2.
Revisão bibliográfica

A utilização de dois combustíveis no modo Dual Fuel leva em conta a interação de várias condições importantes dentro dos estudos dos motores ICO, mas estas condições possuem uma série de princípios teóricos e características dos processos de combustão que devem ser avaliados, de forma independente, para depois estabelecer seus efeitos combinados.

Os principais conceitos levados em conta nesta revisão bibliográfica são:

- ✓ Mapa Razão de Equivalência – Temperatura (ϕ - T);
- ✓ Novos modos de combustão em motores ICO;
- ✓ Estratégias de injeção Dual Fuel.

Existe uma grande relação entre os processos de reação química que acontecem durante a combustão, mas que, neste trabalho não foram considerados isoladamente por estar fora do foco desta pesquisa.

2.1.
Mapa Razão de Equivalência – Temperatura (ϕ-T)

No processo de combustão em motores ICO, a razão de equivalência (ϕ)[1] e as temperaturas dos gases queimados, têm uma grande importância na formação de poluentes (Amorim, 2010). A formação de NO_X se produz em regiões de alta temperatura de combustão e sua formação chega a ser maior nas regiões próximas à região estequiométrica (Muñoz, 2013). Por sua vez, a formação de material particulado ocorre em uma faixa de temperatura entre 1600K e 2800K, exatamente nas temperaturas nas quais a emissão de NO_X é reduzida (Suh, 2011).

Kamitomo et al., (1988) apresentaram, pela primeira vez, uma

[1] $$\Phi = \frac{\left(C/A\right)_r}{\left(C/A\right)_e}$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

representação gráfica da formação de poluentes. No caso de MP e NO_X através de um diagrama ϕ-T, como mostrado na figura 8. O grupo de Kamitomo mostra a região onde se produziria o material particulado proveniente da combustão e as regiões onde não se formaria ou se oxidaria completamente. De igual forma, mostra a região de formação de NO_X e sugere o caminho com altas temperaturas durante a combustão na qual não haveria emissão destes poluentes (na figura 6 chamado de “desirable path”). Neste caminho, a combustão passaria entre as regiões de formação de MP e NO_X, mas sem tocá-las, com o objetivo de evitar sua formação durante a combustão.

Vale ressaltar que este mapa é limitado ao modelo pesquisado e a razão de equivalência, ϕ, não era maior que quatro.

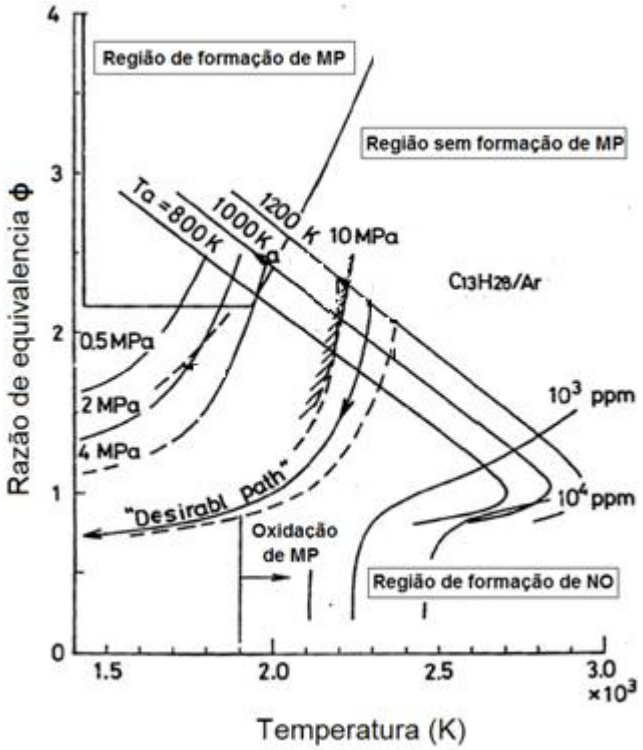


Figura 6 - Primeira representação gráfica do mapa ϕ - T, modificado de Kamimoto et al., (1988).

Akihama et al., (2001), em seus estudos sobre o mecanismo da combustão sem fumaça, aprofundaram o mapa de Kamitomo et al., (1988). O novo mapa apresentado foi calculado com um tempo de reação de 1ms, pressão constante igual a 6 MPa e sem o uso do sistema EGR, utilizando n-Heptano como combustível base para os cálculos.

Ao contrário do grupo de Kamitomo, o grupo de Akihama utilizou o modelo de combustão de baixa temperatura de chama que evitaria a formação de

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

precursores de fumaça e, suficientemente baixa para que não exista formação de NO_X.

Na figura 7 aparece o mapa ϕ-T desenvolvido por Akihama et al., (2001) baseado no trabalho de Kamitomo et al., (1988).

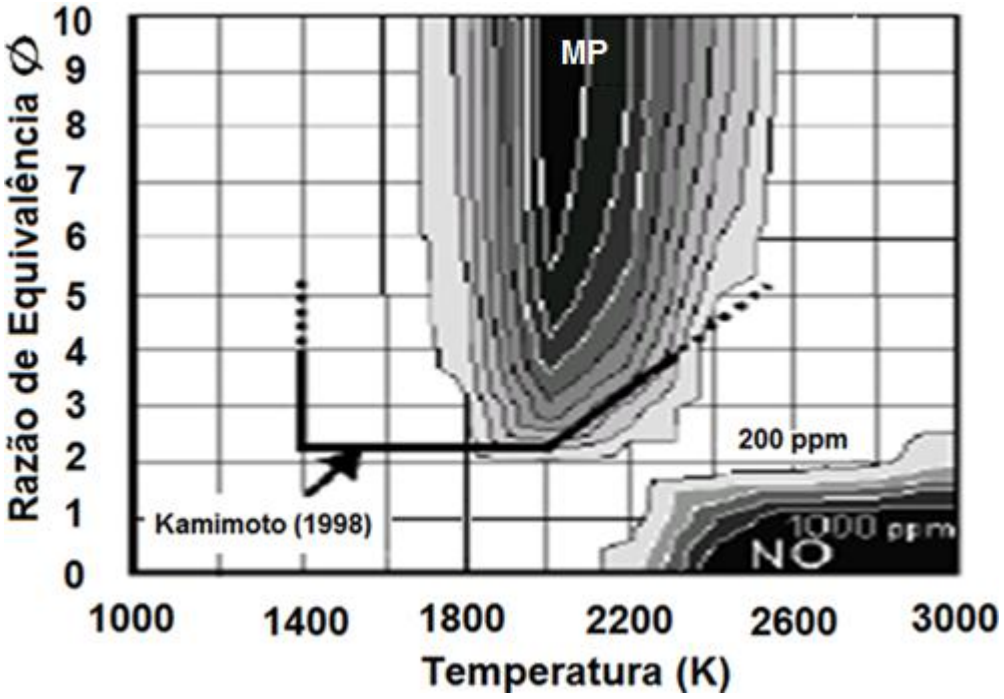


Figura 7 - Mapa (ϕ - T) pressão constante de 6 MPa e tempo de reação de 1 ms. Akihama et al., (2001)

Kook et al., (2005) apresentam um mapa ϕ-T, onde são mostradas também as regiões de formação de MP e NO_X (figura 8). Este mapa foi desenvolvido em concordância como os resultados numéricos obtidos por Kitamura et al., (2002). De igual forma, representou a fronteira que regula a oxidação do CO (em azul) em função dos mesmos parâmetros demostrados por Adomeit et al., (2004).

À direita desta fronteira, a cinética química da oxidação do CO acontece de forma muito rápida e atinge o estado de equilíbrio quase imediatamente, enquanto que, do lado esquerdo, a oxidação do monóxido de carbono acontece muito lentamente, elevando consideravelmente a concentração do monóxido de carbono no escapamento.

Outra contribuição do mesmo grupo de pesquisa destacada no mapa é a região de oxidação de material particulado, que tende a diminuir de intensidade quando menores são as temperaturas ou menor é a razão de equivalência (figura 8).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

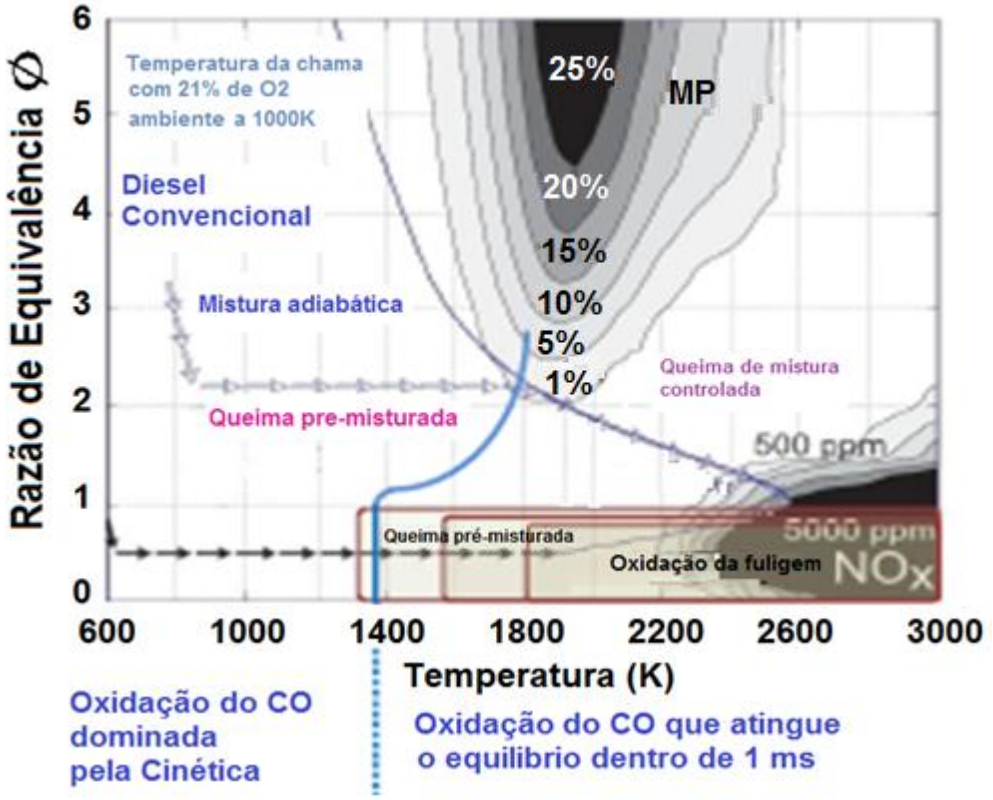


Figura 8 - Mapa (ϕ-T) com tempo de reação 2ms representando regiões de formação de MP e NO_X, Adomeit et al., (2004) e.Kook et al., (2005)

Outro potencial problema, que acontece uma vez que os poluentes são reduzidos pela diminuição da temperatura de combustão, é o incremento das emissões de monóxido de carbono (CO) e dos hidrocarbonetos não queimados (HC). Estes podem ser originados tanto por misturas ricas quanto pobres e são altamente dependentes da temperatura, como se pode observar nas figuras 9 e 10.

Para condições pobres, altas temperaturas permitem a oxidação completa tanto de CO quanto de HC. Em temperaturas intermediárias, CO e HC poderiam estar presentes na exaustão ou só os HC. Se a temperatura é muito baixa o combustível não queima.

Em condições ricas, elevadas temperaturas podem resultar em oxidação parcial de HC em CO, diminuindo a saída de HC e aumentando a de CO fazendo com que ambos estejam presentes a baixas temperaturas de combustão.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

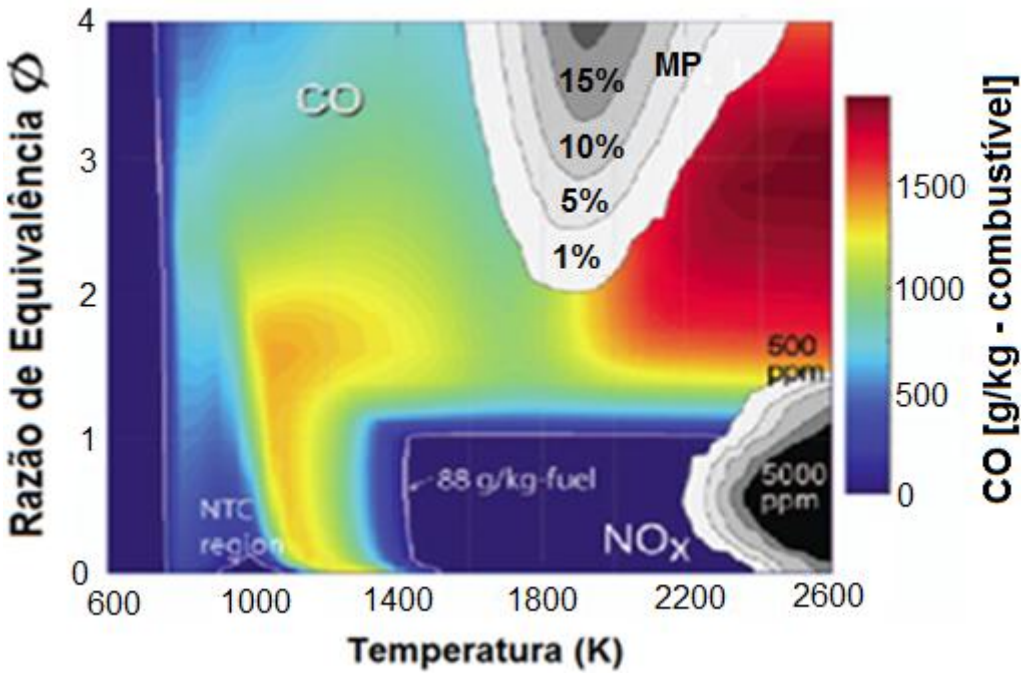


Figura 9 - Monóxido de Carbono (CO) como uma função da temperatura e a razão de equivalência (Lewander, 2011)

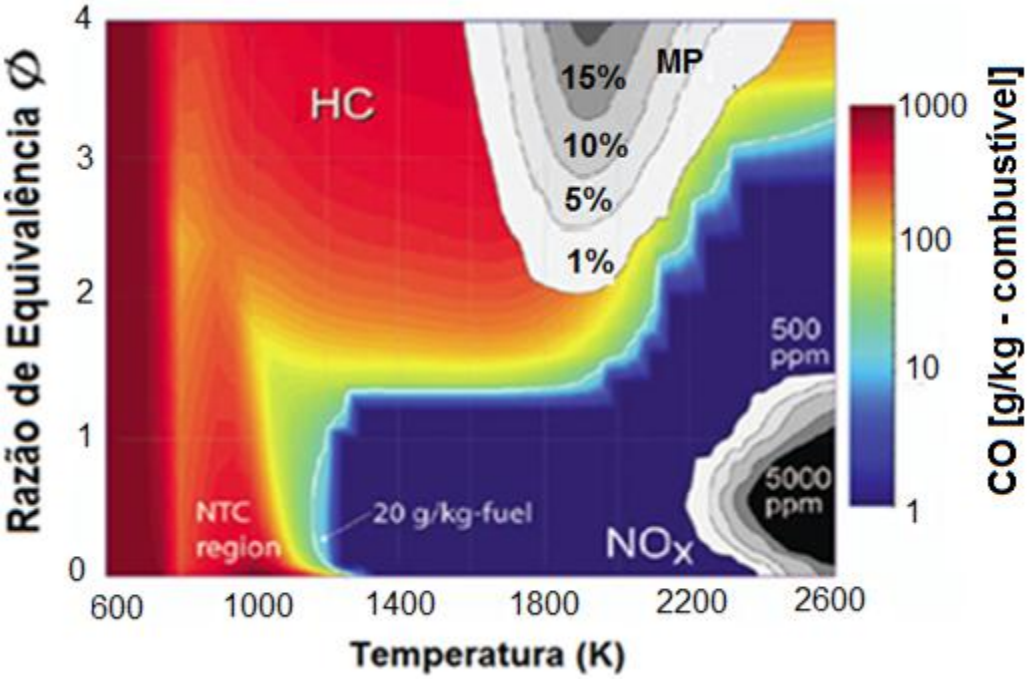


Figura 10 - Hidrocarbonetos não queimados (HC) como uma função da temperatura e a razão de equivalência (Lewander, 2011)

Estas variantes mostram uma região bastante interessante de produzir a combustão, de forma eficiente e limpa, como é representado na figura 11.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

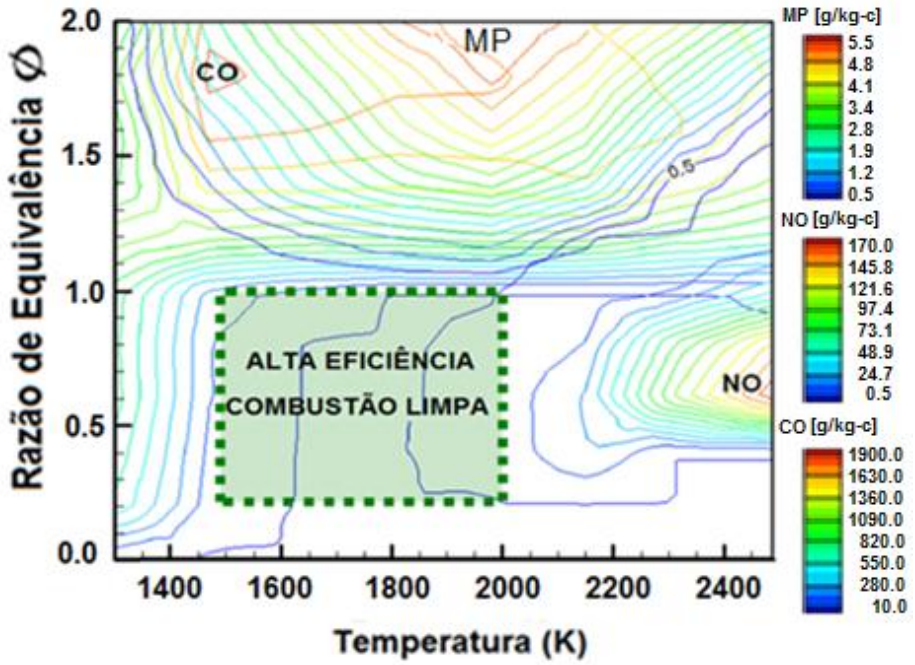


Figura 11: Alta eficiência e regimes de combustão limpa sobre um mapa ϕ-T (Kokjohn, 2012)

Na figura 12 (embora de forma arbitrária) pode-se observar uma região que agrupa características de diferentes modos de combustão e as regiões onde poderiam acontecer estes modos (HCCI, PCCI, LTC, diesel convencional). Inclui-se também curvas com diferentes percentagens de Oxigênio que podem se atingir quando se faz uso de técnicas como a recirculação de gases de escapamento.

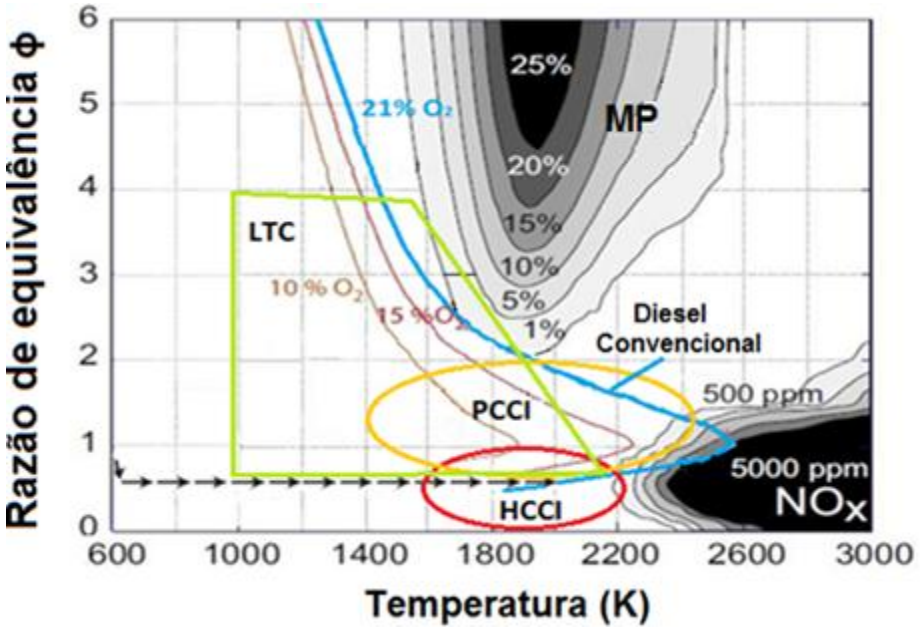


Figura 12 - Modos de Combustão com alta eficiência e regimes de combustão limpa sobre um mapa ϕ-T (Kokjohn, 2012)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

2.2.
Novos modos de combustão em motores ICO

O estudo dos diferentes sistemas que utilizam o conceito de combustão homogênea, ou pré-misturada, mostra os benefícios potenciais destes modos de combustão. Estes estudos também revelam algumas dificuldades que devem ser vencidas antes de poder utilizar completamente este modo de combustão. A seguir são explicadas, brevemente, cada uma delas.

2.2.1.
Ignição por Compressão de Carga Homogênea

A estratégia de combustão HCCI, (do inglês “Homogeneous Charge Compression Ignition”) caracteriza-se por uma combustão pré-misturada completamente homogênea. Os HCCI incorporam as melhores características tanto dos motores ICO quanto dos motores ICE. Este tipo de combustão resulta em uma combustão mais limpa e com menores emissões de NO_x e fuligem (Hu et al., 2008).

A operação de motores em modo HCCI está limitada para algumas faixas de rotação e carga, assim como alguns níveis de pressão (Jayaraman, 2012). As vantagens e desvantagens da combustão HCCI têm sido bem documentadas por diferentes autores, Ryan & Matheaus (2003) e Christensen & Johansson (1998). Os principais obstáculos à aplicação com sucesso em motores de combustão interna do HCCI são:

- ✓ O uso do HCCI é limitado por um forte aumento do pico de pressão no interior do cilindro, que pode provocar danos ao motor;
- ✓ Dificuldade de controlar o ponto de autoignição e, assim, a liberação de calor;
- ✓ Embora os motores HCCI tenham mostrado redução nos níveis das emissões de NO_X, os níveis de HC e CO aumentam.

Pesquisas têm-se focado em superar os obstáculos do HCCI usando diferentes tipos de misturas de combustíveis como os trabalhos desenvolvidos por Hardy & Reitz (2006) e Sun & Reitz (2006). Isto resultou no desenvolvimento da combustão bicombustível e da combustão Dual Fuel. O controle da ignição do HCCI aconteceu através da manipulação das propriedades dos combustíveis como foi documentado por Shibata (2005 e 2009).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

Para evitar a necessidade de “formular” combustíveis, Inagaki et al., (2006) combinaram combustíveis para simular um combustível real. No entanto, nesse estudo, os combustíveis eram misturados no interior da câmara de combustão. Iso-octano foi usado para representar um combustível de alta octanagem injetado no coletor de admissão e óleo diesel injetado diretamente no cilindro. Os resultados mostraram que o tempo de ignição podia ser controlado alterando as quantidades relativas dos combustíveis injetados. Os resultados de Inagaki et al., (2006) foram muito promissores, embora a estratégia de fornecimento de combustível não representasse a operação real HCCI.

A otimização do trabalho de Inagaki tem sido demonstrada computacionalmente por Kokjohn et al., (2009) e experimentalmente por Hanson et al., (2010) usando combustíveis comerciais. Foi demostrado que o evento de combustão é controlado pela ignição sequencial de zonas de maior e menor reatividade. Esta técnica tem sido chamada de Ignição por Compressão de Reatividade Controlada (RCCI).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

2.2.2. Ignição por Compressão de Carga Pré-misturada

A Ignição por Compressão de Carga Pré-misturada (PCCI – Premixed Charge Compression Ignition) é uma variante da combustão HCCI, mas com a injeção do combustível acontecendo durante o curso de compressão como método para diminuir o contato com a parede do cilindro (Amorim, 2010). Pode também ser vista como uma situação intermediária entre a combustão convencional e a combustão HCCI (Ying et al., 2010).

A principal diferença entre HCCI e PCCI está na homogeneidade da carga injetada no interior do cilindro. No PCCI o combustível é injetado cedo (antes do ponto morto superior) e dispõe de um tempo para se misturar com o ar antes da ocorrência da autoignição, o que é mais fácil de desenvolver na prática (Ojeda et al., 2009). A redução da temperatura no interior do cilindro resulta na redução das emissões de NO_X e MP (Murata et al., 2010). Embora a mistura aconteça dentro do cilindro, existe uma alta possibilidade de combustão incompleta, devido ao combustível aderido às paredes do cilindro. Neste caso as emissões de HC se apresentaram elevadas, assim como o consumo específico de combustível (Amorim, 2010).

Apesar das dificuldades no uso prático do PCCI, as pesquisas continuam, uma vez que oferece um caminho adequado para alcançar as vantagens do

HCCI por meio dos tempos de injeção e controle da recirculação dos gases de escapamento (Lilik, 2008).

Outros estudos com o objetivo de melhorar as características da combustão e emissões incluem o uso de vapor de água na admissão (Kaneko et al., 2002), EGR refrigerado (Simescu et al., 2002) e estratégias de múltiplas injeções de combustível (Okude et al., 2004). Estas técnicas têm sido utilizadas com o objetivo de reduzir as emissões de NO_X, MP e HC, aumentando a faixa de aplicação das estratégias PCCI em motores ICO.

Para a correta e completa implantação desta estratégia em motores ICO, primeiro devem ser solucionados alguns inconvenientes, entre os quais se encontram:

- ✓ Dificuldade do controle da fase de combustão;
- ✓ Elevados níveis de ruído;
- ✓ Altos níveis de HC e CO;
- ✓ Altos níveis de diluição do óleo lubrificante.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

2.2.3. Combustão em Baixa Temperatura

A Combustão em baixa temperatura (LTC - Low Temperature Combustion) procura atingir combustão sem a formação de NO_X. Akihama et al., (2001) sugerem que com uma temperatura de chama inferior a 2100 K não se observaria a formação de NO_x em quantidades significativas. Embora, a temperatura também esteja de certa forma associada à formação dos precursores do MP e sua oxidação, o que pode levar a maiores emissões deste poluente (Amorim, 2010).

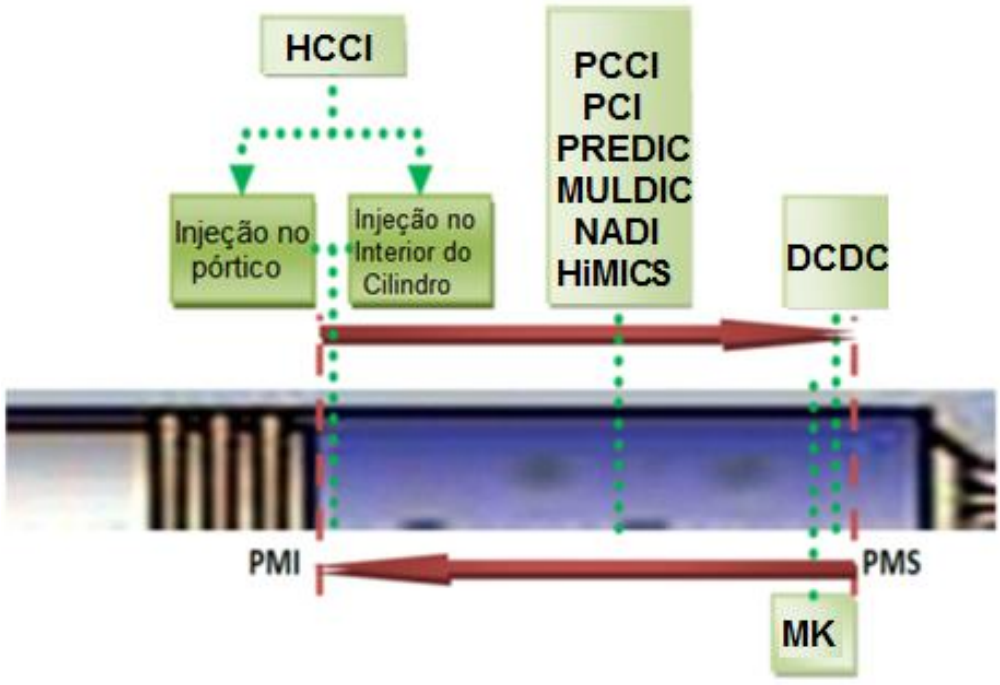
Com algumas variantes nos métodos, combustível, ou tipo de motor utilizado, ao longo do tempo, diferentes nomenclaturas têm aparecido para uma série de modos de combustão que podem ser agrupadas dentro do modelo LTC. A tabela 2 mostra os principais modos de combustão e faz referência aos grupos envolvidos nestas pesquisas.

Tabela 2 - Modos de combustão LTC, Riesco et al., (2005) e Amorim (2010).

Acrônimo	Nome	Referência
PREDIC	Combustão Diesel Pré-misturada de Baixa Carga	Takeda et al., (1996)
HiMICS	Sistema Inteligente de Combustão com Carga Homogênea e Múltiplas Injeções	Yokota et al., (1997)
HCDC	Combustão Diesel com carga Homogênea	Suzuki et al., (1997a y 1997b)
MULDIC	Combustão Diesel de Fases Múltiplas	Hashizume et al., (1998)
MK	Cinética Modulada	Kimura et al., (1999)
PCI	Combustão de ignição por compressão com carga pré-misturada	Iwabuchi et al., (1999)
CAI	Auto ignição Controlada	Lavy et al., (2000)
DCDC	Combustão Diesel Limpa com Combustível Oxigenado	Pickett e Siebers (2003).
NADI	Injeção Direta em Angulo	Ranini et al., (2004)

Estes termos são específicos para as características particulares do motor ou sistema de injeção usado (Riesco et al., 2005).

A figura 13 mostra aproximadamente os instantes, em relação ao PMI e PMS, em que acontecem as injeções para cada estratégia de combustão.



Figuras 13 - Esquema das diversas estratégias de combustão LTC, segundo a distância na qual acontece a injeção de combustível (Amorim, 2010)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

2.2.4.
Ignição por Compressão de Reatividade Controlada

Os avanços nas pesquisas sobre modelos de combustão são conduzidos empregando usualmente óleo diesel e gasolina como combustíveis. Cada um deles possui vantagens e deficiências específicas (Cho et al., 2011).

Bessonette et al., (2007) sugerem que o combustível ótimo para o desenvolvimento dos modelos de combustão deve ter qualidades de autoignição entre as do óleo diesel e as da gasolina, e que diferentes níveis de misturas poderiam ser requeridos em diferentes condições de operação. Por tanto, a reatividade do combustível controla o início da combustão, e este processo se denomina “Combustão por Ignição de Reatividade Controlada” ou RCCI que é uma evolução do HCCI e PCCI. A abordagem Dual Fuel poderia ser uma via adequada para alcançar maior eficiência e emissões de NO_X e MP inferiores (Cho et al., 2011).

RCCI é uma tecnologia de combustão do motor Dual Fuel, que foi desenvolvida na Universidade de Wisconsin-Madison (Motor Research Laboratories Center), fornecendo mais controle sobre o processo de combustão e com potencial de reduzir drasticamente as emissões (Kokjohn, 2011).

Um combustível de reatividade relativamente baixa é injetado antecipadamente no ciclo do motor e mistura-se homogeneamente com o ar. Posteriormente, um combustível de alta reatividade é injetado no cilindro, utilizando injeções únicas ou múltiplas, diretamente na câmara de combustão. Essa abordagem cria bolsões de diferentes relações ar/combustível e reatividades, fazendo com que a combustão ocorra em tempos diferentes. Então vários sistemas de injeção são necessários para operar um motor (Reitz, 2011).

Este último modo de combustão é o que mais se assemelha às condições que são aplicadas durante as experiências conduzidas no presente trabalho. Exemplos de pares de combustível para RCCI são mencionadas por Splitter et al., (2010):

- ✓ Gasolina e óleo diesel;
- ✓ Etanol e óleo diesel;
- ✓ Gasolina e gasolina com pequenas adições de aditivos com elevado número de cetano (peróxido de di-terc-butílo, PDTB).

O RCCI permite o aprimoramento tanto do modelo HCCI quanto do PCCI

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

em motores ICO, reduzindo as emissões e a necessidade de métodos de pós-tratamento. Como se mostra na figura 14, aplicando o modo RCCI consegue reduzir até em um 70% as emissões de MP sem o uso de pós-tratamento e até em um 80% com o uso de pós-tratamento quando comparado ao modo CDC (Ashley, 2010).

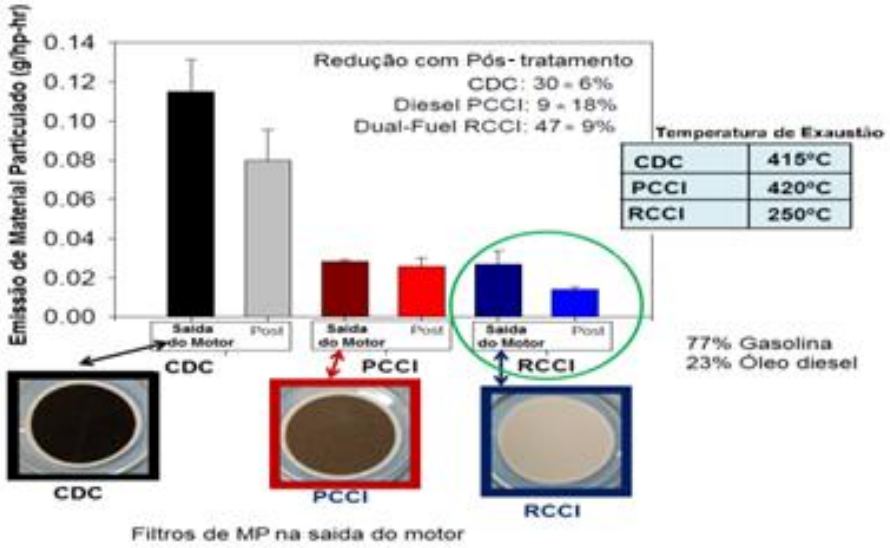


Figura 14 – Efeito sobre as emissões dos modos de combustão CDC, PCCI e RCCI (Ashley, 2010).

Ao escolher adequadamente as relações das razões de combustível, suas quantidades relativas e temporárias podem ser adaptadas para conseguir a saída de potência ótima (eficiência de combustível), sob temperaturas controladas (controle de NO_x) com a razão de equivalência controlada (controle de material particulado). Os principais benefícios da estratégia RCCI incluem:

- ✓ Baixas emissões de NO_x e MP;
- ✓ Reduzir as perdas por transferência de calor;
- ✓ Incrementar a eficiência do combustível;
- ✓ Eliminar a necessidade de custosos métodos de pós-tratamento.

A figura 15 mostra os avanços das novas estratégias de injeção com o uso simultâneo de dois combustíveis de diferentes reatividades.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

Figuras 15 - Avanços das estratégias de combustão convergindo tanto em Hardware quanto em combustível (Departamento de Energia dos EUA, 2012)

Reitz et al., (2011) demonstraram uma eficiência térmica líquida no eixo de quase 56%, utilizando o modelo de combustão RCCI, no modo diesel-gasolina. Assim, este é um dos modos de combustão, que estão sendo estudados com detalhe.

Cho et al., (2011) mostraram resultados da comparação de motores funcionando sob diferentes modelos de combustão:

- ✓ Combustão Diesel Convencional (CDC);
- ✓ Ignição por Compressão de Carga Homogênea (PCCI);
- ✓ Ignição por compressão de reatividade controlada (RCCI), injeção no pórtico de admissão.

A figura 16 mostra a comparação da pressão instantânea do cilindro para cada modelo de combustão.

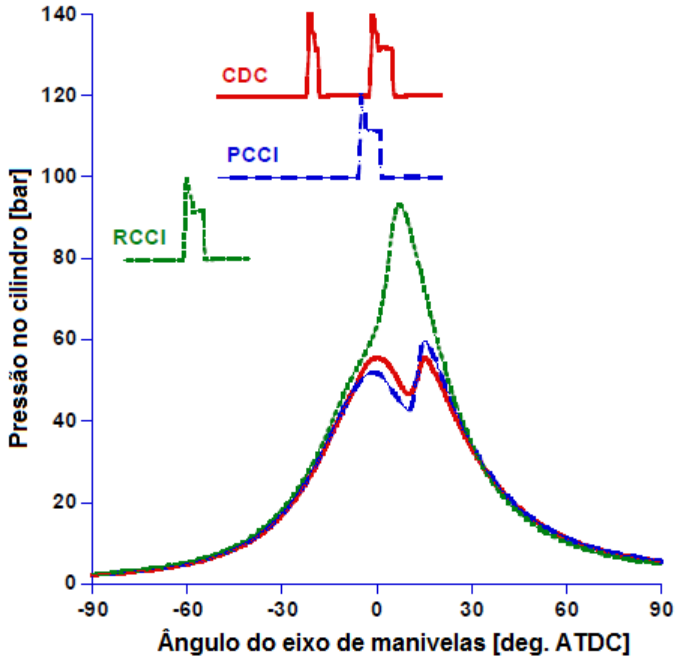


Figura 16 - Pressão do cilindro em função do eixo de manivelas, para diferentes modelos de combustão. Cho et al., (2011)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

Os valores de pressão no modo RCCI (taxa de substituição de 75% de gasolina por óleo diesel) foram significativamente maiores do que o CDC e o modo PCCI. No modo RCCI as fases da combustão foram mais curtas quando comparadas com os outros dois modos. Também foi observada uma combustão pré-misturada uniformemente distribuída no modo de combustão RCCI.

Segundo Cho et al., (2011) o estudo paramétrico do modelo de combustão RCCI revela que a taxa de aumento de pressão do cilindro pode ser controlada por alguns parâmetros físicos como o “swirl” ou controlando o inicio da injeção do óleo diesel.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

2.3.
Estratégias de injeção de combustível

A tarefa principal de qualquer sistema de injeção é proporcionar a quantidade de combustível correta no tempo preciso (Garcia, 2009).

Independentemente do motor, estratégia ou tipo de combustível utilizado, uma classificação interessante dos processos de combustão alternativos é mediante a forma como o combustível é introduzido na câmara de combustão (Muñoz, 2013).

O método de injeção do combustível tem um efeito considerável nas características do motor e limita as formas de controle do inicio da combustão que podem se utilizar. Riesco et al., (2005) mostram uma simplificação bastante útil sobre a classificação dos métodos de injeção desenvolvidos nos processos de combustão alternativos, como se mostra na figura 17.

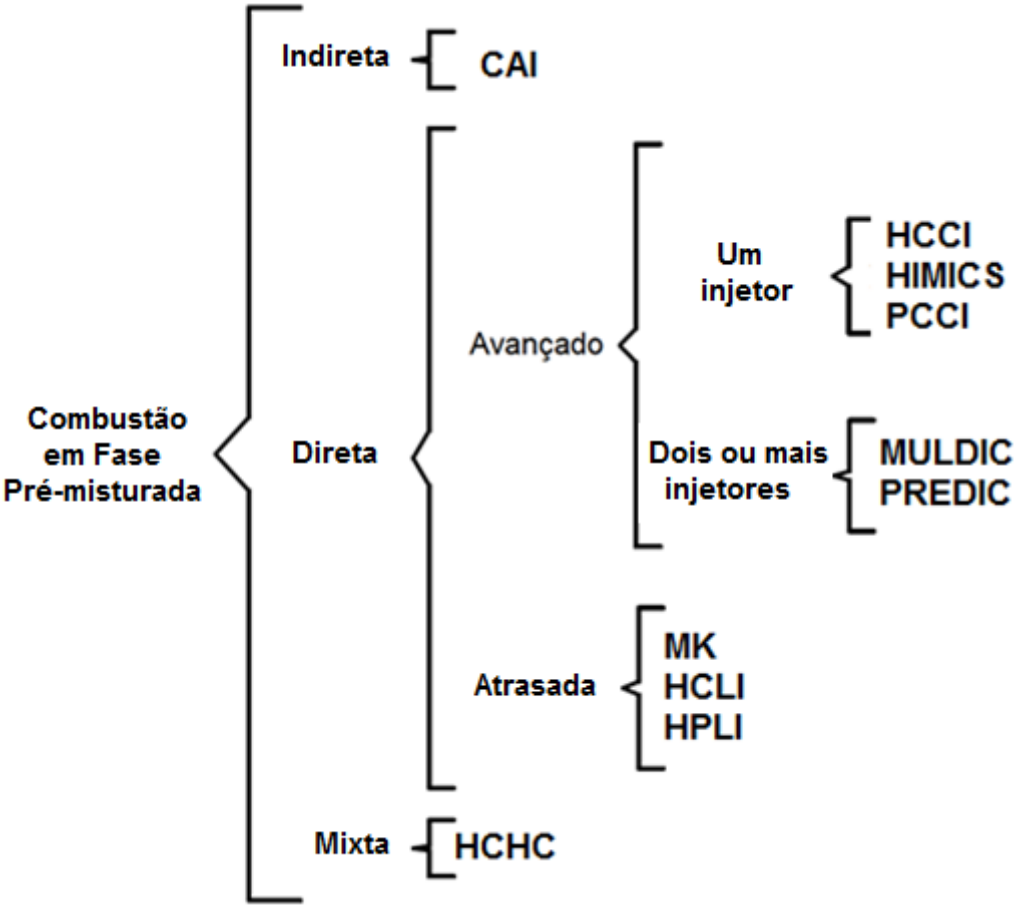


Figura 17 - Classificação dos conceitos de combustão em fase pré-misturada segundo o método de injeção do combustível (Muñoz, 2013).

Com o uso de estratégias de injeção múltipla, o processo de injeção em

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

cada ciclo do motor, o qual tradicionalmente consiste em um único evento, é dividido em duas ou mais partes. O uso de injeções múltiplas pode ser considerado como o mais importante avanço desenvolvido nos modernos sistemas de injeção do óleo diesel (Vaglieco, 2010). A tecnologia de injeções múltiplas foi considerada muito atrativa para os motores diesel de injeção direta com alta velocidade rotacional baseados nos resultados dos motores pesados (Nehmer & Reitz, 1994).

A seguir se detalham as diferenças mais importantes que acontecem no processo de combustão quando se usam estratégias de injeção múltipla, assim como os efeitos relevantes da aplicação das mencionadas estratégias. Existem diferentes tipologias, dentre as estratégias de injeção múltipla, atendendo aos diferentes parâmetros que as definem: Número de eventos de injeção, posição relativa entre os diferentes eventos de injeção e duração dos mesmos (Garcia, 2009).

Adicionalmente, a interação entre pulsos, será mais relevante quanto mais perto estejam entre si os pulsos de injeção. A interação entre pulsos implica que as condições na câmara na qual se injeta um pulso são diferentes às correspondentes ao pulso de injeção precedente.

Segundo Garcia (2009) o principal fenômeno associado à mudança nas condições ambientais produzido pela interação entre pulsos de uma injeção múltipla se dá durante o processo de atomização e está relacionado com as diferenças no *drag* (resistência do ar à penetração das gotículas).

Amagai et al., (1999) mostraram que dividir a injeção, reduz o tempo de atraso à autoignição e ajuda a estabilizar a combustão como resultado do aumento no processo de mistura.

Rente et al., (2001) igualmente ao grupo de Amagai, concluíram que o uso de estratégias de injeção partida promove tempos de atraso menores que uma estratégia de injeção simples.

Com o uso de estratégias de injeção múltiplas, o processo de injeção em cada ciclo do motor, o qual tradicionalmente consiste em evento único, divide-se em dois ou mais partes, como se mostra na figura 18.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

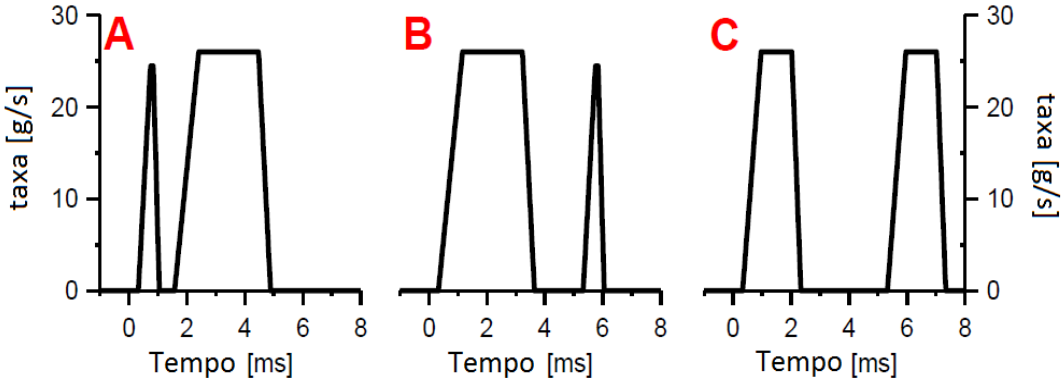


Figura 18 - Estratégia de injeção de massa versus o tempo para as tipologias básicas de injeção múltipla: (a)estratégia de injeção piloto, (b) estratégia de pós-injeção e (c) estratégia de injeção partida. (Garcia, 2009).

Combinando estas três tipologias básicas de injeção múltiplas pode-se gerar um número elevado de sequências diferentes de injeção.

A nomenclatura usada para definir a sequência de injeção múltipla é mostrada na figura 19. De forma simplificada, a estratégia de injeção simples é definida pelo principio da injeção e a duração da mesma. Já com as injeções múltiplas, o número de graus de liberdade na hora de definir a sequência cresce com o número de pulsos de injeção. Normalmente, do inicio da injeção (Start of Injection – SoI) e da duração de cada pulso (DP), tem-se que definir o tempo entre cada dois pulsos consecutivos (TP), ou seja, o tempo entre o final de uma injeção e o início da consecutiva.

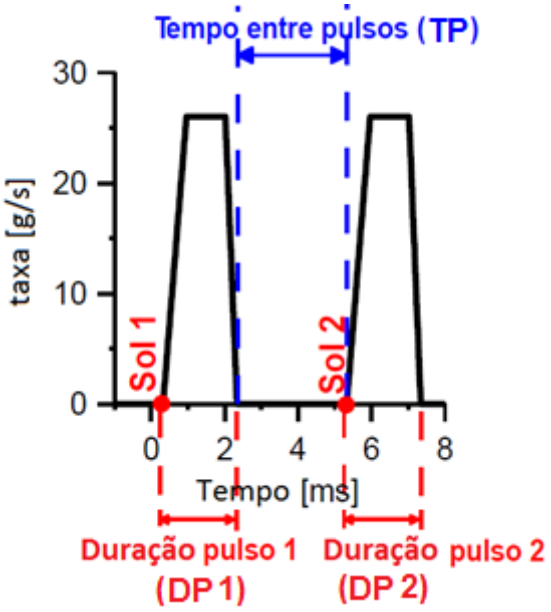


Figura 19 - Esquema dos diferentes parâmetros que influenciam a definição de uma estratégia de injeção múltipla. Neste caso apresenta-se uma estratégia de injeção partida, Garcia (2009).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

Ricaud & Lavoisier (2004) pesquisaram uma estratégia de injeção piloto denominada “pré-injeção”. Em comparação com a estratégia piloto convencional, a pré-injeção implica um pulso de injeção (antes da injeção principal) de curta duração e com um tempo de separação entre pulsos pré e principal muito pequeno. Esta estratégia proporciona um pequeno incremento no nível de ruído quando comparada com uma estratégia de injeção piloto convencional. Produz, todavia, uma notável melhora no que se refere às emissões e consumo. Adicionalmente estes autores conseguiram reduzir o nível de ruído produzido pela combustão abaixo do esperado em uma estratégia piloto convencional. Enquanto que Garcia (2009) destaca que a pós-injeção tem uma influência significativa sobre a redução das emissões finais de fuligem, a maioria dos autores associa esta redução a uma melhora no processo de oxidação da fuligem.

Benajes et al., (2001), aumentando o conhecimento dos efeitos da pós-injeção, concluíram que esta é uma estratégia adequada para diminuir a fuligem, mantendo os níveis de NO_X, com pequenos incrementos no consumo de combustível. Atribuem-se os mesmos níveis de NO_X porque a temperatura não varia quando comparada aos casos de injeção simples. Por outro lado, a diminuição da fuligem é atribuída a um aumento da temperatura no final do processo de combustão, que apresenta como resultado uma melhora na oxidação.

A figura 20 mostra as possíveis combinações que podem surgir variando o início da injeção.

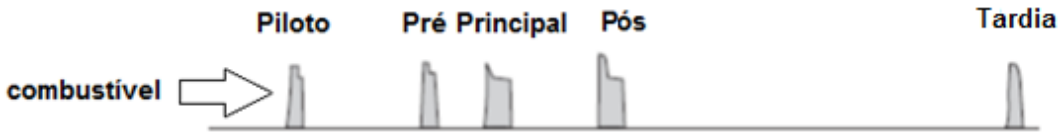


Figura 20 - Injeções múltiplas. Ricaud & Lavoisier (2004)

Injeção piloto: Usualmente se inicia muito cedo quando comparado o inicio da injeção (SoI) da injeção principal. Reduz o ruído da combustão durante a partida em frio e regimes lentos. Além disto, contribui para a redução de fuligem e incrementa a eficiência volumétrica.

Pré-Injeção: Usualmente acontece muito perto da injeção principal. Controla o processo de pré-mistura, o qual tem um forte impacto no ruído durante a combustão, assim como na formação de NO_x e MP.

Injeção Principal: Envolve grande parte da massa injetada de combustível (70% -

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

80%). O inicio da injeção associado à injeção principal tem forte efeito sobre a formação de NO_x.

Pós-injeção: Usualmente acontecendo muito perto da injeção principal, favorece a completa oxidação do MP, este processo é importante por dois motivos:

- Aumenta a temperatura da mistura gasosa, o que favorece as reações de oxidação.
- A energia cinética associada à massa injetada de combustível gera turbulência no cilindro, favorecendo a mistura e incrementando a concentração de oxigênio, necessário à oxidação da fuligem.

Injeção Tardia: Usualmente acontece muito tarde, quando comparado com o inicio da injeção (SoI) da injeção principal. Aumenta a temperatura dos gases de escapamento e é realizada para melhorar o desempenho dos dispositivos de pós-tratamento.

Três injeções consecutivas (piloto + principal + *tardia*) são particularmente efetivas para redução da fumaça. Esta estratégia foi pesquisada para diferentes tempos entre pulsos “TP”. Foi demonstrado que para TP1 de 830 µs, uma injeção tardia depois da principal é muito efetiva para uma maior redução de fumaça de 1,7 a 0,9 BSU com um simultâneo efeito positivo sobre os NO_X como mostrado na figura 20. Pode ser observado que a injeção tardia incrementa a oxidação do MP, resultando em uma menor emissão de fumaça sem incremento do NO_X.

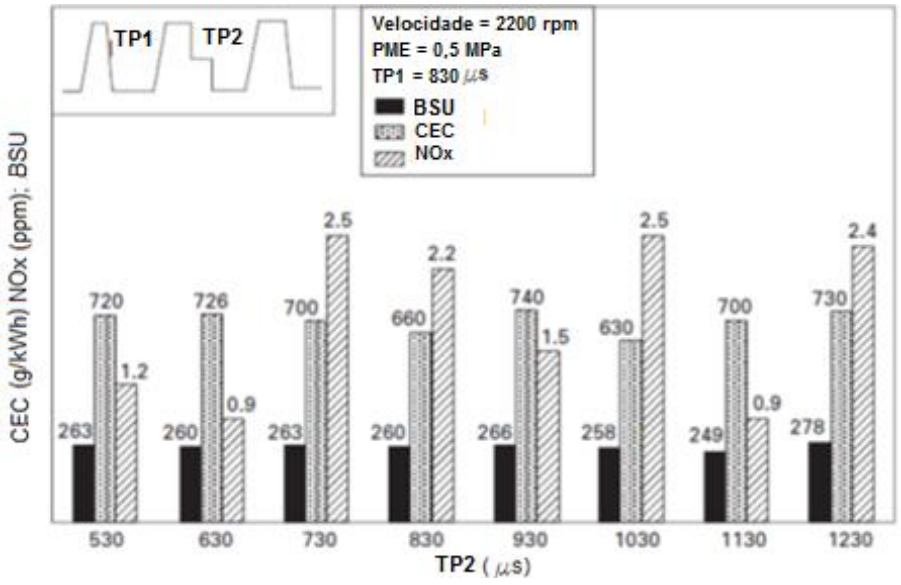


Figura 21 - Emissão de fumaça (BSU), consumo específico de combustivel (CEC) e NOx com uma estratégia de três injeções vs o tempo entre pulsos “TP” Corcione et al., (2003).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

Na figura 22 pode ser verificada uma comparação das diferentes estratégias de injeção apresentada por Imarisio (2000) onde cada estratégia de injeção pode influenciar de forma diferente tanto as emissões de poluentes quanto o consumo especifico de combustível assim quanto o ruído do motor:

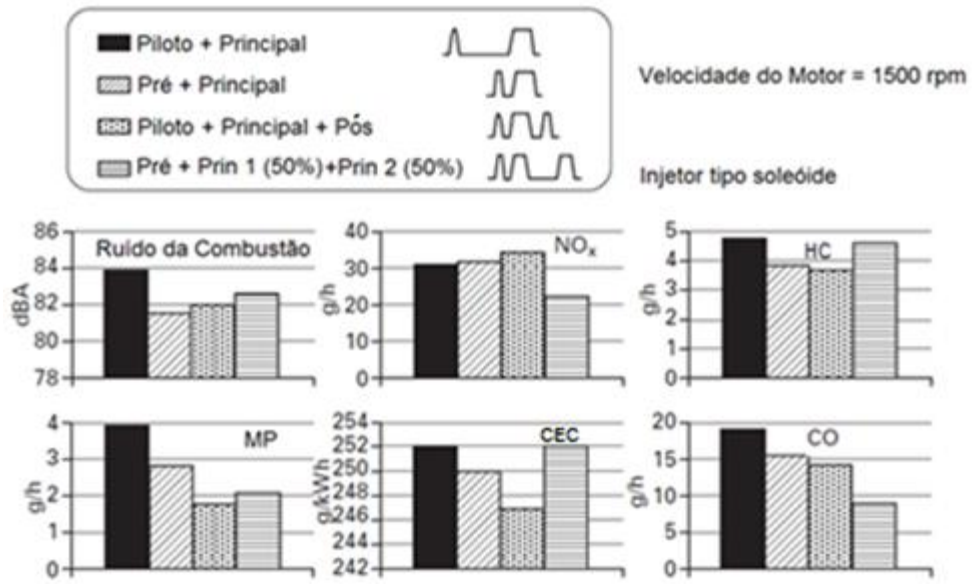


Figura 22 - Efeito da múltipla injeção no desempenho e emissões de um motor de injeção direta com alta velocidade de rotação (Imarisio, 2000).

Pode-se dizer até agora que as estratégias de injeção múltipla apresentam um elevado número de graus de liberdade, sobre os quais agem os pulsos de injeção em que se divide a massa total injetada. São variáveis importantes, a distância entre pulsos, a duração de cada pulso e a pressão de injeção. Por fim, é necessário incluir a utilização de dois combustíveis, com diferentes números de cetano, sendo um deles renovável, como motivo da pesquisa aqui desenvolvida.

2.4. Estratégias de injeção Dual Fuel

Nesta seção serão descritas as duas modalidades convencionais de injeção aplicadas ao uso simultâneo de dois combustíveis, misturados no interior do cilindro. A ideia é introduzir os conceitos, para em seguida, definir uma estratégia, visando a sua implantação em uma máquina de compressão rápida.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

2.4.1.
Fumigação

O termo “fumigação” representa a introdução de um combustível, finamente atomizado ou vaporizado, no ar de admissão. Uma segunda injeção de combustível é fornecida na forma convencional (usualmente na fase líquida). Este último é adicionado ao interior do cilindro, no caso dos motores do ciclo Diesel, ou mesmo próximo às válvulas de admissão, no caso dos motores do ciclo Otto. Esta fração de combustível, quando adicionada ao ar de admissão, tem como objetivo melhorar algumas características de funcionamento do motor, tal como a redução de depósitos de carbono em bicos injetores (Peterson et al., 1987).

Chaplin & Junius (1987) trabalharam com etanol e indicam que o método da fumigação, que já foi testado por vários grupos de pesquisa, sempre esbarra em problemas similares:

- ✓ Diminuição da eficiência térmica em cargas parciais;
- ✓ Aumento do atraso da ignição da mistura com o aumento da adição do segundo combustível;
- ✓ Aumento no consumo específico de combustível;
- ✓ Aumento do ruído causado pela queima excessivamente rápida da mistura;
- ✓ Dificuldades de partida a frio.

A tabela 3 apresenta um resumo das principais conclusões da aplicação da fumigação de etanol em motores ICO.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

Tabela 3 - Resumo das principais conclusões decorrentes da fumigação de etanol em motores ICO.

Autor	Resultado
Barnes et al., (1975)	Substituição de etanol, methanol e isopropanol em um motor diesel turboalimentado, obtiveram uma significativa redução de fumaça e menores temperaturas de gases de descarga.
Muyarama et al. (1981),	Encontraram que o aquecimento do ar favorecia a redução de poluentes, mas provocava um decréscimo na potência. O desempenho do motor não era afetado pela presença de água no etanol, até um máximo de 40% em volume e não produzia mudanças no desempenho do motor.
Bandel (1983) Baeser & Bennet (1980). Cummings & Scott (1977)	Mencionam que só uma pequena parcela de óleo diesel pode ser substituída sem acarretar danos ao motor pela detonação na combustão
Savage et al., (1986)	Realizaram ensaios com substituição parcial de óleo diesel por álcool injetado nas proximidades de cada válvula de admissão (sistema multi-ponto) de um motor Diesel, 6 cilindros, 7,1 L. turboalimentado, utilizando três diferentes ciclos de injeção de álcool. A injeção de álcool nas proximidades das válvulas de admissão, independentemente do ciclo de injeção utilizado, causava aumento no atraso da ignição, conforme aumentava-se a substituição do óleo diesel.
Goetz et al., (1993)	Utilizaram a injeção multiponto para a fumigação de etanol em um motor de ciclo diesel, com controle eletrônico em função da velocidade e carga. Este sistema era facilmente reconvertido a seu modo original. Observaram que maiores proporções de etanol resultavam em tempos de atraso da ignição maiores. As taxas de incremento de pressão, aumentavam e depois diminuíam com o incremento da adição de etanol. Em baixas cargas a eficiência térmica decrescia com a introdução de etanol.
Nogushi et al., (1996)	Conseguiram uma substituição de até 38% de óleo diesel por etanol (em termos energéticos) para uma condição de máxima carga. Nestas condições, mesmo com o atraso da injeção do óleo para 10°APMS, verificou-se um aumento de 2,1 dB no ruído da combustão. Verificaram uma redução de 51% na emissão de NO_X
Ajav et al., (1998)	Taxas de substituição do diesel variáveis com a carga do motor, porém, da ordem de 34% para cargas até 50% e de 15% para plena carga.
Bika et al., (2007)	Com taxas de substituição de até 40% do óleo diesel, observaram uma diminuição na eficiência térmica e um aumento na emissão de HC

Estas pesquisas concluíram que o alto calor latente de vaporização do etanol é o principal fator que dificulta a combustão adequada da mistura. Isto é resultado de uma vaporização inadequada no coletor de admissão, queda de temperatura excessiva do ar e resfriamento excessivo no cilindro, causando grande atraso na ignição, queima imprópria e dificuldades de partida.

Indicação especial merecem os trabalhos de Curran et al., (2012) e outros desenvolvido na Universidade de Wisconsin, que desenvolveram a operação no modo Dual Fuel em um cilindro com injeção de gasolina no pórtico e de óleo diesel de forma convencional, como mostrado na figura 23. Neste caso foi estabelecida também uma relação com o modo de combustão RCCI, fazendo uma diferenciação entre os combustíveis, baseado na reatividade de cada um deles.

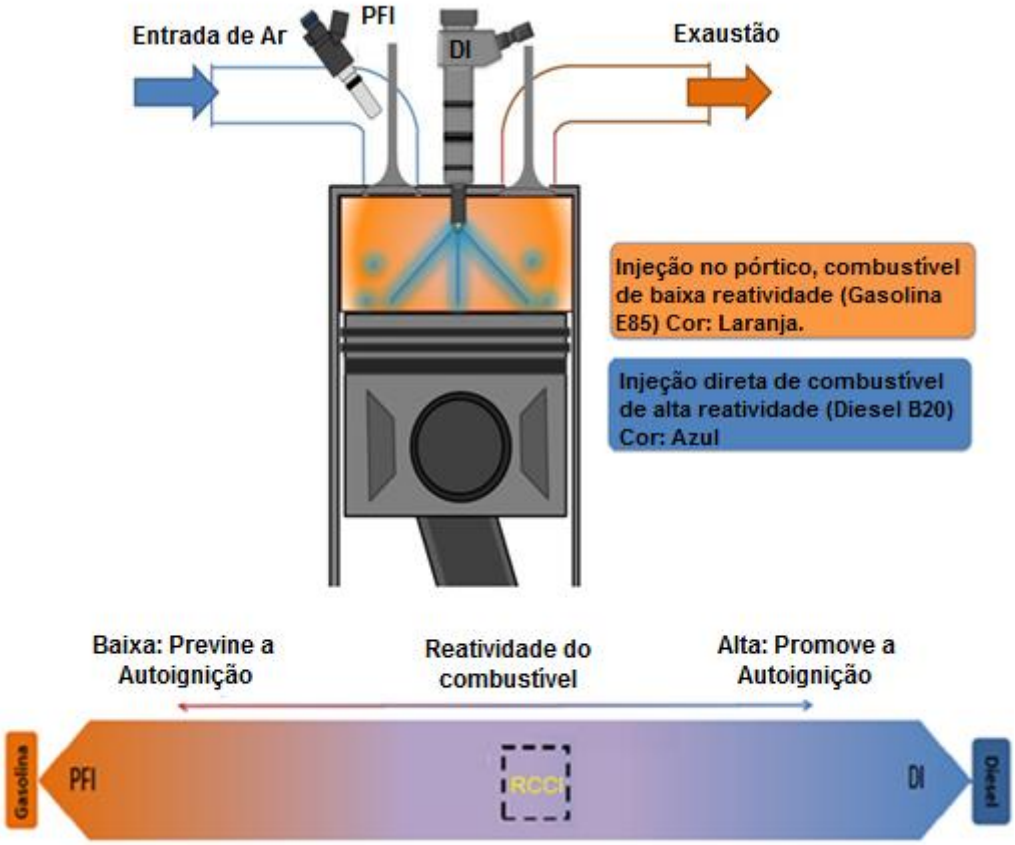


Figura 23: Fumigação aplicada ao método RCCI (Adaptado de Curran et al., 2012).

Um dos avanços mais representativos, usando o método de fumigação para combinar dois combustíveis de diferentes reatividades, foi mostrado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE Hydrogen Progran and Vehicle Tecnologies Annual Merit Review, 2010). A figura 24 descreve o processo. Neste caso, o acionamento dos oito injetores foi realizado por só uma

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

unidade de controle eletrônico (UCE).

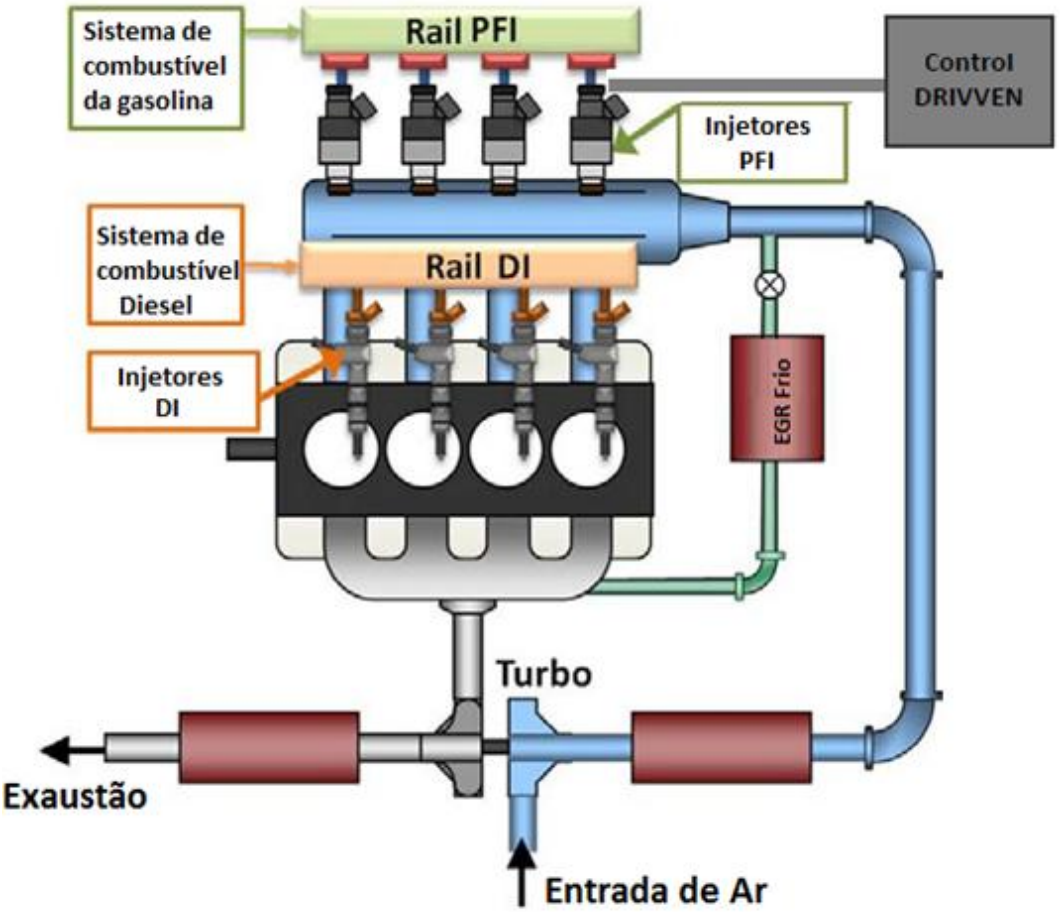


Figura 24: Motor de quatro cilindros operando no modo Dual Fuel, com injeção indireta de gasolina e injeção direta de diesel, controladas através de uma só UCE. (Kokjohn et al., 2010).

Embora, similar às outras estratégias (LTC, HCCI e PCCI), a estratégia RCCI utilizando o método da fumigação ainda apresenta níveis de HC e CO que são consideravelmente maiores dos que os observados em uma combustão Diesel convencional (Wissink et al., 2012).

Egusquisa (2011) mostra os efeitos da fumigação do etanol hidratado sobre as características da combustão em um motor Diesel de quatro tempos com quatro cilindros em linha, de fabricação MWM, modelo 4.10 TCA, com potência máxima de 107 *kW* a 2.600 *rpm* e torque máximo verificado de 430 *Nm* a 1.800 *rpm*. Este motor é comumente empregado na propulsão de caminhões leves e veículos comerciais. Trata-se de um modelo com turbo-alimentação e arrefecimento do ar de admissão, na figura 25 se apresenta o esquema do aparato experimental utilizado por Egusquisa (2011).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

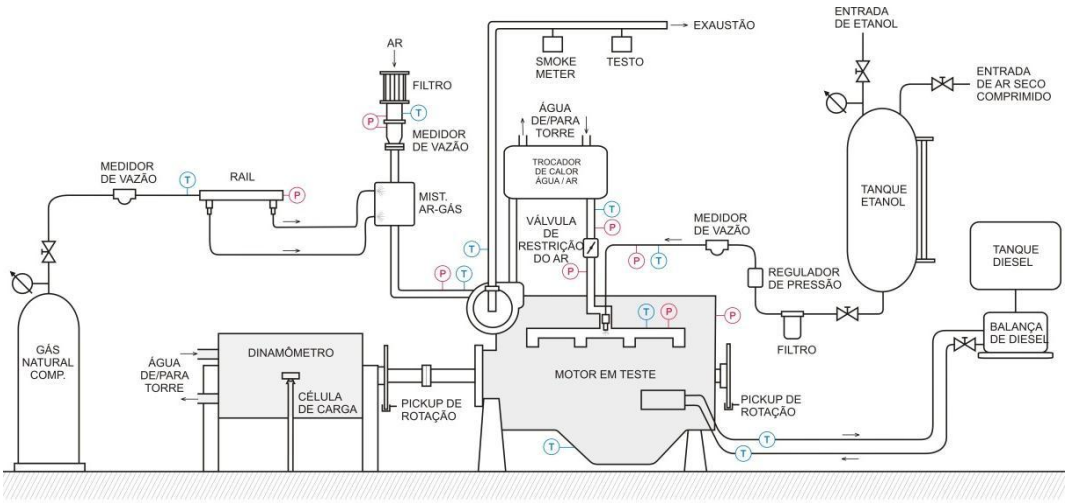


Figura 25 – Esquema do aparato experimental utilizado por Egusquisa (2011)

Egusquisa (2011) considerou quatro condições de carga correspondentes a 30, 50, 75 e 100 % da plena carga. Sob o regime de 1800 rpm, variou a taxa de substituição (TS) Diesel/Etanol até um limite máximo, a partir do qual o funcionamento do motor se tornava instável

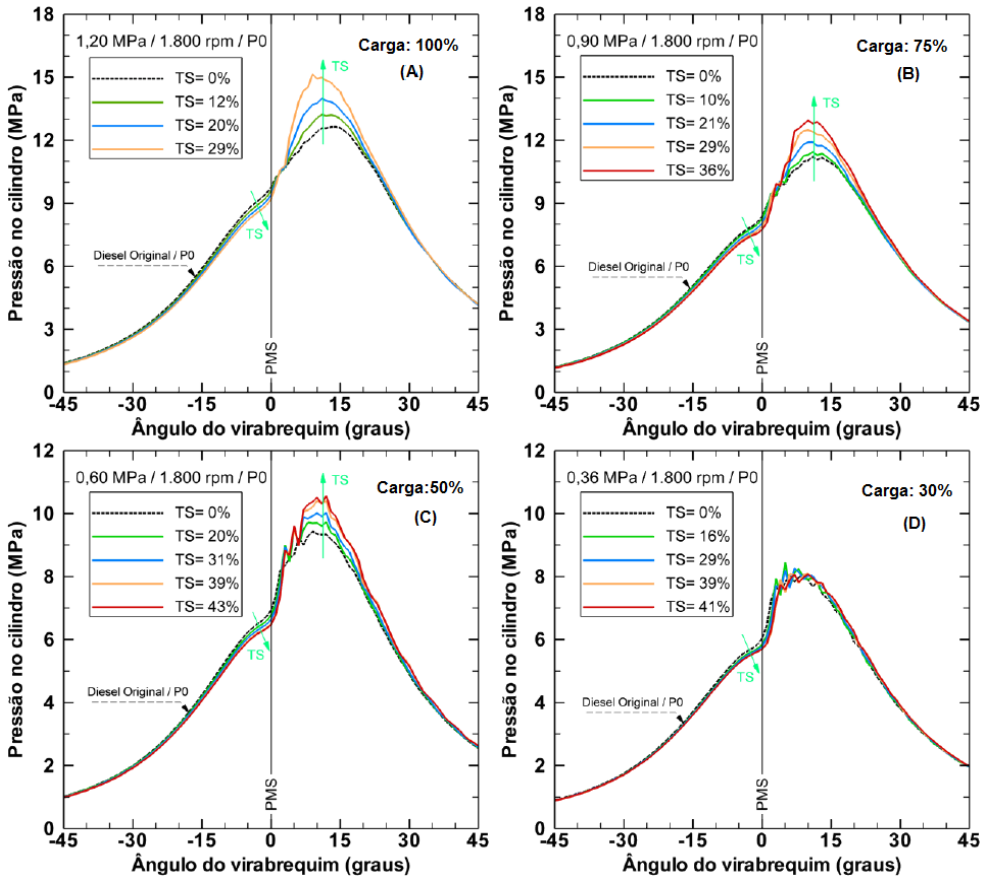


Figura 26 - Variação das curvas de pressão com a substituição Diesel/etanol e a carga do motor (RPM: 1.800); injeção do diesel: P0= 9° APMS. (Egúsquisa, 2011).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

Das curvas da figura 26 pode se observar o seguinte:

- ✓ A medida que se aumenta a TS, os níveis da pressão indicada em torno do PMS são alterados em relação ao modo Diesel convencional, apresentando, na maioria dos casos, diminuição gradual no final do curso de compressão e aumento progressivo na pressão máxima no processo de combustão (indicação das setas TS).
- ✓ Entre 30 e 50% da plena carga, foram observadas maiores oscilações do pico de pressão nas vizinhanças da posição de pressão máxima. Esta característica foi mais evidente quando altos débitos de etanol foram empregados (Figura 24-C e Figura 24-D).
- ✓ Sob 50% de carga, estas flutuações indicariam a presença de uma "detonação leve" em cargas mais elevadas, interrompia-se o fornecimento do combustível alternativo ao notar um elevado aumento no pico da pressão de combustão, e verificar, por vezes, a presença da detonação;
- ✓ Enquanto que em baixas cargas, se verificou falha na combustão. A combustão instável estaria, possivelmente, associada com o maior efeito de resfriamento do etanol hidratado, o que tornaria inconsistente a propagação de chama, a partir das regiões de queima influenciadas pelo piloto.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

2.4.2. Dupla Injeção Direta

Uma técnica bastante interessante é apresentada como "Injeção piloto Dual Fuel" ou simplesmente "Injeção Dual" (Pischinger et al. 1979). Esta deveria ter mais sucesso do que outras técnicas, por permitir que o etanol seja injetado diretamente dentro da câmara de combustão. Segundo Bandel (1982) este procedimento permite uma maior taxa de substituição, de até 90% em plena carga e entre 60% a 80% em cargas parciais.

Este método também se distingue pela sua capacidade de utilizar diferentes combustíveis, além do óleo diesel. Outros combustíveis, com boa qualidade de autoignição, podem servir como injeção piloto, tais como óleos vegetais, ou álcool com aditivos para melhorar sua autoignição (Mischke et al., 1980). A eficiência térmica desta estratégia é similar à do processo Diesel convencional.

Holmer et al., (1980) efetuaram a injeção de metanol, etanol anidro, etanol hidratado e gasolina na câmara de combustão, após a injeção do óleo diesel, evitando-se, desta maneira, a autoignição do combustível alternativo. Neste trabalho foi verificado que a injeção de etanol ou metanol produz eficiências térmicas equivalentes aquelas do motor funcionando apenas com óleo diesel. Foram também observados baixos níveis de fumaça e menor temperatura nos gases de exaustão.

Este sistema possibilita a substituição de uma fração maior de óleo diesel (aproximadamente 70%). Porém, devido às altas pressões de injeção, o uso de etanol e metanol acarretava uma deterioração excessiva dos bicos injetores, devido à falta de lubrificação.

Dietrich & Bindel (1983) realizaram pesquisas e testes com injeção de óleo diesel e injeção central de etanol, na câmara de combustão. Este sistema denominado de PID “Pilot Injection Diesel” consistia de um injetor principal de etanol, localizado na posição central na câmara de combustão e um injetor secundário (piloto) de diesel, localizado na periferia da câmara de combustão, este último era utilizado apenas como “estopim” da combustão principal, no caso, do etanol. Com relação à taxa de substituição de óleo diesel por etanol, foi obtido um valor de 84% em volume, com o motor trabalhando a plena carga.

Os resultados de Dietrich & Bindel (1983) indicam que a geometria da câmara de combustão, e a forma da injeção do etanol na mesma, não exercem uma maior influência na combustão. Este comportamento é contrário ao comportamento dos motores ICO, os quais reagem às alterações desta ordem, com uma forte emissão de fumaça. Segundo Feitosa (2002) a razão da pouca sensibilidade do motor com o jato piloto, no que diz respeito a alterações bastante significativas, pode ser explicada pela composição química dos álcoois, que incluem na sua estrutura molecular oxigênio e uma alta relação hidrogênio carbono (H/C), de modo a que o menor conteúdo de carbono (em relação a combustíveis a base de petróleo) leva a uma combustão mais fácil. Assim, o teor de carbono não queimado nas emissões é consideravelmente reduzido, como observaram os pesquisadores durantes seus testes. Além disto, o etanol possui uma temperatura de mudança de fase constante, por ser substância pura. Isto significa que a evaporação começa praticamente de uma única vez e o etanol evaporado se distribui rapidamente dentro da câmara de combustão.

Ecklund et al., (1984) afirmam que, por meio da injeção piloto de óleo diesel, é possível inflamar uma injeção atrasada de álcool, produzindo uma combustão estável e eficiente.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

Os pesquisadores da Universidade de Wisconsin acharam uma nova aplicação da dupla injeção direta, assim como das injeções múltiplas. Desta vez injetando simultaneamente dois combustíveis, de alta e baixa reatividade, como método para controlar a combustão das fases do modelo RCCI (figura 27) que oferece o potencial de diminuir emissões de HC e CO, sem sacrificar os benefícios do RCCI: Alta eficiência e níveis próximos de zero, tanto de NO_x quanto de MP (Wissink et al., 2012).

Ao utilizar uma combinação de combustíveis de baixa e de alta reatividade, respectivamente, através do método de fumigação, a variação da reatividade no cilindro é diretamente proporcional à variação de razão de equivalência, pois cada local que contém combustível de injeção direta vai aumentar tanto em razão de equivalência quanto na reatividade. Ao injetar independentemente ambos combustíveis diretamente para dentro do cilindro, estes gradientes são dissociados e uma estratificação independente da reatividade e da razão equivalência torna-se possível. Ao injetar diretamente ambos combustíveis, uma distribuição mais controlada é possível, através do direcionamento do spray, reduzindo potencialmente a quantidade de combustível não queimado nas regiões de fenda como se mostra na figura 27 (Wissink et al., 2012).

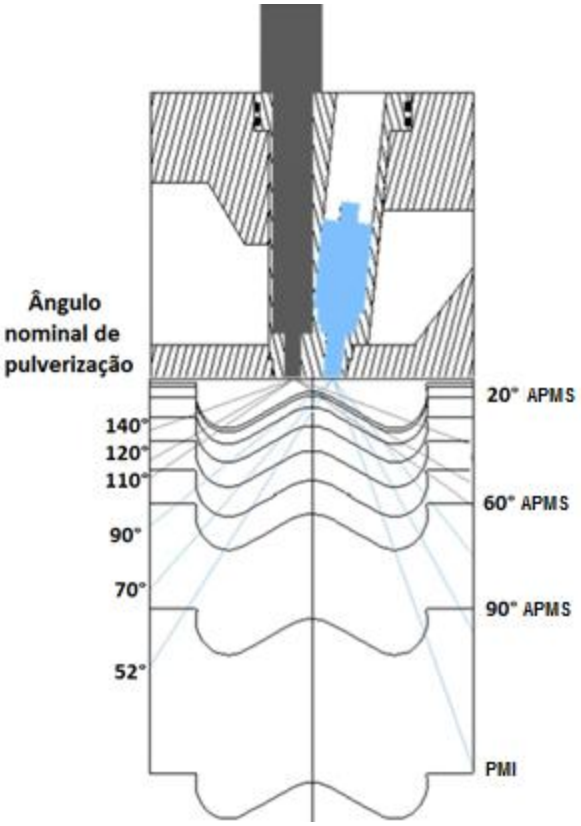


Figura 27 - Diagrama do posicionamento da injeção direta Dual Fuel (Wissink et al., 2012)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB

A dificuldade de instalar um segundo injetor no cabeçote de qualquer motor ICO é grande devido à complexidade dos mesmos, como ilustrado na figura 28:

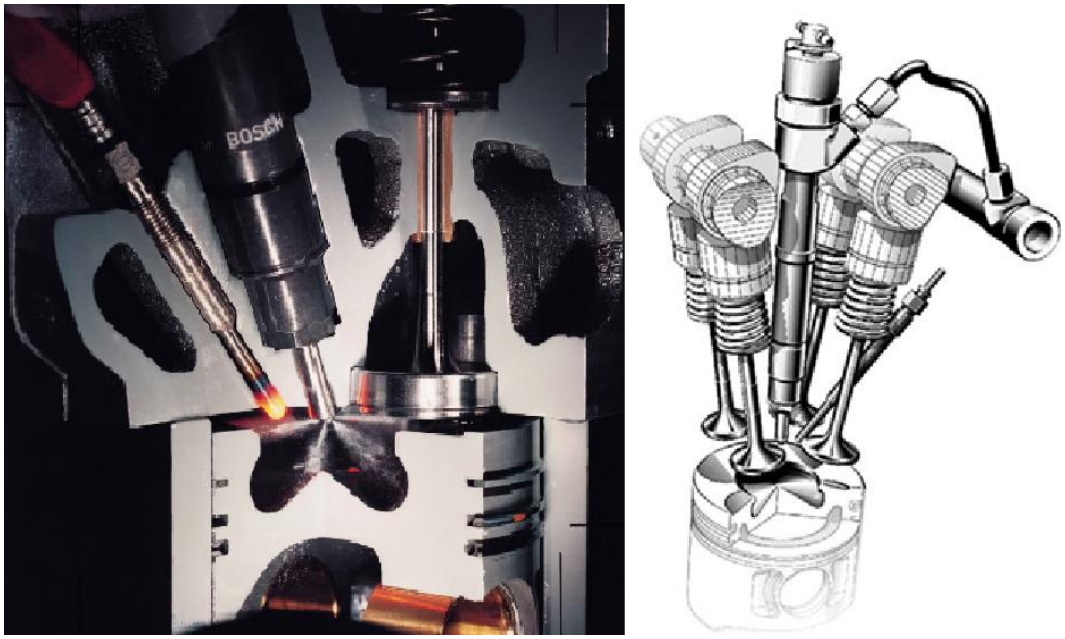


Figura 28 - Configuração de um injetor central e quatro válvulas em um motor ICO, Handbook of Diesel Engines (2010).

O desenvolvimento de novos conceitos de combustão requer a realização de pesquisas eficientes, para o correto entendimento dos processos de combustão dentro da câmara de combustão. Uma forma de simular experimentalmente as condições da dupla injeção direta Dual Fuel, de modo controlado, e sem a complexidade da instalação do segundo injetor no cabeçote do motor, é fazer uso de uma “Máquina de Compressão Rápida”. Este foi o caminho utilizado neste trabalho e está descrito no capítulo seguinte.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0912557/CB