

2 Revisão Bibliográfica

2.1. Emissões em Motores de Combustão Interna

As emissões em motores de combustão interna (MCI) de ciclo Otto (SI) e ciclo Diesel (CI) são diferentes. Segundo Harrington & McConnel (2003), para os motores SI, os poluentes de maior preocupação são o monóxido de carbono (CO), compostos orgânicos voláteis e o óxido de nitrogênio (NO_x). No caso dos motores CI, as emissões de CO são baixas, mas as emissões de NO_x e partículas (MP) são elevadas.

O monóxido de carbono é resultado da combustão incompleta, ele é altamente tóxico, sem cor, sem odor, não tem gosto e é não irritante (Humberto, 2004). Ele é obtido a partir da queima incompleta dos combustíveis fósseis que contém carbono, é dizer quando o motor é operado e não há suficiente oxigênio para converter todo o carbono para CO₂, parte do combustível é queimado e a outra parte acaba em CO (Carranza, 2001).

Segundo Humberto (2004) os óxidos de nitrogênio (NO_x) formados durante os processos de combustão são constituídos de aproximadamente 95% de óxido nítrico (NO) e o restante de dióxido de nitrogênio (NO₂). As emissões de NO_x têm a sua formação regulada principalmente pelas altas concentrações de oxigênio e as altas temperaturas no interior da câmara de combustão (Heywood, 1988).

Os hidrocarbonetos (HC) são combustíveis não queimados, conhecidos como frações do combustível que não foram oxidadas. Eles são uma mistura de compostos produzidos pela falta de oxigênio no processo de combustão, formando a neblina fotogênica (Pulkrabek, 2003).

A formação de material particulado (MP) ocorre principalmente na combustão de combustíveis líquidos e sólidos (Humberto, 2004). É um conjunto de poluentes constituídos por poeira, fumaça e todo tipo de material sólido e líquido que se mantém suspenso na atmosfera por causa de seu pequeno tamanho

(Pulkrabek, 2003). O material particulado em veículos automotores resulta da combustão das frações mais complexas de hidrocarbonetos em condições de insuficiência de oxigênio e de tempo insuficiente para uma queima adequada (Dondero, 2002).

O dióxido de enxofre (SO₂) é um gás incolor, tóxico que é obtido da combustão de qualquer combustível de origem fóssil que contenha enxofre, especialmente o petróleo e derivados (Carranza, 2001). A concentração resultante de SO₂ está uma função da porcentagem de enxofre contida no combustível e da razão ar-combustível. Uma parcela do SO₂ produzido na câmara pode ser oxidada a SO₃, dependendo das condições de temperatura e ar. A oxidação do SO₂ também ocorre na atmosfera e é ativada pelos raios ultravioletas do sol (Humberto, 2004).

2.2.

Efeitos das emissões no ambiente e na saúde humana

Na Tabela 1 apresentamos os impactos dos poluentes na saúde humana e no meio ambiente.

Tabela 1. Principais impactos dos gases de combustão

Poluentes	Saúde Humana	Meio Ambiente
Monóxido de Carbono (CO)	Interfere no sistema respiratório. Pode produzir danos ao coração e cérebro, leva mudanças nas funções cardíacas e pulmonares, fadiga e morte em altas exposições.	Tóxico para os animais, mas não assim para as plantas, devido que o CO se oxida para CO ₂ e é utilizado para a fotossíntese das plantas, efeito estufa
Oxido de Nitrogênio (NO _x)	Irritação do trato respiratório. Em altas concentrações pode causar a morte.	Ao reagir na atmosfera com outras substâncias leva à formação do ácido nítrico (chuva ácida).
Hidrocarbonetos (HC)	São irritantes para as mucosas e olhos. Causa dor de cabeça, vertigem, depressão, náuseas, vômito, fadiga, fraqueza, diarreia.	Tem comportamentos diferentes no ambiente, mas seu impacto está relacionado à geração de dióxido de carbono (efeito estufa)
Material Particulado (MP)	Efeito na respiração e visão, alteração no sistema imunológico, dano ao tecido pulmonar, toxicidade sistêmica, estresse de coração.	Altera os níveis de visibilidade, tem efeitos nos ecossistemas (fertilização, acidificação, etc.) e degrada matérias de construção.
Dióxido de Enxofre (SO ₂)	Irritação às vias nazais e aos olhos, provoca agravamento de doenças respiratórias e cardiovasculares já existentes.	Quando se oxida em diferentes meios e reage com a umidade do ambiente pode produzir partículas de ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄).

Fonte: (Arellano, 2002; Carranza, 2001; Glynn & Heinke, 1999)

2.3. Características Gerais da Tecnologia HCCI

HCCI é o acrônimo em inglês de “Homogeneous Charge Compression Ignition”, sendo em português “Ignição por Compressão de uma Carga Homogênea”. Os motores HCCI são caracterizados porque o ar e o combustível são misturados fora da câmara de combustão e a mistura resultante consegue a ignição espontânea no final da fase de compressão do motor. Por tanto a combustão HCCI é similar ao SI (Spark Ignition) no sentido que ambas as tecnologias usam uma carga misturada e similar ao CI (Compression Ignition) em que utilizam a auto-ignição para iniciar a combustão (Yao et al, 2009).

Este tipo de motor não tem um iniciador de combustão, como a faísca no caso dos motores SI ou de um injetor no caso dos motores CI. O processo de ignição é atingido mediante o controle da concentração da mistura e do ambiente térmico no interior do cilindro (temperatura da mistura e da parede do motor). Por tanto o controle de estes parâmetros pode permitir o início do processo de ignição num momento desejado. (U.S. Department of Energy, 2001). Existem diferenças entre os motores SI e CI em comparação ao motor HCCI apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Diferença entre as tecnologias de motores. Ribeiro (2001)

	Motor Gasolina (injeção indireta)	Motor Gasolina (injeção direta)	Motor Diesel	Motor HCCI
Formação da mistura	Tubo de admissão	Câmara de combustão	Câmara de combustão ou pré-câmara	Tubo de admissão
Distribuição da mistura	Homogênea	Heterogênea estratificada	Heterogênea estratificada	Homogênea
Proporção da mistura	Estequiométrica ($\lambda = 1$)	Pobre ou muito pobre	Muito pobre	Muito pobre ($\lambda = 2-4$)
Regulação da carga	Borboleta aceleradora	Maior ou menor quantidade de combustível	Maior ou menor quantidade de combustível	Maior ou menor quantidade de combustível
Tipo de ignição	Centelha	Centelha	Auto-inflamação	Auto-inflamação
Pressão de injeção	Baixa	Alta	Muito alta	Baixa
Relação de compressão	Entre 8 e 12 a 1	Entre 10 e 13 a 1	Entre 17 e 23 a 1	Entre 20 e 30 a 1

O HCCI é considerado como um processo de combustão alternativo em motores de combustão interna podendo fornecer altas eficiências como os motores ciclo Diesel com a diferença de produzir ultrabaixas emissões de NO_x e MP, basicamente pelo fato que a mistura é homogênea e pobre (redução de MP) e que não apresenta propagação de frente de chama (redução de NO_x).

2.3.1. Vantagens da Tecnologia HCCI

Em relação aos motores SI, os motores HCCI são mais eficientes, tendo uma eficiência próxima dos motores CI. Esta melhoria nos resultados de eficiência vem de três fontes: eliminação das perdas de estrangulamento, utilização de altas razões de compressão e uma menor duração da combustão. Também os motores HCCI têm baixas emissões de NO_x .

Em relação aos motores CI, os motores HCCI têm emissões mais baixas de PM e NO_x . A duração da combustão HCCI é muito menor que nos motores CI, já que não é limitada pela taxa da mistura ar-combustível, então esta curta duração dá ao motor HCCI uma vantagem de eficiência. Finalmente os motores HCCI podem ser de baixo custo comparado ao motor CI porque eles provavelmente vão utilizar equipamento de injeção de combustível de baixa pressão.

A operação HCCI tem sido mostrada com uma vasta gama de combustíveis, onde a gasolina é particularmente bem adaptada para operação HCCI. (Johansson, 2007).

HCCI é potencialmente aplicável para motores de automóveis e caminhões. Também é aplicável para motores utilizados fora do setor de transportes tais como aqueles usados para a geração de energia elétrica em bombeamento (U.S. Department of Energy, 2001).

2.4. Fundamentos da Combustão

Na Figura 1 são apresentados os processos de combustão dos motores de ciclo SI, CI e do HCCI. A combustão em um motor ciclo Otto (Fig. 1-a) acontece quando a vela de ignição produz uma faísca no interior da câmara de combustão queimando a mistura de ar-combustível, a mistura homogênea é feita fora da

câmara. Este tipo de combustão se propaga num frente de chama para o resto da câmara apresentando uma divisão em três regiões ou zonas: (i) A zona queimada é a área localizada atrás do frente de chama e contém os produtos da reação. (ii) A zona não queimada é a área localizada na parte frontal do frente de chama. Contém a mistura que ainda não foi queimada. (iii) A zona de Frente de Chama, também denominada zona fina de reação, se propaga através da câmara de combustão quando a faísca inicia a ignição. Apesar de que as reações são muito rápidas nesta zona, o processo de combustão toma tempo já que a zona se propaga desde a vela até as paredes do cilindro (propagação de frente de chama).

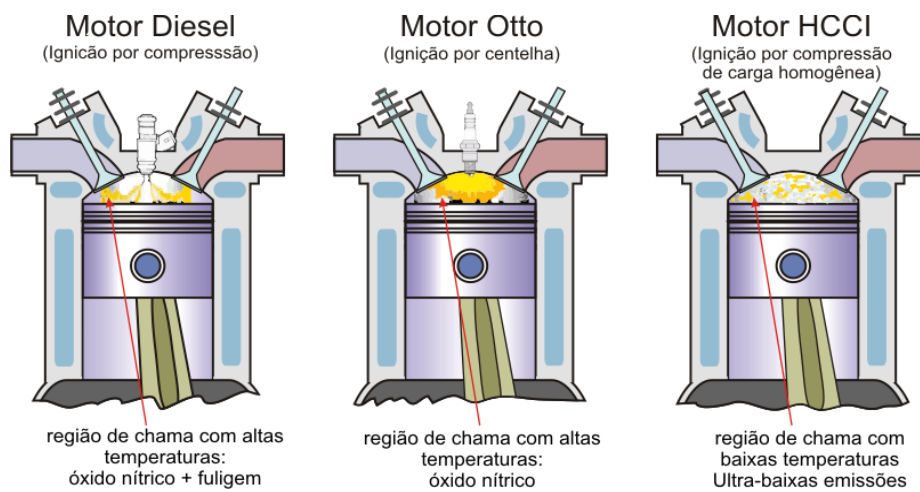


Figura 1. Tipos de Combustão. (a) CI (Diesel); (b) SI (Gasolina); (c) HCCI

No motor de ciclo Diesel (Fig. 1-b) é um processo heterogêneo temporal, inicialmente só entra ar na câmara de combustão, depois o combustível é injetado perto do PMS sendo desintegrado em pequenas gotículas que logo mudam para a fase gasosa (vapor) onde finalmente elas se misturam com o ar alcançando as condições corretas de pressão e temperatura permitindo dar início á ignição. Este tipo de combustão apresenta zonas onde a mistura é muito rica (excesso de combustível), por tanto apresenta uma alta temperatura de combustão que provoca a associação do oxigênio com o nitrogênio do ar, resultando em altas emissões de NO_x . Por outro lado, fuligem e os hidrocarbonetos também se formam nestas zonas constituindo outra fonte de emissões.

No motor HCCI (Fig. 1-c) a carga ar-combustível é misturada homogeneamente fora de câmara de combustão e em baixa pressão. Uma característica importante desta forma de combustão é que a auto-ignição não

acontece em um ponto localizado e sim de forma simultânea em toda a câmara de combustão. Conseqüentemente não apresenta propagação de frente de chama como no ciclo Otto (Zhao, 2007). Como a auto-ignição ocorre em vários pontos na câmara, pode causar altas taxas de liberação de calor e, por conseguinte, altos níveis de pressão (Alkidas, 2007). Outra característica é que a combustão HCCI é denominada pelas velocidades de reação da cinética química local. Pequenas diferenças de temperatura dentro do cilindro têm um efeito considerável sobre a combustão devido à sensibilidade da cinética química (U.S. Department of Energy, 2001). Também a combustão HCCI é significativamente influenciada pela duração total da combustão, limitando a faixa de carga onde a operação HCCI é estável e possível. Uma rápida liberação de calor da origem a uma violenta combustão detonante. Por outro lado, um tempo de combustão muito longo provoca uma combustão incompleta ou falha, devido à diminuição da temperatura da mistura na fase de expansão (Chialva, 2006). As características da liberação de calor HCCI podem ser comparadas com os processos de combustão SI e CI (Figura 2).

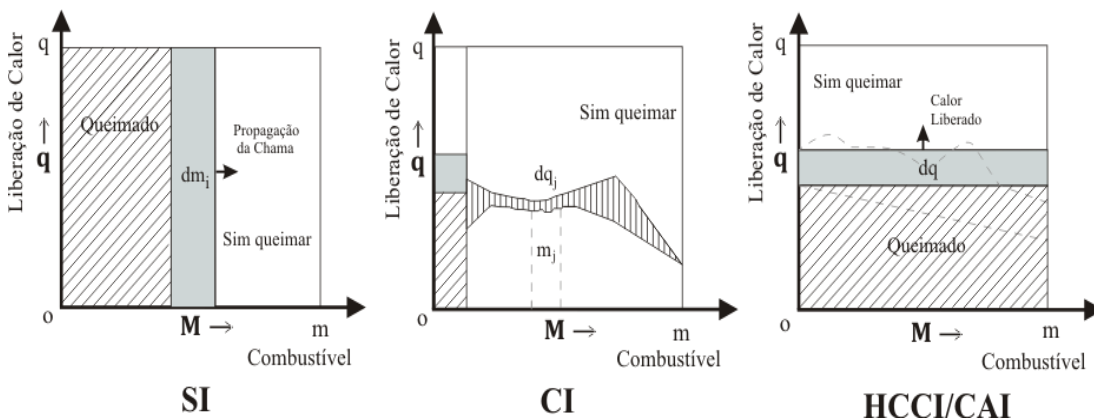


Figura 2. Processo de Combustão: (a) SI; (b) CI; (c) HCCI. Zhao (2007).

Na combustão SI (Fig. 2-a) observa-se uma zona de reação fina onde a química ocorre separando a carga do cilindro em uma região queimada e não queimada. Portanto, a liberação de calor é limitada por esta zona que se propaga através da câmara de combustão e apresenta uma propagação da chama (Johansson, 2007).

A quantidade de calor liberado num motor SI é a somatória do calor liberado por certa massa “dm_i” e, pode ser expressa em função da seguinte equação.

$$Q = \int_1^m q \cdot dm_i \quad (2.1)$$

Onde “q” é o calor por unidade de massa da mistura ar-combustível e “m” é o número de zonas de reação.

A combustão CI (Fig. 2-b) inicia quando com a injeção do combustível, uma pequena quantidade é arrastada para o processo de combustão. A quantidade de calor liberado pode ser expressa como a soma de dois processos. A primeira parte representa a fase da pré-mistura queimada e a segunda parte é a difusão, onde o valor do calor de cada mistura varia em função da mistura local.

$$Q = \int_1^m m_p \cdot dq_i + \int_1^q m_j \cdot dq_j \quad (2.2)$$

Na equação (2.2) “m_p” é a quantidade da mistura que participa na fase de queima, “m_j” e “dq_j” são os valores de massa e calor.

No processo de combustão HCCI idealizado (Fig. 2-c), a combustão tem lugar em todo o cilindro e a massa completa participa do processo de liberação de calor. A quantidade de calor liberado é expressa como a somatória do calor liberado de cada reação de combustão “dq_i” da mistura completa (m), onde “q” é o número total de reações que liberam calor. O calor será liberado uniformemente em tempo finito, mas na prática não acontece isso devido a que não se tem uma mistura completamente homogênea nem uma distribuição de temperatura homogênea, resultando em um processo não uniforme como se mostra na Figura 2 através das linhas pontilhadas.

$$Q = \int_1^q m \cdot dq_i \quad (2.3)$$

2.5. Operação HCCI

Devido que a combustão HCCI é determinada pela cinética química, qualquer variável que tenha um impacto nas condições de operação terá um impacto direto sobre a combustão (Zhao, 2007).

A combustão HCCI é limitada para trabalhar a rotações e cargas parciais. Em carga baixa, por causa da baixa temperatura do gás, o motor experimenta dificuldades na ignição e redução da eficiência de combustão. Em carga alta o

motor tem dificuldade em controlar a auto-ignição, resultando em aumento da pressão que causa maior ruído, detonação e possível dano ao motor (Alkidas, 2007) .

2.5.1. Limites de Operação

Os dois principais critérios para a definição dos limites são a estabilidade da combustão e a detonação do motor. Quando a combustão torna-se instável ou quando a detonação torna-se inaceitável, a operação não é mais viável (Andreae, 2006).

O critério que define o limite de carga baixa é a falha de ignição. O controle da carga é realizado pelo ajuste do sistema de alimentação, mantendo constante a relação ar-combustível. Outro critério é a estabilidade da combustão, como a carga é reduzida, a combustão torna-se menos estável levando á falha de ignição, mas em muitos casos a combustão pode ser mantida antes da falha.

O critério que define o limite de carga alta é a detonação do motor. A fim de aumentar a carga, a quantidade de combustível dentro do cilindro deve ser incrementada. Com o aumento da carga, a temperatura de combustão incrementa-se. Altas temperaturas de combustão e altas concentrações levam a maiores taxas de reação ocasionando que a pressão não se iguale dentro do cilindro e as ondas de pressão começam a aparecer no interior provocando ruído e danos no motor.

2.5.2. Parâmetros de Controle

Desde que a combustão HCCI é determinada pela cinética química, métodos de controle direto para o início da ignição são difíceis. No entanto há uma série de métodos indiretos que tem o potencial de controlar a auto-ignição e a taxa de liberação de calor da combustão HCCI (Zhao et al, 2003).

Segundo Chialva (2006), estes métodos de controle indireto geralmente podem ser divididos em duas categorias: modificando as propriedades da mistura ar-combustível e modificando o funcionamento do motor e parâmetros de desenho (controle).

A elevada temperatura da mistura de admissão (ar-combustível) ocasiona uma alta taxa de liberação de calor, melhora o início da ignição e reduz o atraso de ignição (Chialva, 2006; Zhao et al, 2003). Também permite um avanço da combustão, mas o intervalo controlável é limitado. Outra característica é a redução da eficiência térmica e volumétrica, já que se a ignição avança na fase de compressão, vai ocasionar um impacto negativo sobre o trabalho do pistão. A concentração da mistura (relação ar-combustível) tem um efeito direto na ignição e na taxa de liberação de calor da combustão. A reatividade do combustível para a auto-ignição é influenciada pela sua composição, tamanho e estrutura molecular. Acondicionamentos prévios ou misturas de diferente combustíveis podem melhorar a combustão sendo a operação HCCI mais viável (Chialva, 2006).

Uma elevada razão de compressão (RC) pode incrementar a temperatura da carga durante a fase de compressão adiantando o início da ignição, podendo obter altas eficiências térmicas. Entretanto, o problema da detonação pode apresentar elevadas RC e são utilizadas particularmente com combustíveis de baixo número de octanagem e a altas cargas (Zhao et al, 2003).

O atraso da ignição depende em grande parte do rendimento das misturas e é relativamente independente da rotação do motor (Chialva, 2006). Não obstante, a rotação tem um impacto na faixa de operação HCCI, porque o motor apresenta uma redução do tempo disponível para a combustão, transferência de calor, troca de gases e outros processo que afetam a operação. A combustão acontecerá muito rápida com o incremento da rotação, requerendo um aumento da temperatura no cilindro para garantir a combustão no ponto desejado (Andreae, 2006).

Uma forma para controlar a combustão HCCI é através da injeção direta permitindo manter constante a temperatura de ar de admissão e o uso da estratificação (Zhao et al, 2003).

2.5.3. Características do Combustível

O combustível é um importante aspecto na operação HCCI (Zhao et al, 2003), suas propriedades vão definir as características da auto-ignição, o desenvolvimento da combustão e a faixa de operação.

O processo de combustão HCCI pode aceitar uma variedade de tipos de combustíveis. A escolha do combustível terá um impacto significativo no desenho do motor onde a volatilidade e as características de auto-ignição do combustível são importantes. (Yao, 2009).

O número de octanagem é o parâmetro definido como a medida da resistência do combustível à auto-ignição (Prakash, 1998; Zuehl, 2009). O número de octanagem se obtém de dois índices: o RON (Research Octane Number) e o MON (Motor Octane Number). De esta forma é considerado que RON e MON são medidas de auto-ignição de um combustível, podendo descrever o processo de auto-ignição tais como a combustão HCCI (Zuehl, 2009).

A composição do combustível pode variar de estação para estação e de região para região. A fonte de petróleo e o processo de refino podem variar a composição, por conseguinte as características do processo de combustão e as reações de oxidação serão distintas para cada tipo de combustível (Andreae, 2006). Desde a perspectiva da combustão HCCI, as diferenças que realmente importam são as características da combustão global (fase de combustão e duração) que controlam o tempo da reação principal e a taxa de reação. (Yao, 2009).

2.5.4. Falha na Ignição HCCI

As propriedades do combustível e as condições de operação do motor afetam os limites da operação HCCI. Estudar este fenômeno de forma experimental é complexo devido às poucas condições no cilindro que podem ser medidas exatamente (volume e pressão, principalmente). Um modelo de simulação numérica permite ter melhores aproximações (Zuehl, 2009).

Uma alta temperatura inicial é requerida para manter a combustão em múltiplos ciclos considerando as flutuações de ciclo a ciclo. Pequenas diferenças de temperatura e a falha de ignição são relacionadas como a falha HCCI já que apresenta insuficiente energia térmica para manter a auto-ignição nos próximos ciclos.

Os motores operam em várias rotações e com uma vasta gama de combustíveis. Portanto, avaliar o impacto da rotação do motor, da temperatura no limite de falha é importante (Zuehl, 2009).

2.6. Desafios da Tecnologia HCCI

A combustão HCCI é lograda controlando a temperatura, pressão e composição da mistura ar-combustível. Portanto, este modo de ignição é mais desafiador do que usar um mecanismo de controle direto como uma vela ou injetor de combustível para iniciar a ignição como acontece nos motores SI e CI, respectivamente.

A tecnologia HCCI é desenvolvida faz vinte anos. Somente agora com os recentes avanços em controles eletrônicos é que a combustão HCCI pode ser considerada para protótipos. Mesmo assim, dificuldades técnicas devem ser superadas antes que os motores HCCI sejam viáveis para a produção industrial (U.S. Department of Energy, 2001). A continuação se descreve os desafios mais significantes para o desenvolvimento do motor HCCI.

2.6.1. Controle da ignição em diferentes rotações e cargas

Um dos principais desafios da combustão HCCI é o controle da fase de ignição e, portanto da fase de combustão. Ao contrario da combustão convencional (SI ou CI), não se tem disponível um método direto para controlar o início da combustão (Yao et al., 2009). A ignição HCCI é determinada pela composição da carga e o histórico da temperatura e pressão. Qualquer variação na potência de saída requer uma mudança na taxa de alimentação e na carga. Como resultado, a temperatura precisa ser ajustada para manter a adequada combustão. Da mesma forma, mudando a rotação do motor, muda a quantidade de tempo para a química de auto-ignição e a temperatura da mistura novamente deve ser ajustada para compensar o sistema. (U.S. Department of Energy, 2001).

2.6.2.

Operação para cargas elevadas

Embora os motores HCCI funcionem bem em médias cargas, a operação HCCI em altas cargas, é provavelmente o obstáculo mais difícil de superar. A combustão pode ser muito rápida e intensa, ocasionando inaceitável ruído, potencial de dano ao motor, e eventualmente níveis de emissões de NO_x elevados. A operação pode ser ampliada pela estratificação da carga a cargas elevadas com estudos que envolvem o uso dos tradicionais modos de combustão (SI ou CI) para aquelas condições onde a operação HCCI é mais difícil.

2.6.3.

Partida em frio

Na partida em frio, a temperatura do gás comprimido em um motor HCCI será reduzida porque a carga comprimida é rapidamente resfriada pelo calor transferido para as paredes frias da câmara de combustão. Para superar essa dificuldade, o motor deverá ser iniciado em um modo convencional de combustão (SI ou CI) e depois mudar para o modo HCCI após um curto período de aquecimento (Yao et al., 2009; U.S. Department of Energy, 2001)

2.6.4.

Ruído, vibração e emissões de HC e CO

Um desafio importante na operação HCCI é o aumento potencial do ruído, a vibração e das emissões de CO e HC. A temperatura do gás queimado é muito baixa para consumir a maior parte do combustível não queimado, resultando em um significativo incremento das emissões de HC e CO. Além disso, o pico da temperatura do gás queimado é baixo para completar a oxidação do CO para CO₂ e a eficiência da combustão deteriora-se vertiginosamente (Yao et al., 2009).

Existem métodos para mitigar essas emissões, no entanto, na maioria dos casos, as emissões de HC e CO dos motores HCCI precisará de dispositivos de controle de emissões de escape (U.S. Department of Energy, 2001).

2.6.5. Preparação da mistura homogênea

Uma preparação eficaz da mistura ar/combustível é crucial para alcançar uma alta eficiência na queima do combustível, reduzindo assim as emissões de HC e CO.

A homogeneidade da mistura afeta a auto-ignição que controlam a fase da combustão HCCI e não há evidência significativa de que baixas emissões de NO_x podem ser devidas à homogeneidade na mistura dentro da câmara (Yao et al., 2009).