

1. Introdução

A busca por motores mais eficientes visa não só a redução do consumo, mas, também, a redução das emissões. Neste sentido, nos últimos anos, é notável como os motores de ignição por compressão com injeção direta, equipados com sistemas de injeção de alta pressão (common rail), utilizando óleo diesel, têm incrementado seu posicionamento no setor automotivo.

Em conformidade com a Associação de Fabricantes Europeus de Automóveis, os motores de ignição por compressão (ICO) consomem 30% menos combustível e emitem 25% menos CO₂, em média, quando comparados com os motores de ignição por centelha (ICE).

Do ponto de vista ambiental, mesmo que os motores ICO sejam considerados respeitosos com o meio ambiente, devido ao seu menor consumo e, por tanto, uma menor emissão de CO₂, eles não estão isentos de desvantagens (Muñoz, 2013). Os altos níveis de óxidos de nitrogênio (NO_x), material particulado (MP) e ruído na combustão são desvantagens dos motores ICO, já que apresentam efeitos negativos tanto no ambiente quanto na saúde, por tanto, vinculadas a limites legais (Ehleskog, 2012). O impacto que têm os poluentes no meio ambiente engloba: formação de chuva ácida, mudanças climáticas e deterioração da qualidade, tanto da água quanto da terra, além, dos problemas de visibilidade (Suyin et al., 2011).

Apesar da incerteza sobre qual será o próximo principal combustível do futuro, por várias razões, o etanol tem captado a atenção mundial (Rosillo-Calle e Heaford, 1987). A tecnologia Dual Fuel utiliza diferentes métodos do uso combinado Diesel/Etanol com o objetivo de reduzir o uso do combustível fóssil no transporte e em operações agrícolas (Volpato e Pimenta, 1995). Reduções de até 51% do NO_x (Noguchi, 1996) e de 28% de MP (Van Gerpen e Van Meter, 1990) quando comparado com um motor ICO utilizando só óleo diesel e outros modos Dual Fuel (diesel-gás).

Cálculos teóricos do ciclo Diesel utilizando etanol ou óleo diesel, mostrados na figura 1, apresentam quase os mesmos dados de pressão e eficiência (Hardenberg e Schaefer, 1981).

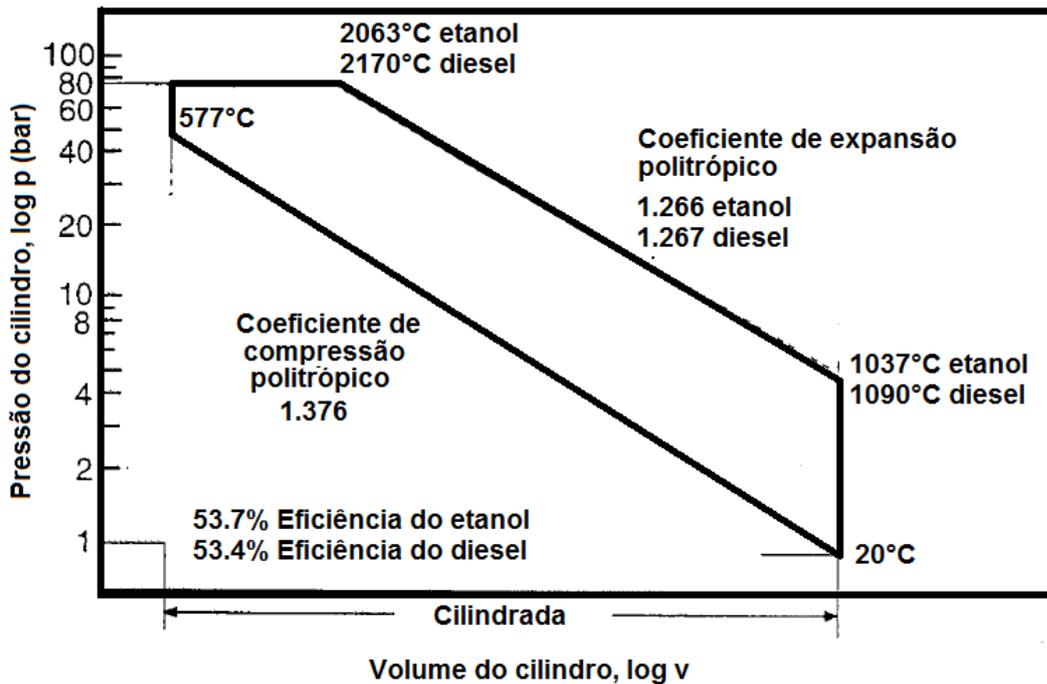


Figura 1 - Análises do ciclo Diesel em um motor IC com óleo diesel e etanol
(Hardenberg & Schaefer, 1981)

O etanol é um combustível relativamente simples de ser usado em motores ICE. Por outro lado, é difícil de ser utilizado em motores ICO por causa do seu baixo índice de cetano, o que significa um longo atraso da ignição (Chen, 1991), assim como por seu poder calorífico baixo e baixa lubrificidade. Para tentar contornar este problema, uma grande quantidade de pesquisas é realizada no mundo todo e podem ser divididas em dois grupos principais:

- ✓ Procedimentos de Gerenciamento do combustível.
- ✓ Procedimentos de Gerenciamento do motor.

O processo tecnicamente mais interessante, que tem sido apresentado sob o nome “Dupla Injeção direta Dual Fuel”, parece ser o mais bem sucedido no uso simultâneo do óleo diesel e etanol (Bandel, 1983). Este procedimento possibilita que o etanol seja injetado diretamente na câmara de combustão e o início da combustão seja propiciado pela injeção piloto de óleo diesel.

Segundo Bandel (1983), com a injeção direta Dual Fuel consegue-se, não só um melhor controle sobre o processo de combustão, como também um maior nível de substituição do combustível fóssil, chegando a ser, em plena carga, de até 90% e, em cargas parciais, entre 60% - 80%.

Extensas pesquisas foram desenvolvidas nos últimos 40 anos, envolvendo diferentes métodos visando a substituição de óleo diesel por etanol. A tabela 1 mostra o comportamento do etanol como combustível complementar em motores de ignição por compressão, assim como as máximas razões de substituição para cada modelo pesquisado.

Tabela 1 - Etanol como combustível em motores ICO, modificado de: Ecklund et al.,(1984) e Larsen et al., (2009).

Método	Linha de Pesquisa	Substituição de Diesel	Vantagens Potenciais	Possíveis Inconvenientes
Soluções	Procedimentos para Gestão de Combustível.	Até 20%	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Não precisa de modificações no motor. ✓ Mais baratos comparados com as Emulsões. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Requer etanol anidro para minimizar o custo do aditivo. ✓ Baixa viscosidade, lubricidade e fase instável no armazenamento (mistura fraca na presença de água), corrosão. ✓ Baixo número de cetano. ✓ Elevados índices de CO e HC. ✓ Degradação do óleo lubrificante.
Emulsões	Procedimentos para Gestão de Combustível.	Até 40%	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Maior deslocamento do combustível fóssil quando comparado com as soluções. ✓ Podem ser utilizadas sem modificar o motor Diesel. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Os mesmos que as Soluções. ✓ Custos. ✓ Elevados índices de NO_x e HC.
Misturas de etanol, biodiesel e diesel convencional.	Procedimentos para Gestão de Combustível.	Até 100%	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Alto deslocamento do combustível fóssil. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Requer etanol anidro. ✓ Pesquisas limitadas.
Dual Fuel Fumigação	Procedimentos para Gestão do Motor.	15-60%	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Não requer etanol anidro. ✓ Modificações mínimas no motor Diesel. ✓ Pode recuperar seu estado inicial para utilizar óleo diesel (reversível) ✓ Baixos níveis de NO_x em altas cargas 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Maior tamanho e complexidade devido aos dois sistemas de armazenamento. ✓ Altos níveis de HC em baixas cargas. ✓ Sobreposição das válvulas. ✓ Esforço adicional do usuário para encher dois tanques.
Dual Fuel Dupla Injeção Direta	Procedimentos para Gestão do Motor.	Até 90%	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Não requer etanol anidro. ✓ Maior potência de saída quando comparado com o uso de óleo diesel puro. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Precisa de um sistema adicional (separado) de combustível para o etanol. ✓ Esforço adicional do usuário para encher dois tanques.

Cada uma das técnicas de substituição de óleo diesel por etanol, mostradas na tabela 1, apresentam vantagens e desvantagens comuns para todas elas. As desvantagens gerais são o alto consumo volumétrico de combustível, a manipulação especial do combustível e despesas adicionais para modificação do combustível, do motor ou de ambos. Em quanto às vantagens, as baixas emissões de fumaça e material particulado e um potencial de combustão altamente eficiente, comparável ou melhor do que o óleo diesel convencional.

Neste capítulo introdutório, se faz um percurso pela evolução e os fatores que influenciam o uso simultâneo do etanol com o óleo diesel, onde estes se misturam só no interior do cilindro. O objetivo é combinar as vantagens de ambos os combustíveis para utilização em motores ICO, de modo a atender as restritivas normas sobre emissões esperadas no futuro próximo (no Brasil ainda não se tem previsão para passar da norma EURO 5 para EURO 6).

O termo moderno mais utilizado para definir o modelo de combustão Dual Fuel é o denominado “Ignição por Compressão de Reatividade Controlada” ou RCCI por sua sigla em Inglês, utilizado nas amplas pesquisas desenvolvidas pela Universidade de Wisconsin sobre uso combinado de diesel-gasolina. Define-se o modelo RCCI de forma que certa quantidade de um combustível com alta reatividade (alto número de cetano) é utilizada para estabelecer uma ignição piloto em outro combustível de baixa reatividade (baixo número de cetano) que previamente se mistura homogeneamente com o ar. Este mesmo modelo de combustão pode ser achado na literatura utilizando termos como Dual Fuel CAI (Zhang, 2011), Dual Fuel PCCI (Kokjohn & Reitz, 2010) e Dual Fuel HCCI de múltiplo-estágio (Lim & Reitz, 2012).

Mesmo que a utilização de dois combustíveis de diferentes reatividades (sendo um deles etanol) seja motivo de pesquisa desde meados dos anos 70, a combustão Dual Fuel não é uma tecnologia madura, comparável com a combustão em motores ICO ou ICE. Por este motivo nem todos os problemas e limitações têm sido resolvidos e documentados (Königsson, 2012), mas seu potencial para reduzir emissões, substituir grande parte dos derivados do petróleo e atingir altas eficiências torna seu estudo interessante. Sobretudo no Brasil, um dos líderes mundiais na produção de combustíveis renováveis como o etanol e que já possui tecnologia desenvolvida para sua aplicação no mercado automotivo no segmento leve (injetores, bombas, materiais especiais para tubulações, etc) assim como postos de abastecimento em quase todo seu território.

1.1 Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo maximizar a razão de substituição do óleo diesel pelo etanol em processos de combustão em motores, mediante a simulação experimental, em uma máquina de compressão rápida. Pretende-se desenvolver novas estratégias, de múltiplas injeções, tanto de etanol hidratado quanto de óleo diesel, no processo de ignição por compressão. Como consequência, diferentes estratégias são avaliadas no intuito de, simultaneamente, aumentar a razão de substituição do combustível fóssil, ao mesmo tempo em que são reduzidas as emissões de gases poluentes.

Para atingir este objetivo foram necessárias as seguintes ações:

1. Compreensão dos diferentes modelos de combustão disponíveis na literatura para determinar as condições de combustão ótimas.
2. Estudo das estratégias de múltiplas injeções de combustível que justificam os objetivos do atual trabalho.
3. Adaptação de uma máquina de compressão rápida para instalar no seu cabeçote dois injetores, um para óleo diesel e outro para etanol, assim como dois sistemas de bombeamento e instalações eletrônicas necessárias para seu funcionamento.

1.2 Justificativa

As normas ambientais, tanto nos Estados Unidos quanto na Europa, foram desde o começo, ditadas para favorecer o uso de combustíveis renováveis (McNutt & Rodgers, 2003). Assim, uma vez que as normas para a redução de emissões foram estabelecidas, as seguintes medidas foram implantadas:

- ✓ Utilização de combustíveis renováveis em substituição aos derivados do petróleo em veículos leves, médios e pesados;
- ✓ Endurecimentos das normas sobre redução de emissões para promover o uso de combustíveis limpos;
- ✓ Expansão no uso de combustíveis oxigenados e hidrogenados.

A indústria vem atuando no sentido de reduzir as emissões de poluentes dos veículos, visando atender às crescentes exigências ambientais, e tem sido eficiente nesse propósito. Entretanto, compromissos assumidos pelos países signatários do Protocolo de Quioto, que entrou em vigor em 2005, vêm estimulando a indústria a rever conceitos primordiais dos veículos, sobretudo no que se refere à utilização de combustíveis alternativos (Goldsenstein & Azevedo, 2006). No Município de São Paulo a Lei de Mudanças Climáticas (Lei Municipal nº 14.933) de 9 de novembro de 2009 estabelece uma redução dos GEEs em torno de 20% até 2020.

O entendimento das estratégias de injeção no modo Dual Fuel, que promovem as pesquisas que visam à substituição total ou parcial do óleo diesel por combustíveis de uma fonte renovável contribuem para muitas das medidas acima descritas.

1.3 Contexto Histórico

A área ambiental começou a ser discutida nas relações internacionais a partir da década de 1960, especificamente em 1968, com o Clube de Roma, posteriormente, em 1972, com a realização da 1ª Conferência Mundial sobre o Meio Ambiente, em Estocolmo. Este evento representou um marco político na conscientização mundial dos problemas ambientais, produzindo, como principal documento, a “Declaração sobre o Ambiente Humano” (Ometto, 2005). Desta forma, o modelo de desenvolvimento poluente e baseado no petróleo começou a ser questionado.

Em pouco mais de sessenta anos de utilização em larga escala, as projeções já apontavam para o risco de esgotamento das reservas internacionais de petróleo, o que contribuiu para a forte elevação de suas cotações (Goldsenstein & Azevedo, 2006). Até então, os preços dos derivados de petróleo eram ditados pelas chamadas “Sete Irmãs”. Por causa do poder dessas empresas, o preço do barril manteve-se artificialmente mais baixo. Em 1973, eclodiu a Guerra do Yom Kippur, que elevou as tensões no Oriente Médio. Naquele contexto, a OPEP decretou um aumento unilateral de 300% nos preços do petróleo, o que provocou uma crise econômica mundial e interrompeu o longo período de grande crescimento econômico, que se mantinha desde o fim da segunda grande guerra (Goldsenstein & Azevedo, 2006). O mundo todo percebeu a grande dependência que se tinha (e ainda se tem) dos derivados do

petróleo. O Brasil sofreu o impacto da elevação dos preços, principalmente porque havia uma forte dependência, materializada na importação de 80% do óleo bruto então consumido no País. Isto levou o País a procurar combustíveis que pudessem, primeiro complementar e, no futuro, substituir integralmente os derivados do petróleo.

Neste contexto surge a ISAF (Simpósio Internacional de Álcool Combustível), uma organização internacional que reúne técnicos e executivos especialistas em álcool combustível, que teve sua primeira edição em Estocolmo (Suécia, 1976). Nesta ocasião, enfatizou-se o uso do etanol como uns dos principais combustíveis com a capacidade de ser utilizado em grande escala para substituir parcial ou totalmente os derivados do Petróleo (ISAF, 1980).

Um dos caminhos a seguir para o uso de etanol em motores ICO seria o modelo denominado Dual Fuel, onde o etanol e óleo diesel misturam-se dentro do cilindro do motor. A finalidade era substituir a maior quantidade de óleo diesel possível e que uma pequena parcela do óleo diesel dê origem à combustão.

Experiências com combustíveis gasosos injetados no coletor de admissão (Alpenstein, 1958) mostraram, já no início da década de 60, que este procedimento era factível e que, em qualquer caso, o motor poderia voltar a ser utilizado em seu modo original.

Na segunda metade da década de 70, os primeiros resultados sobre injeção indireta de etanol em motores ICO (injeção no coletor de admissão) são apresentados nos meios científicos (Barnes et al., 1975). Posteriormente, quase no final desse quinquênio a utilização de dois injetores dentro cilindro mostra também ser factível (Murayama et al., 1981).

Como resultado destas pesquisas, no início da década de 80, tanto a injeção direta, quanto a indireta de etanol em motores ICO mostraram resultados bastante otimistas, não só na quantidade de óleo diesel substituído, mas também nos níveis de emissões emitidas, assim como na eficiência térmica do motor (Holmér et al., 1980).

A tendência marcante durante a segunda metade da década de 80 que reduziu a utilização do etanol foi o chamado contrachoque do petróleo (figura 2). Com o preço por barril de petróleo despencando de 50 a 20 dólares (preços em dólares constantes de 2005), de 40 dólares por barril de etanol no Brasil (Morales & Storper, 1991) e de 1,54 dólares por galão nos EUA (www.neo.ne.gov), reduziram as pesquisas sobre combustíveis alternativos e renováveis entre eles o etanol em motores ICO.

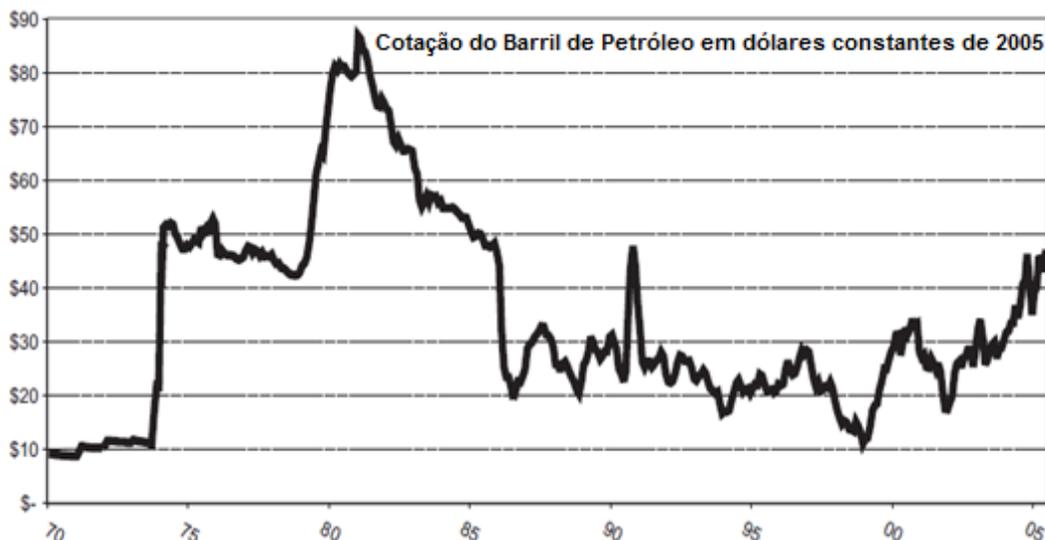


Figura 2 - Cotação do Barril de Petróleo: 1970 – 2005
(Goldsenstein & Azevedo, 2006)

Outros dois fatos que afetaram as pesquisas sobre a substituição de óleo diesel por etanol, se deram quando o Brasil, um dos maiores produtores de etanol no mundo, orientou sua produção para o uso em motores ICE, através de seu programa Proálcool, o maior e mais bem-sucedido programa de substituição de combustíveis derivados de petróleo do mundo (Brogio, 2009). Enquanto que, nos EUA, as políticas sobre subsídios ao etanol, assim como a falta de experiência e as ânsias de ganhar recursos do Estado com projetos mal estruturados fizessem que muitas refinarias de etanol fossem fechadas. (McNutt e Rodgers, 2003).

Uma nova oportunidade para o uso de etanol em motores ICO, desta vez impulsada pelas leis do combustível limpo para motores (1988) e as leis do ar limpo (1990), ditadas pelo Governo dos Estados Unidos, com o objetivo de abranger motores diesel ligeiros para favorecer ainda mais o uso de combustíveis renováveis, estabeleceram normas mais restritivas sobre emissões (Nos Estados Unidos normas EPA) como se mostra na figura 3.

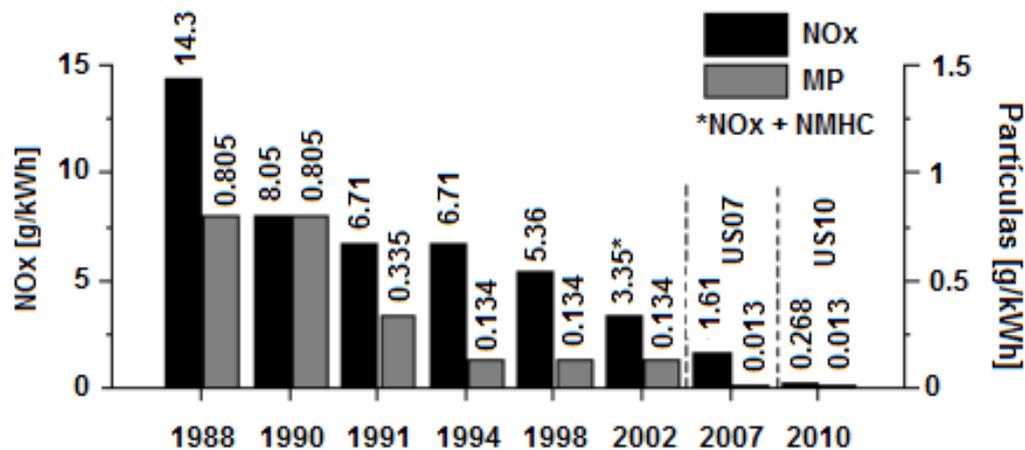


Figura 3 - Evolução cronológica da legislação sobre poluentes nos EUA em veículos de passageiros com motores ICO (Novella, 2009)

Mas mesmo quando se demonstrou que os veículos com combustíveis alternativos são tecnicamente superiores, tanto em potência, quanto em emissões, em uma lição de resposta competitiva, as indústrias automotivas foram capazes de identificar e implantar melhor as técnicas que começaram a enfraquecer o argumento da política dos combustíveis alternativos (McNutt & Rodgers, 2003).

Quando a Agência de Proteção Ambiental (EPA) dos Estados Unidos promulgou as regras para o Programa do Combustível Limpo (1993), que originalmente foi pensado como um mandato virtual para o uso de veículos com combustíveis alternativos, combustíveis reformulados foram capazes de oferecer significativas reduções de emissões, o que superou o potencial que os combustíveis alternativos podiam proporcionar no curto prazo (McNutt & Rodgers, 2003).

A figura 4 mostra a evolução dos motores ICO. Nas últimas décadas, cada vez que uma nova restrição é estabelecida, o avanço feito na indústria automotiva tem conseguido superá-la com melhores desenvolvimentos técnicos (Garcia, 2009).

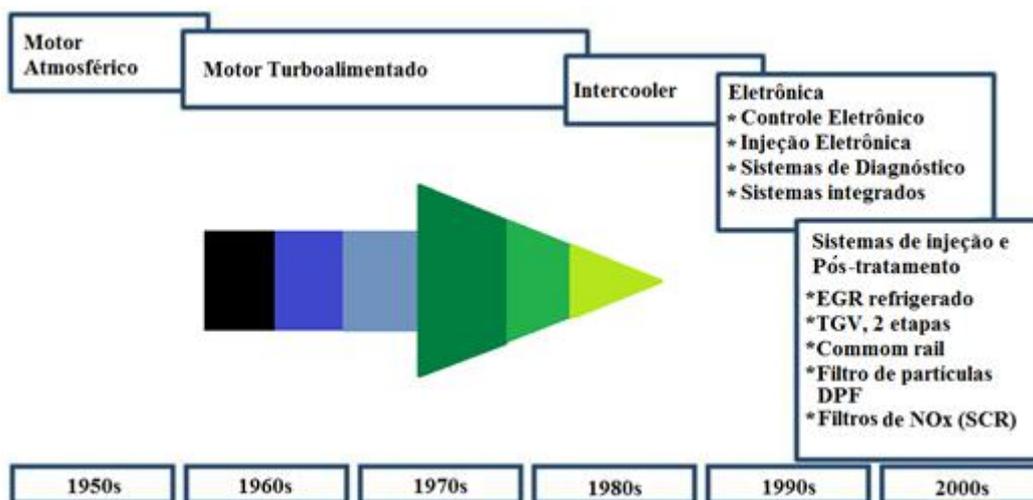


Figura 4 - Evolução das tecnologias do motor ICO (Garcia, 2009).

A grande questão que se coloca não diz respeito aos gases tóxicos, e sim a um gás tido, historicamente, como inofensivo ao meio ambiente: o dióxido de carbono, que representa 18,1% das emissões veiculares (Joseph, 2005). A liberação desse gás é inerente ao processo de combustão e o CO₂ lançado à atmosfera é um dos principais gases de efeito estufa. Na figura 5 se observa a produção de CO₂ por categoria de veículo no Brasil.

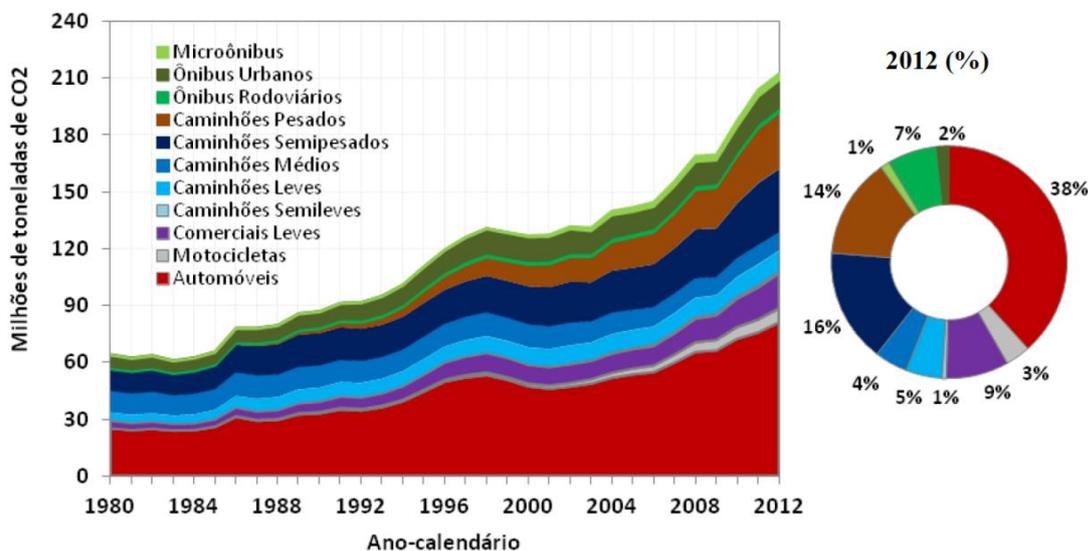


Figura 5 - Emissão de CO₂ por categoria de veículo (www.mmm.gov.br 2012).

Uma das principais linhas de ação adotadas para reduzir a emissão de poluentes e gases de efeito estufa na atmosfera é a utilização de fontes alternativas de energia tais como o etanol.

1.4 Conteúdo do trabalho

No segundo capítulo é apresentada uma descrição dos modos de combustão que fundamentam o estudo do uso simultâneo de dois combustíveis. Nesta parte se aborda as estratégias Dual Fuel, assim como os métodos de injeção de combustível, incluindo a teoria utilizada para o desenvolvimento da tese, de forma que se consiga entender o fenômeno de combustão, suas variáveis e variantes, para atingir os objetivos aqui propostos.

No terceiro capítulo, apresenta-se o aparato experimental fazendo uma descrição da Máquina de Compressão Rápida, assim como de seu funcionamento, seguido de uma descrição das condições necessárias para a montagem de dois injetores no cabeçote do cilindro da MCR. Apresenta-se as principais características da MCR, os equipamentos complementares, os dados do motor usado como referência e os resultados da caracterização da massa injetada pelos injetores, um para óleo diesel e outro para etanol. É detalhado o equacionamento empregado na análise de dados e os cálculos das variáveis de interesse. As estratégias, resultados e suas respectivas discussões constituem o capítulo quatro.

O presente trabalho encerra-se com as conclusões e sugestões para estudos futuros dispostas no capítulo cinco que são a soma das conclusões elaboradas, como resultados dos capítulos anteriores, de modo a avaliar a tese em geral. Finalmente se propõe um caminho para dar continuidade às pesquisas sobre motores Dual Fuel, usando o etanol como principal substituto do diesel.