

1 Introdução

A poluição ambiental e a dependência do petróleo são questões urgentes, relacionadas ao mercado de energia, que despertam a preocupação da sociedade. Nesse contexto, foram pesquisadas e desenvolvidas diversas soluções tecnológicas que pudessem diminuir o consumo de derivados de petróleo, e que fossem menos poluentes. Essas mudanças tecnológicas estão direcionando os mercados energéticos de muitos países, e conseqüentemente os parâmetros de previsão de demanda dos diversos combustíveis de atual uso automotivo.

O anterior tem trazido como alvo distintos programas de desenvolvimento de motores a combustão para obter baixas emissões e altas eficiências. Os motores modernos de ignição por compressão podem atingir essas necessidades, mas são diferentes aos convencionais, porque a carga na alimentação geralmente é altamente diluída e pré-misturada. A diluição na entrada é conseguida por misturas pobres em combustível ou diluída com gases de recirculação (EGR).

No Brasil, o campo de combustíveis, após o segundo choque do petróleo, em 1979 a gasolina passou a concorrer diretamente com um combustível alternativo: o álcool hidratado. O governo deu incentivos para o funcionamento de automóveis movidos a álcool, neste sentido, explica-se o forte declínio do consumo de gasolina no país no período de 1979 a 1987. Em 2003, a introdução dos veículos flex-fuel veio alterar estruturalmente o mercado de gasolina automotiva, uma vez que estes veículos possibilitam a utilização simultânea de gasolina e álcool hidratado como combustível em veículos automotores (Napo, 2007). Na atualidade, a indústria de refino do Brasil gera um excedente de gasolina que é destinado à exportação a países da América do Sul e África, ou promove a troca de combustíveis. Em contrapartida, o Brasil está longe de ser auto-suficiente no abastecimento de Diesel, por causa da sua política de transporte, predominantemente rodoviária. Além de ter uma tendência de se pensar no transporte como: *ferramenta indispensável para o crescimento de uma nação, viável economicamente, interagindo de forma racional com o meio*

ambiente e sem produzir agressões aos que interagem diretamente com ele.
(Magalhães, 2006)

No âmbito internacional um artigo da prestigiosa REUTERS, no final de 2007, já apresentava estimativas sobre o excedente de gasolina mundial, a qual iria se quintuplicar até 2010, devido principalmente a um aumento no consumo de etanol nos Estados Unidos, o que reduzirá as importações do combustível fóssil do País. A Europa produziu um excedente de cerca de 40 milhões de toneladas em 2005, cuja maior parte foi exportada para os EUA, e deve chegar a 60 milhões de toneladas em três anos, já que o consumo local continua a cair. O uso da gasolina na Europa está caindo de 3% a 4% por ano, enquanto a demanda por diesel aumenta de 2% a 3%. Nos EUA, maior mercado mundial de gasolina, o equilíbrio entre oferta e demanda tornou-se altamente dependente da produção de etanol. Dessa forma, precisa-se procurar alternativas que possibilitem o emprego da gasolina existente no mercado, e como já foi dito, se encontrem dentro dos regimes ambientais que aumentam em rigor em menores faixas de tempo.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821288/CA

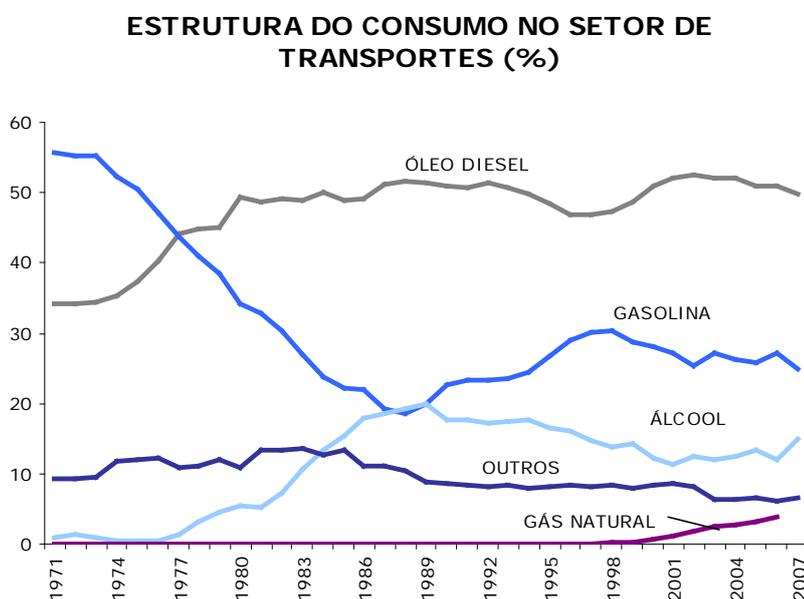


Figura 1 – Estrutura do Consumo de Combustíveis. Setor de Transportes

Fonte: (MME, 2008)

Voltando ao campo de desenvolvimento de motores de combustão, as tecnologias de combustão a baixa temperatura (LTC) têm trazido o interesse das

pesquisas atuais. O HCCI se encontra classificado dentro deste grupo e tem um interesse particular, devido às vantagens ambientais e de eficiência térmica que oferece. Nas últimas décadas muitos nomes foram atribuídos para este processo de combustão, ATAC (Active Thermo-Atmosferic Combustion), TS (Toyota-Soken), ARC (Active Radical Combustion) em motores de dois tempos, CIHC (Compression-Ignited Homogeneous Charge), Homogeneous Charge Compression Ignition, CAI (Controlled Auto-Ignition), UNIBUS (Uniform Bulky Combustion System), MK (Modulated Kinetics) entre outros (Zao, 2007).

É mais adequado referir-se ao processo de ignição como auto-ignição controlada (CAI), particularmente para motores a gasolina, mais que ignição por compressão. Isto é mais compatível com a clássica classificação em motores de combustão interna, permitindo ter uma idéia mais real do processo (Zhao, 2007). O trabalho tem-se orientado ao estudo deste processo de combustão, através da variação da temperatura de entrada e a quantidade de combustível presente na mistura de ingresso. Por ser um termo de uso comum vai-se utilizar o acrônimo HCCI para representar o processo estudado.

1.1. Combustão a baixa temperatura

Muitos métodos estão sendo propostos para a diminuição da temperatura de combustão, que dependem do princípio de diluição da pré-mistura ou parcial pré-mistura da combustão. Devido à alta diluição, as temperaturas de combustão são baixas, resultando em baixa geração de NOx. A carga suficientemente bem misturada prevê a formação de fuligem. A eficiência térmica é tipicamente comparável ao motor diesel para estes tipos de combustão (Zhao, 2007), razão pela qual muita pesquisa está se desenvolvendo neste campo. Um deles é o HCCI, onde atualmente, uma grande variedade de combustíveis está sendo testada (gasolina, combustível diesel, etanol, gás natural, e outros).

Com o combustível diesel, o clássico HCCI não é facilmente implementado, devido principalmente à baixa volatilidade e à facilidade com a qual a auto-ignição acontece. Quando se fala de uma combustão a baixa temperatura (LTC) do diesel, se faz uma boa aproximação ao processo de HCCI, na qual se utilizam muitas técnicas para obter a suficiente pré-mistura para obter a melhor

combinação de temperatura de combustão e taxa equivalente local que conduzem há evitar a formação de fuligem e NOx, como se pode ver na Figura 2. Nota-se que a temperatura de chama adiabática em ar, para condições convencionais para o diesel, atravessa pela região de formação de fuligem e NOx, e a combustão por centelha (SI) produz considerável quantidade de NOx, este último pelo fato das altas temperaturas geradas no frente de chama (Jarosinski & Veyssiere, 2009). Os motores de SI têm consideráveis baixas eficiências térmicas pelas baixas razões de compressão e as perdas do acelerador na borboleta.

Para vencer as dificuldades de implementação da combustão a baixas temperaturas se requer um melhor entendimento dos processos ao interior do cilindro para estes avançados sistemas de combustão.

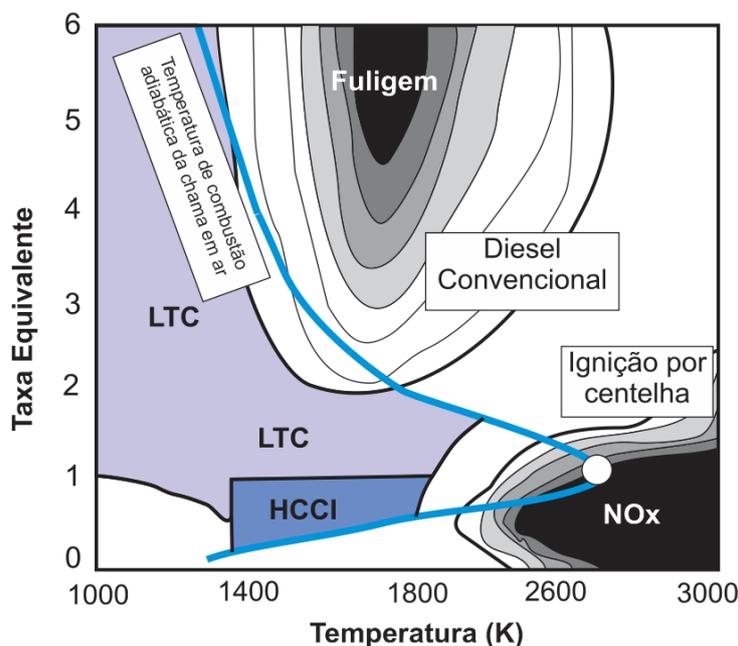


Figura 2 - Taxa Equivalente – Temperatura, regiões de formação de Fuligem e NOx para motores Diesel, SI, HCCI, e LTC Diesel.

(Jarosinski & Veyssiere, 2009)

1.2. Saúde e efeito ambiental das emissões

O Brasil é o país com maior quantidade de habitantes de América do Sul (mais de 180 milhões), com 30 % morando nas regiões metropolitanas do Rio de Janeiro (RJRM) e São Paulo (SPRM) na parte sudeste. O RJRM tem a maior densidade demográfica (1700 habitantes / km²), e nesta área as fontes de emissão

móveis (principalmente automóveis) são responsáveis por 77% dos poluentes emitidos à atmosfera (Cunha & Azeredo, 2009).

Segundo a Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA), a produção de veículos apresentou um significativo crescimento nas cinco últimas décadas, como se pode ver na Figura 3.

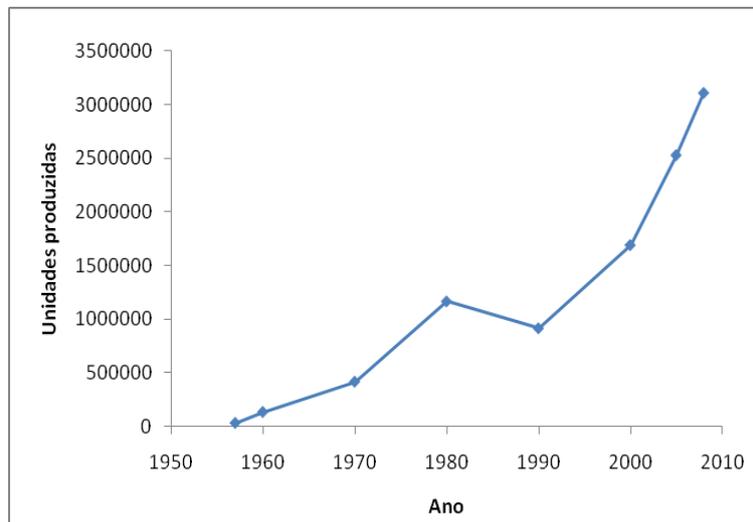


Figura 3 - Produção de automóveis das últimas décadas (Cunha & Azeredo, 2009)

A frota de veículos está também concentrada na parte sudeste do país, seguido pela região sul, sendo a última a região centro-oeste, como apresenta o gráfico.

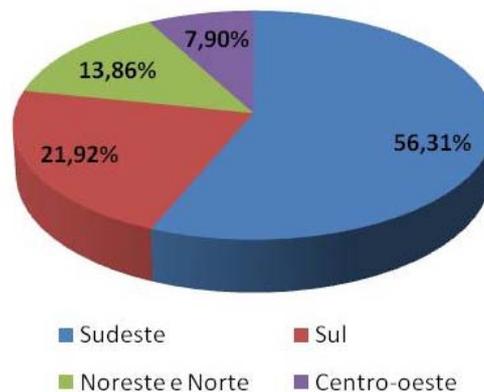


Figura 4 – Distribuição da frota de veículos nas cinco regiões do Brasil (Cunha & Azeredo, 2009)

Os anteriores fatos trazem uma forte preocupação pelos poluentes que podem se apresentar no processo de combustão dos motores, os quais podem se classificar em dois grupos principalmente. O nitrogênio, oxigênio, hidrogênio,

vapor de água e o dióxido de carbono pertencem ao grupo das substâncias não tóxicas. O grupo de substâncias tóxicas inclui monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x), hidrocarbonetos (C_xH_y), aldeídos (R_xCHO), fuligem, dióxidos de enxofre (SO₂), ácido sulfídrico e partículas sólidas. Os hidrocarbonetos poli-aromáticos são substâncias cancerígenas e formam um grupo especial.

A Tabela 1 apresenta os principais componentes nas emissões de motores de combustão interna, onde também se faz uma classificação segundo a toxicidade que apresentam (Rodriguez et al., 2008).

Tabela 1 – Gases de exaustão de motores de combustão interna

Componentes	Máximo conteúdo em volume (%)		Observação
	Gasolina	Diesel	
Nitrogênio	74-77	76-78	Não Tóxico
Oxigênio	0.3-0.8	2.0-18.0	Não Tóxico
Vapor	3.0-5.5	0.5-4.0	Não Tóxico
Dióxido de Carbono	5.0-12.0	1.0-10.0	Não Tóxico
Monóxido de Carbono	0.1-10.0	0.01-0.5	Tóxico
Oxido de nitrogênio	0.1-0.5	0.001-0.4	Tóxico
Hidrocarbonetos	0.2-3.0	0.009-0.5	Tóxico
Aldeído	0-0.2	0.001-0.009	Tóxico
Dióxido de enxofre	0-0.002	0-0.03	Tóxico
Fuligem (g/m ³)	0-0.04	0.01-1.1	Tóxico

(Rodriguez, Andrade, Tiyoko, & Silveira, 2008)

O CONAMA (Conselho Nacional de Meio Ambiente) instituiu em 1986 o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE), o qual deu prioridade ao segmento de veículos leves, devido ao grande número e utilização intensiva. As normas e os limites nos quais se encontra baseado, vem de legislações de países desenvolvidos, adaptando-se às condições e necessidades brasileiras, isto fez com que a regulação para motores diesel se fundamente na experiência européia (EUROS). Na atualidade, a PROCONVE P-6 está vigente (equivalente ao EURO 4), e será substituída no 2012 pela P-7 (EURO 5). A Figura 5 mostra o rigor das normas EURO com respeito aos principais contaminantes expressados em g/kWh.

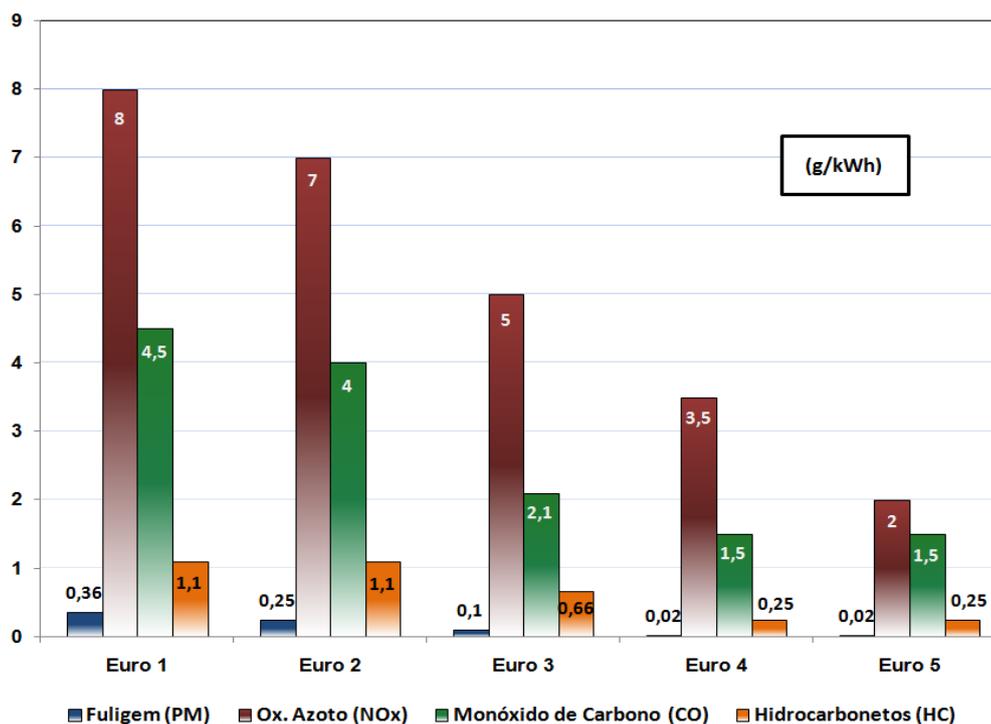


Figura 5 – Passado, presente e futuro da legislação de emissões nos países da União Européia (Steffens, D.,2006).

1.2.1. Óxidos de Nitrogênio

NO e NO₂ causam impacto no meio ambiente e na saúde do homem em múltiplas formas. Quando o NO₂ é foto-dissociado, pode resultar na formação de perigosos níveis de ozônio e smog. NOx também contribui com a chuva ácida, causa estragos na natureza e danifica as construções. O nitrogênio também pode contribuir com o excesso de nutrientes para espécies aquáticas, produzindo eutroficação de lagos e rios, o qual diminui os níveis de oxigênio nos lagos, provocando finalmente a morte de animais e plantas dos eco-sistemas afetados.

1.2.2. Material particulado ou Fuligem

Tem-se comprovado que as partículas podem causar problemas de saúde, como asma, diminuição no funcionamento dos pulmões, sintomas cardiovasculares, câncer de pulmão, e recentemente a morte prematura. As

partículas reduzem a visibilidade, estragam e danificam as construções (Eastwood, 2008).

1.2.3. Hidrocarbonetos não queimados

Os hidrocarbonetos incluem muitos compostos tóxicos que provocam câncer e outros efeitos adversos na saúde. Reagem com a luz solar em presença de óxidos de nitrogênio para formar ozônio.

1.3. Objetivos

O desenvolvimento atual dos motores de Ignição por Compressão de Mistura Homogênea é amplo, mas ainda não tem sido possível um protótipo comercial para distintas cargas a diferentes velocidades (Zao, 2007). Assim, são objetivos principais do presente trabalho:

- a. Determinar através da caracterização do motor as condições adequadas para que o processo de HCCI aconteça dentro de um regime controlado através das variáveis de entrada, como a temperatura da alimentação e concentração na mistura de alimentação.
- b. Mostrar as vantagens de trabalhar com o processo HCCI em função do rendimento e à quantidade de emissões geradas, tendo como marco de referência o excedente de gasolina no Brasil, e a variedade de combustíveis comercializados, sempre na procura de novas tecnologias.

1.4. Atividades Desenvolvidas e descrição da dissertação

Um motor monocilíndrico de ignição por compressão Diesel foi adaptado para funcionar em modo HCCI e para isto foi construído previamente um dinamômetro de bancada. A instrumentação foi destinada à medição das principais variáveis que permitem caracterizar a combustão e avaliar o rendimento do motor durante os testes. O trabalho na sua integridade foi desenvolvido no Laboratório de Engenharia Veicular (LEV/PUC–Rio). Na primeira parte do

trabalho é apresentada uma introdução à tecnologia da combustão a baixa temperatura, junto aos objetivos.

No capítulo dois, faz-se a revisão bibliográfica do tema, apontando resultados obtidos por diferentes autores e grupos de pesquisa, além de conceitos importantes para um melhor entendimento da auto-ignição ao interior do motor. É também feita uma revisão da cinética química do processo de combustão e como os combustíveis reagem na mesma.

No capítulo três descrevem-se o aparato experimental empregado, os detalhes construtivos do motor testado, e da bancada de testes.

A metodologia adotada na realização dos ensaios junto ao equacionamento para a avaliação dos distintos parâmetros de operação do motor é feita aplicando a redução dos dados que é descrita no capítulo quatro.

A apresentação dos resultados experimentais é feita no capítulo cinco. A dissertação se concluiu no capítulo seis. Neste último se resumem os principais resultados para sua aplicabilidade e às limitações experimentais enfrentadas.

Nos anexos, inclui-se a análise das incertezas experimentais e sua propagação no cálculo das grandezas de interesse, além da planilha dos resultados experimentais e informações a respeito das propriedades do combustível.