
EMISSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS EM MOTORES À IGNIÇÃO POR CENTELHA - UMA REVISÃO DA LITERATURA

Cassio Augusto Yared

Engenheiro Mecânico

Aluno do curso Pós-Graduação em Motores à Combustão Orientada à Engenharia da Mobilidade –

SENAI - CIC

cassioyared@msn.com

Manolo Lutero Gipiela

Doutor em Engenharia Mecânica

Professor da Faculdade de Tecnologia do SENAI – CIC

manolo.gipiela@pr.senai.br

RESUMO

Os combustíveis fósseis são, desde períodos anteriores à Revolução Industrial, a principal fonte de energia utilizada pela humanidade. No entanto, seu uso traz impactos à natureza e à saúde humana. Sabendo-se que uma das principais fontes destes poluentes são os automóveis, esforços vêm sendo realizados desde os anos 60 do século XX com o objetivo de limitar os impactos da poluição por meio da redução das emissões dos veículos. Nos próximos anos, a legislação brasileira relativa às emissões se tornara mais restritiva, trazendo necessidade de novos desenvolvimentos que permitam aos veículos nacionais se enquadrarem nos novos requisitos, e com isso, a qualificação dos engenheiros envolvidos nestes trabalhos. Apesar do tema de emissões ser bastante discutido, seu conhecimento aprofundado não é difundido em larga escala. Além disso, por ser um tema bastante específico, a introdução de novos engenheiros ao tema torna-se bastante difícil e trabalhosa. Desta forma, o presente trabalho propõe a realização de um levantamento do estado da arte em termos de emissões de poluentes pelos motores à ignição por centelha. O objetivo é identificar quais são os poluentes emitidos por estes motores, como estes poluentes se formam, qual o impacto dos mesmos para a atmosfera e a saúde humana, e quais os métodos existentes para redução e controle das emissões. Estes objetivos foram atingidos através de pesquisa e leitura de artigos pertinentes ao tema, gerando um material resumido que pode ser utilizado por novos engenheiros que necessitam ou se interessem pelo tema, mas ainda não possuem profundidade suficiente no mesmo. Este artigo apresenta um sistema desenvolvido para controle de passageiros em ônibus do tipo rodoviário, fretamento ou ônibus que precisem de um controle de passageiros não sendo possível a utilização da catraca devido ao incômodo ou a normas técnicas que legislam essas especificações e, veículos desse tipo

Palavras-chave: Motores à combustão. Emissão de poluentes. Poluição atmosférica.

1 INTRODUÇÃO

Com o advento da Revolução Industrial, os combustíveis fósseis passaram a ser uma fonte de energia de extrema importância para o ser humano. Ao longo do século XX, a utilização deste tipo de combustível se intensificou, tornando-o a principal fonte na matriz energética do planeta. O aumento na utilização de combustíveis fósseis trouxe consigo a degradação da qualidade do ar respirável, principalmente nos grandes centros urbanos. Dentre os maiores responsáveis pela queda da qualidade do ar estão as atividades industriais e a utilização de veículos automotores movidos à combustão interna. (Goklany, 1999).

Tendo em vista este impacto, no ano de 1967 o governo do estado da Califórnia criou a California Air Resources Board (CARB), com o objetivo de controlar e reduzir o nível de poluentes no ar atmosférico. A partir daí, governos de diversos países decidiram por seguir os mesmos passos, atuando fortemente sobre os motores à combustão interna (CARB, 2014).

No Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) criou em 1986 o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE). Desta forma, o governo brasileiro se compromete a fiscalizar constantemente e a melhorar em longo prazo a qualidade do ar respirado pela população. (BRASIL, 1986)

O presente trabalho contém um levantamento do estado da arte no que diz respeito às emissões de poluentes provenientes de veículos automotores, movidos por motores de combustão à ignição por centelha, dividindo o conteúdo em duas partes: impacto dos poluentes; e origem e controle das emissões em motores à ignição por centelha.

Apesar do tema de emissões e poluição do ar ser tratado de maneira usual pelos engenheiros atuantes na indústria automobilística nacional, muitos deles ainda possuem um conhecimento superficial a respeito do tema, seja pela pouca experiência ou pela falta de necessidade existente até então. Além disso, dentro da esfera dos especialistas em emissões e poluentes, o conhecimento avançou de maneira exponencial nas últimas duas décadas, principalmente nos países desenvolvidos, o que dificulta a introdução do tema junto a novos engenheiros que necessitam deste conhecimento em sua atuação diária.

Desta forma, o presente trabalho se justifica como uma forma de sumarizar os fundamentos necessários para os engenheiros que necessitam se iniciar no tema de emissões de poluentes provenientes de motores à ignição por centelha, contribuindo com a disseminação do conhecimento e com a excelência dos trabalhos a serem realizados pelos profissionais da indústria automobilística nacional.

2 POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

De acordo com o CONAMA, em sua resolução nº3 de 28/06/1990, o poluente atmosférico pode ser definido como “[...] qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou características em desacordo com os níveis estabelecidos, e que tornem ou possam tornar o ar: impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde; inconveniente ao bem-estar público; danosos aos materiais, à fauna e à flora; prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade.” (Brasil, 1990)

Os poluentes atmosféricos podem ser classificados como primários ou secundários. Os primários são aqueles emitidos diretamente por uma fonte de poluição, sendo mais comuns o monóxido de carbono (CO), o dióxido de carbono (CO₂), os hidrocarbonetos (HC), o monóxido de nitrogênio (NO) e o dióxido de enxofre (SO₂). Já os secundários são aqueles formados a partir de reações entre poluentes primários e elementos constituintes da atmosfera, principalmente através de oxidação. Dentre os poluentes secundários mais comuns, podemos citar o ácido sulfúrico (H₂SO₄), dióxido de nitrogênio (NO₂) e o ozônio (O₃). (Brasil, 1990)

2.1. CAMADA DE OZÔNIO

A presença de ozônio na estratosfera permite a formação da camada de ozônio, que age como uma barreira protetora contra radiação ultravioleta. Próximo ao solo, o ozônio pode ser um poluente bastante prejudicial. (Holanda, 2010)

A camada de ozônio se situa numa faixa entre 15 e 30 quilômetros acima da superfície terrestre, em uma região chamada estratosfera. Esta camada age como uma barreira para a radiação solar, filtrando os raios ultravioleta e evitando que estes

cheguem até a região habitável do planeta. Ainda assim, uma parcela destes raios acabam alcançando a superfície, mas numa faixa de frequência menos prejudicial à saúde humana. A camada é formada naturalmente na alta atmosfera pela ação dos próprios raios ultravioleta, que dissociam moléculas de O₂, liberando átomos de oxigênio.

Estes, por sua vez, reagem com moléculas de O₂, resultando em ozônio (O₃). O ozônio formado, então, reage com os raios ultravioleta, provenientes do Sol, e se dissociam em O e O₂. Ainda, o ozônio pode reagir com outros átomos de oxigênio, resultando em duas moléculas de O₂, completado o ciclo. Desta forma, nota-se que a formação e a extinção do ozônio acontece em um ciclo natural e equilibrado. Este equilíbrio é desfeito quando moléculas de cloro-flúor-carbono (conhecidos também como CFCs) entram em cena. Através da ação dos raios ultravioleta, os CFCs se quebram, liberando átomos de cloro (Cl). Estes, reagem com o ozônio, resultando em O₂ e ClO. Quando o ClO encontra um átomo de oxigênio, forma-se O₂ e o Cl está livre novamente para reagir com outra molécula de O₃. Desta forma, é possível perceber que um único átomo de Cl pode destruir milhares de moléculas de ozônio. É importante dizer que o mesmo efeito ocorre com os óxidos de nitrogênio em relação ao ozônio. NO reage com O₃ resultando NO₂ e O₂. Este NO₂ reage com oxigênio livre e resulta em NO e O₂, e assim indefinidamente. (Holanda, 2010)

2.2. EFEITO ESTUFA

Efeito estufa é uma expressão cunhada pelo químico sueco Svant Arrhenius no final do século XIX, com o objetivo de alertar que a queima de combustíveis fósseis iria aumentar a quantidade de CO₂ na atmosfera e levar a uma mudança climática por meio de um aquecimento global. Porém, nos dias de hoje, não existe um consenso entre os cientistas se as emissões antropogênicas de CO₂ são de fato responsáveis por mudanças climáticas ou se estas são resultado de um ciclo natural do clima da Terra. Além disso, apesar de ser possível verificar um aumento nas concentrações de CO₂ na atmosfera, não é possível dizer com elevado grau de certeza que este aumento se dá somente pelas atividades humanas. (Holanda, 2010)

De maneira simplificada, o efeito estufa é um mecanismo cíclico através do

qual o planeta Terra se mantém aquecido. Ao encontrar a superfície terrestre, os raios solares incidentes são refletidos, transferindo uma parcela de sua energia para o ambiente. Quando os raios refletidos atingem os limites superiores da atmosfera, uma parte é refletida novamente à Terra, enquanto o restante retorna ao espaço. Esta parcela refletida dá início a um novo ciclo quando encontra novamente a superfície, e dessa forma o ambiente se mantém aquecido. Nota-se, portanto, que o efeito estufa é um mecanismo natural necessário para a manutenção da vida no planeta Terra. No entanto, seu potencial pode ser alterado pela emissão de poluentes para o ar ambiente. (Holanda, 2010)

Os gases que mais contribuem para o agravamento do efeito estufa são o dióxido de carbono, gás metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), vapor d'água, cloro-fluor-carbonos e ozônio. Dentre estes, alguns são mais poderosos do que outros em termos de efeito estufa, sendo o metano 23 vezes mais poderoso do que o CO₂, enquanto os CFCs podem ser mais de 10.000 vezes mais poderosos do que o CO₂. No entanto, ainda estima-se que o CO₂ seja o de maior contribuição para o efeito estufa (50%), seguido pelo metano (20%), CFCs (15%), ozônio (10%) e óxido nitroso (5%). Como contraponto, considera-se que a quantidade de CO₂ de origem antropogênica (devido à queima de combustíveis fósseis) corresponde a cerca de 4% de todo o montante produzido pela natureza. (Holanda, 2010).

2.2 IMPACTO DOS POLUENTES NA SAÚDE

Na Tab. 1 é apresentado o efeito toxicológico individual de cada poluente emitido pelos motores à combustão no sistema respiratório humano. No entanto, na prática, a exposição nunca será individual, mas sim aos diversos poluentes simultaneamente, de modo que o efeito combinado deve ser levado em conta. (Dockery e Pope, 1994)

Tabela 1 - Impacto dos poluentes na saúde humana

Poluente	Fonte Natural	Fonte antropogênica	Efeitos na saúde humana
Monóxido de carbono	Não detectável	Combustão incompleta de misturas ricas em combustível	Redução da capacidade de transporte de oxigênio pelo

Óxidos de nitrogênio	Raios e atividades bacterianas no solo	Combustão à altas temperaturas em motores	Irritações nos olhos, garganta e pulmão. Produção de SMOG e chuva ácida. Destruição da
Dióxido de enxofre	Erupções vulcânicas	Queima de carvão, refinamento do petróleo, motores Diesel	Irritações nos olhos, garganta e pulmão. Formação de chuva
Ozônio	Raios e reações fotoquímicas na troposfera	Produto de reações fotoquímicas	Irritações nos olhos, garganta e pulmão. Funções primárias do pulmão prejudicadas.
Dióxido de carbono	Respiração animal, liberação pelos oceanos	Combustão de combustíveis fósseis e madeira	Potencialização do efeito estufa
Hidrocarbonetos (exceto metano)	Processos biológicos	Combustão incompleta	Produção de SMOG
Metano	Decaimento anaeróbico, digestão de animais	Vazamentos de gás natural e combustão	Potencialização do efeito estufa
Cloro-fluor-carbonos	Nenhum	Usado como solvente, propelente aerossol, fluidos refrigerantes	Destruição da camada de ozônio

Fonte: SHER, 1998

3. MOTORES À COMBUSTÃO INTERNA E OS POLUENTES

Na sequência, serão apresentados os mecanismos de formação dos principais poluentes emitidos pelos motores à ignição por centelha.

3.1. FORMAÇÃO DE NO_x

Apesar de normalmente se referenciar aos óxidos de nitrogênio como NO_x, em motores à ignição por centelha apenas o NO é relevante, enquanto o NO₂ se faz presente em grandes concentrações apenas em motores à ignição por compressão. (Miller e Bowman, 1989).

De maneira geral, o NO é formado na região de gases quentes, gerada pela combustão. Sua taxa de formação é lenta em relação ao processo de combustão, e aumenta exponencialmente com a temperatura dos gases após a combustão. O principal caminho para formação de NO é o chamado “caminho térmico” ou

mecanismo de ZeldovichKeck, que consiste nas reações abaixo listadas.



Observa-se que na Eq. (1) os átomos de oxigênio presentes após a frente de chama iniciam a decomposição do N_2 em N, com energia de ativação da ordem de 75kcal/mol. (Raine et al, 1995)

3.2. FORMAÇÃO de CO

A combustão pode ser descrita como uma conversão do combustível em hidrocarbonetos menores, seguida de oxidação para formar aldeídos e cetonas, que por sua vez são transformadas em CO e, após sua oxidação, CO_2 . A conversão do combustível para moléculas intermediárias se dá de maneira muito mais rápida do que a oxidação final. Desta forma, o CO é resultante da falta de oxigênio (quando a mistura é rica) e também da expansão rápida dos gases queimados, cessando a reação final de oxidação. (Sher, 1998)

3.3. Formação de HC

De maneira geral, toda emissão de HC se origina de fontes que impedem parcelas do combustível de serem consumidas pela chama da combustão. Algumas dessas fontes são superfícies frias (que dificultam a oxidação do combustível quando da passagem da chama), fendas estreitas ao longo da câmara de combustão (que armazenam HC e impedem que sejam queimados), a absorção do HC pelo óleo lubrificante, vaporização insuficiente do combustível, falta de estanqueidade nas válvulas, entre outros. A influência relativa de cada fonte varia com a condição de funcionamento e com a geometria do motor. Em partidas a frio, a vaporização deficiente do combustível torna-se a contribuição principal para as emissões de HC, enquanto que com o motor em regime o efeito das fendas é dominante (Cheng et al,

1993).

Cerca de 10% do combustível injetado na câmara não é queimado durante o evento da combustão principal. Destes, 75% são consumidos após a combustão principal, dentro do cilindro ou até mesmo na linha de escapamento. Isto significa que a queima deste combustível em um momento tardio do ciclo não gera trabalho no eixo do motor, proporcionando basicamente um aumento da entalpia dos gases de exaustão, contribuindo com uma menor eficiência do sistema. (CHENG et al, 1993).

As camadas de atenuação são regiões próximas às paredes mais frias da câmara de combustão, através das quais a chama não consegue se propagar. Em outras palavras, estas camadas são o local em que a energia liberada pela chama entra em balanço com as perdas de calor para a parede. Mesmo assim, outras definições podem ser formuladas, uma vez que trata-se de um fenômeno instável. (CHENG et al, 1993).

Uma vez que a distância de atenuação é inversamente proporcional à pressão do sistema, a condição em que a camada de atenuação mais afeta as emissões de HC é em regimes de baixa carga. Além disso, estima-se que estas camadas podem contribuir com até 20% dos HC não queimados. Porém, devido às características do processo, boa parte destes HC acaba sendo consumida após a combustão, ainda dentro da câmara. Em termos finais, as camadas de atenuação contribuem com cerca de 5% a 10% do total. Uma fração mais importante pode ocorrer quando da extinção em massa da combustão (ou misfire) que ocorre em condições de mistura excessivamente pobre. (CHENG et al, 1993).

Outro mecanismo de formação de HC são as fendas do sistema. Por fendas entende-se volumes reduzidos distribuídos ao longo da câmara de combustão, com o objetivo de inibir a propagação da chama. Estão presentes nos pistões, ao longo da junta de cabeçote, ao longo das sedes de válvulas, e roscas de vela. Durante a compressão, estes volumes são preenchidos pela mistura ainda não queimada. Após a combustão principal, ocorre a expansão e parte destes HC não queimados deixam as fendas e são oxidados junto aos gases quentes da combustão. Outra parte acaba deixando o cilindro sob forma de HC. Cada fenda contribui de maneira diferente para a emissão de HC, dependendo do seu volume e distância relativa à vela - fendas próximas ao local da centelha são preenchidas com maior fração de gases

⁷⁴ Conhecimento Interativo, São José dos Pinhais, PR, v. 11, n. 2, p. 67-90, jul./dez. 2017.

queimados - e à válvula de exaustão (maior probabilidade do HC sair do cilindro sem ser oxidado) (ADAMCZYK, 1989).

Com objetivo de reduzir as emissões de HC, é possível diminuir os volumes das fendas existentes, porém tal ação acaba sendo limitada pela necessidade de espaço para expansão térmica dos componentes do motor. Além disso, muitas reduções são limitadas pela tensão à qual as peças são submetidas, principalmente pistão e anéis (ADAMCZYK, 1989).

Em termos de contribuição, as fendas próximas à vela e às válvulas contribuem de forma discreta, enquanto as fendas na cabeça do pistão e na junta de cabeçote possuem contribuições consideráveis. Ainda, em termos gerais, as fendas proporcionam a maior contribuição para emissão de HC quando o motor atua em regime permanente (ADAMCZYK, 1989).

Um mecanismo comum de formação de HC é a absorção pelo óleo lubrificante. A presença de óleo nas camisas do cilindro possibilita que o combustível seja absorvido antes da passagem da chama pelo local. Isso contribui de forma significativa para as emissões de HC. Por exemplo, em um estudo realizado retirando-se todo o óleo do motor (e utilizando anéis de grafite) obteve-se uma redução de emissões da ordem de 30%. (KAISER et al, 1981). Além disso, foi constatado que combustíveis mais voláteis levam a maiores níveis de emissões, da ordem de 10% do total de HC emitido pelo motor. (KAISER et al, 1981).

Outro ponto a se preocupar são os depósitos de HC não queimado. Com o uso do motor, depósitos podem se formar nas superfícies das válvulas e da câmara de combustão. Apesar de não ser completamente compreendido, acredita-se que os depósitos nas válvulas ocorrem por polimerização e oxidação do combustível em camadas similares à verniz, enquanto na câmara de combustão estes depósitos geralmente são formados pela condensação de combustível e oxidação durante os ciclos. Estes diferentes tipos de depósitos contribuem de maneira diferente para a emissão de poluentes. Os depósitos nas válvulas de admissão prejudicam a performance do motor, ao interferir na qualidade da mistura em regime transiente. Já os depósitos na câmara aumentam a incidência de NO_x, uma vez que ao se acumularem nas paredes do cilindro prejudicam a troca de calor da câmara, aumentando sua temperatura média. Além disso, por ser formado em grande parte

por material carbônico, a incidência de depósitos pode aumentar a emissão de HC, dependendo da natureza do combustível utilizado. (CHENG et al, 1993).

A maior parte das emissões de HC em motores de ignição por centelha (mais de 90%) acontece durante o primeiro minuto de operação. Isto acontece por dois fatores principais:

- a) elevado tempo de aquecimento do catalizador (light off);
- b) riqueza elevada da mistura para garantir a partida e o funcionamento nos primeiros instantes (de 8 a 15 vezes a quantidade estequiométrica de combustível).

Grande parte do combustível em excesso injetado na partida a frio se acumula no cilindro e nas válvulas durante os primeiros ciclos, e acaba sendo vaporizado após a combustão propriamente dita, deixando o sistema na forma de HC. (BOAM et al, 1994).

A necessidade de se injetar uma mistura mais rica se dá pelo tipo de geometria de injeção adotado. A maioria dos motores possui injeção na cabeça da válvula (Port Fuel Injection - PFI), que quando aquecida vaporiza o combustível, que por sua vez é levado para a câmara de combustão pelo ar de admissão em turbulência. Desta forma, métodos de injeção que permitam uma pré-mistura mais homogênea podem reduzir a riqueza necessária durante a partida a frio do motor, reduzindo assim as emissões de HC. (BOAM et al, 1994).

Sendo assim, a redução das emissões de HC durante a partida do motor depende fortemente da dinâmica do transporte e vaporização do combustível, de forma a assegurar uma partida imediata com o mínimo de excesso de combustível possível. A preparação da mistura é, portanto, fator chave para a otimização do sistema. (BOAM et al, 1994).

De maneira geral, todo e qualquer fator que aumente a temperatura ou a disponibilidade de oxigênio pós combustão pode levar a uma redução nas emissões de HC. Porém, não é possível reduzir indefinidamente o HC por estes meios sem aumentar a quantidade de NOx emitido, já que este se forma em altas temperaturas. Sendo assim, se faz necessário um ponto de equilíbrio entre os níveis de HC e NOx, para que o motor atenda as legislações. (THOMPSON e WALLACE, 1992).

Dentre as condições de operação que afetam as emissões de HC, podemos destacar:

- a) relação ar-combustível;
- b) EGR (Exhaust Gas Recirculation);
- c) avanço de ignição;
- d) rotação e carga;
- e) fluido de arrefecimento.

No que diz respeito à relação ar/combustível, apesar de existir um pico de temperatura média quando o motor funciona com mistura estequiométrica, o que favorece a redução de HC, de maneira geral quanto mais pobre for a mistura, menor será a emissão de HC (até o ponto em que passa a ocorrer falha de ignição ou misfire). Isto ocorre pois a redução de emissões de HC por meio de excesso de oxigênio é maior do que pela alta temperatura. Desta forma, operar em regimes ligeiramente pobres é a melhor alternativa para emissões de HC. (THOMPSON e WALLACE, 1992).

Já a utilização de EGR leva a menores temperaturas na câmara de combustão, porém sem adição de oxigênio, o que leva por consequência a um aumento nas emissões de HC. (THOMPSON e WALLACE, 1992).

O avanço de ignição afeta diretamente o início da combustão e a pressão máxima atingida. Um maior avanço irá resultar em maior temperatura dos gases queimados durante a exaustão, reduzindo as emissões de HC, principalmente em partidas à frio. (THOMPSON e WALLACE, 1992).

O aumento na rotação de funcionamento do motor irá reduzir as trocas de calor entre os gases queimados e o sistema, o que aumenta a taxa de oxidação dos HC não queimados. Desta forma, um aumento na rotação reduz a emissão de HC. Por outro lado, não existe uma regra geral entre a carga aplicada e o nível de emissão de HC, sendo que o resultado varia com a condição de operação. (THOMPSON e WALLACE, 1992).

A temperatura do fluido de arrefecimento é de fundamental importância na emissão de HC. Maiores temperaturas nas camisas dos cilindros levam a um menor nível de emissões de HC. Isto se dá pois, com maiores temperaturas nas camisas ocorre menor depósito de HC nas fendas da câmara de combustão e dos

pistões (por meio da redução da densidade dos gases retidos), dessorção ou vaporização mais rápida do HC retido na película de óleo lubrificante (maiores temperaturas levam a camadas mais finas de óleo e menores índices de solubilidade) (THOMPSON e WALLACE, 1992).

4. MÉTODOS DE CONTROLE E ATENUAÇÃO

Motores à combustão interna contribuem enormemente para a emissão de poluentes atmosféricos. Em números, os motores à ignição por centelha são responsáveis por 20% do volume total. Apesar de não ser a principal fonte de poluentes, ainda assim é um montante significativo no qual é necessário atuar. (SHER, 1998).

No que diz respeito ao CO₂, uma vez que sua quantidade emitida é diretamente ligada à quantidade de carbono presente na combustão, existem duas formas básicas de se aumentar a eficiência geral do veículo na redução da emissão deste poluente:

- a) aprimorar a eficiência do veículo em termos de consumo de combustível;
- b) mudar o combustível para outro que possua maior liberação de energia por átomo de carbono presente.

Algumas maneiras de melhorar a eficiência do veículo em termos de consumo são um melhor casamento entre

motor e transmissão, massa reduzida do veículo, menor resistência à rolagem, e arrasto aerodinâmico reduzido. (SHER, 1998).

Os métodos de controle de emissões podem ser classificados de diferentes maneiras, levando-se em conta características de design, fatores operacionais, tratamento do motor e tratamento dos gases de exaustão. (SHER, 1998).

Dentre as características de design, a mais simples de se alterar para reduzir as emissões é a taxa de compressão que, quando reduzida, diminui as emissões de HC não queimado. Além disso, reduz-se também as emissões de NO_x, enquanto a quantidade de CO aumenta. Acredita-se que este efeito seja obtido pelo fato de que uma menor taxa de compressão mantém os gases de exaustão a uma temperatura mais alta, ajudando a promover a oxidação de CO e HC não queimado na tubulação

de escapamento. Já a redução de NOx se dá pela diminuição da temperatura da câmara após a compressão que, por consequência, reduz a temperatura de pico durante o ciclo. Por outro lado, menores taxas de compressão reduzem a eficiência do sistema, havendo consequente aumento das emissões de CO2 pelo aumento da quantidade de combustível necessária para o funcionamento correto e equilibrado do sistema. (SHER, 1998).

Outra característica de design que pode ser alterada é o diâmetro do cilindro. Uma vez que a espessura das zonas de atenuação próximas às paredes do cilindro é função somente da temperatura e pressão dos gases e da temperatura das paredes, maiores diâmetros de cilindro proporcionam uma menor quantidade de área de atenuação em relação ao volume total da câmara de combustão. Desta forma, haverá redução do HC não queimado. Por outro lado, cilindros maiores estão associados com menores velocidades por razões puramente mecânicas o que aumenta as emissões de HC não queimados, uma vez que estas são menores quanto menor for a velocidade de operação do motor. Além disso, quanto maior o cilindro, maiores serão as emissões de NOx devido a maior proporção de gases que queimam a alta temperatura longe das paredes. (SHER, 1998).

O formato da câmara de combustão é outro fator geométrico que pode ser otimizado para emissões. Devido a possuir uma menor área de parede em relação ao volume total da câmara, o formato esférico é o ideal do ponto de vista das emissões, pois diminui a relação entre tamanho da zona de atenuação e volume total da câmara. Além disso, câmaras mais compactas são preferíveis, pois promovem maior taxa de queima do combustível, minimizando as zonas de atenuação e melhorando o nível de emissões de HC não queimado. Este mesmo raciocínio pode ser aplicado às fendas presentes na câmara de combustão, que devem ser reduzidas a um valor mínimo que não prejudique a integridade estrutural do sistema. (SHER, 1998).

Quanto ao tipo de sistema de injeção, a configuração multiponto é sempre preferível em relação à monoponto, uma vez que permite dedicar o sistema de admissão exclusivamente para a passagem do ar, diminuindo as perdas e melhorando a atomização do combustível. Uma melhor forma de injetar o combustível é a utilização de sistemas de injeção direta, no qual o combustível é injetado diretamente dentro da câmara de combustão. A principal vantagem está no fato de se

utilizar menores pressões e injetar o combustível o mais cedo possível no processo de compressão, permitindo maior tempo para evaporação e atomização da mistura. (SHER, 1998).

Já com relação aos parâmetros operacionais, é possível utilizar do artifício de uma queima pobre, ou seja, uma mistura com menos combustível do que o determinado pela estequiometria. Isto reduz o nível de HC não queimado, e proporciona baixo nível de CO. (SHER, 1998).

Em termos de avanço de ignição, para redução do nível de emissões pode-se atrasar o momento da ignição em relação ao ponto ótimo de funcionamento, o que aumenta a temperatura dos gases de exaustão, facilitando a oxidação de CO e HC não queimado na linha de escapamento. Além disso, um atraso na centelha faz com que a combustão ocorra com um volume de câmara maior do que o programado, o que reduz a proporção de zonas de atenuação e, por consequência, o nível de emissões. Por fim, um atraso na ignição propicia menores pressões de pico e temperatura no interior da câmara de combustão, e conseqüentemente se tem uma redução nos níveis de NOx emitidos. Como desvantagem, o atraso no ponto de ignição afasta o motor da condição ótima de funcionamento, reduzindo sua eficiência e aumentando o consumo de combustível. (SHER, 1998).

Devido às grandes pressões atuantes na câmara de combustão entre o fim da compressão e o processo de combustão em si, quantidades de HC não queimado e CO presentes nas fendas do pistão e seus arredores acaba escapando da câmara de combustão, em direção ao cárter do motor. Caso este excesso de gás não seja retirado, pode haver aumento excessivo da pressão no cárter, o que é indesejável. Porém, caso seja simplesmente extraído para fora do motor, este gás será despejado na atmosfera sob forma de emissões. Para solucionar esse problema, redireciona-se os gases do cárter até o coletor de admissão via pressão positiva por meio de uma tubulação e válvula. Os gases são, então, misturados ao ar admitido e reintroduzidos na câmara de combustão para completar a queima. Como vantagem, além de redução do nível de emissões, este sistema proporciona a recuperação de uma parcela do combustível que, de outra maneira, seria perdido para o ambiente. Devido à utilização da pressão positiva do coletor de admissão, este sistema é chamado de PCV (Positive Crankcase Ventilation). (SHER, 1998).

Um método comum para a diminuição da quantidade de NOx emitido pelo motor é a utilização de diluentes, com o objetivo de reduzir a temperatura de pico da combustão. Dois diluentes propostos são a água (injetada diretamente ou misturada ao combustível) e os gases de escapamento (sob forma de recirculação - Exhaust Gas Recirculation - EGR).

De acordo com Quader (1971), diversas outras substâncias podem ser usadas, porém o calor específico do diluente é a característica dominante na redução de NOx. Devido a sua alta disponibilidade, alta eficiência em redução de NOx e neutralidade em relação a outras emissões e à eficiência do motor, a recirculação dos gases de exaustão acaba sendo o método mais utilizado. O EGR é recuperado diretamente do sistema de exaustão via uma válvula e tubo ligados ao coletor de admissão, e controlado diretamente pela pressão no interior do coletor de admissão. (SHER, 1998).

Outra forma de controle são os reatores térmicos. Estes são sistemas que, por meio de alta temperatura e ambiente rico em O₂, finalizam a oxidação de CO e HC não queimados já na linha de escapamento. Uma vez que necessitam de um suprimento próprio e variável de O₂ (geralmente proporcionado por uma bomba de ar com aquecimento próprio) e uma temperatura de funcionamento constante (nem sempre possível em todas as condições de funcionamento do motor), seu uso nos dias de hoje se tornou inviável. Além disso, possui a desvantagem de forçar o motor a funcionar com misturas ricas e retardo no ponto de ignição (condição de grande ineficiência) e de não ser útil no controle de NOx. (SHER, 1998).

De maneira a solucionar os problemas dos reatores térmicos, foram introduzidos os conversores catalíticos. Estes funcionam em temperaturas menores, e não precisam afetar os parâmetros de funcionamento do motor para serem eficientes. Estes conversores se valem de materiais metálicos (Cobre, Cromo, Platina, Paládio, Ródio) adicionados à cerâmicas em formato de colmeia para conseguir este efeito. Os conversores catalíticos podem ser de oxidação (atuando sobre CO e HC não queimados), de redução (atuando sobre o NOx) ou de três vias, no qual todas as emissões são tratadas em uma única disposição de catalisador. Atualmente, o tipo mais utilizado é o de três vias, devido à comunização de componentes e eficiência no tratamento de emissões em geral. Porém, devido às diferentes necessidades

de riqueza de mistura para o tratamento das diferentes emissões (pobre para CO e HC, e rica para NOx), os catalizadores de três vias possuem uma janela ótima de funcionamento em termos de proporção ar-combustível, que varia de 0,5% mais pobre a 0,8% mais rica que a estquiometria para uma eficiência de 80% na conversão dos três tipos de emissões considerados. Nota-se, portanto, que a aplicação de catalizadores três vias demanda a utilização de sistema de injeção multiponto com retroalimentação via sonda de oxigênio, para uma rápida resposta em termos de relação ar-combustível, de maneira a manter a janela de riqueza necessária. (TRIMM, 1994).

Além disso, sistemas de conversão catalítica possuem uma temperatura ótima de funcionamento, o que implica na existência de um período de inércia térmica até atingir esta temperatura (chamada de light off e correspondente a uma eficiência de conversão da ordem de 50%). Isso implica que boa parte das emissões originadas desde a partida do motor até este atingir sua temperatura de regime não são convenientemente tratadas. Este problema pode ser solucionado de diversas maneiras, mas nenhuma delas é barata ou simples o bastante, sendo justificável apenas em casos extremos. Dentre as opções estão o aquecimento do conversor catalítico via efeito Joule, retenção dos HC não queimados no sistema de exaustão (que ganha em complexidade e custo de manufatura), ou o funcionamento do motor sem injeção de combustível com o objetivo de aquecer as peças do sistema sob atrito. (TRIMM, 1994).

O ajuste dos parâmetros de funcionamento do motor é crítico na determinação do nível de emissões. Neste ajuste, deve-se considerar dois cenários distintos: regime permanente e regime transiente. O controle de emissões em regime transiente é muito mais complexo do que em regime permanente, e por isso deve ser estudado com mais profundidade. (MILTON et al, 1993).

Regimes transientes são aplicados ao motor quando se necessita de uma resposta às mudanças de velocidade ou carga, e possuem tempos de aplicação inferiores a 20s, uma vez que acima disso são pouco distinguíveis com relação ao regime permanente. (MILTON et al, 1993).

Tanto para regime permanente quanto para regime transiente, os fatores a serem considerados são: pressão e temperatura na câmara de combustão após o

fechamento da válvula de admissão; a relação ar/combustível e sua distribuição; existência de turbulências na câmara (função da rotação e geometria do motor); presença de gases residuais (incluindo EGR); e ponto de ignição. Porém, na prática observa-se que as mudanças de velocidade do pistão de um ciclo para o outro são pequenas, mesmo quando se tem acelerações da ordem de 1000rpm/s. Isso significa que os fatores acima citados e relacionados com a rotação do motor (turbulência da mistura e resíduos de combustão por exemplo) são pouco influenciados pelos efeitos da aceleração ou desaceleração do sistema. Além disso, as condições de pressão e temperatura mudam de maneira sutil a partir do momento em que o processo de aceleração ou desaceleração se estabiliza (desde que a válvula borboleta permaneça em sua nova posição). Sendo assim, pode-se assumir que tais fatores predominantes na determinação da performance do motor podem ser analisados segundo um processo quasi-estático, sendo o regime transiente do motor analisado como uma série de ciclos quase-estáticos subsequentes. Desta forma, toma-se como principais parâmetros transientes a relação ar/combustível e sua distribuição na câmara de combustão, o sistema de EGR e o tempo de ignição, uma vez que estes fatores possuem um tempo de resposta considerável em relação à duração de cada ciclo. Além disso, sistemas de tratamento de gases também podem ser de grande importância. Estes parâmetros serão estudados a seguir. (MILTON et al, 1993).

Em motores à ignição por centelha, a resposta às demandas de aceleração/desaceleração acontecem por meio da abertura e fechamento da válvula borboleta. Estes movimentos alteram a vazão de ar admitida pelo sistema e, idealmente, deve haver uma alteração diretamente proporcional na quantidade de combustível adicionado à mistura para que a relação ar/combustível se mantenha dentro dos estritos parâmetros ideais de funcionamento. Porém, devido à natureza específica de cada um (ar em estado gasoso e combustível em estado líquido), esta proporcionalidade ideal dificilmente é atingida. O quão próximo do ideal será a resposta à mudança no fluxo de ar é determinado pelo tipo de sistema de injeção de combustível presente no motor. (MILTON et al, 1993).

O sistema de injeção que possui a pior resposta à mudança é o sistema carburado, atualmente em desuso, em que a injeção ocorre próximo à válvula borboleta. Tal característica se dá, primeiramente, pela baixa pressão de injeção de

combustível - 0,5 bar em carburadores e de até 3 bar em bicos injetores - o que prejudica a atomização do combustível no ar admitido. Isso favorece a aderência dos átomos de combustível às paredes do sistema de admissão, podendo chegar a quase 30% do fluxo de combustível admitido em misturas estequiométricas, ou até mais para misturas ricas. A partir do momento em que o combustível se deposita nas paredes do sistema sob a forma de um filme, ele pode evaporar novamente, ser carregado pelo fluxo de ar em forma de gotas, ou fluir ao longo da parede variando a espessura do filme. Em regime permanente, as quantidades de combustível que se depositam nas paredes são iguais às que deixam as paredes sob um destes três mecanismos. Porém, quando se abre (ou fecha) subitamente a válvula borboleta (regime transiente), a variação na pressão de entrada irá facilitar (ou dificultar) o depósito de combustível nas paredes, o que deixa mais pobre a mistura no momento em que chega à câmara de combustão mesmo se o sistema de injeção responder de maneira proporcional ao aumento de fluxo de ar de admissão. Desta forma, para manter correta a relação ar/combustível, o sistema deve enriquecer a mistura - o que irá aumentar ainda mais a deposição de combustível nas paredes. Uma vez que o regime permanente voltar a ser dominante, haverá uma quantidade excessiva de combustível entrando na câmara de combustão devido ao excesso de combustível no filme previamente depositado, e as emissões de poluentes irão aumentar devido a essa maior riqueza da mistura. Este problema pode ser minimizado através do aquecimento do coletor de admissão, que diminuirá a espessura do filme depositado. Porém, aquecer o sistema de admissão pode reduzir a performance do motor e aumentar a quantidade de emissões de NO_x, devido ao aquecimento do ar admitido. (MILTON et al, 1993).

Da situação acima pode-se concluir que quanto mais próximo do cilindro estiver a injeção de combustível, menor será o efeito do regime transiente sobre as emissões. E é nisso que se baseiam os sistemas multi-ponto, em que os bicos injetores são posicionados muito próximos às válvulas de admissão, havendo um ponto de injeção exclusivo para cada cilindro. Mesmo assim, ainda existe uma pequena parcela de depósito nas paredes próximas às válvulas de admissão, e nas válvulas em si, além de maior molhamento das paredes do cilindro. Sistemas multiponto possuem de 30% a 40% mais molhamento do que sistemas monoponto.

Uma solução parcial é sincronizar o tempo de injeção com o tempo de abertura de válvula, para que o depósito de combustível nas válvulas seja o menor possível, porém ainda assim o problema não é eliminado. Por fim, quanto maior a atomização e a homogeneidade da mistura ar/combustível menor será o nível de emissões obtido. (MILTON et al, 1993).

Em motores antigos, a utilização do distribuidor como o instrumento determinante do momento da centelha prejudicava muito o tempo de resposta do sistema de ignição. Desta forma, ocorriam com frequência centelhas fora do tempo ideal, prejudicando a performance do motor e aumentando o nível de emissões. No entanto, com o advento da eletrônica embarcada, atualmente o tempo de resposta do sistema passou a ser quase instantâneo, bastando um bom mapeamento do motor para que o tempo de ignição deixe de ser um fator preponderante para as emissões em regime transiente. (SHER, 1998)

Uma vez que os conversores catalíticos possuem uma janela ideal de funcionamento em termos de relação ar/combustível (geralmente próximo da estequiometria), estes componentes podem ser fortemente afetados pelos problemas de funcionamento transiente. Além disso, sistemas de EGR também podem ser afetados pelo regime transiente, devido ao tempo de resposta da válvula de recirculação de gases. Como se sabe, a aplicação de EGR reduz diretamente a emissão de NOx, devido a redução da temperatura da câmara de combustão. (TRIMM, 1994).

Durante a partida a frio, o regime transiente está diretamente associado à diferença entre a temperatura inicial e final do sistema, ou seja, entre a temperatura do ambiente durante a partida e a temperatura de funcionamento ideal, na qual o regime permanente é atingido. Um tempo aproximado para atingir o regime permanente pode ser considerado como sendo de oito minutos. (SHER, 1998).

Quando o motor está frio, a maioria dos componentes da gasolina ainda estão sob fase líquida, e não vaporizam durante a injeção. Desta forma, é necessário enriquecer fortemente a mistura para que o sistema funcione sem a ocorrência de problemas de combustão. Este excesso de combustível sai do sistema sob a forma de HC não queimados, prejudicando fortemente o nível de emissões. (SHER, 1998).

Um equilíbrio entre performance e quantidade de combustível é crucial nesta

etapa de funcionamento, para reduzir ao mínimo as emissões necessárias. Ainda, é importante que a concepção do motor seja tal que o sistema de admissão se aqueça rapidamente, bem como o sistema de refrigeração atinja sua temperatura ideal o mais rápido possível. (SHER, 1998).

5. CONCLUSÃO

No presente trabalho foi realizado um levantamento do estado da arte no que diz respeito às emissões de poluentes provenientes de motores de combustão interna, movidos à ignição por centelha. Conforme visto, a principal motivação deste trabalho foi de sumarizar os conhecimentos básicos necessários ao engenheiro que deseja trabalhar no desenvolvimento de motores de combustão interna mais adequados no aspecto da emissão de poluentes. Para tanto, foram traçados objetivos específicos, ligados diretamente a esta motivação.

O primeiro objetivo específico delineado foi determinar quais são os poluentes emitidos pelos motores de combustão movidos à ignição por centelha. Ainda, foi possível identificar quais poluentes afetam a qualidade do ar. Porém, nem todos estes poluentes são emitidos diretamente pelos motores. Conforme visto, os principais poluentes emitidos pelos motores são o dióxido de carbono, o monóxido de carbono, os óxidos de nitrogênio, e os hidrocarbonetos não queimados. Enquanto o primeiro é um produto natural da combustão completa, os outros são provenientes da combustão incompleta que acontece no funcionamento real do motor.

O segundo objetivo específico elencado foi o de determinar como se formam os poluentes nos motores à combustão. Conforme foi visto, cada tipo de poluente possui um mecanismo de formação particular. O CO₂ se forma como produto da combustão completa do combustível admitido no motor. Já o CO se forma como produto de uma combustão incompleta, cuja causa pode ser a falta de oxigênio para completar a reação (mistura muito rica), ou do pouco tempo disponível para a ocorrência da reação durante o ciclo do motor (o que impede a reação de se completar dentro da câmara de combustão). Por sua vez, os óxidos de nitrogênio são formados por mecanismos particulares, fortemente dependentes da temperatura da câmara durante a combustão - quanto mais alta a temperatura, maior será a taxa de

formação de NOx. Por fim, os hidrocarbonetos não queimados são oriundos de regiões da câmara de combustão que, por suas características geométricas ou perfis térmicos, dificultam a combustão das camadas de combustível adjacentes à sua superfície. Fendas apertadas, superfícies frias e até mesmo a adsorção do combustível pelo óleo lubrificante são exemplos destas fontes.

O terceiro objetivo específico estabelecido foi de verificar qual o impacto dos poluentes emitidos para a atmosfera. Como pode ser visto, estes impactos podem ser classificados em impactos ambientais, impactos à saúde humana e impactos econômicos.

Dentre os principais impactos ambientais, destacam-se a deterioração da camada de ozônio e a potencialização do efeito estufa. A alteração do equilíbrio, em ambos os casos, gera efeitos secundários como instabilidades climáticas, agravamento do aquecimento global e redução na capacidade de filtragem dos raios ultravioleta. Além disso, foi verificado que, em casos extremos, podem ocorrer os fenômenos da inversão térmica, chuvas ácidas e SMOG.

No que diz respeito aos impactos à saúde humana, foi visto que cada poluente provoca uma consequência no corpo humano. A Tabela 1 mostra um resumo destes impactos, separados individualmente para cada poluente.

Por fim, o quarto objetivo específico do trabalho foi de identificar as maneiras pelas quais se pode controlar as emissões em motores de combustão à ignição por centelha. Como pôde ser visto, os métodos de controle são os mais diversos, e envolvem desde alterações no sistema de injeção de combustível, até a geometria dos principais componentes do motor. É importante destacar o papel dos sistemas de conversão catalítica, instalados à jusante do coletor de exaustão e que contribui fortemente para que os motores atuais atinjam os níveis de emissões exigidos pelas diversas legislações ao redor do planeta.

Diante do exposto, nota-se que os conhecimentos a respeito das emissões oriundas de motores à combustão são bastante extensos, porém pouco difundidos. Desta forma, conclui-se que o presente trabalho cumpriu com seus principais objetivos, e seu conteúdo está fortemente alinhado com as motivações iniciais. A utilização deste material como ponto de partida para obtenção de conhecimentos mais específicos no tema será de grande valia para aqueles que estejam envolvidos

com o desenvolvimento das novas tecnologias necessárias para o cumprimento das legislações ambientais, cada vez mais restritivas no que diz respeito às emissões de poluentes para a atmosfera.

REFERÊNCIAS

- ADAMCZYK, A. **Hydrocarbon emissions from an annular crevice: effects of spark/insert position, equivalence ratio and pressure.** Combustion Science Technology, 1989.
- BOAM, D. et al, **The sources of unburnt hydrocarbon emissions from spark ignition engines during cold starts and warm-up.** Institution of Mechanical Engineers, 1994.
- BRASIL, “Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 18, de 6 de maio de 1986”, **Diário oficial da União.** Brasília, 1986. Dispõe sobre a criação do Programa de Controle de Poluição do Ar por veículos Automotores - PROCONVE.
- BRASIL, “Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 03, de 28 de junho de 1990”, **Diário Oficial da União.** Brasília, 1990. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR.
- CALIFORNIA AIR RESOURCES BOARD. “**History of air resources board**”, 2014. Disponível em: <<http://www.arb.ca.gov/knowzone/history.htm>>. Acesso em: 19 ago. 2014.
- CHENG, W. et al. “**An overview of hydrocarbon emissions mechanisms in spark ignition engines**”. SAE Papers, 1993.
- DOCKERY, D. W.; POPE, C. A. “**Acute respiratory effects of particulate air pollution.**” Boston, 1994.
- GOKLANY, I. “**Cleaning the air: the real story of the war on air pollution.**” Washington: Cato Institute, 1999.
- HOLANDA, R. “**Análise das emissões gasosas de um veículo flex funcionando com diferentes combustíveis.**” Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia do Petróleo) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.
- KAISER, E. et al. **The effect of oil layers on the hydrocarbon emissions generated during closed vessel combustion.** Pittsburgh, 1981.
- MILLER, J.; BOWMAN, C. “**Mechanism and modeling of nitrogen chemistry in combustion.**” Energy Combustion Science, 1989
- MILTON, B. et al. **An examination of transient fuel/air flows in manifolds.** New York: Begell House, 1993.
- RAINE, R. et al. “**Modeling of nitric oxide formation in spark ignition engine with a multizone burned gas.**” Combustion and Flame, 1995.
- SHER, E.; “**Handbook of air pollution from internal combustion engines.**” San Diego: Academic Press, 1998.

THOMPSON, N.; WALLACE, L. **Effect of engine operating variables and piston and ring parameters on crevice hydrocarbon emissions**. SAE papers, 1994.

TRIMM, D.; **Design of high temperature combustion catalysts**. International Workshop on Catalytic Combustion, 1994.

RESUMEN

Los combustibles fósiles son, desde períodos anteriores a la Revolución Industrial, la principal fuente de energía utilizada por la humanidad. Sin embargo, su uso trae impactos a la naturaleza ya la salud humana. Sabiendo que una de las principales fuentes de estos contaminantes son los automóviles, se están realizando esfuerzos desde los años 60 del siglo XX con el objetivo de limitar los impactos de la contaminación a través de la reducción de las emisiones de los vehículos. En los próximos años, la legislación brasileña relativa a las emisiones se ha vuelto más restrictiva, llevando la necesidad de nuevos desarrollos que permitan a los vehículos nacionales se encuadren en los nuevos requisitos, y con ello, la calificación de los ingenieros involucrados en estos trabajos. Aunque el tema de emisiones es bastante discutido, su conocimiento profundo no se difunde a gran escala. Además, por ser un tema bastante específico, la introducción de nuevos ingenieros al tema se vuelve bastante difícil y laboriosa. De esta forma, el presente trabajo propone la realización de un levantamiento del estado del arte en términos de emisiones de contaminantes por los motores a la ignición por chispa. El objetivo es identificar cuáles son los contaminantes emitidos por estos motores, como estos contaminantes se forman, cuál es el impacto de los mismos para la atmósfera y la salud humana, y cuáles son los métodos existentes para reducción y control de las emisiones. Estos objetivos se alcanzaron a través de la investigación y lectura de artículos pertinentes al tema, generando un material resumido que puede ser utilizado por nuevos ingenieros que necesitan o se interesan por el tema, pero aún no tienen suficiente profundidad en el mismo. Este artículo presenta un sistema desarrollado para control de pasajeros en autobuses del tipo carretero, fletamento o bus que necesiten un control de pasajeros no siendo posible la utilización de la catraca debido a la incomodidad o a las normas técnicas que regulan esas especificaciones y, vehículos de ese tipo.