simples do setor industrial da matriz energética brasileira do ano de 2010. O foco será no setor de transporte em consumo de combustíveis derivados do petróleo e combustíveis renováveis. O objetivo é observar o crescimento do país pela oferta e demanda de energia. Por fim, um destaque será dado na evolução do motor de ignição por compressão.

O transporte brasileiro é movido quase que inteiramente por motores a combustão interna, onde o principal combustível é o óleo Diesel. Devido ao processo de combustão deste tipo de combustível, estes motores são considerados um dos maiores causadores da emissão de poluentes no Brasil e no mundo.

Neste aspecto, existe uma grande preocupação com o crescimento do transporte rodoviário, oriunda do aumento da riqueza e distribuição de renda e do aumento populacional do país. Ressalta-se que a emissão dos gases CO₂ acarreta em impactos ambientais, como o aquecimento global, intensificando o efeito estufa. A fim de reduzir ao máximo a emissão de poluentes há a necessidade de uma política energética eficaz que seja capaz de diminuir a forte dependência dos derivados de petróleo. Como exemplo, citam-se os biocombustíveis. Alguns fatores relevantes podem ser explicitados. Pelo ponto de vista estratégico, torna-se uma alternativa interessante em virtude da diversificação da produção em diversas regiões do país.

Em uma escala menor, para o meio ambiente local há vantagens, como por exemplo, a não existência do enxofre, componente presente nos combustíveis

fósseis. Vale ressaltar que o enxofre causa danos à qualidade do ar. Avaliando economicamente cita-se o etanol, tendo em vista os baixos custos de produção e podendo ser produzido localmente.

Em virtude do grande interesse pela substituição de derivados do petróleo por combustíveis alternativos, o etanol e o Brasil estão no centro da discussão mundial. Isto é devido à alta do preço do petróleo juntamente com a pressão pela redução de emissão de carbono. Adiciona-se ainda a distância que separa os automóveis de alternativas como células de hidrogênio e motores elétricos. O etanol é uma fonte renovável que emite uma quantidade menor de poluentes quando comparado ao óleo Diesel e pode ser misturado à gasolina.

No Brasil, o consumo do combustível Diesel pode ser separado em três grandes setores (BEN, 2011):

- Transportes, representando mais de 75% do total consumido;
- Agropecuário, com cerca de 20% do consumo;
- Transformação, que utiliza o produto na geração de energia elétrica e corresponde à cerca de 5% do consumo total de óleo Diesel.

Já o combustível biodiesel pode ser um substituto nos três setores, podendo ser utilizado como puro (B100), no setor de transformação de energia elétrica (geradores) e no setor agropecuário (tratores).

O abastecimento interno de óleo Diesel no mercado é através de 13 refinarias espalhadas pelo país, onde a grande maioria pertence à Petrobras. A Petrobras a fim de atender toda demanda nacional dos mais variados tipos de combustíveis, desde 2003, tem modernizado suas refinarias com intuito de melhorar a qualidade dos produtos e processar uma quantidade maior de óleo nacional. A finalidade dos investimentos, realizados de forma contínua, é a adequação e expansão do parque de refino ao perfil do consumo nacional para que a demanda crescente seja suprida sistematicamente pelos anos posteriores.

Em 2010, o objetivo da empresa foi que a produção esteja em um patamar equivalente a 114% do valor da demanda, representando um incremento de 270 mil barris de petróleo por dia (bpd) na carga processada no parque existente. E também, aumentar em 300 mil bpd o óleo nacional processado. O total de

investimentos em adequação, qualidade e expansão do parque de refino nacional, segundo o plano, será de US\$ 9 bilhões até 2010 (Valor econômico, 2010).

Neste propósito é interessante avaliar o balanço energético do país, para futuros planejamentos estratégicos. Para o setor energético brasileiro, a avaliação realizada é através do relatório BEN (Balanço Energético Nacional). O relatório é elaborado no ano seguinte do ano proposto a ser analisado, a fim de investigar a oferta e consumo de energia em todos os setores da economia brasileira. A finalidade principal é prestar serviços ao MME (Ministério de Minas e Energia) para o subsídio do planejamento energético.

No ano de 2010, a energia total consumida no país foi 270,9 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep)¹, 11% maior em relação a 2009. A partir deste argumento, vale destacar alguns tópicos relacionados aos setores da matriz energética que tiveram resultados positivos:

- Alta participação das fontes renováveis apresentando 45,4%, conforme Figura 1, mantendo-se com altos índices em relação ao ano de 2009;
- Grande crescimento do setor industrial, sendo 13% superior ao ano anterior;
- Crescimento do setor da geração de energia térmica e eólica;
- Grande alta no setor de transporte.

Cabe mencionar que para este último, os motores a combustão interna estão inseridos e serão analisados no presente trabalho. No setor de transporte houve um aumento da frota veicular onde, para veículos pesados foi de 41,2% e para veículos leves 10,6%, quando comparados ao ano de 2009. Devido a este fator, houve um aumento no consumo de combustíveis de 10,8% (Tabela 1) no ano de 2010 (BEN, 2011).

¹ Unidade de energia de referência, correspondendo à quantidade de energia contida em uma tonelada de petróleo de referência. Adotada no Balanço Energético Nacional e em diversas outras publicações internacionais, corresponde a 10 000 Mcal e não é equivalente ao petróleo médio processado no Brasil (BEN, 2011).

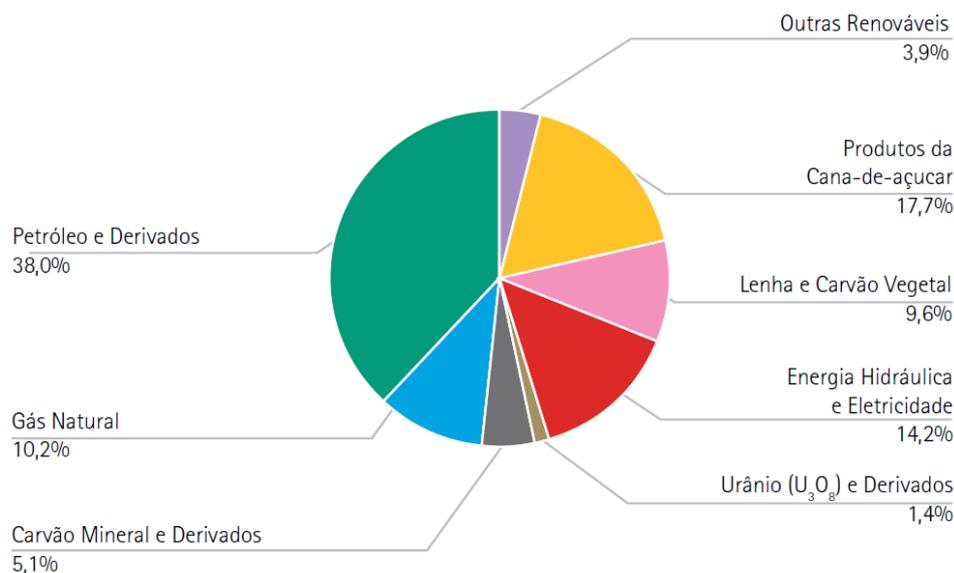


Figura 1: Oferta interna de energia (BEN, 2011)

No que tange ao setor de transporte, segue a Tabela 1 abaixo, a fim de se observar o aumento do consumo de combustíveis entre os anos de 2009 e 2010.

Tabela 1: Consumo de Combustíveis - 2009 e 2010 (BEN 2011)

Unidade: 10³ tep

	2010	2009	△ 10/09
Óleo Diesel ¹	33.756	30.369	11,2%
Gasolina ²	17.515	14.674	19,4%
Álcool Hidratado	8.243	8.400	-1,9%
Álcool Anidro	3.790	3.392	11,7%
Gás Natural	1.766	1.853	-4,7%
Outras Fontes ³	4.380	3.998	9,6%
Total	69.451	62.687	10,8%

¹ Inclui biodiesel

² Inclui apenas gasolina A (automotiva)

³ Inclui gasolina de aviação, querosene de aviação, gás natural, óleo combustível e eletricidade

O ano de 2010 teve um aumento na produção de etanol de 7,1 % e um aumento na produção de biodiesel de 49,0%, em relação ao ano de 2009. Estes fatores são relevantes para se observar a intensificação do emprego de combustíveis renováveis na matriz na energética. Ressalta-se também, o aumento do consumo de combustíveis líquidos de 8,1% em 2010 (BEN, 2011).

A discussão, simples e objetiva, apresentada anteriormente foi realizada para um melhor entendimento da oferta e demanda dos combustíveis, já que o principal meio de transporte brasileiro está localizado no setor rodoviário. No entanto, em complemento, vale reforçar que o foco está voltado para as energias limpas (renováveis). O objetivo é a redução da emissão de poluentes, substituindo em um futuro próximo os combustíveis fósseis.

1.1. Evolução dos Motores Diesel

Estes motores foram idealizados pelo engenheiro mecânico Rudolf Christian Karl Diesel, onde patenteou seu primeiro em 22 de fevereiro de 1893. Os motores de ignição por compressão são entendidos como uma máquina térmica, que transforma a energia proveniente de uma reação química em energia mecânica. O processo de conversão se dá através de processos termodinâmicos que envolvem admissão, compressão, expansão e exaustão.

Ao longo do século, esses motores sofreram diversas modificações com objetivo de se extrair a máxima eficiência. Nas décadas passadas, os motores de ignição por compressão misturavam o combustível óleo Diesel e o ar em uma câmara de pré-combustão antes da própria injeção no interior do cilindro. Estes passos de mistura e injeção eram controlados mecanicamente, o que tornava muito difícil a obtenção da correta mistura ar-combustível. Isto ocasionava combustões incompletas, particularmente para cargas baixas. Como resultado o combustível era desperdiçado e as emissões através dos gases de escape eram relativamente altas.

Nos dias atuais, o óleo Diesel é injetado diretamente nos cilindros do motor, perto do final da compressão do ar com o auxílio de processadores. A finalidade é entregar precisamente a quantidade correta de combustível no instante necessário. Nos motores atuais, todas as funções são controladas por um módulo de controle eletrônico que faz interface com uma gama de sensores localizados estrategicamente por todo motor. O objetivo é monitorar todos os pontos possíveis, desde a variação de velocidade até a temperatura do fluido de arrefecimento e óleo lubrificante. A posição em que o pistão se encontra em relação ao ângulo do eixo virabrequim também faz parte do monitoramento. A presença do controle é justificada por uma queima do combustível mais completa,

oferecendo maior potência e maior economia de combustível. Atrelado a estes fatores, obtém-se com tais motores menores índices de emissão de poluentes quando comparados aos motores das décadas passadas.

Os recentes motores do ciclo Diesel de injeção direta produzem quantidades menores de dióxido de carbono, monóxido de carbono e hidrocarbonetos não queimados. As emissões de óxido de nitrogênio e o material particulado foram reduzidos em quase 90% desde 1980 até os dias atuais. No entanto, estes dois ainda permanecem com índices relativamente elevados. Vale ressaltar que as emissões desses poluentes acarretam consequências ao meio ambiente e aos seres humanos. Por exemplo, a chuva ácida e o efeito *smog* são provenientes do óxido de nitrogênio. Já para grande concentração de material particulado podem surgir problemas à saúde humana, como dificuldades no sistema respiratório e cardiovascular.

Os motores de ignição por compressão em relação aos motores Otto possuem vantagens como, maior eficiência gerando maior economia de combustível e emitindo cerca de 20 a 30% menos de CO₂. Além disso, tem maior durabilidade, relação custo-eficácia favorável e maior torque. Esses fatores explicam em parte sua utilização no setor rodoviário.

1.2. Motivação

Nos últimos anos ocorreram avanços tecnológicos consideráveis em relação a motores de veículos automotivos. Um exemplo claro se aplica aos motores Otto e Diesel, onde o sistema de injeção direta de combustível foi incorporado, como já mencionado anteriormente. Não só esse aspecto, mas a eficiência dos motores, a dirigibilidade do veículo, o consumo de combustível, o nível de emissão de poluentes, melhoraram de forma significativa. O objetivo é obedecer às normas ambientais mais rigorosas e satisfazer o consumidor mais exigente dos dias atuais. Vale ressaltar que, o mundo globalizado está cada vez mais acelerado, onde os projetos de engenharia automotiva necessitam serem concluídos em prazos mais curtos com orçamentos mais apertados.

Neste propósito, enfatiza-se a importância das ferramentas computacionais. Estas têm por objetivo gerar as soluções necessárias para atender a exigência do mercado automotivo no desenvolvimento e projetos de motores à combustão.

Ressalta-se que servem como auxílio à parte experimental na elaboração de motores futuros. Como exemplos citam-se, CAE (*Computational Analysis Engineering*) e o CFD (*Computational Fluid Dynamics*), que adquiriram grande importância nos últimos anos. A utilização destas ferramentas é de um modo geral empregada para análise e entendimento dos fenômenos físicos que ocorrem na etapa de combustão. Vale destacar a importância da correta modelagem da câmara de combustão, como também, o entendimento teórico dos modelos físicos que englobam o problema: descrição da injeção de combustível, formato do *spray*, combustão, etc. Assim, pode-se quantificar, por exemplo, o calor liberado e a formação de poluentes.

Na área experimental, diversos trabalhos já foram publicados relacionados a motores e combustíveis alternativos. Os ensaios experimentais são realizados em bancadas de testes acoplando o dinamômetro ao motor de combustão. Além do acoplamento, o motor é instrumentado a fim de coletar os dados necessários para estudos, como: 1) temperatura; 2) pressão; 3) vazão mássica de ar; 4) consumo de combustível; 5) emissão de poluentes etc. Como exemplo, destacam-se trabalhos experimentais realizados em motores do ciclo Diesel. Em alguns estudos, esses motores operaram no modo Diesel / gás, e em outros, no modo Diesel / etanol. No modo bicomcombustível deve-se avaliar eficiência, taxas de substituição do óleo Diesel pelo combustível alternativo e redução de poluentes em diversas condições de operação, para posteriormente comparar com o modo original. Com isso, observam-se as vantagens e desvantagens, inclusive para fins comerciais.

Na operação bicomcombustível (Diesel / etanol), os motores do ciclo Diesel apresentam um rendimento térmico menor em relação ao modo original para baixas cargas e com altas taxas de substituição (Egúsquiza, 2011). Outra característica presente é a diminuição da emissão de óxidos de nitrogênio ao se substituir gradualmente óleo Diesel por etanol (Gao *et al.*, 1983). Em trabalhos anteriores, estas ocorrências foram investigadas em ensaios experimentais e em simulação numérica para motores do ciclo Otto e motores do ciclo Diesel.

Com base nos argumentos acima e conforme discutido na introdução, referente ao aumento da frota veicular e ao aumento do consumo de combustível, ressalta-se a grande importância dos motores à combustão, especialmente os motores do ciclo Diesel para com a sociedade. Vale destacar que o território nacional é extenso e atrelado a este fator mais de 50% do transporte de carga está

situado no setor rodoviário, o qual o motor Diesel está inserido. Assim, objetivando desenvolver motores mais eficientes são utilizadas as técnicas experimentais e numéricas acima mencionadas. Estas técnicas são capazes de mapear o motor para condições de operações diversas. O objetivo é avaliar possíveis melhorias quanto ao rendimento e emissão de poluentes, por exemplo.

Neste sentido, o presente trabalho propõe estudar experimentalmente um motor do ciclo Diesel a uma rotação fixa de 1800 rpm e complementá-lo com uma análise termodinâmica no processo de combustão. Salienta-se que esta rotação de operação é utilizada em motores geradores e em motores empregados em ônibus e/ou em veículos híbridos largamente empregados no setor de transporte.

Entende-se que para avanços tecnológicos, em qualquer área de atuação, a indústria automobilística necessita estar próxima ao meio científico / acadêmico. Menciona-se que, nos próximos anos, a tendência são motores cada vez menores (compactos), mais eficientes e mais potentes.

1.3. Objetivo

O presente trabalho tem por objetivo avaliar o comportamento de um motor Diesel com turbocompressor e *intercooler* de fabricação MWM International, empregado na propulsão de caminhões leves e micro-ônibus. A avaliação experimental será realizada no modo original (Diesel puro) e no modo bicomcombustível (Diesel / etanol: AEHC - álcool etílico hidratado combustível @ 70 e 93° INPM²). Os resultados a serem analisados são:

² A Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) regulamenta o teor alcoólico do álcool combustível na faixa de 92,6° e 93,8° INPM. O Instituto Nacional de Pesos e Medidas (INPM) define que o grau em questão é a fração em massa. Isto é, 1 kg de álcool combustível tem em média 930 g de álcool e 70 gramas de água.

- Trabalho útil;
- Rendimento térmico;
- Consumo específico de combustível;
- Emissão de poluentes: óxido de nitrogênio, hidrocarbonetos e material particulado;
- Calor total liberado;
- Calor perdido pelas paredes do cilindro.

1.4. Descrição da Dissertação

O presente trabalho é subdividido em seis capítulos.

O primeiro capítulo é referente à introdução, destacando a importância do setor de transporte no consumo de combustíveis da matriz energética brasileira. É observada também a evolução dos motores de ignição por compressão e a motivação.

No capítulo dois, a revisão bibliográfica é tratada, especificando as características dos combustíveis em questão (óleo Diesel e etanol), os métodos de modelagem utilizados na análise de combustão, e trabalhos realizados na área experimental e numérica.

O terceiro capítulo descreve o método de modelagem adotado e apresenta descrição do equacionamento dos fundamentos teóricos.

O quarto capítulo apresenta o procedimento de cálculo e experimental para a obtenção dos resultados.

A apresentação dos resultados e suas análises constituem o quinto capítulo do presente trabalho, o qual é finalizado pelo sexto capítulo com as conclusões e recomendações.