

Estudo Comparativo entre os Principais Sistemas de Injeção de Combustível Diesel em relação as Resoluções Brasileiras de Emissões de Poluentes Atuais e Futuras

(Comparison Study Between the Main Diesel Fuel Injection Systems in Relation the Brazilian Pollutant Emissions Resolution)

Anderson Sicka de Oliveira

Julio César Lodetti

Resumo

Este trabalho aborda o estudo comparativo entre os principais sistemas de injeção de combustível Diesel (para veículos comerciais médios e pesados) em relação as resoluções brasileiras de emissões de poluentes atuais e futuras, com o objetivo de identificar quais os sistemas mais promissores para esta questão. Visando cumprir com este objetivo proposto, foram desenvolvidos ao longo deste trabalho, o estudo bibliográfico a respeito do que são os motores de combustão interna ciclo Diesel (Ignição por compressão), o que são sistemas de injeção de combustível Diesel, os principais tipos existentes, seus principais parâmetros e quais as resoluções brasileiras atuais e futuras para emissão de poluentes para este tipo de motor. Com isto, na etapa de metodologia, foi realizado o agrupamento das informações e parâmetros estudados referentes a estes itens, possibilitando desta forma, a realização do estudo comparativo entre os sistemas, onde a partir da análise dos resultados deste estudo, foi possível concluir que os sistemas mais promissores em relação as resoluções de emissões de poluentes atuais e futuras, são os sistemas: de Unidade Injetora, de Bomba Unitária e Common Rail. A partir disto, foi possível concluir que o objetivo geral foi atingido.

Palavras-chave: Motor Diesel, Sistemas de Injeção de Combustível, Emissões de Poluentes.

Abstract: *This work deals with the comparative study of the main Diesel fuel injection systems (for medium and heavy-duty commercial vehicles) in relation to current and future Brazilian pollutant emission resolutions, in order to identify the most promising systems for this issue. To comply with this proposed objective, it was developed a bibliographical study about what are the Diesel internal combustion engines (compression ignition), what are the Diesel fuel injection systems, the main types existing, its main parameters and which are the current and future Brazilian resolutions for emission of pollutants for this type of engine. From this, in the methodology stage, the information and parameters studied were grouped in relation to these items, thus enabling a comparative study between the systems, where from the analysis of the results of this study, it was possible to conclude that the most promising systems for current and future pollutant emission resolutions are: the Unit Injector System, the Unit Pump System and the Common Rail system. From this, it was possible to conclude that the main objective was achieved.*

Key-words: Diesel Engine, Fuel Injection Systems, Pollutant Emissions

1. Introdução

Com normas de limites de emissão de gases, resultantes da combustão, cada vez mais rígidas, é extremamente necessário que as montadoras invistam de forma progressiva na pesquisa e desenvolvimento de soluções, que visem atualizar os sistemas que compõe o *powertrain*, visando minimizar emissão destes gases.

Um sistema que foi amplamente atualizado ao longo do tempo, foi o sistema de injeção de combustível, direcionando a pesquisa para motores do ciclo de compressão (Diesel) aplicados a veículos comerciais (médios e pesados), surge a seguinte problemática: **quais os principais tipos de sistemas de injeção de combustível que foram utilizados ao longo do tempo até os dias atuais e quais destes, em relação as resoluções de emissões, são os mais promissores?**

O objetivo geral deste trabalho é realizar um estudo comparativo dos principais tipos de sistemas de injeção de combustíveis (Diesel), frente as resoluções de limites emissões de gases de exaustão atuais e futuras, visando identificar os sistemas mais promissores.

Para obter êxito no objetivo geral definido, torna-se necessário concluir algumas etapas, para isto, define-se os seguintes objetivos específicos:

- Realizar estudo bibliográfico a respeito do que são motores de combustão interna do ciclo Diesel;
- Realizar estudo bibliográfico a respeito do que são os sistemas de injeção de combustível Diesel;
- Realizar estudo bibliográfico a respeito de quais os principais tipos de sistema de injeção de combustível Diesel existentes e suas particularidades;
- Realizar estudo sobre resoluções de emissões de gases de exaustão atuais e futuras e o que definem;
- Estudo comparativo entre os sistemas de injeção que serão estudados;
- Análise dos dados e resultados;
- Conclusões.

2. Referencial Teórico

Neste tópico serão detalhados todos os fundamentos necessários para obter-se compreensão e/ou noções básicas a respeito do tema principal deste artigo. Desta forma busca-se, através do mesmo, fundamentar o que são motores ciclo Diesel (os motores de ignição por compressão serão chamados desta forma ao longo deste trabalho), o que são sistemas de injeção de combustível (em motores deste ciclo), quais são os tipos de sistemas de injeção existentes e quais são as regulamentações, no âmbito de emissões de gases, para este tipo de motor.

Sendo assim, no primeiro item abordado neste tópico, será detalhado o que é um motor ciclo Diesel, breve histórico acerca do mesmo e quais são as suas particularidades e sistemas que lhe compõem.

2.1. Motor Ciclo Diesel

O motor ciclo Diesel, foi inventado pelo engenheiro alemão Rudolf Diesel, onde sua criação herdou seu próprio sobrenome. Inicialmente Diesel inventou um motor teórico a partir dos ensinamentos da termodinâmica de Carnot, porém necessitou rever seus fundamentos de desenvolvimento para que a sua construção fosse possível e rentável [1].

Primeiramente definiu que a combustão ocorrendo a temperatura constante seria a com maior rendimento, porém em 1893, Diesel propõe o ciclo de pressão constante, que mesmo com um rendimento menor, ainda era superior ao do motor a gás. No ano de 1895, um protótipo de seu motor, funcionou com uma eficiência de 16% e em 1897, após aperfeiçoamentos, atingiu o marco de 26,2%. Os primeiros motores Diesel foram vendidos em 1898 por M.A.N. e Krupp, empresas que apoiaram o seu desenvolvimento, mas que encontraram grandes dificuldades com a manutenção das máquinas vendidas [1].

O motor ciclo Diesel, é um motor de combustão interna de movimento alternativo. É um tipo de motor onde o FA (fluido ativo - é uma substância, formada pela mistura de ar e combustível e produtos da combustão, que através de uma sequência de trabalhos realizados sobre ela, resulta na obtenção de trabalho) participa diretamente da combustão e é chamado “alternativo” devido aos movimentos alternados (“vaivém”) de seus pistões. Em outras palavras é um motor onde os processos realizados no combustível (FA) geram energia que resulta em trabalho (movimento alternativo de seus pistões) [2].

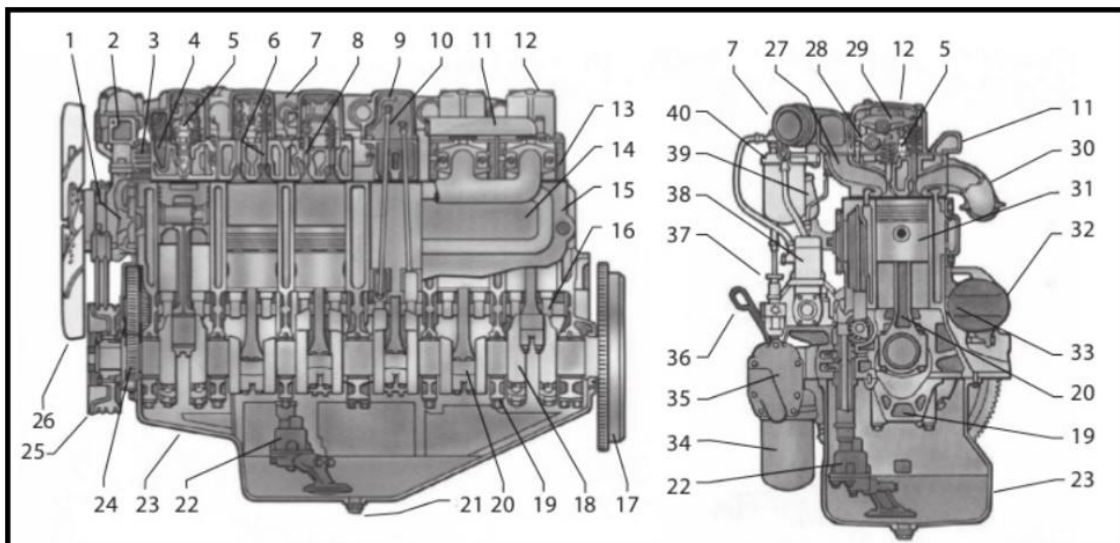


Figura 1. Motor de Combustão Interna (MCI)

Fonte: [2]

Na figura 1 está ilustrado um motor de combustão interna, com a identificação através de números, de cada um dos itens principais que compõem este motor. Na tabela 1, estão dispostas as descrições de cada um destes itens.

1. Bomba d' água	11. Duto de água	21. Bujão do carter	31. Pistão
2. Válvula termostática	12. Tampa de válvula	22. Bomba de óleo	32. Motor de partida
3. Compressor de ar	13. Cabeçote	23. Cáster	33. Dreno de água
4. Duto de admissão	14. Tampa lateral	24. Engrenagem do virabrequim	34. Filtro de óleo
5. Injetor de combustível	15. Bloco	25. Amortecedor vibracional	35. Radiador de óleo
6. Válvula de escapamento	16. Eixo comando de válvulas	26. Ventilador	36. Vareta de nível de óleo
7. Coletor de admissão	17. Volante	27. Duto de admissão	37. Bomba manual de combustível
8. Válvula de admissão	18. Virabrequim	28. Balancim da válvula de admissão	38. Bomba injetora de combustível
9. Linha de combustível	19. Capa de mancal	29. Balancim da válvula de escapamento	39. Respiro do Cáster
10. Haste de válvula	20. Biela	30. Coletor de escapamento	40. Filtro de combustível

Tabela 1. Descrição dos componentes do MCI
Fonte de dados: [2]

O motor Diesel é, por definição, um motor de ignição por compressão, não possuindo sistema de preparação de mistura e nem sistema de ignição. Neste tipo de motor é inicialmente aspirado o ar para o interior do cilindro, após este processo, o ar é submetido à elevada pressão, atingindo altas temperaturas (suficiente para inflamação do combustível), atingidas no final da fase de compressão, posteriormente sendo injetado o combustível de maneira específica, que nestas condições, entra em ignição, sem a necessidade de agente externo [1].

Segundo Brunetti [2], nesses motores (Diesel), somente o ar é comprimido pelo pistão no interior do cilindro, até que o mesmo atinja elevadas temperaturas. Quando o pistão está próximo de atingir o PMS (Ponto morto superior), o combustível é injetado e reage espontaneamente com o oxigênio presente no ar quente, não sendo necessário que ocorra uma faísca para a inflamação. A temperatura necessária para que ocorra a reação de combustão denomina-se “temperatura de autoignição”.

A figura 2 demonstra a posição em que se encontram o PMS (Ponto morto superior) e o PMI (Ponto morto inferior) no motor.

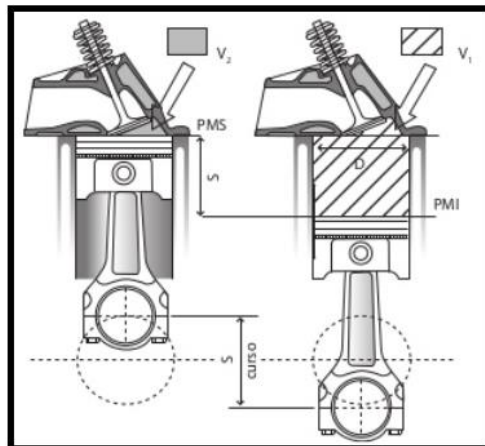


Figura 2. Posições do PMI e PMS
Fonte: [2]

Segundo Tillmann [3], para que este processo de transformação da energia, proveniente dos combustíveis, em trabalho mecânico se realize de forma eficiente, são necessários alguns sistemas. Estes sistemas complementares são:

- a) Sistema de alimentação de ar.
- b) Sistema de alimentação de combustível.
- c) Sistema de arrefecimento.
- d) Sistema de lubrificação.
- e) Sistema elétrico.

Cada um destes sistemas possui função específica no processo de transformação de energia e no funcionamento do MCI e de acordo com o tema proposto neste trabalho, serão abordados apenas detalhes e características do sistema de alimentação de combustível nos motores Diesel.

Este sistema de alimentação de combustível é responsável por garantir o abastecimento do motor, garantindo que a injeção deste combustível, dentro do cilindro, ocorra na quantidade correta, no momento exato e com a pressão necessária para que o processo de combustão ocorra com a maior eficiência possível [3].

Conforme o que foi exposto neste tópico, foi possível ter noções básicas a respeito do histórico, funcionamento básico e os sistemas que compõem os motores de ciclo Diesel, nos tópicos a seguir será dado um enfoque no sistema de injeção de combustível destes motores, o qual faz parte do sistema de alimentação.

2.2. Sistemas de Injeção de Combustível Diesel

O sistema de injeção de combustível, nos motores Diesel, é responsável por alimentar o motor com combustível. Para que isto ocorra, faz-se necessário principalmente, a existência de uma bomba injetora, que é o componente que produz a pressão necessária para que ocorra a injeção de maneira eficiente. Neste sistema, através do tubo de pressão, o combustível é enviado ao bico injetor e posteriormente injetado na câmara de combustão [4].

Segundo Conceição [5] este sistema surgiu a partir de uma necessidade existente no período inicial da invenção do motor Diesel. Este motor apresentava um inconveniente: não atingia altas rotações, devido a necessidade em que a câmara de combustão possuía, de que o combustível fosse injetado na quantidade e no momento correto. Em meados de 1923, Robert Bosch apresentou uma solução que vinha a sanar este problema, um sistema de injeção em que o combustível era injetado de maneira pulverizada, através de pressão na câmara de combustão do motor.

Em 1927, após diversos testes e validações, a primeira bomba injetora Bosch, para motores ciclo Diesel saiu da fábrica, vindo a resolver os inconvenientes relacionados a injeção de combustível, uma grande contribuição para a consolidação e sucesso deste tipo de motor [5].

Basicamente, os componentes que fazem parte do sistema de injeção Diesel são: tanque de combustível, filtro de combustível, bomba alimentadora de combustível, bomba injetora, tubos de pressão, bico injetor, regulagem de rotação e regulagem do início da injeção (quando necessária). Na figura 3 estão ilustrados de maneira básica alguns destes componentes que fazem parte de um sistema de injeção para motores ciclo Diesel [4].

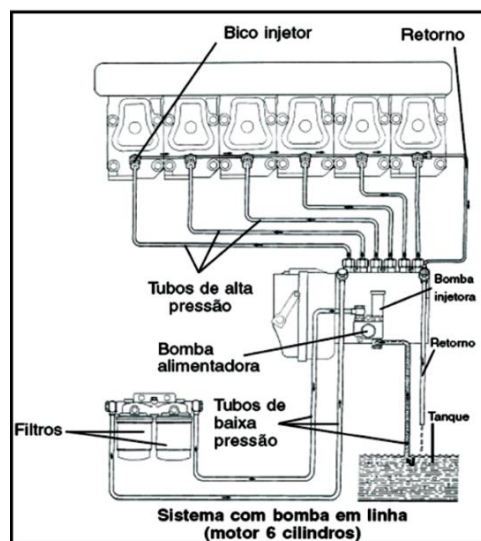


Figura 3. Sistema de Injeção de Combustível com Bomba em Linha

Fonte: Adaptado de MWM Internacional Motores [6]

O processo de combustão no motor Diesel, relacionado com outros fatores como: o desempenho do motor, o consumo de combustível, composição dos gases de escape e ruído da combustão, dependem em grande parte de como a mistura ar/combustível é preparada. A atuação do sistema de injeção é decisiva para a qualidade desta mistura, sendo os principais parâmetros de influência: o início da injeção, a curva da taxa de descarga e duração da injeção, a pressão da injeção e o número de injeções realizadas [7].

2.2.1. Parâmetros de injeção

Neste tópico serão abordados detalhes a respeito dos parâmetros de injeção que têm influência na performance do motor e conseqüentemente na eficiência frente a emissões de gases de exaustão.

2.2.1.1. Início da injeção

O ponto em que a injeção de combustível inicia, dentro do cilindro do motor, tem um efeito decisivo sobre o início da combustão da mistura ar/combustível e desta forma possui grande influência sobre níveis de emissão, consumo de combustível e ruído da combustão. Sendo assim este é um parâmetro de grande importância na otimização das características de performance do motor [7].

O “início da injeção” especifica a posição em graus de rotação do virabrequim em relação ao ponto morto superior (PMS) em que o bico injetor abre e injeta o combustível dentro da câmara de combustão do motor [7].

A posição em que o pistão se encontra em relação ao PMS – graus de rotação do virabrequim – irá influenciar no fluxo, densidade e temperatura do ar dentro da câmara de combustão, sendo desta forma, o início da injeção muito importante para a qualidade da mistura do ar com o combustível. Afetando as emissões de fuligem, óxidos de nitrogênio (NOx), hidrocarbonetos não queimados (HC) e monóxido de carbono (CO) [7].

O ajuste dos pontos de início da injeção varia de acordo com a velocidade, carga e temperatura do motor. Após definir/encontrar os valores mais otimizados para cada estratégia do motor, estes são armazenados em um mapa, do programa de início da injeção, conforme ilustra a figura 4, que demonstra a variação do ponto de início da injeção conforme a carga do motor [7].

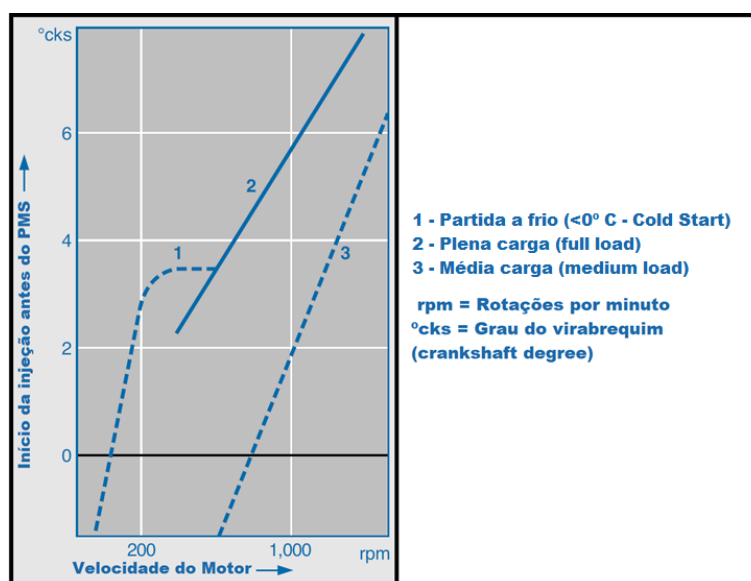


Figura 4. Exemplo de mapa de início da injeção para diferentes cargas do motor

Fonte: Adaptado de *Diesel Engine Management Systems and Components* [7]

Comparado com os sistemas controlados por came) os sistemas *common rail* (estes sistemas estarão demonstrados no tópico 2.3.) são os que trazem maior liberdade e flexibilidade para selecionar o momento e a quantidade de eventos de injeção que irão ocorrer em cada ciclo de combustão do motor, assim como a pressão destas injeções. Isto devido a possibilidade de realizar a gestão da geração de pressão separada do mecanismo de injeção de combustível (sistemas desacoplados), possibilitando parâmetros otimizados para cada ponto de operação do motor [7].

2.2.1.2. Início da entrega

Além do início da injeção, outro fator que também é considerado, é o início da entrega de combustível da bomba para o bico injetor. Este parâmetro tem grande importância para sistemas mais antigos, acionados por came [7].

O tempo relativo ou de alinhamento entre o motor e a bomba injetora é regulado pelo início da entrega, por ser mais “fácil” de definir do que o tempo real do início da injeção. É possível realizar este tipo de regulagem porque existe uma relação definida entre início da entrega e início da injeção, também chamada “atraso de injeção” (injection lag - tempo ou ângulo do virabrequim percorrido do início da entrega até o início da injeção) [7].

O atraso da injeção é resultado do tempo que leva para a onda de pressão percorrer o trajeto da bomba injetora até o bico injetor. Em diferentes velocidades do motor, existe um atraso de injeção diferente medido no ângulo do virabrequim (grau de rotação do virabrequim). Em velocidades maiores, o motor possui também um maior “atraso de ignição” (*ignition lag* - tempo ou ângulo do virabrequim percorrido do início da injeção até o início da ignição). Estes dois efeitos devem ser compensados, por este motivo o sistema de injeção deve possuir capacidade de ajustar o início da entrega/início da injeção conforme a velocidade, carga e temperatura do motor [7].

2.2.1.3. Taxa de descarga de combustível

A curva de taxa de descarga descreve o fluxo de massa de combustível em relação ao tempo de injeção dentro do cilindro do motor ao longo da duração do processo de injeção de combustível [7]

2.2.1.3.1. Curva da taxa de descarga em sistemas acionados por cames

Nos sistemas de injeção onde a bomba injetora é comandada/acionada por cames, a pressão é desenvolvida continuamente ao longo do processo de injeção de combustível. Neste tipo de sistema, a velocidade da bomba tem influência direta na taxa de entrega de combustível e consequentemente na pressão de injeção. Sistemas de injeção com bombas em linha ou distribuidoras, controladas mecanicamente, não permitem a realização de “pré-injeção” (*pilot injection*), sendo possível apenas em bombas distribuidoras controladas com válvulas solenoides [7], estes tipos de sistemas serão detalhados em tópicos seguintes (tópico 2.3).

A geração de pressão e a quantidade de combustível injetado são parâmetros interligados pelo came e pela bomba de injeção nos sistemas acionados por came. Isto causa os seguintes impactos nas características de injeção: a pressão de injeção se eleva na medida que a velocidade do motor e a quantidade de combustível injetado aumentam, até atingir a pressão máxima; a pressão de injeção aumenta no início da injeção, porém diminui novamente para o nível de pressão de fechamento do bico injetor, antes do final da injeção. As consequências destas características da injeção são: em baixa pressão, pequenas quantidades de combustível são injetadas; a curva da taxa de descarga apresenta forma aproximadamente triangular [7].

Esta curva triangular, desde que atinja crescimento de pouca profundidade, promove a combustão em carga parcial e com baixas velocidades do motor, sendo assim proporciona uma combustão mais silenciosa, entretanto quando o motor está em plena carga, esta curva não é tão favorável quanto a curva quadrada, que alcança melhor eficiência do ar [7].

2.2.1.3.2. Curva da taxa de descarga em sistemas *common rail*

Neste sistema a bomba de alta pressão gera acúmulo de pressão independentemente do ciclo de injeção. A pressão de injeção durante o processo de injeção é praticamente constante, conforme exemplifica a figura 5. Em determinada pressão do sistema, a quantidade de combustível injetada é proporcional a duração de tempo em que o injetor permanece aberto, não possuindo dependência da velocidade do motor e/ou da bomba. O resultado disto é uma curva da taxa de descarga quase quadrada, a qual se intensifica com injeções de curta duração e quase constantes, alta velocidade do spray de injeção a plena carga, permitindo maior potência de saída específica [7].

Entretanto, devido à alta pressão no início da injeção, grandes quantidades de combustível são injetadas durante o período de atraso de ignição o que não é benéfico para a questão de ruído de combustão. Mas como o sistema *common rail* possibilita até dois eventos de pré-injeção, a câmara de combustão pode ser pré-condicionada, o que diminuirá o atraso de ignição, possibilitando o alcance de menores níveis de emissão de ruído possível [7].

Sendo os bicos injetores acionados e/ou abertos pela unidade de controle eletrônica os parâmetros de início da injeção, duração da injeção e pressão de injeção são livremente ajustáveis para os vários pontos operacionais a qual o motor for destinado. Estes parâmetros são controlados pela unidade de controle Diesel (EDC – Eletronic Diesel Control), a qual realiza o balanceamento da quantidade de combustível injetada e distribui para cada um dos bicos injetores por meio da compensação de entrega de injeção (*Injection delivery compensation*). Os sistemas *common rail*, equipados com o sistema de injeção piezoelétrico, possibilitam realizar até cinco eventos de injeção de combustível, durante um ciclo de energia do motor [7].

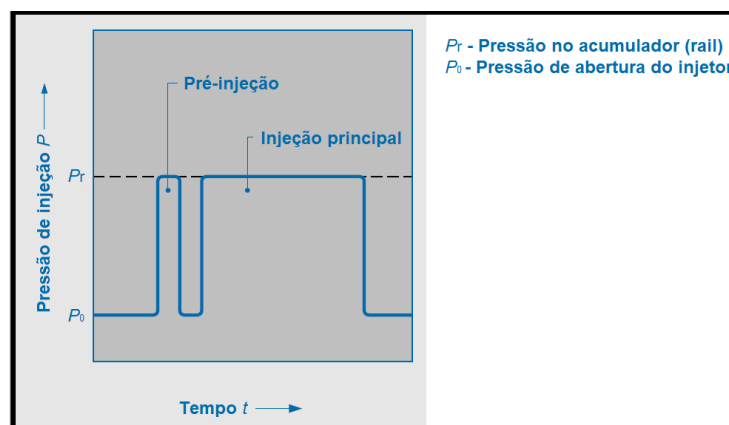


Figura 5. Ilustração de curva de pressão de injeção no sistema *common rail*
Fonte: Adaptado de *Diesel Engine Management Systems and Components* [7]

2.2.1.4. Pressão de Injeção

O processo de injeção de combustível utiliza pressão no sistema para expelir o fluxo de combustível através dos bicos injetores. A alta pressão do sistema, resulta em uma alta taxa de vazão no bico. Devido a colisão do jato turbulento com o ar presente na câmara de combustão, ocorre a atomização do combustível. Portanto, quanto maior a velocidade relativa entre combustível e ar e maior a densidade do ar, mais combustível é eficientemente atomizado [7].

Nos motores de injeção direta, o combustível deve ser injetado a alta pressão devido ao baixo fluxo de ar existente dentro da câmara de combustão. Os sistemas de injeção modernos, geram pico de pressões de 1000 até 2200 bar (unidade de medida para pressão) para veículos comerciais. Porém a maioria destes sistemas possui a pressão de pico disponível apenas em velocidades altas do motor, com exceção do sistema *common rail* [7].

Para se obter uma curva de torque ideal, com produção de baixa fumaça (baixa emissão de material particulado) deve-se utilizar sistema que disponibilize uma pressão de injeção relativamente alta para o processo de combustão em baixas velocidades e plena carga do motor. Sendo a densidade do ar baixa na câmara de combustão quando o motor se encontra em baixas rotações, a pressão de injeção deve ser limitada para evitar o depósito de combustível nas paredes do cilindro. Quando o motor está operando em média-alta rotação, a pressão de ar fica disponível, podendo ser aplicada a pressão máxima de injeção. Para que se obtenha boa eficiência, o combustível deve ser injetado dentro de uma variação específica de ângulos do virabrequim, dependendo da velocidade do motor em ambos os lados do PMS. Em altas velocidades do motor, são necessárias altas pressões para que seja possível encurtar a duração da injeção [7].

2.2.1.5. Funções e/ou Estratégias de Injeção

Dependendo da aplicação a qual o motor Diesel for destinado, tomam-se necessárias adotar algumas estratégias referente a eventos e posição de injeção, sendo estas (os itens numerados no texto abaixo, referem-se a figura 6) [7]:

- Pré-injeção (*Pre-injection / pilot injection*): representada pelo número “1”, esta função de injeção reduz as emissões de NO_x e ruído da combustão, particularmente em motores DI.
- Curva de pressão positiva – injeção principal: representado pelo número “3”, este tipo de injeção principal reduz as emissões de NO_x nos motores Diesel sem recirculação de gases de escape (EGR – Exhaust Gas Recirculation).
- Curva de pressão de dois estágios: representada pelo número “4”, durante a injeção principal esta função reduz as emissões de NO_x e de fuligem em motores sem EGR.
- Alta pressão constante: esta função na injeção principal, reduz as emissões de fuligem em motores com EGR, está representada pelos números “3” e “7”.
- Injeção secundária avançada (*post injection*): esta função, representada pelo número “8”, reduz as emissões de fuligem.
- Injeção secundária retardada (*post injection*): representada pelo número “9” esta função é aplicada para realizar a regeneração dos sistemas de pós tratamento.

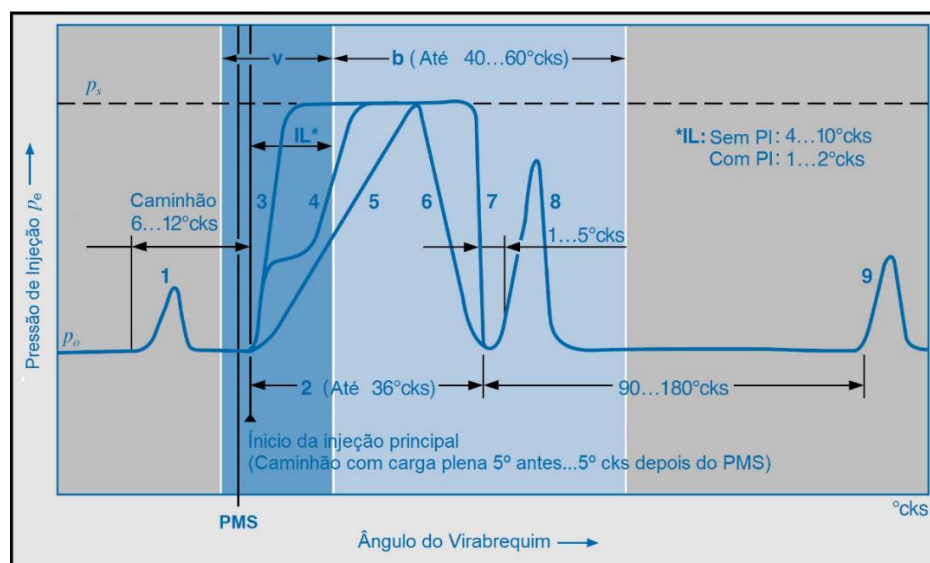


Figura 6. Ilustração de estratégias de eventos e posições de injeção
Fonte: Adaptado de *Diesel Engine Management Systems and Components* [7]

	<ul style="list-style-type: none"> • Ajustes destinados a baixos níveis de NO_x requerem o início da injeção próximo ao PMS. • O atraso de injeção (IL – Ignition lag) varia conforme o sistema de injeção.
1	Pré-injeção
2	Injeção principal
3	Curva de pressão abrupta (Sistema <i>common rail</i>)
4	“Boot-shaped” (Forma de bota) curva de aumento de pressão em sistema de bomba unitária (UPS) com válvula solenoide de abertura em 2 estágios
5	Curva de pressão gradual (Injeção convencional)
6	Curva de queda de pressão plana (Bombas injetoras em linha ou distribuidoras)
7	Queda de pressão acentuada (Bomba unitária (UPS), Unidade injetora (UIS), ligeiramente menos íngreme com <i>common rail</i>)
8	Injeção secundária avançada
9	Injeção secundária retardada
P _s	Pressão de pico
P _o	Pressão de abertura do bico injetor
b	Duração da combustão para a fase de injeção principal
v	Duração da combustão para a fase de pré-injeção
IL	Atraso de injeção (IL – <i>Injection lag</i>) da injeção principal
PI	Pré-injeção
°cks	Ângulo rotacional do virabrequim em relação ao PMS

Tabela 2. Legenda da figura 6

Fonte de dados: [7]

2.2.1.5.1. Pré-injeção

Com a aplicação de uma pequena quantidade de combustível aplicada a fase de compressão, os níveis de temperatura e pressão no cilindro aumentam no momento da injeção principal, isto faz com que o atraso de ignição diminua, trazendo benefícios em relação ao ruído de combustão, porém ao mesmo tempo, a quantidade de combustível queimado aumenta. Isto acaba aumentando as emissões de fuligem e NO_x, devido à alta temperatura prevalecendo no cilindro [7].

Por outro lado, a temperatura elevada na câmara de combustão traz benefícios, principalmente nos pontos de partida a frio e carga baixa, estabilizando a combustão e reduzindo as emissões de HC e CO. Dependendo do ponto de operação do motor, uma boa harmonização entre emissões de NO_x e ruído podem ser obtidas com o ajuste do intervalo entre pré-injeção e injeção principal e com a medição da quantidade de combustível injetado na pré-injeção [7].

2.2.1.5.2. Injeção secundária retardada

Com a injeção de combustível neste ponto, o mesmo não entra em combustão, mas é evaporado com o calor existente nos gases de exaustão. A fase da injeção secundária é após a injeção principal, durante o ciclo de expansão ou de exaustão com um ângulo rotacional no virabrequim de até 200° após o PMS (Ponto morto superior). O combustível é injetado nos gases de exaustão com precisão em relação a quantidade e o resultado da mistura é expelido para o sistema de escapamento [7].

A injeção secundária retardada, é utilizada principalmente para prover hidrocarbonetos os quais causam um aumento na temperatura do gás de exaustão por oxidação em um conversor catalítico. Esta estratégia é utilizada para realizar a regeneração dos sistemas de tratamento dos gases de exaustão, como os filtros de particulados ou filtros catalíticos do tipo acumuladores para NO_x [7].

2.2.1.5.3. Injeção secundária avançada

Para os sistemas *common rail*, este tipo de injeção pode ser utilizada logo após a injeção principal, enquanto a combustão ainda está ocorrendo no cilindro. Desta forma, partículas de fuligem são queimadas, reduzindo as emissões de fuligem de 20% a 70% [7].

Conforme visto nos tópicos anteriores os parâmetros de injeção possuem grande influência sobre a performance do motor Diesel. A partir disto serão demonstrados nos tópicos a seguir, as particularidades dos sistemas de injeção existentes.

2.3. Principais Tipos de Sistemas de Injeção de Combustível Diesel

As principais diferenças entre os sistemas de injeção Diesel existentes, estão no sistema de geração de alta pressão, no sistema de controle de início da injeção e na duração da injeção. É interessante ressaltar que o controle mecânico destes aspectos somente é mantido em sistemas antigos, sendo que nos dias atuais, a utilização em geral é do sistema de controle eletrônico [7].

Os principais tipos de sistemas existentes são: [7]

- Sistema de bomba injetora em linha (*In-line fuel-injection pumps*);
 - Bomba injetora em linha padrão;
 - Bomba injetora em linha com bucha de controle;
- Sistema de bomba distribuidora (*Distributor injection pumps*);
 - Bomba distribuidora axial;
 - Bomba distribuidora radial;
- Sistema de unidade injetora (*Unit Injector System (UIS)*);
- Sistema de bomba unitária (*Unit Pump System (UPS)*);
- Sistema *common-rail* (*Common-Rail system (CRS)*).

2.3.1. Sistema de Bomba Injetora em Linha

Neste tipo de bomba a injeção é controlada pelo governador (*governor*, mecanismo de controle da bomba), pela hélice do êmbolo e pela bucha de controle (nas bombas que possuem), determinando através de suas dimensões, geometrias e design, parâmetros como o tempo e a quantidade de combustível injetada. Existem diversos tipos de bombas em linha, como ilustra a figura 7, para atender motores com capacidades cúbicas diferentes. As pressões destes tipos de sistema, na região de alta pressão, ou seja, do bico injetor, variam de 600 a 1300 bar (mencionar unidade nas referências). Um exemplo, é a bomba tipo “A” (figura 7), utilizada em motores de pequena e média capacidade, podem atingir pressão de 750 bar, com sua estrutura mecânica reforçada [8].

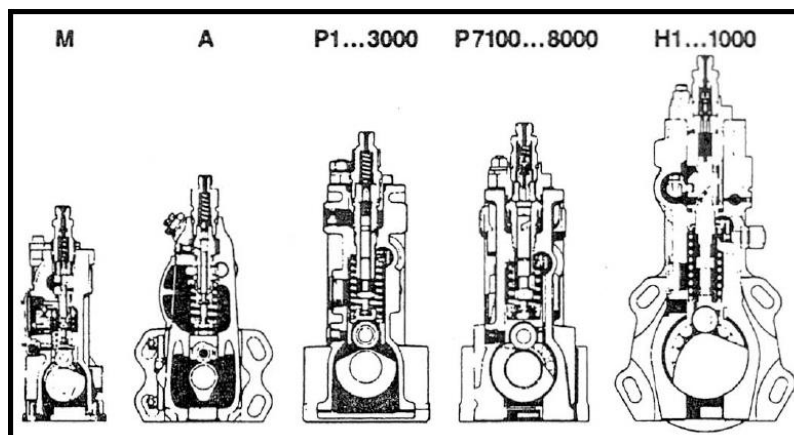


Figura 7. Tipos de bombas injetoras em linha Bosch
Fonte: KRIEGER, K., HUMMEL, H., and NAIK, L. [8]

2.3.1.1. Bomba Injetora em Linha Padrão

Esta bomba possui em seu mecanismo, posicionados em linha, um “elemento de bombeamento” (êmbolo e camisa) para cada cilindro do motor. Onde o movimento de avanço dos êmbolos é controlado a partir do eixo de cames/comando da bomba e o retorno é realizado através das molas que compõe cada elemento de bombeamento [9].

Durante o movimento de ascensão do êmbolo, a porta de alimentação é fechada pelo seu corpo e a partir deste instante o combustível começa a ser pressurizado na camisa da bomba e entregue para a tubulação de alta pressão que liga a bomba ao bico injetor. Como o bico injetor opera através de pressão controlada, no momento em que o combustível atinge a pressão de abertura regulada, o mesmo se abre e inicia a injeção no o motor. O processo de alimentação se encerra no momento em que o êmbolo atinge a posição na qual a hélice inclinada – canal presente no êmbolo – se alinha com a porta de retorno, permitindo assim a passagem de combustível e conseqüentemente alívio da pressão e fechamento do bico injetor [9].

O curso efetivo do elemento de bombeamento é o curso do êmbolo após realizar o fechamento do canal de alimentação, até a abertura do canal de retorno (contato com a hélice). O curso efetivo, assim como a quantidade de combustível injetada, pode variar usando o controle rotacional do êmbolo, através da cremalheira [9].

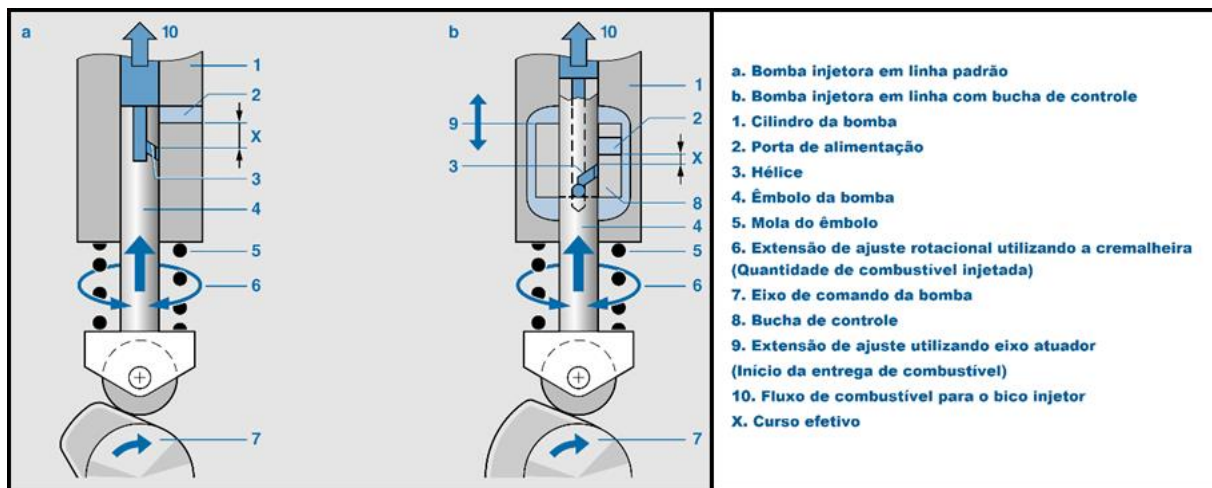


Figura 8. Bomba injetora em linha

Fonte: Adaptado de *Diesel Engine Management Systems and Components* [7]

Para controlar a quantidade de combustível injetada o êmbolo da bomba é rotacionado a partir da cremalheira de comando como um fator da carga e aceleração do motor. Essa rotação do êmbolo, altera a posição da hélice em relação a saída/entrada de combustível, alterando também o curso efetivo do mesmo. A cremalheira de comando é controlada por um governador (*governor*) mecânico ou via atuador elétrico. As bombas que atuam segundo este princípio, são chamadas “controladas por porta” (*port-controlled*) [9].

2.3.1.2. Bomba Injetora em Linha com Bucha de Controle

Este tipo de bomba, possui os mesmos princípios da bomba em linha padrão, diferenciando-se por possuir uma bucha de controle (item 8 – figura 8) no êmbolo, a qual controla e ajusta o curso para o fechamento da porta de entrada, através de um eixo atuador, o qual controla o início da entrega de combustível para o bico injetor [7].

Neste sistema com bucha de controle, a quantidade de combustível entregue e o início da injeção, podem ser livremente definidas através de mapas (parâmetros de regulagem e ajuste para diferentes condições de trabalho do motor) em motores diesel de veículos comerciais. Solenoides lineares controlam eletronicamente estes parâmetros de injeção e com um range (extensão / curso) pré-determinado a bucha de controle ajusta o início da injeção nos êmbolos da bomba. Esta bucha permite melhorar a fase de partida e aquecimento do motor, reduzindo o nível de emissões de poluentes e o consumo de combustível [8].

Todas as bombas em linha com bucha de controle são comandadas eletronicamente. A quantidade de combustível injetada e o momento de início da injeção são ajustados de acordo com parâmetros calculados. Já na bomba injetora em linha padrão, o início da injeção depende da aceleração do motor [7].

2.3.2. Sistema de Bomba Distribuidora

As bombas distribuidoras foram inicialmente desenvolvidas para veículos de passageiros, equipados com motores com pré câmara de combustão (IDI), a fim de permitir o máximo de funções no menor espaço possível. Mais tarde foi destinada tanto para motores IDI (injeção indireta) quanto para motores DI (injeção direta) de até 200 cv (unidade de potência) e seis cilindros. O pico normal de pressão nos bicos injetores deste tipo de sistema, dependendo da carga e velocidade, varia entre 150 a 300 bar para motores IDI e 200 a 1200 bar para motores DI [8].

Estas bombas possuem basicamente dois tipos de controle, o mecânico, realizado via regulador/governador (*governor*) mecânico, ou eletronicamente via dispositivo de temporização. Este tipo de bomba possui apenas um conjunto de êmbolo-cilindro (*plunger-and-barrel*) para todos os cilindros do motor [10].

2.3.2.1. Sistema de bomba distribuidora axial

Neste sistema existe apenas um “elemento de bombeamento” (êmbolo e camisa) para todos os cilindros do motor. O avanço do êmbolo é pilotado através da placa e/ou disco de cames a qual é acionada através do eixo de cames/comando do motor. O número de ressaltos na placa de cames – que são os componentes que acionam o avanço do êmbolo – é igual ao número de cilindros do motor (≤ 6) [9].

Para acionar o avanço do êmbolo a placa de cames gira sobre um anel de rolos, o que faz com que os ressaltos, quando em contato com os rolos, gere o movimento longitudinal de acionamento. O movimento do êmbolo realiza

a abertura e fechamento das portas de combustível, sendo desta forma o seu fluxo direcionado para as saídas referentes a cada cilindro do motor [9].

O êmbolo realiza movimento axial através da placa de cames, realizando a compressão e pressurização e entrega do combustível para os bicos injetores, os quais se abrem e alimentam e/ou realizam a entrega para o motor. O curso efetivo do conjunto e também a quantidade de combustível injetada é ajustada através da bucha de controle e o momento de início da entrega, varia conforme a regulagem realizada pelo mecanismo temporizador, que rotaciona o anel de rolos em relação a placa de cames [9].

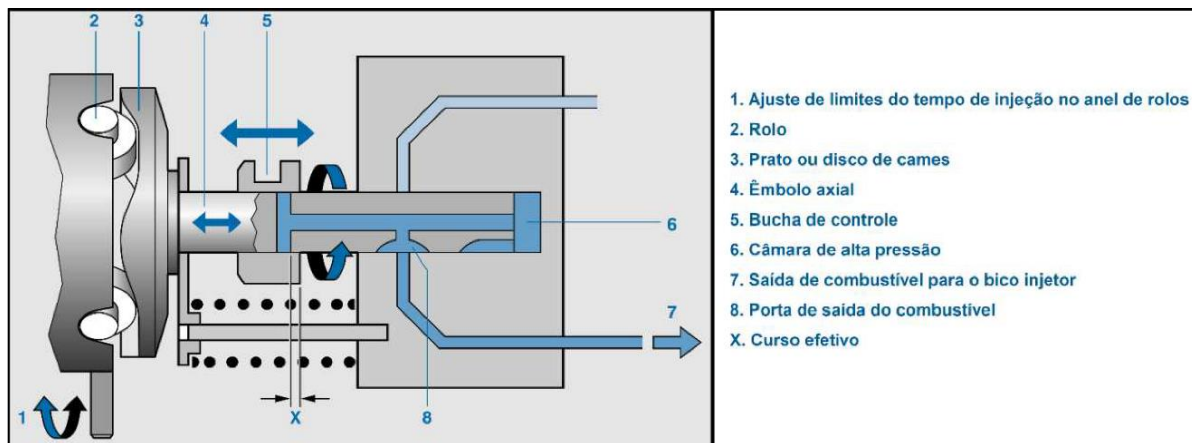


Figura 9. Bomba distribuidora axial

Fonte: Adaptado de *Diesel Engine Management Systems and Components* [7]

2.3.2.1.1. Bomba distribuidora axial com válvula solenoide de controle

Este tipo de bomba possui o mesmo conceito de pressurização encontrado no tópico anterior. Os componentes mais relevantes neste sistema, que se diferem dos anteriores são: válvula solenoide de alta pressão e sensor de ângulo de rotação e unidade de controle da bomba [9].

Para um controle mais preciso da quantidade de combustível, a bomba injetora é equipada com sua própria unidade de controle, montada na bomba. Separando as funções do motor das do veículo, possibilitando um armazenamento individual de mapas para cada uma das aplicações da bomba [9].

Esta bomba possui o mesmo princípio das bombas distribuidoras “mecânicas”, com a diferença de possuir uma válvula solenoide de alta pressão ao invés da bucha de controle. Neste tipo de bomba, a pressão no bico injetor pode chegar a 1400 bar e caso a bomba apresente algum defeito, o diagnóstico ocorre em sua própria unidade de controle, sendo relatado como um “status da bomba” para a unidade de controle do motor [9].

2.3.2.2. Sistema de bomba distribuidora radial com válvula solenoide de controle

O sistema de injeção por bomba distribuidora radial, é assim chamado pois possui êmbolos de movimentos radiais que realizam a compressão e pressurização do combustível e assim como no sistema com bomba axial, possui uma placa de cames, porém neste sistema, os ressaltos acionam os êmbolos no sentido radial, fazendo com que ocorra um movimento partindo da região externa para a interna. O número de êmbolos varia entre um ou dois pares de êmbolos ou três êmbolos independentes [9].

A placa de cames deste sistema, assim como no de bomba axial, possui o número de ressaltos igual ao número de cilindros do motor. Os rolos dos êmbolos que comandam o seu movimento, e fazem parte de um êmbolo distribuidor, pilotado pelo eixo do motor. Os rolos entram em contato com os ressaltos da placa de cames e transmitem o movimento para os êmbolos radiais, realizando assim o bombeamento a partir da compressão do combustível no centro do êmbolo principal, que realiza a distribuição do combustível para os bicos injetores [9].

O êmbolo principal realiza a abertura e fechamento das portas de alimentação, o controle da quantidade e início da entrega de combustível é realizado a partir de uma válvula solenoide, enquanto esta válvula se encontra fechada, o sistema realiza a pressurização do combustível [9].

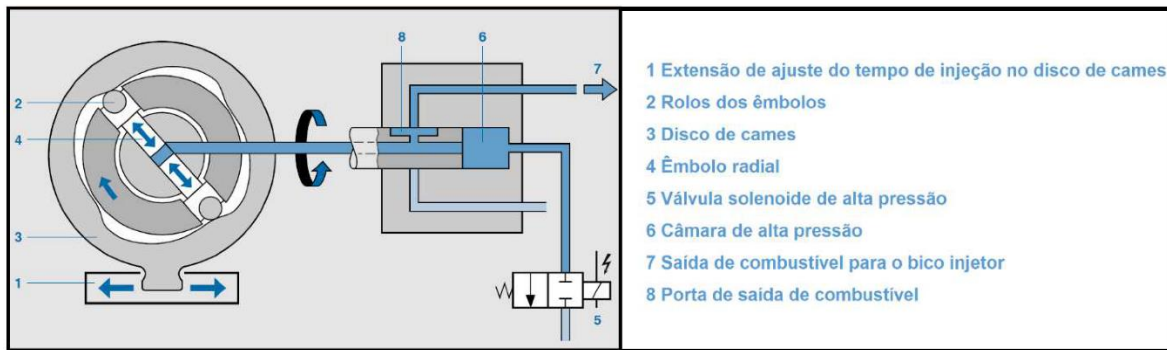


Figura 10. Bomba distribuidora radial

Fonte: Adaptado de *Diesel Engine Management Systems and Components* [7]

Este tipo de bomba foi comumente aplicado em motores 4 e 6 cilindros desde 1996, atinge pressões de até 1000 bar na própria bomba, mas a onda de pressão gerada na linha/tubulação de alta pressão é utilizada para aumentar a pressão no bico, atingindo até 1800 bar [8].

Esta bomba é acionada pelo eixo de manivelas (virabrequim) do motor e a sua rotação é metade da rotação do virabrequim, a pressão é gerada por dois ou três êmbolos radiais, pilotados por rolos que ficam em movimento sobre um anel de cames fixo. O combustível é mesurado e controlado por meio de uma válvula solenoide. A válvula solenoide é pilotada por um sinal para a quantidade de combustível e por outro para a o tempo de início da injeção ambos gerados pela Unidade de Controle da Bomba (PCU), a qual controla todas as funções de injeção. A bomba é sincronizada com o motor a partir de um sensor que detecta quatro pontos de referência a cada rotação do virabrequim e transmite o sinal para a PCU da ECU [8].

2.3.3. Sistema de Unidade Injetora (*Unit Injector System (UIS)*)

Este tipo de sistema possui uma unidade injetora integrada ao cabeçote para cada um dos cilindros do motor. A unidade injetora é acionada através de eixo de cames/comando do motor por meio de cames ou balancins de rolos [9]

Quando o sistema é acionado pelo eixo de comando, o êmbolo realiza movimento e gera a pressurização do combustível no corpo da unidade, este fluido se pressuriza em um canal ligado diretamente ao bico injetor, o qual faz parte deste conjunto, não existindo tubulação de alta pressão entre o bico e a bomba. O início e a quantidade de combustível injetado, são controlados através de uma válvula solenoide de alta velocidade, o acionamento desta válvula é controlado através de uma unidade de controle eletrônico (ECU). O movimento de retorno do êmbolo de bombeamento, após finalizar a alimentação do motor, é acionado através de mola [9].

O sistema UIS está no mercado desde 1994 e por possuir esta vantagem de não necessitar de linha de alta pressão, o sistema suporta pressões extremamente altas, chegando até 2200 bar. Isto gera um aumento na eficiência e queda nos níveis de emissão do motor [11].

Este sistema trabalha com bico injetor controlado por válvula solenoide de alta velocidade, a qual é acionada eletronicamente, podendo trabalhar com pré-injeção (*pilot injection*). É empregado principalmente em veículos comerciais médios e pesados, permitindo alto torque mesmo em velocidades baixas do motor [11].

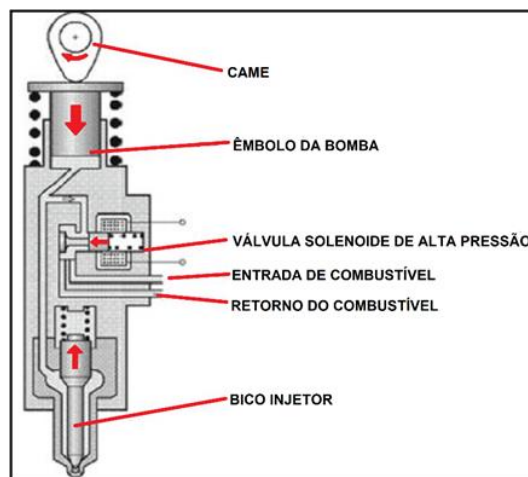


Figura 11. Unidade Injetora

Fonte: Adaptado de *Handbook of Diesel Engines* [9]

2.3.4. Sistema de bomba unitária (*Unit Pump System (UPS)*)

Este sistema foi desenvolvido especialmente para veículos comerciais. A sua produção em série foi iniciada no ano de 1995. A UPS é integrada por uma válvula solenoide de alta velocidade, sendo conectada a um porta injetor convencional através de “curta” linha / tubulação de alta pressão, permitindo através desta construção, pressões de até 2200 bar [11].

Este sistema possui um conjunto de bombeamento (bomba, linha de alta pressão e porta bico injetor) para cada um dos cilindros do motor, o seu acionamento é realizado através do eixo de cames/comando do motor e o controle do tempo de injeção é comandado através de válvula solenoide de alta pressão [9].

Por ser acionada diretamente pelo eixo de comando do motor, a alta taxa de entrega da bomba garante um aumento contínuo na pressão ao longo de toda a duração do processo de injeção de combustível. As válvulas solenoides deste sistema são comandadas pela ECU, a qual controla o início e a duração da injeção de combustível, adaptando-se as condições de operação do motor e as capacidades específicas dos cilindros [11].

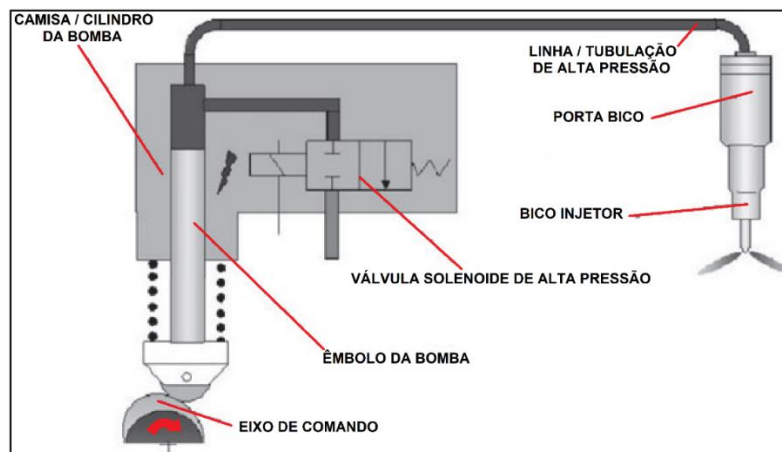


Figura 12. Bomba Unitária

Fonte: Adaptado de *Handbook of Diesel Engines* [9]

2.3.5. Sistema *common-rail* (*Common-Rail System (CRS)*)

Até o ponto de invenção deste sistema, o grande alvo era alcançar flexibilidade na injeção de combustível para motores DI permitindo um mapeamento livre do início da injeção, quantidade de combustível, pressão de injeção e taxa de injeção. Todos os sistemas descritos anteriormente geravam a pressão de injeção separadamente para cada evento de injeção. Através do princípio de funcionamento por cames, onde a pressão de injeção aumentava com o aumento da quantidade de combustível e de velocidade do motor. Tendo também a característica de a pressão ser baixa no intervalo entre as injeções [8].

Em contraste com relação aos sistemas anteriores, a geração de pressão e o sistema de injeção são desacoplados no sistema *common rail*. Independentemente da velocidade do motor e a quantidade de combustível injetada, são mantidos níveis de pressões ajustáveis – com determinados limites – no acumulador, que consiste no *rail* e nos tubos de alta pressão interligados aos injetores. A quantidade de combustível necessária em cada um dos cilindros é extraída deste acumulador [8].

A operação deste sistema funciona basicamente da seguinte forma: uma bomba alimentadora, transporta o combustível do tanque para a bomba de alta pressão, após isto, esta bomba de alta pressão, que é acionada pelo motor, entrega combustível, através do acumulador para os bicos injetores de cada um dos cilindros. Uma parte deste combustível é injetada na câmara de combustão do motor e uma pequena parte do volume, controle o bico injetor e então retorna para o tanque. O volume de combustível mantido entre a bomba de alta pressão e os injetores, serve como acumulador [8].

O combustível é compressível e amortece as oscilações provenientes da entrega pulsante vinda da bomba de alta pressão e da extração abrupta de combustível por parte dos injetores. Um sensor afere a pressão do combustível no *rail* e este sinal é comparado com um valor “desejável” armazenado na ECU. Se o valor aferido for diferente do valor desejado, um orifício de alívio no regulador de pressão do lado de alta pressão é aberto ou fechado. O combustível excedente retorna para o tanque. O que foi descrito, explica a primeira geração do sistema *Common Rail (CRS – Common Rail System)* produzido pela Bosch [8].

Esta separação “funcional” entre o sistema de geração de pressão e os injetores, permite maiores estratégias no projeto do método de combustão. A pressão de injeção pode ser selecionada livremente através do mapa e permanece amplamente constante ao longo do processo de injeção. A maior pressão na primeira geração deste sistema varia entre 1350 a 1600 bar, dependendo do tipo da bomba de alta pressão [8].

Os injetores são abertos e fechados via comando da ECU, por quantas vezes forem parametrizadas. A duração da injeção, a pressão do combustível no *rail* e na área de fluxo do injetor, determinam a quantidade de combustível injetada [8].

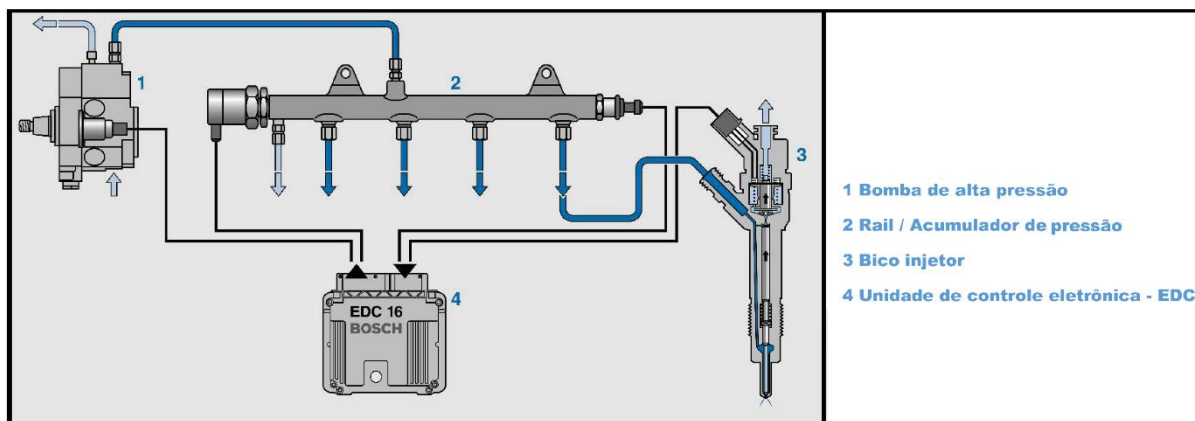


Figura 13. Sistema *Common Rail*

Fonte: Adaptado de *Diesel Engine Management Systems and Components* [7]

Geração	Identificação	Máxima pressão no <i>Rail</i>	Início da produção
1ª	CRSN1	1400 bar	1999
		1600 bar	2001
2ª	CRSN2	1600 bar	2001
3ª	CRSN3-18	1800 bar	2005
	CRSN3-20 ¹	2000 bar	-
	CRSN3-22 ¹	2200 bar	2007
	CRSN3-25 ¹	2500 bar	2013
4ª	CRSN4-21 ²	2100 bar	2008
	CRSN-4-25	2500 bar	2012

Tabela 3. Gerações sistema *Common Rail*

Fonte de dados: *Common Rail System* [12]

O sistema *common rail*, possui a capacidade de múltiplas injeções estáveis, incluindo pré-injeções (*pilot injection*) e “pós-injeções” (injeções secundárias / *post injections*). Com o passar do tempo, os sistemas foram se tornando cada vez mais flexíveis neste aspecto de múltiplas injeções, permitindo mais de uma pré-injeção e mais de uma pós-injeção também, possibilitando atuar com estratégias de injeções muito antecipadas, muito tardias ou com o mínimo intervalo de tempo possível entre pré-injeção, injeção principal e pós-injeção. É importante mencionar neste ponto, que alguns sistemas eletrônicos de bombas unitárias e unidades injetoras, permitem múltiplas injeções também [12].

2.4. Resoluções de emissões no Brasil

Segundo CNT [13] a preocupação com a qualidade do ar nos centros urbanos do Brasil, fez com que o CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) criasse em 1986, o Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE). Este programa foi instituído pela resolução nº 18/86, tendo por objetivo reduzir as emissões de poluentes em veículos novos, por meio de implantação de fases progressivas que exigem que as indústrias automotivas reduzam o nível de emissões nos veículos a serem disponibilizados no mercado [13].

As fases da resolução são classificadas conforme o tipo do veículo. Para veículos pesados (ciclo Diesel), as fases possuem a nomenclatura “P” e para os veículos leves (ciclo Otto), as fases possuem nomenclatura “L”, tratando separadamente os limites de emissões para cada uma das categorias [13].

Para veículos pesados, o Brasil está na fase “P7”, que está em aplicação desde janeiro do ano de 2012, sendo que a fase “P6” não entrou em vigor, seguindo-se diretamente para esta fase atual. Os limites de emissão para esta fase “P7” equivalem aos níveis definidos pelos países europeus na regulamentação conhecida como “Euro 5” [13].

Para cumprir com os limites estabelecidos pelas fases da regulamentação implementadas ao longo do tempo, a indústria automotiva teve de investir na evolução e desenvolvimento de tecnologias para redução de emissão de poluentes, sendo exemplo de algumas destas: os catalisadores, que fazem parte dos sistemas de pós-tratamento de

gases na exaustão e os sistemas de injeção, que através da otimização da combustão e do processo de queima do combustível, resultam na redução da emissão de poluentes. A figura 14, demonstra a evolução dos limites de emissão, que foram sendo implementados através das fases para veículos pesados, da resolução do PROCONVE ao longo do tempo [13].

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

1. Não foram exigidos legalmente.
2. 0,70 para motores até 85 kW e 0,40 para motores com mais de 85 kW.
3. Motores com cilindrada unitária inferior a 0,75 dm³ e rotação à potência nominal superior a 3.000 RPM.
4. Não entrou em vigor na data prevista.

Figura 13. Sistema *Common Rail*
Fonte: Adaptado de CNT [13]

2.4.1. Evolução dos motores ciclo Diesel x fases do PROCONVE

Conforme ilustra a figura 14, para atender as fases P3 e P4 (Equivalentes a Euro I e II) do PROCONVE, os motores Diesel utilizavam sistema de bomba injetora de alta pressão, turbo e *intercooler*. Para a fase P5 (Euro III), conforme a demanda de emissões, foi necessária a evolução da tecnologia a ponto de realizar a aplicação de módulos eletrônicos de controle e sistemas de injeção, com pressão ainda mais elevada. E na evolução mais recente, para atender a fase P7 (Euro V), os motores Diesel aperfeiçoaram o sistema de pós-tratamento de gases de exaustão, utilizando sistema de SCR (Selective Catalytic Reduction – sistema de redução catalítica seletiva), Injeção de ureia (Arla 32) e EGR (Exhaust Gas Recirculation – sistema de recirculação de gases de exaustão), variando na combinação de um ou todos os sistemas, dependendo da estratégia da montadora, em relação aos níveis de emissão requeridos e performance, porém tornam-se extremamente necessárias a utilização de um ou mais destes sistemas de pós tratamento para atender aos limites de emissões definidos pelas resoluções vigentes [14].

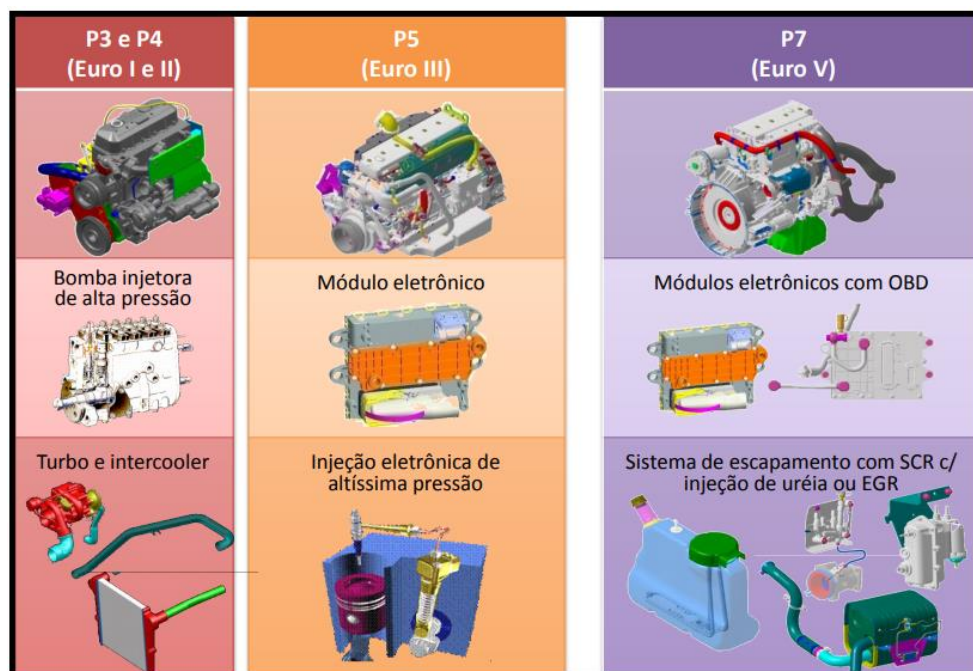


Figura 14. Evolução dos sistemas e motores para atender as fases do PROCONVE
Fonte: Adaptado de Ventura [14]

2.4.2. Limites de emissões para o futuro

No dia 21 de novembro de 2018, o Conama publicou a resolução 490, que estabelece a oitava fase do PROCONVE, ou seja, “P8”, baseada na norma internacional “Euro 6”. Esta resolução define novos limites, estabelecidos pela norma europeia para emissão de poluentes por ônibus, caminhões e demais veículos comerciais Diesel [15].

Esta resolução era amplamente esperada, visto que a última norma adotada (Euro 5 – PROCONVE P7) foi no ano de 2012. Todos os veículos comerciais pesados do país, deverão atender aos limites estabelecidos pelo PROCONVE P8 a partir de janeiro de 2023, mas os novos projetos de caminhões e ônibus, deverão seguir o que prevê a legislação já a partir de janeiro de 2022 [15].

Esta resolução também determina a homologação de veículos através de testes em situação de tráfego real, com avaliações considerando condições de velocidade, topografia, trajetos urbanos, rodoviários e rurais, com registro obrigatório de emissões de CO₂ (dióxido de carbono) e consumo de combustível [15].

A PROCONVE P8 estabelece também que os veículos homologados, deverão continuar apresentando níveis de emissões similares por longo período de uso e serão testados por amostragem em laboratórios credenciados pelo Ibama [15].

Este período em que os veículos devem manter os níveis, é diferenciado conforme características de peso dos mesmos, sendo [15]:

- Veículos destinados a transporte de passageiros com peso bruto total (PBT) de até 5 toneladas terão de manter níveis similares de emissão por 160 mil quilômetros (km) ou 5 anos;
- Os veículos de carga de 3,8 a 16 toneladas de PBT ou veículos de passageiros acima de 5 toneladas, deverão manter os níveis de emissão por 300 mil km ou 6 anos;
- Os veículos de carga acima de 16 toneladas de PBT ou veículos de passageiros acima de 7,5 toneladas, deverão manter níveis similares de emissão por 700 mil km ou 7 anos.

Os novos limites referentes a emissões, estabelecidos para nova fase do PROCONVE (PROCONVE P8), podem ser encontrados na resolução CONAMA N° 490/2018.

3. Metodologia

Nesta etapa foram desenvolvidos estudos comparativos entre os aspectos detalhados no referencial teórico (tópico 2), com base no que foi detalhado em cada um dos itens deste tópico, foi possível captar as características específicas e dados que possibilitaram realizar a comparação entre os sistemas de injeção de combustível Diesel.

Para tornar-se possível realizar a comparação a qual detalhou quais dos sistemas são mais adequados frente as regulamentações de emissões, foram desenvolvidas, primeiramente, tabelas para realizar o agrupamento de informações referente a cada aspecto necessário para a comparação, com a seguinte sequência:

- a) Inicialmente foi desenvolvida uma tabela agrupando dados dos parâmetros de injeção que foram listados no tópico 2.2.1., detalhando a influência dos mesmos em aspectos relacionados a emissões;
- b) Após isto foi desenvolvida tabela agrupando detalhes de como cada sistema de injeção, entre os estudados, trabalha com os parâmetros de injeção;
- c) Na sequência, foi desenvolvida outra tabela para detalhar de maneira visível, quais os componentes de emissão cada um dos parâmetros de injeção influencia;
- d) A partir do agrupamento de todos os dados nestas tabelas anteriores, foi desenvolvida a tabela de comparação entre os sistemas de injeção frente aos componentes de emissão regulamentados.

3.1. Dados dos parâmetros de injeção

A partir do que foi detalhado no tópico de “parâmetros de injeção” (2.2.1.), foi desenvolvida uma tabela contendo dados referentes ao efeito causado por cada um dos parâmetros de injeção estudados, no motor Diesel, dando ênfase nos detalhes de influência nas emissões provenientes da combustão. A seguir está detalhada a tabela 4, contendo o que foi descrito.

(continua)

Parâmetro de Injeção	Características
Início da Injeção	* Grande importância na qualidade da mistura ar/combustível e na performance do motor; * Influência nos níveis de emissões de fuligem, óxidos de nitrogênio (NO _x), hidrocarbonetos não queimados (HC) e monóxido de carbono (CO);
Início da entrega	* Parâmetro de regulagem entre motor e bomba injetora em alguns sistemas; * Influência na qualidade da mistura ar/combustível e na performance do motor; * Influência no início da injeção, devido ao atraso de injeção (<i>injeciton lag</i>)

(conclusão)

Taxa de descarga de combustível	* Em sistemas onde a bomba injetora é comandada por cames, a velocidade do motor e da bomba têm influência direta neste parâmetro e conseqüentemente na pressão de injeção; * A taxa de descarga e momento em que ela é realizada – posição/tempo e carga em que o motor se encontra – têm influência direta na emissão de ruídos, na qualidade da mistura ar/combustível e conseqüentemente na performance do motor;
Pressão de injeção	* Parâmetro crucial para a atomização do combustível, quanto mais alto o pico de pressão alcançado, melhor a atomização e conseqüentemente a eficiência da mistura ar/combustível. Quanto maior o pico de pressão, menor a emissão de material particulado.
Estratégias de múltiplas injeções	
Pré-injeção	*Influência da performance de emissões de ruído e NO _x
Injeção Principal	*Quando possui curva de pressão “positiva” melhora a performance de emissões de NO _x em motores sem EGR.
Injeção com curva de pressão em dois estágios (item 4, figura 6, tópico 2.2.1.5.)	*Melhora a performance de emissão de NO _x e fuligem em motores sem EGR.
Injeção de pressão alta e constante (item 3 e 7, figura 6, tópico 2.2.1.5.)	*Função ocorre na injeção principal, reduz os níveis de emissões de fuligem em motores com EGR.
Injeção secundária avançada	*Reduz os níveis de emissão de fuligem.
Injeção secundária retardada	*Regeneração dos sistemas de pós tratamento de gases de exaustão.

Tabela 4. Efeitos dos parâmetros de injeção

3.2. Dados dos sistemas de injeção de combustível Diesel

Após detalhar a tabela 4, contendo os parâmetros de injeção, os mesmos foram tomados como base para filtrar informações referentes a como cada sistema de injeção, dos detalhados no tópico “Principais Tipos de Sistemas de Injeção de Combustível Diesel” (2.3.), tratam e/ou realizam a gestão destes parâmetros, na tabela a seguir (tabela 5), foram agrupados estes dados.

(continua)

SISTEMAS	CARACTERÍSTICAS					
	Geração de Pressão	Início da Entrega	Início da Injeção	Pressão Máxima	Múltiplas Injeções	Controle da Quantidade
Bomba em linha padrão	Através de movimento de êmbolo (acionado por eixo de came) na camisa da bomba, existindo 1 para cada cilindro do motor	Realizada mecanicamente no momento em que o corpo do êmbolo faz o fechamento da porta de alimentação presente na camisa da bomba	Ocorre no momento em que a pressão do combustível, presente na linha de alta pressão, atinge o nível de pressão de abertura do bico injetor	Varia entre os modelos e aplicações de cada bomba em linha padrão, partindo de 600 até 1300 bar	Este tipo de sistema (<i>port-controlled</i>), não permite múltiplas injeções	Controle mecânico, sendo diretamente influenciada pela pressão, velocidade e carga do motor e da bomba injetora. Ajustada com a rotação do êmbolo.
Bomba em linha com bucha de controle	Mesmo princípio da bomba "1"	Controle eletrônico, através da variação da posição da bucha de controle, qual ajusta a posição em que ocorre o fechamento da porta de alimentação, definindo assim o início da entrega	Controlado eletronicamente. O princípio de abertura do bico é o mesmo, porém, como o início da injeção é controlado através do início da entrega, o controle deste é efetuado eletronicamente	Mesmos valores da bomba em linha padrão	Este tipo de sistema (<i>port-controlled</i>), não permite múltiplas injeções	Controle é realizado eletronicamente por parâmetros pré estabelecidos, sendo ajustado pela bucha de controle.

(conclusão)

Bomba distribuidora axial	Gera Através do movimento de um único êmbolo principal para todos os cilindros do motor. Este êmbolo é acionado através de placa/disco de cames, que ao girar sobre um anel de rolos, origina o movimento.	O êmbolo, através de seu movimento, realiza o fechamento das portas de alimentação e inicia a entrega e direciona o combustível para a saída do respectivo cilindro do motor. O ajuste do início da entrega é realizado através da regulagem do anel de rolos	Depende do mecanismo de controle, porém o ajuste é realizado através da regulagem do anel de rolos	Depende do tipo do sistema, varia de 200 a 1200 bar	Este tipo de sistema (<i>port-controlled</i>), não permite múltiplas injeções	O controle da quantidade de combustível injetada é realizada através da bucha de controle, que define o curso efetivo do sistema
Bomba distribuidora axial com válvula solenoide de controle	Mesmo princípio da bomba distribuidora axial	Princípio de funcionamento igual ao da bomba distribuidora axial, porém o ajuste do início da entrega é controlado eletronicamente por válvula solenoide de alta pressão	Controlado pela válvula solenoide de alta pressão que comanda o início da injeção	Mesmo valor da bomba distribuidora axial	Este sistema permite “pré-injeção”	Controlado eletronicamente e por válvula de alta pressão
Bomba distribuidora radial com válvula solenoide de controle	O sistema possui uma placa/disco de cames que impulsiona os rolos presentes em cada êmbolo, os quais realizam movimento no sentido radial, gerando pressão no êmbolo central, que se movimenta e distribui o combustível pressurizado	Regulado através da placa/disco de cames por dispositivo temporizador	Controlado por válvula comandada eletronicamente	Mesmo valor da bomba 3	Este sistema permite “pré-injeção”	Eletronicamente, através de válvula solenoide
Unidade Injetora	É gerada através de uma unidade injetora (êmbolo e camisa) por cilindro, o movimento do êmbolo é acionado diretamente por cames ou por balancim. A unidade de bombeamento e a unidade injetora (bico injetor) integram o mesmo conjunto, não existindo tubulação de alta pressão	Controlado eletronicamente através de uma ECU, que comanda uma válvula solenoide que realiza o início da entrega	Controlado eletronicamente através de uma ECU, que comanda uma válvula solenoide de alta velocidade	Este sistema pode atingir o pico de pressão de até 2200 bar	Permite múltiplas injeções	Válvula solenoide, comandada pela ECU
Bomba unitária	Semelhante ao item 7, porém neste sistema existe uma curta tubulação de alta pressão que interliga a bomba injetora com o bico injetor	Controlado eletronicamente por válvula solenoide, comandada pela ECU	Controlado eletronicamente, através do início da entrega	Este sistema pode atingir o pico de pressão de até 2200 bar	Permite múltiplas injeções	Válvula solenoide comandada pela ECU
Common Rail	Sistema de geração de pressão e o sistema injetor são “desacoplados”, sendo que a bomba injetora “entrega” combustível pressurizado para o “rail”, que acumula o combustível até o atingir o nível de pressão parametrizado na ECU	Entrega sempre disponível no acumulador (<i>rail</i>)	Controle eletrônico através da ECU a qual comanda a abertura do bico injetor, o que caracteriza o início da injeção	Varia conforme o modelo e geração do <i>common rail</i> , partindo de 1400 até 2500 bar	Possibilita até 5 eventos de injeção, sendo até 2 eventos de “pré-injeção”, 1 de injeção principal e até 2 de injeção secundária / posterior.	ECU, através do controle da abertura e fechamento do bico injetor, condições do combustível e do motor

Tabela 5. Parâmetros de injeção em cada um dos principais sistemas estudados

(conclusão)

Bomba distribuidora axial	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
Bomba distribuidora axial com válvula solenoide de controle	SIM	SIM	SIM	NÃO	SIM	NÃO	NÃO
Bomba distribuidora radial com válvula solenoide de controle	SIM	SIM	SIM	NÃO	SIM	NÃO	NÃO
Unidade Injetora	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Bomba unitária	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM
Common Rail	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM	SIM

Tabela 7. Comparação entre os sistemas de injeção de combustível Diesel estudados considerando os parâmetros de injeção e emissões

4. Análise dos Dados e Resultados

Para que fosse possível realizar a análise comparativa dos sistemas de injeção em relação aos parâmetros de emissão de gases de exaustão, restringidos pelas resoluções vigentes, foi necessário seguir uma sequência de etapas. Nestas etapas, foram reunidas informações que foram descritas ao longo de todo o tópico de referencial teórico (tópico 2.).

Na primeira etapa (tópico 3.1.), foi realizado o agrupamento de dados referente aos parâmetros de injeção, juntamente com as influências que cada um destes parâmetros possuía nas emissões dos motores Diesel. O agrupamento destes dados permitiu o desenvolvimento da tabela 4, a qual demonstra de maneira simples e de fácil acesso as informações de cada parâmetro.

A partir disto, prosseguiu-se para a segunda etapa (3.2.), onde foi realizada a busca por informações específicas de cada um dos sistemas de injeção estudados, referente a forma como os mesmos operam referente aos principais parâmetros de injeção listados na tabela 4 (Efeitos dos parâmetros de injeção). Estas informações possibilitaram o desenvolvimento da tabela 5, contendo informações específicas e detalhadas de cada sistema de injeção, relatando a forma como realizam a gestão dos parâmetros de injeção.

Na terceira etapa (3.3.) da metodologia, foi desenvolvida a tabela 6, a qual reúne informações de componentes de emissão de gases, os quais foram reunidos a partir do tópico 2.4. (Resoluções de emissões no Brasil) em comparação com os parâmetros de injeção. As informações para esta tabela, foram extraídas da tabela 4, a qual permitiu identificar quais componentes de emissão que cada um dos parâmetros de injeção influencia.

Desta forma, prosseguiu-se para quarta (3.4.) e última etapa da metodologia, onde foi realizada a comparação entre cada um dos sistemas estudados. Como base de comparação, foram reunidos os dados agrupados em todas as tabelas (4, 5 e 6) e a partir disto, foi desenvolvida a tabela 7 a qual contém o tipo de sistema de injeção “versus” o parâmetro de injeção e seus respectivos componentes de emissão que influencia. Para realizar o preenchimento desta tabela, foi realizada a análise das três tabelas desenvolvidas nas etapas anteriores (3.1.;3.2.;3.3.), as quais, direcionaram, a partir das informações agrupadas, a resposta, se o sistema atende ou não ao parâmetro em questão, considerando as emissões.

As informações que direcionaram as respostas, para cada parâmetro de injeção foram principalmente:

- **Início da entrega:** “Não”, um dos principais motivos para esta escolha foi devido ao tipo de controle que realizam do mesmo. Por mais que estes sistemas possuam controle deste parâmetro, ainda desta forma, este ajuste possui um limite de extensão, o que pode ser prejudicial para as estratégias de redução de emissão de gases, que necessitam estar alinhadas a todas as condições do motor.

“Sim”, estes sistemas receberam esta resposta, deve-se principalmente ao fato de serem controlados eletronicamente, sendo este parâmetro comandado pela ECU, que ajusta o mesmo para cada condição de operação do motor.

- **Início da injeção:** “Não”, um dos principais motivos para receber esta resposta foi porque este parâmetro é regulado com a pressão específica de abertura do bico injetor, sendo regulado a partir do início da entrega pelo *injection lag*, assim como descreve o tópico 2.2.1.2., o que não traz a flexibilidade necessária para este parâmetro, afetando a performance de emissões influenciadas por ele.

“Sim”, um dos principais motivos por estes sistemas terem recebido “sim”, foi por este parâmetro ser controlado eletronicamente, sendo comandado pela ECU angariando maior eficiência para a regulagem e/ou ajuste.

- **Taxa de descarga:** “Não”, um dos principais motivos para estes sistemas não serem adequados, é porque este parâmetro está totalmente relacionado a quantidade de combustível injetada, e nestes sistemas, este parâmetro é influenciado pelas condições de velocidade do motor e da bomba, o que não traz a eficiência necessária em determinadas condições de funcionamento do mesmo, para performance em emissões, conforme descreve o tópico 2.2.1.3.

“Sim”, estes sistemas receberam esta resposta principalmente por possuírem a ECU que comanda as válvulas que determinam este parâmetro, tornando-se eficientes para emissões influenciadas por ele neste aspecto.

- **Pressão de injeção:** os sistemas que não foram aprovados para este aspecto, devem-se principalmente ao fato de não possuírem o nível de pressão superior a 2000 bar, atingido pelos sistemas “aprovados” (Unidade Injetora, Bomba Unitária e *Common Rail*). Como o que foi mencionado no tópico 2.2.1.4., quanto mais alto o nível de pressão, menor a emissão de MP, neste aspecto os sistemas que receberam “sim” se equiparam em questão de níveis de pressão a que são capazes de atingir.
- **Múltiplas injeções:** os sistemas que receberam “sim” (Unidade Injetora, Bomba Unitária e *Common Rail*) em todos os aspectos deste parâmetro, deve-se ao fato de possibilitarem ou atenderem a todas as estratégias de injeção, as quais os seus efeitos em emissões são tratados no tópico 2.2.1.5.. Um aspecto muito importante deste parâmetro é a estratégia de “injeção secundária retardada” a qual realiza a regeneração dos sistemas de pós-tratamento, os quais tem um papel muito importante para as regulamentações atuais e futuras, conforme descreve o tópico 2.4.1.

A comparação realizada na tabela 7 permitiu visualizar quais são os sistemas promissores, entre os estudados, atualmente e para o futuro, frente as resoluções de emissões. Fato que é justificável pelas características que possuem cada um destes sistemas, as quais foram detalhadas ao longo do referencial teórico (tópico 2.)

Desta forma é possível destacar que, entre os sistemas estudados, para parâmetros de eficiência em emissões, os mais promissores são: o sistema de Unidade Injetora, o sistema de Bomba Unitária e o sistema *Common Rail*, por serem os mais avançados em relação aos parâmetros de injeção.

5. Conclusão

Sendo no Brasil as regulamentações, de limites de emissões de poluentes, cada vez mais rígidas ao longo do tempo, o motor de combustão interna do ciclo Diesel, assim como os sistemas que lhe integram, estão em progressiva evolução para atender ao que definem estas regulamentações.

Neste contexto foi definido como objetivo geral deste trabalho, a realização do estudo comparativo entre os principais sistemas de injeção de combustível Diesel existentes (para veículos comerciais médios e pesados), visando indicar quais são os mais promissores, em relação as resoluções atuais deste quesito.

A partir disto, visando tornar possível este estudo de comparação, foi realizada pesquisa bibliográfica a respeito do que são os motores de combustão interna do ciclo Diesel, o que são sistemas de injeção de combustível Diesel e seus principais parâmetros, quais os principais tipos destes sistemas existentes e quais são as regulamentações de emissão atuais e o que elas preveem.

Com isto foi realizado, em três etapas, no tópico de metodologia, o agrupamento dos principais quesitos detalhados ao longo do tópico de referencial teórico, tornando possível realizar o estudo de comparação entre os sistemas de injeção de combustível Diesel estudados, em relação a quesitos de emissão.

Conclui-se a partir dos resultados deste estudo, que os sistemas mais promissores, em relação as regulamentações de emissões, são os sistemas: de Unidade Injetora, de Bomba Unitária e o sistema *Common Rail*, cumprindo desta forma com o objetivo geral proposto.

Recomenda-se com isto, para trabalhos futuros, a realização de estudo dos componentes que integram cada um destes três sistemas, afim de identificar, quais são as limitações e/ou oportunidades de melhorias que cada um possui, visando avançar ainda mais nos níveis eficiência em relação a performance de emissões de gases de exaustão.

6. Referências Bibliográficas

- [1] MARTINS, Jorge. **Motores de Combustão Interna**. 2. ed. [S.l.]: Publindustria, Edições Técnicas, 2006. 464p.
- [2] BRUNETTI, Franco. **Motores de Combustão Interna**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 2012. 553p.
- [3] TILLMANN, Carlos Antonio da Costa. **Motores de Combustão Interna e seus Sistemas**. Pelotas: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense, 2013. 165 p.
- [4] ZEXEL - BOSCH. **Bombas VE**. [s.l.]: Zexel, 2009-2010. 290 p.
- [5] CONCEIÇÃO, Isac Leite da. **O Sistema de Injeção do Motor Diesel e sua Manutenção**. 2010. 58 f. TCC (Graduação) - Curso Superior de Tecnologia em Manutenção Industrial, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2010. Cap. 1. Disponível em: <<http://bd.centro.iff.edu.br/xmlui/handle/123456789/408>>. Acesso em: 11 nov. 2018.
- [6] MWM INTERNACIONAL MOTORES. **O Motor Diesel - Treinamento**. [S.L.]: Mwm Internacional Motores, [20--]. 74 p.
- [7] BOSCH. **Diesel Engine Management Systems and Components**: Bosch Professional Automotive Information. [S.L.]: Springer Vieweg, 2014. 370 p. Edição Konrad Reif.
- [8] KRIEGER, K., HUMMEL, H., and NAIK, L., "Diesel Fuel Injection Technology - An essential contribution towards an environment friendly powerful diesel engine", SAE Technical Paper 2000-01-1429, 2000, <https://doi.org/10.4271/2000-01-1429>.
- [9] MOLLENHAUER, Klaus; TSCHOEKE, Helmut. **Handbook of Diesel Engines**. [S.L.]: Springer, 2010. 634p.
- [10] TSCHÖKE, Dr.-ing. Helmut. **Diesel distributor fuel-injection pumps**: Technical Instruction. 4. ed. Stuttgart: Bosch, 1999. 63 p.
- [11] BOSCH. **Diesel Systems**. Disponível em: <https://in.bosch-automotive.com/en_GB/parts_and_accessories/engine_systems_1/diesel_2/diesel_system>. Acesso em: 02 fev. 2019.
- [12] JÄÄSKELÄINEN, Hannu; KHAIR, Magdi K., **Common Rail Fuel Injection**. 2015. Disponível em: <https://www.dieselnets.com/tech/diesel_fi_common-rail.php>. Acesso em: 15 mar. 2019.
- [13] CNT (Brasil). Sest / Senat. **A Fase P7 do PROCONVE e o impacto no setor de transporte**. 2012. Disponível em: <http://cms.cnt.org.br/Imagens%20CNT/Site%202015/Pesquisas%20PDF/proconve_p7_2012.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2019.
- [14] VENTURA, Luso Martorano (Ed.). **Emissões de Veículos a Diesel**: São Paulo: Netz Automotiva, 2009. 25 slides, color. Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br/documentos/SeminarioItem2.pdf>>. Acesso em: 05 fev. 2019.
- [15] AUTOMOTIVE BUSINESS. São Paulo: **Automotive Business**, jan. 2019. Disponível em: <<http://www.automotivebusiness.com.br/revistasabpdf/REVAB54.pdf>>. Acesso em: 07 fev. 2019.