

2. Revisão Bibliográfica

No inventário de substâncias perniciosas ao meio ambiente, proveniente da combustão de óleo diesel, constam: monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrocarbonetos não queimados (HC), óxidos de enxofre (SO_x), além de outras 40 espécies de materiais particulados (MP). (Bertha, 2007; Suzana, 2006)

Com o objetivo de estabelecer um modelo de controle das emissões, provenientes da combustão de produtos de origem fóssil, foram criados programas governamentais para diminuir, progressivamente, os níveis desses gases poluentes.

No mundo existem diferentes padrões de controle de emissões veiculares:

- Na Europa o programa de controle de emissões foi batizado de EURO e implantado em 1992;
- Nos Estados Unidos os padrões de emissões são denominados de Tier e surgiram em 1987;
- Na Austrália e na Nova Zelândia são adotados os mesmos da Europa, mas os limites estão defasados em alguns anos;
- Na China a legislação que trata deste assunto é chamada de National Standard;
- No Brasil a regulamentação das emissões é feita pelo Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE).

O programa foi criado pela resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) Nº 18, de 6 de maio de 1986, tendo por objetivo principal reduzir emissão de poluentes dos veículos automotores. Para isso foi dividido diversas em fases. A Tabela 2.1 mostra um comparativo entre as fases do PROCONVE e as do EURO para veículos pesados abastecidos com óleo diesel.

O programa iniciou em 1986 com a denominação de P1, em referência a primeira fase do PROCONVE. Nesta etapa inicial as emissões de MP e de NO_x dos veículos pesados foram reduzidas, respectivamente, em 20% em 12%.

Em 1994, iniciou a fase P2 que determinou a diminuição do CO e do NOx. Estabeleceu o máximo de teor de enxofre do combustível entre 3 000 a 10 000 ppm e sugeriu que as emissões de MP fossem mantidas em 0,60 g/kW.h.

Tabela 2.1: Limites das Emissões - PROCONVE

LIMITES DAS EMISSÕES PARA VEÍCULOS PESADOS A DIESEL								
PROCONVE	EURO	CO (g/kW.h)	HC (g/kW.h)	NOx (g/kW.h)	MP (g/kW.h)	Norma (Conama)	Vigência	Teor de enxofre (S)
Fase P1	-	14,00 ¹	3,50 ¹	18,00 ¹	-	Res. 18/85	1989 a 1993	-
Fase P2	Euro 0	11,20	2,45	14,40	0,60 ¹	Res. 08/93	1994 a 1995	3.000 a 10.000 ppm
Fase P3	Euro 1	4,90	1,23	9,00	0,40 ou 0,70 ²	Res. 08/93	1996 a 1999	3.000 a 10.000 ppm
Fase P4	Euro 2	4,00	1,10	7,00	0,15	Res. 08/93	2000 a 2005	3.000 a 10.000 ppm
Fase P5	Euro 3	2,10	0,66	5,00	0,10 ou 0,13 ³	Res. 315/02	2006 a 2008	500 a 2.000 ppm
Fase P6 ⁴	Euro 4	1,50	0,46	3,50	0,02	Res. 315/02	2009 a 2012	50 ppm
Fase P7	Euro 5	1,50	0,46	2,00	0,02	Res. 403/08	a partir de 2012	10 ppm

CO	monóxido de carbono	HC	hidrocarbonetos	NOx	óxidos de nitrogênio	MP	material particulado	S	enxofre
-----------	---------------------	-----------	-----------------	------------	----------------------	-----------	----------------------	----------	---------

FONTE: A fase P7 do Proconve e o impacto no setor de transporte. – 2.ed. – Brasília: CNT: Sest/Senat, 2012.

A fase P3 entrou vigor em 1996 e estabeleceu emissão de MP em 0,70 g/kW.h para motores até 85 kW e 0,40 g/kW.h. Os limites de CO e NOx foram, respectivamente, estabelecidos em 4,90 e 9,00 g/kW.h. O nível teor de enxofre não foi alterado.

Em 2000, iniciou a fase P4 com poucas mudanças. O nível teor de enxofre foi mantido e, comparada às fases anteriores, o limite de emissões de CO e NOx tiveram reduções menos expressivas. As emissões de MP foram definidas em 0,15 g/kW.h.

A fase P5, equivalente ao Euro 3, entrou em vigor em 2006, trazendo mudanças relevantes: o teor de enxofre foi estabelecido entre 500 e 2 000 ppm; os limites de emissões de CO e NOx foram reduzidos, respectivamente, para 2,10 g/kW.h e 5,00 g/kW.h; e o MP foi estabelecido em 0,13 g/kW.h. A tecnologia embarcada nos motores eletrônicos permitiu a adequação dos motores para atender as demandas da fase P5.

Em 2009 estava prevista para entrar em vigor a fase P6, que estabeleceria uma redução rigorosa do teor de enxofre do combustível (nível máximo em 50 ppm), não entrou em vigor no Brasil. Entretanto, ficou instituído o adiantamento para 2012 do PROCONVE P7, além de estabelecer a redução do teor de enxofre para 10 ppm até 2013.

Finalmente, em 2012, entra em vigor a fase P7, equivalente a Euro 5, reduzindo os níveis de emissões de CO, NOx e MP.

Na Europa, já está em vigor a fase Euro 6. A fase equivalente está prevista para ser implantada no Brasil em 2023.

2.1

Pesquisas Relacionadas com a Tecnologia RCCI

Splitter, D. et al. (2010) investigaram a viabilidade do funcionamento de um motor IC, com tecnologia RCCI, operar com gasolina comum e com gasolina aditivada com de peróxido de di-terc-butílico (DTBP), utilizado para melhorar o número de cetano. A metodologia seguiu as seguintes etapas: na injeção (PFI) de gasolina comum; injeção (DI) de gasolina aditivada com 1,75% de volume de DTBP, representando cerca de 0,2% do abastecimento total. Verificou-se que a gasolina aditivada apresentou comportamento semelhante ao do diesel, permitindo a combustão eficiente. Os testes foram comparados com o motor operando com gasolina comum e diesel. Os resultados mostram que a maior volatilidade da gasolina permitiu uma redução na pressão de injeção (DI) de 800 bar (operando com diesel) para 400 bar (operando com gasolina aditivada). Além disso, apresentou eficiência térmica superior a 57%. As emissões de NOx e de MP em ambas operações sem pós-tratamento ficaram dentro do estipulado pela norma EPA HD 2010.

Kokjohn SL et al. (2011) compararam o funcionamento de um motor ICO convencional com um motor RCCI. O experimento consistia em submeter o motor a uma série de cargas. Para ilustrar as tendências observadas, foi utilizada uma modelagem computacional detalhada de dinâmica dos fluidos. Os resultados mostram que no motor RCCI a quantidade de NOx e de MP emitidas foram menores, além de apresentar aumento de 16,6 % na eficiência. Os resultados mostraram ainda dois fatores contribuíram para a melhoria na eficiência: redução

de perdas por transferência de calor e controle sobre o processo de início e fim da combustão.

Splitter et al. (2011) utilizaram um modelo CFD multidimensional para investigar o efeito do tempo de injeção em um motor ICO, com tecnologia RCCI de simples e dupla injeção, operando com iso-octano e com n-heptano. Os resultados mostraram que as injeções duplas proporcionam uma redução de 40% das emissões de CO e HC e um aumento de 1% no rendimento térmico.

Splitter, D. et al. (2012) realizaram um estudo experimental para explorar os efeitos da taxa de compressão e da geometria do pistão em um motor diesel com RCCI, operando em cargas entre 4 e 17 bar IMEP e velocidade angular entre 1300 e 1700 rpm. Nos experimentos foram utilizados três pistões com geometrias e taxas de compressão diferentes. De todos os modelos testados, o pistão com geometria em formato tipo banheira e com fenda reduzida apresentou a maior eficiência. Os resultados mostraram ainda que a formação de HC está relacionada com o volume de fenda, mas que otimizando a geometria do jato as emissões de HC poderiam ser reduzidas.

Scott et al. (2012) compararam o desempenho de um motor ICO de quatro cilindros, operando do modo convencional (diesel) e do modo RCCI (diesel e gasolina). Os resultados mostram que o motor operando do modo RCCI apresenta menor emissão de NOx e eficiência maior ou igual ao do motor convencional.

Hanson et al. (2012) investigaram o funcionamento de um motor ICO com tecnologia RCCI em três pontos de operação distintos, escolhidos especificamente para atender as condições estabelecidas no Federal Test Procedure (FTP) light-duty United States (US) Environment Protection Agency (EPA). Os combustíveis utilizados no experimento foram: a gasolina injetada na entrada do coletor de admissão (PFI) e o diesel injetado diretamente na câmara de combustão (DI). Os testes foram realizados no motor original de fábrica operando de forma convencional e no motor com os pistões especialmente modificados, operando com tecnologia RCCI. Os resultados mostram que, a 2600 rpm, o motor operando com pistões modificados e utilizando a tecnologia RCCI apresenta aumento na eficiência térmica de 37% para 40%. Além disso, as metas de emissões estabelecidas pela EURO IV relativas a NO e a MP foram atendidas sem a necessidade de pós-tratamento dos gases de escape.

Pohlkamp, K. and Reitz, R. (2012) compararam o funcionamento de um

conjunto motor - gerador IC Yanmar L70AE, monocilíndrico, operando com tecnologia RCCI e operando no modo convencional. Os testes foram realizados com injeção (PFI) de gasolina e injeção (DI) de diesel para 25%, 50% e 75% da carga máxima. Foram analisadas a eficiência do motor, as emissões e a estabilidade da combustão, baseado na variação dos seguintes parâmetros: temperatura do ar de admissão e do tempo de injeção (DI). Os resultados indicaram que o motor operando com tecnologia RCCI foi capaz de reduzir as emissões de NOx e MP, mas apresentou aumento nas emissões de CO e HC. Além disso, apresentou baixa eficiência operando em regime de cargas leve. Entretanto, operando com 75% de carga máxima, apresentou eficiência quase 3% maior.

Hanson e Reitz, R. (2013) investigaram o funcionamento, em regime transiente, de um motor ICO operando de duas formas: convencional, utilizando como combustível diesel de baixa concentração de enxofre; e com tecnologia RCCI, utilizando gasolina (injetada no coletor de admissão) e diesel de baixa concentração de enxofre (injetado diretamente no cilindro). Os testes mostraram que o motor com tecnologia RCCI apresentou menores emissões de MP e NOx. Em contrapartida, constataram maiores emissões de HC e de CO.

Kokjohn e Reitz (2013) realizaram testes para comparar o funcionamento de um motor ICO operando de duas formas: modo convencional, equipado com catalizador calibrado para reduzir as emissões de NOx e cumprir a meta estipulada pela norma Tier 2 Bin 5; e modo RCCI sem catalizador. Os resultados mostram que operando com tecnologia RCCI o motor foi capaz de cumprir as metas para emissões de NOx determinadas pela norma Tier 2 Bin 5. Além disso, devido à redução de perdas por meio de transferência de calor, apresentou melhoria de 4% no consumo de combustível. Verificou-se ainda que a eficiência alcançada por conta da utilização da tecnologia RCCI pode ser melhorada com a seleção das condições de operação e da configuração da câmara de combustão.

Splitter et al. (2013) utilizaram um motor ICO, monocilíndrico, adaptado para operar com tecnologia RCCI, com o objetivo de obter a máxima eficiência de um ciclo. Os testes aconteceram com e sem arrefecimento do pistão. Os resultados mostraram que a eficiência diminuiu quando o motor opera com arrefecimento do pistão. Ao passo que, no modo RCCI sem arrefecimento do pistão, a eficiência aumentou e as taxas de emissões de NOx e MP ficaram próximas de zero.

Walker, N. et al. (2013) compararam a performance e as emissões de um

motor ICO, monocilíndrico, operando no modo RCCI com pistão original e modificado. Os testes seguiram a seguinte metodologia: gasolina injetada no coletor de admissão; diesel injetado diretamente na câmara de combustão, por meio de um injetor de baixa pressão (150 - 200 bar) e outro de alta pressão (200 - 500 bar); início de injeção (SOI) variando de -35° a -115 do TDC. Os resultados experimentais mostram que o motor RCCI com pistão original apresenta desempenho e emissões semelhantes ao motor operando no modo convencional, mas com ligeiras reduções na eficiência quando se injeta a baixa pressão. Operando no modo RCCI com pistão otimizado foi possível alcançar desempenho e emissões equivalente ao motor operando em modo convencional, mesmo utilizando o sistema de injeção de baixa pressão. Além disso, foram observados aumentos significativos na eficiência térmica, superiores a 47%.

Hanson et al. (2013) compararam o desempenho de um motor ICO com tecnologia RCCI utilizando como combustíveis (E20 + ULSD), (gasolina + ULSD), (E20 + B20) e (gasolina + B20). Os testes foram realizados de acordo com as normas US EPA FTP. A metodologia dos experimentos consistia na injeção (PFI) de E20 e na de injeção (DI) de ULSD ou B20. Os resultados preliminares mostram que, com (E20 + ULSD), a carga de pico foi elevada de 8 para 10 bar BMEP, a taxa de aumento de pressão foi reduzida e a eficiência térmica aumentou 5% se comparada com (gasolina + ULSD). Os resultados mostram ainda que utilizando (E20 + B20) e (gasolina + B20) houve aumento na eficiência de combustão com o motor operando com cargas baixas.

Dempsey, A. et al. (2013) utilizaram um motor IC monocilíndrico com tecnologia RCCI, operando com duas combinações de combustível: (gasolina-diesel) e (álcool-diesel). Os testes ocorreram com a seguinte metodologia: motor operando a uma velocidade angular de 1500 a 2300 rpm; IMEP de 3,5 a 17 bar; utilizando pistão original e modificado. Os resultados mostram que utilizando o pistão original ambas as combinações de combustível foram capazes de alcançar valores baixos de NOx e MP, eficiência de 48%. No entanto, em condições de carga leves apresentaram baixa eficiência. Utilizando o pistão modificado a eficiência melhorou nas operações com cargas leves. Ao longo de toda a carga e da faixa de velocidade angular, o pistão modificado apresentou baixos índices de emissões de NOx e de PM, com eficiência de quase 51%.

Jesús Benajes et al. (2014) utilizou um motor ICO, monocilíndrico, abastecido com gasolina e diesel para verificar o processo de autoignição da mistura ar – combustível. Os testes apresentam os seguintes resultados: a combustão começa com a autoignição do diesel injetado no cilindro contendo mistura de ar e gasolina; a propagação da chama no diesel nas zonas de gasolina começa depois do aumento da temperatura e da pressão; à medida que a razão diesel/gasolina é reduzida, o atraso na ignição aumenta; observa-se redução de NO_x e MP se comparado aos resultados obtidos com o motor operando apenas o óleo diesel.

Lim, J. et al. (2014) analisaram a operação de um motor ICO utilizando tecnologia RCCI, abastecido misturas de iso-octano e de n-heptano. Os resultados mostram que: as emissões de NO_x diminuem à medida que a velocidade do motor aumenta; o controle da combustão é maior nas rotações mais elevadas (3000 rpm); a capacidade de controle de combustão permitiu adiantar a injeção, aumentando o tempo para misturar o combustível e, conseqüentemente, diminuiu as emissões MP e de CO.

Hanson et al. (2014) compararam o funcionamento, em regime transiente, de um motor ICO com EGR, funcionando de forma convencional e com tecnologia RCCI. Os testes ocorreram com carga constante de 2 bar, numa faixa de rotação de 1000 a 2000 rpm. A metodologia dos experimentos consistia na injeção (PFI) de gasolina e na de injeção (DI) de ULSD, nos testes com RCCI; e, nos testes com motor convencional, na injeção (DI) de ULSD. Os resultados mostram que o motor com tecnologia RCCI apresentou emissões de NO_x e de MP significativamente mais baixas se comparado ao motor funcionando no modo convencional.

Doosje, E. et al. (2014) analisaram o funcionamento de um motor diesel-GNV de 6 cilindros, operando com tecnologia RCCI, abastecido com diesel-GNV. Os testes ocorreram na faixa de 1200 a 1800 rpm, sem EGR e com pressão BMEP entre 2 e 9 bar. Os resultados mostram que o motor apresentou emissões de NO_x e MP dentro dos padrões exigidos pela norma Euro VI. A eficiência térmica foi equivalente ou melhor que dos motores ICO operando no modo convencional.

Lim e Reitz (2014) fizeram uma simulação computacional para demonstrar a eficácia da utilização de dupla injeção direta para controlar a combustão em um motor ICO com tecnologia RCCI. O objetivo do estudo era encontrar o tempo de injeção e a fração em massa, entre as múltiplas injeções, que diminuísse o consumo específico de combustível e que minimizassem as emissões de MP, NO_x, CO e HC.

Os resultados mostram que a pressão média indicada (IMEP) alcançada, por meio da dupla injeção direta, foi de 21 bar e que os melhores resultados ocorreram para uma taxa de pico de pressão de 12.6 bar/grau, pressão máxima 158 bar, e eficiência térmica indicada de 48,7%.

Dempsey, A., et al. (2014) estudaram a emissão de particulados provenientes de um motor General Motors 1.9L ZDTH, quatro cilindros operando com tecnologia RCCI. Os testes foram realizados com injeção (PFI) de gasolina e injeção (DI) de diesel com pistões modificados para funcionar com pré-mistura. A metodologia do experimento consistiu em medir: as distribuições de tamanho de partícula; a concentração total de partículas nos gases de escape utilizando filtros de membrana; e as emissões. A coleta de amostra das emissões de partículas e gases foi realizada antes e depois de um catalisador de oxidação a diesel (DOC). Verificou-se que, em baixas cargas de operação o MP é composto principalmente de espécies orgânicas voláteis e semi-voláteis de combustível não queimado; e, em cargas mais elevadas do motor, a concentração bruta de MP é ultrabaixa. Foi observado ainda que partículas com 30nm foram reduzidas significativamente por meio do DOC, enquanto as partículas maiores foram reduzidas em menor escala. Os resultados mostram aumento nas emissões de NOx totais; modificação na relação NO₂/NOx causada pelo catalisador; e que um DOC pode ser eficaz na redução de MP de compostos voláteis.

Dahodwala, M., et al. (2014) investigaram as emissões e o desempenho de um motor IC, operando no modo convencional (diesel) e com tecnologia RCCI (diesel e gás natural veicular - GNV) com o objetivo de verificar a capacidade de substituição de diesel por GNV. Foi observado que, sem efetuar qualquer ajuste ou calibração no motor, a substituição do diesel pelo GNC estava limitada por: elevadas emissões de HC, instabilidade na combustão; picos pressão no interior do cilindro e temperatura dos gases de exaustão. Com a aplicação EGR os resultados mostram: obtenção de níveis mais elevados de substituição de diesel pelo GNV; maior estabilidade de combustão; redução simultânea das emissões de NOx e PM. Os testes revelaram ainda que a utilização de GNV pode elevar as emissões de HC, que consistem principalmente de metano (CH₄).

Zhang, Y. et al. (2014) utilizaram um motor ICO monocilíndrico de quatro tempos, operando no modo convencional, no HCCI e no RCCI com o objetivo de comparar a distribuição de tamanho das partículas nos gases de exaustão. Para

estudar a influência das partículas voláteis, as medições foram realizadas com e sem o removedor de partículas voláteis (*thermodenuder*). Os resultados mostram que, na operação convencional, foram obtidas as maiores emissões de partículas de tamanho superior a 23 nm. Operando com tecnologia RCCI, a quantidade de partículas é maior se comparadas com a tecnologia HCCI. Este resultado indica que a injeção direta de combustível e a não uniformidade de distribuição de combustível dentro do cilindro pode contribuir para particulado gerado. Tanto a tecnologia RCCI quanto a HCCI apresentam um alto número de partículas sub-23 nm, mesmo quando a diluição elevada é usada em conjunto com o *thermodenuder*.

Zoldak, P. et al. (2014) realizaram um estudo computacional em um motor diesel IC HD 15L com tecnologia RCCI abastecido com diesel e GNV, com a finalidade de examinar as emissões de poluentes, consumo de combustível, pico pressão no cilindro e máxima taxa de aumento da pressão no cilindro. Os resultados do modelo indicam que o motor, operando com tecnologia RCCI, tem potencial de reduzir o NOx em 17,5%, o MP em 78%, e o consumo de combustível em 24% aplicando a estratégia de dupla injeção. Além de gerar, no interior do cilindro, níveis admissíveis de máxima taxa de aumento de pressão e pico de pressão.

Zegarra, F. (2016) utilizou uma máquina de compressão rápida (MCR), simulando um motor ICO com finalidade de: investigar combustíveis possíveis substituir o óleo diesel; avaliar produtos melhoradores da autoignição do etanol para substituir o óleo diesel; determinar valores percentuais dos componentes nas misturas de etanol e melhoradores da autoignição; e identificar novas técnicas de injeção. Nos testes foram empregados o óleo diesel S50, o etanol, misturas de etanol e polietilenoglicol 400 e 600, n-butanol e etanol aditivado (ED95).

Os resultados revelaram que, comparado ao Diesel S50, os combustíveis, à base da mistura de etanol e aditivos melhoradores da autoignição (ED95), não podem ser utilizados diretamente em um processo de ignição por compressão sem que a taxa de compressão seja aumentada. Além disso, a pressão de injeção no bico injetor do combustível ED95 tem que ser maior para alcançar a mesma quantidade de energia. Os resultados mostram ainda que o n-butanol, com uma participação de 10% na mistura, pode ser utilizado como melhorador da autoignição do etanol em sistemas de ignição por compressão.