

MOTORES

DE COMBUSTÃO INTERNA

Volume 2

FRANCO BRUNETTI

Blucher



MOTORES

DE COMBUSTÃO INTERNA

Blucher

Franco Brunetti

MOTORES

DE COMBUSTÃO INTERNA
Volume 2

Motores de Combustão Interna – Volume 2

© 2012 Franco Brunetti

1ª reimpressão – 2013

Editora Edgard Blücher Ltda.

Blucher

Rua Pedroso Alvarenga, 1245, 4º andar

04531-012 – São Paulo – SP – Brasil

Tel 55 11 3078-5366

contato@blucher.com.br

www.blucher.com.br

Segundo Novo Acordo Ortográfico, conforme 5. ed.
do *Vocabulário Ortográfico da Língua Portuguesa*,
Academia Brasileira de Letras, março de 2009.

É proibida a reprodução total ou parcial por quaisquer
meios, sem autorização escrita da Editora.

Todos os direitos reservados pela Editora
Edgard Blücher Ltda.

FICHA CATALOGRÁFICA

Brunetti, Franco

Motores de Combustão Interna: volume 2 /
Franco Brunetti. – São Paulo: Blucher, 2012.

Bibliografia

ISBN 978-85-212-0709-2

1. Motores. 2. Motor diesel. 3. Automóveis –
motores I. Título

12-0267

CDD 629.287

Índices para catálogo sistemático:

1. Motores
2. Motor diesel

Agradecimentos

Agradeço a todos aqueles que se empenharam para a elaboração deste livro, em especial ao professor engenheiro Fernando Luiz Windlin, que incentivou o projeto e não mediu esforços na coordenação dos trabalhos, abdicando horas de convívio familiar. A sua esposa e filhos minha gratidão e respeito.

Ana Maria Brunetti

Apresentação

O Instituto Mauá de Tecnologia sente-se honrado por incentivar esta merecida homenagem ao saudoso Prof. Eng. Franco Brunetti. Dos 47 renomados profissionais que atuaram neste projeto, muitos foram seus alunos, alguns desfrutaram do privilégio de atuarem como seus colegas de trabalho e todos guardam pelo Mestre uma imensa admiração.

Sob a incansável coordenação do Prof. Eng. Fernando Luiz Windlin, os dois volumes desta obra reúnem, sem perder a docilidade acadêmica das aulas do Prof. Brunetti, o que de mais atual existe na área de motores de combustão interna.

O leitor, maior beneficiário deste trabalho, tem em suas mãos o mais amplo tratado sobre o tema já publicado no Brasil. Rico em ilustrações, com uma moderna diagramação e um grande número de exercícios, o material tem sua leitura recomendada para os estudantes de curso de engenharia, mas também encontra aplicação em cursos técnicos e na atualização profissional daqueles que atuam na área.

Prof. Dr. José Carlos de Souza Jr.

Reitor do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia

Prefácio da 3ª Edição

No final de 2009, a Engenharia ficou mais triste com a perda do Prof. Franco Brunetti, reconhecido como um dos mais importantes professores de Engenharia do Brasil.

O Prof. Brunetti, nestas quatro décadas de magistério em diversas Universidades, participou da formação da grande maioria dos engenheiros que hoje atuam na indústria nacional e dos professores (ex alunos) que continuam seu trabalho.

Seu nome sempre estará associado às disciplinas: Mecânica dos Fluidos, para qual deixou um livro que revolucionou a forma de ministrar esta matéria, e, Motores de Combustão Interna, sua grande paixão.

Nascido em Bolonha, Itália, desde os 12 anos de idade no Brasil, graduado em Engenharia Mecânica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, POLI/USP – turma de 1967. Sua realização era a lousa de uma sala de aulas e durante toda vida uniu a experimentação com a didática.

Professor impecável e amigo para todas as horas deixou saudades, porém estará sempre presente:

- Presente pela cultura que transmitiu;
- Presente pela amizade que conquistou;
- Presente pelo exemplo que legou;
- Sempre presente porque mais que um professor foi um educador.

Como gratidão pelos diversos anos de trabalho conjunto, resolvemos transformar sua apostila num livro, de forma a perpetuar seu nome. Nos capítulos

que compõem esta obra, mantivemos a marca singela do Educador, com algumas atualizações decorrentes dos avanços tecnológicos.

Cabe aqui ressaltar o companheirismo do Prof. Oswaldo Garcia que sempre apoiou ao Prof. Brunetti nas apostilas anteriormente editadas.

Não podemos deixar de agradecer a esposa, e filhas, que permitiram este trabalho.

Nossos agradecimentos ao Instituto Mauá de Tecnologia pelo apoio e confiança incondicionais.

À todos aqueles que ajudaram na atualização, por simples amizade e/ou pelo tributo ao grande mestre Brunetti, e que encontram-se citados em cada capítulo, minha eterna gratidão.

São Paulo

Fernando Luiz Windlin

Coordenador desta Edição

Prefácio da 2ª Edição

Finalmente consegui roubar do dia a dia o tempo necessário para realizar uma revisão e uma ampliação da 1ª edição desta publicação.

Muitas das imperfeições foram corrigidas e acrescentei assuntos importantes como: sobrealimentação, combustíveis e emissões.

Todos os assuntos tratados devem ser compreendidos como uma exposição didática apenas de conceitos fundamentais.

Cada assunto poderia ser desenvolvido em muitos livros e não apenas em algumas páginas como foi feito. Entenda-se que o objetivo da obra é o de criar uma base e despertar o interesse do leitor que futuramente, se quiser se desenvolver neste ramo da tecnologia, deverá ler obras mais especializadas de cada um dos assuntos.

A grande dificuldade numa publicação deste tipo é exatamente esta. Conseguir extrair de um imenso universo de conhecimentos, o que é básico e atual, de maneira compreensível para o leitor iniciante. Este objetivo eu acho que foi atingido e creio que seja o grande valor deste trabalho.

Eu e o Prof. Oswaldo Garcia agradecemos os subsídios de alunos e colegas que apontaram os erros da 1ª edição e sugeriram modificações e espero que continuem com esta contribuição.

Mas, agradecemos principalmente Ana Maria, Claudia e Ângela, cujo trabalho de digitação, revisão e composição foram fundamentais para esta nova edição.

São Paulo, fevereiro de 1992

Prof. Eng. Franco Brunetti

Prefácio da 1ª Edição

Após muitos anos lecionando Motores de Combustão Interna na Faculdade de Engenharia Mecânica, consegui organizar neste livro os conhecimentos básicos da matéria, ministrados durante as aulas.

Com muita honra vejo o meu nome ao lado do meu grande mestre no assunto, o Prof. Oswaldo Garcia, que muito contribuiu com seus conhecimentos e com publicações anteriores, para a realização desta obra.

Se bem que reconheça que não esteja completa e que muita coisa ainda possa ser melhorada, creio que este primeiro passo será de muita utilidade, para os estudantes e amantes do assunto.

Aproveito para agradecer a minha esposa Ana Maria e a minha filha Claudia que, com paciência e perseverança, executaram a datilografia e as revisões necessárias.

São Paulo, março de 1989

Prof. Eng. Franco Brunetti

Conteúdo

Volume 1

1 | INTRODUÇÃO AO ESTUDO DOS MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

1.1 Introdução

1.2 Motores alternativos

- 1.2.1 Nomenclatura
- 1.2.2 Nomenclatura cinemática
- 1.2.3 Classificação dos motores alternativos quanto à ignição
- 1.2.4 Classificação dos motores alternativos quanto ao número de tempos do ciclo de operação
- 1.2.5 Diferenças fundamentais entre os motores de 2T e 4T
- 1.2.6 Diferenças fundamentais entre os motores ciclos Otto e Diesel a 4T

1.3 Outras classificações

- 1.3.1 Quanto ao sistema de alimentação de combustível
- 1.3.2 Quanto à disposição dos órgãos internos
- 1.3.3 Quanto ao sistema de arrefecimento
- 1.3.4 Quanto às válvulas
- 1.3.5 Quanto à alimentação de ar
- 1.3.6 Quanto à relação entre diâmetro e curso do pistão
- 1.3.7 Quanto à rotação
- 1.3.8 Quanto à fase do combustível
- 1.3.9 Quanto à potência específica

1.4 Motores rotativos

- 1.4.1 Turbina a gás
- 1.4.2 Motor Wankel
- 1.5 Histórico
- 1.6 Aplicações

Exercícios

Referências bibliográficas

Figuras

2 | CICLOS

2.1 Introdução

2.2 Ciclos reais traçados com um indicador de pressões

- 2.2.1 Funcionamento dos indicadores de pressão
- 2.2.2 Diagrama da variação da pressão de um motor Otto a 4T
- 2.2.3 Diagramas de variação da pressão de um motor de ignição espontânea (Diesel), a 4T
- 2.2.4 Diagramas da variação da pressão para um motor a 2T de ignição por faísca

2.3 Ciclos-padrão a ar

- 2.3.1 Introdução
- 2.3.2 Ciclo Otto (padrão a ar do ciclo do motor de ignição por faísca, a 4 tempos ou Otto)
- 2.3.3 Conceitos definidos a partir dos ciclos-padrão a ar
- 2.3.4 Ciclo Diesel (padrão a ar do ciclo do motor de ignição espontânea ou Diesel)
- 2.3.5 Ciclo Misto ou de Sabathé
- 2.3.6 Ciclo Brayton (representativo do ciclo simples da turbina a gás)
- 2.3.7 Comparação dos ciclos

2.4 Diagramas e rotinas computacionais para misturas combustível-ar

- 2.4.1 Introdução
- 2.4.2 Propriedades de misturas de combustíveis e gases de combustão
- 2.4.3 Solução dos ciclos por meio de rotinas computacionais para misturas combustível-ar

2.5 Comparação dos ciclos reais com os ciclos teóricos

- 2.5.1 Admissão e escape
- 2.5.2 Perdas de calor
- 2.5.3 Perda por tempo finito de combustão
- 2.5.4 Perdas pelo tempo finito de abertura da válvula de escape

Exercícios

Referências bibliográficas

Figuras

3 | PROPRIEDADES E CURVAS CARACTERÍSTICAS DOS MOTORES

3.1 Momento de força, conjugado no eixo ou torque (T)

3.2 Freio dinamométrico ou dinamômetro

- 3.2.1 Freio de Prony
- 3.2.2 Dinamômetros hidráulicos
- 3.2.3 Dinamômetros elétricos

3.3 Propriedades do motor

- 3.3.1 Potência efetiva
- 3.3.2 Potência indicada
- 3.3.3 Relações entre as potências
- 3.3.4 Controle ou variação da potência do motor

- 3.3.5 Consumo específico
- 3.3.6 Relações envolvendo pressão média

3.4 Determinação da potência de atrito

- 3.4.1 Acionando o motor de combustão desligado, por meio de um motor elétrico
- 3.4.2 Teste de Morse
- 3.4.3 Reta de Willan

3.5 Curvas características dos motores

3.6 Redução da potência do motor a condições atmosféricas padrões

- 3.6.1 Cálculos do fator de redução
- 3.6.2 Comparativo entre fatores de redução
- 3.6.3 Banco de teste de veículos

Exercícios

Referências bibliográficas

Figuras

4 | RELACIONAMENTO MOTOR-VEÍCULO

4.1 Introdução

4.2 Previsão do comportamento de um motor instalado num dado veículo

- 4.2.1 Força de arrasto
- 4.2.2 Força de resistência ao rolamento
- 4.2.3 Força de rampa

4.3 Força total resistente ao avanço de um veículo

- 4.3.1 Raio de rolamento
- 4.3.2 Relacionamento motor-veículo

4.4 Relacionamento entre ensaios em bancos de provas e aplicações do motor em veículos

Exercícios

Referências bibliográficas

Figuras

5 | AERODINÂMICA VEICULAR

5.1 Introdução

5.2 Força de arrasto

- 5.2.1 Força de arrasto de superfície (*skin friction*)
- 5.2.2 Força de arrasto de pressão ou de forma

5.3 Força de sustentação e momento de arfagem (*Pitching*)

5.4 Força lateral

5.5 História da aerodinâmica veicular

- 5.5.1 A era das linhas de corrente
- 5.5.2 Estudos paramétricos
- 5.5.3 Corpos de um volume único

- 5.5.4 O corpo do veículo do tipo “Pantoon”
- 5.5.5 Os veículos comerciais
- 5.5.6 Motocicletas

Exercícios

Referências bibliográficas

6 | COMBUSTÍVEIS

6.1 Um pouco de história

6.2 Combustíveis derivados do petróleo

- 6.2.1 Petróleos
- 6.2.2 Produção de derivados

6.3 Gasolina (*gasoline, gas, petrol, benzin, benzina, essence*)

- 6.3.1 Octanagem ou Número de Octano
- 6.3.2 Volatilidade
- 6.3.3 Composição dos gases de escapamento e relação Ar-Combustível
- 6.3.4 Poder calorífico
- 6.3.5 Massa específica
- 6.3.6 Tonalidade térmica de um combustível
- 6.3.7 Corrosão ao cobre
- 6.3.8 Teor de enxofre
- 6.3.9 Estabilidade à oxidação
- 6.3.10 Outros parâmetros

6.4 Óleo Diesel (*gazole, Dieselöl, Dieselolie, gasóleo, gasolio, Mazot*)

- 6.4.1 Qualidade de ignição: cetanagem ou número de cetano (NC)
- 6.4.2 Volatilidade
- 6.4.3 Massa específica
- 6.4.4 Viscosidade
- 6.4.5 Lubricidade
- 6.4.6 Teor de enxofre
- 6.4.7 Corrosão ao cobre
- 6.4.8 Pontos de turbidez, de entupimento e de fluidez
- 6.4.9 Combustão
- 6.4.10 Estabilidade química
- 6.4.11 Condutividade elétrica

6.5 Compostos Oxigenados

- 6.5.1 Breve histórico
- 6.5.2 Álcoois
- 6.5.3 Éteres
- 6.5.4 Principais propriedades
- 6.5.5 Efeitos no desempenho dos veículos

6.6 Óleos vegetais, gorduras animais, biodiesel e H-Bio

- 6.6.1 Óleos vegetais
- 6.6.2 Gorduras animais
- 6.6.3 Biodiesel
- 6.6.4 H-BIO

Exercícios

Referências bibliográficas

Figuras

7 | A COMBUSTÃO NOS MOTORES ALTERNATIVOS

- 7.1 A combustão nos motores de ignição por faísca**
 - 7.1.1 Combustão normal
 - 7.1.2 Detonação no motor de ignição por faísca
 - 7.1.3 Fatores que influem na detonação no motor Otto
- 7.2 Câmara de combustão**
- 7.3 A combustão nos motores Diesel**
- 7.4 Fatores que influenciam na autoignição no ciclo Diesel**
 - 7.4.1 Qualidade do combustível
 - 7.4.2 Temperatura e pressão
 - 7.4.3 Turbulência
- 7.5 Tipos básicos de câmaras para motores Diesel**
 - 7.5.1 Câmaras de injeção direta ou abertas
 - 7.5.2 Câmaras de injeção indireta ou divididas
 - 7.5.3 Comparação entre as câmaras divididas e abertas
- 7.6 A combustão por autoignição controlada CAI/HCCI**

Exercícios

Referências bibliográficas

Figuras

8 | MISTURA E INJEÇÃO EM CICLO OTTO

Parte I – FORMAÇÃO DA MISTURA COMBUSTÍVEL-AR NOS MOTORES DO CICLO OTTO

- 8.1 Introdução**
- 8.2 Definições**
 - 8.2.1 Relação combustível-ar
 - 8.2.2 Relação combustível-ar estequiométrica
 - 8.2.3 Fração relativa combustível-ar
- 8.3 Tipo de mistura em relação ao comportamento do motor**
 - 8.3.1 Limite pobre
 - 8.3.2 Mistura econômica
 - 8.3.3 Mistura de máxima potência
 - 8.3.4 Limite rico
- 8.4 Curva característica do motor em relação à mistura**
 - 8.4.1 Carburador elementar
 - 8.4.2 Sistema de injeção
 - 8.4.3 Curva característica
- 8.5 Carburador**
- 8.6 Injeção mecânica para motores Otto**
- 8.7 Injeção eletrônica para motores Otto**
 - 8.7.1 Classificação dos sistemas de injeção eletrônica
 - 8.7.2 Sistema analógico de injeção eletrônica

- 8.7.3 Sistema digital de injeção eletrônica
- 8.7.4 Métodos numéricos aplicados ao estudo de formação de mistura

Exercícios

Referências bibliográficas

Figuras

Parte II – INJEÇÃO DIRETA DE COMBUSTÍVEL EM CICLO OTTO (GDI – *GASOLINE DIRECT INJECTION*)

8.8 Introdução

8.9 Requisitos de combustão e formação de mistura

- 8.9.1 Mecanismo de atomização do spray
- 8.9.2 Automatização do combustível
- 8.9.3 Orientação da combustão
- 8.9.4 Combustão homogênea e estratificada

8.10 Sistema de injeção direta de combustível

8.11 Controle da combustão

- 8.11.1 Mapa característico de combustão
- 8.11.2 Injeção em dois estágios
- 8.11.3 Partida a frio

8.12 Emissões de poluentes

- 8.12.1 Formação de poluentes
- 8.12.2 Pós-tratamento de poluentes

8.13 Conclusões

Exercícios

Referências bibliográficas

9 | SISTEMA DE IGNIÇÃO E SENSORES APLICADOS AOS MOTORES

Parte I – SISTEMAS DE IGNIÇÃO

9.1 Visão geral

9.2 Os componentes de um sistema de ignição convencional

9.3 Princípio de funcionamento

9.4 Cálculo do tempo de ignição

9.5 Avanço ou atraso no tempo de ignição

9.6 As evoluções tecnológicas no sistema de ignição

- 9.6.1 Ignição transistorizada com platinado
- 9.6.2 Ignição transistorizada sem platinado
- 9.6.3 Ignição eletrônica mapeada

Exercícios

Parte II – SENSORES APLICADOS AOS MOTORES

- 9.7 Sensores de rotação e fase do motor
- 9.8 Sensor de pressão e temperatura do coletor de admissão
- 9.9 Sensor de posição da borboleta
- 9.10 Caudal de ar
- 9.11 Concentração de oxigênio (sonda λ)
- 9.12 Sensor de temperatura
- 9.13 Sensor de detonação – “Knock”
- 9.14 Outros
- Exercícios
- Referências bibliográficas

Volume 2

10 | SISTEMAS DE INJEÇÃO PARA MOTORES DIESEL 27

- 10.1 Requisitos do sistema e classificação 27
- 10.2 Sistema de bomba em linha 28
- 10.3 Sistema modular de bombas individuais 30
 - 10.3.1 Unidades injetoras tipo bomba-bico 30
 - 10.3.2 Unidades injetores tipo bomba-tubo-bico 31
- 10.4 Unidade de comando eletrônica 32
- 10.5 Bicos injetores 33
- 10.6 Sistema distribuidor ou de bomba rotativa 34
- 10.7 Sistema acumulador ou tipo *Common Rail* 35
 - 10.7.1 Bomba de alta pressão 36
 - 10.7.2 Injetor 37
 - 10.7.3 Injeção modulada *Common Rail* 39
- Exercícios 40
- Referências bibliográficas 45
- Figuras 45

11 | CONSUMO DE AR NOS MOTORES A QUATRO TEMPOS 47

- 11.1 Introdução 47
- 11.2 Eficiência volumétrica 48

11.2.1	Densidade ou massa específica de entrada	49
11.2.2	Eficiência volumétrica baseada na massa de ar seco	49
11.3	Potência e pressão média em função da eficiência volumétrica	53
11.4	Processo de admissão ideal	54
11.5	Eficiência volumétrica pelo diagrama indicado	57
11.6	Efeito das condições de operação sobre a eficiência volumétrica	60
11.6.1	Índice de Mach na entrada	60
11.6.2	Efeito das dimensões do motor na eficiência volumétrica	64
11.6.3	Efeito da relação combustível-ar	66
11.6.4	Efeito da temperatura de admissão	66
11.6.5	Efeito da temperatura do fluido de arrefecimento	67
11.6.6	Efeito do ângulo de superposição de abertura das válvulas (<i>overlap</i>)	67
11.6.7	Influência do ângulo de fechamento da válvula de admissão	69
11.6.8	Influência da relação de compressão	70
11.7	Coletores de admissão	71
11.7.1	Influência do diâmetro e comprimento dos dutos	72
11.7.2	Influência do volume do <i>plenum</i>	74
11.7.3	Interferência entre cilindros	77
11.8	Influência do período de exaustão	78
11.9	Sobrealimentação	80
11.9.1	Sobrealimentação mecânica	80
11.9.2	Turbocompressor	81
11.9.3	O ciclo ideal	82
11.9.4	O turbocompressor	84
11.9.5	Ajuste do turbocompressor ao motor (<i>matching</i>)	94
11.9.6	Considerações sobre o motor turboalimentado	96
Exercícios		97
Referências bibliográficas		103
Figuras		103

12 | SISTEMAS DE EXAUSTÃO 105

12.1	Introdução	105
12.2	O processo de descarga nos motores de combustão interna	106
12.3	Efeitos dinâmicos em coletores de escapamentos	114
12.3.1	Disposição geral dos coletores de descarga	114
12.3.2	Sintonia de tubos de escapamento	115
12.4	Atenuação de ruído em sistemas de exaustão	119
12.4.1	Princípios de acústica em dutos	121
12.4.2	Desempenho de filtros acústicos	123
12.4.3	Elementos acústicos de atenuação	125
12.4.4	Efeitos complexos e considerações acústicas	129
12.4.5	Simulação numérica	132

Exercícios	135
Referências bibliográficas	136

13 | EMISSÕES 137

13.1 Introdução	137
13.1.1 Monóxido de carbono (CO)	138
13.1.2 Óxidos de nitrogênio (NO _x)	138
13.1.3 Hidrocarbonetos (HC)	140
13.1.4 Aldeídos	140
13.1.5 Compostos de enxofre (SO ₂ e H ₂ S)	140
13.1.6 Partículas	141
13.1.7 Compostos de chumbo	141
13.1.8 Dióxido de carbono (CO ₂)	141
13.2 Controle das emissões no motor Otto	142
13.3 Controle das emissões no motor Diesel	146
13.4 Medição de emissões	150
13.5 Legislação acerca de emissões	150
13.5.1 Ensaios de emissões veiculares	151
13.5.2 Ensaios de emissões de motores	152
13.6 Análise dos componentes	153
13.6.1 Monóxido e Dióxido de Carbono	153
13.6.2 Óxidos de Nitrogênio	155
13.6.3 Hidrocarbonetos	157
13.6.4 Oxigênio	159
13.6.5 Aldeídos	160
13.6.6 Material particulado	162
13.6.7 Sulfeto de Hidrogênio e Dióxido de Enxofre	167
13.6.8 Amônia	169
13.7 Métodos alternativos de medição	170
13.7.1 FTIR	170
Exercícios	171
Referências bibliográficas	173

14 | LUBRIFICAÇÃO 175

14.1 Introdução	175
14.2 Classificação	177
14.2.1 Sistema de lubrificação por salpico ou aspersão	177
14.2.2 Sistemas de lubrificação – Motores 2 Tempos	177
14.2.3 Sistemas de lubrificação sob pressão ou forçada	178
14.3 Blow by	179
14.4 Separadores de Blow by	182

14.5 Cáster 183

- 14.5.1 Cáster – Volume 185
- 14.5.2 Válvula PCV – *positive crankcase ventilation* 187
- 14.5.3 Bomba de óleo 188
- 14.5.4 Válvula reguladora de pressão 196
- 14.5.5 Filtros – projeto/seleção 196
- 14.5.6 Filtros – seleção do meio filtrante 197
- 14.5.7 Sistemas de filtragem – total 200
- 14.5.8 Sistemas de filtragem – parcial 201
- 14.5.9 Trocador de calor 201
- 14.5.10 Bomba elétrica 203

14.6 Razões para o consumo de lubrificante em um motor 208**Exercícios 208****Referências bibliográficas 212****Figuras 213****15 | LUBRIFICANTES 215****15.1 Introdução 215****15.2 Propriedades dos óleos lubrificantes 215**

- 15.2.1 Viscosidade 216
- 15.2.2 Índice de viscosidade 221
- 15.2.3 Ponto de fluidez 223
- 15.2.4 Oleoginosidade ou oleosidade 224
- 15.2.5 Corrosão 224
- 15.2.6 Espuma 224
- 15.2.7 Emulsão 225
- 15.2.8 Detergência 225
- 15.2.9 Estabilidade 225
- 15.2.10 Massa específica 226
- 15.2.11 TBN (*Total Base Number* ou reserva alcalina) 227
- 15.2.12 TAN (*Total Acid Number*) 227
- 15.2.13 Resistência à extrema pressão 227

15.3 Aditivos para lubrificantes 227**15.4 Óleos básicos sintéticos 232****15.5 Classificação dos óleos básicos 235****Exercícios 236****Referências bibliográficas 241****16 | RUÍDO E VIBRAÇÕES 243****16.1 Introdução 243**

- 16.1.1 Introdução à acústica 244
- 16.1.2 Introdução às vibrações 250

- 16.1.3 Fundamentos de análise modal experimental 258
- 16.1.4 Análise espectral 263
- 16.2 Ruído e vibrações em motores à combustão 267**
 - 16.2.1 Análise de ordem e assinatura – vibrações 273
 - 16.2.2 Análise de ordem e assinatura – acústica 277
 - 16.2.3 Resposta vibroacústica em motores 278
 - 16.2.4 Alguns fenômenos de ruído e vibrações comuns em motores 280
- 16.3 Considerações finais 296**
- Exercícios 297**
- Referências bibliográficas 299**

17 | CINEMÁTICA E DINÂMICA DO MOTOR 301

- 17.1 Introdução 301**
- 17.2 Cinemática do sistema biela-manivela 302**
- 17.3 Principais forças 305**
 - 17.3.1 Força de pressão 305
 - 17.3.2 Forças de inércia 306
 - 17.3.3 Diagrama da força total 314
- 17.4 Momento no eixo 314**
- 17.5 Volante 317**
- 17.6 Balanceamento das forças de inércia 322**
 - 17.6.1 Forças centrífugas 322
 - 17.6.2 Forças de inércia alternativas 329
- Exercícios 338**

18 | TRIBOLOGIA 343

- 18.1 Introdução 343**
- 18.2 Rugosidade e topografia 345**
 - 18.2.1 Parâmetros de rugosidade 347
 - 18.2.2 Contato entre superfícies 349
- 18.3 Desgaste 350**
 - 18.3.1 Modelos de desgaste 352
 - 18.3.2 Ensaios de desgaste 354
- 18.4 Atrito 358**
 - 18.4.1 Coeficiente de atrito estático *versus* dinâmico 358
 - 18.4.2 Fundamentos do atrito no deslizamento 358
- 18.5 Regimes de lubrificação 359**
- 18.6 Materiais empregados em motores de combustão interna 363**
- Exercícios 365**
- Referências bibliográficas 368**

19 | SISTEMAS DE ARREFECIMENTO 371

19.1 Introdução 371

19.2 Fluxo de energia 373

19.3 Limites de temperatura 375

19.3.1 Limites de temperatura – válvulas 376

19.3.2 Limites de temperaturas – pistões 379

19.3.3 Limites de temperaturas – cilindros 381

19.4 Processos de arrefecimento 382

19.5 Resfriamento por circulação de ar 384

19.6 Resfriamento por circulação de óleo 387

19.7 Resfriamento por circulação de água 388

19.7.1 Resfriamento por circulação de água – termossifão 388

19.7.2 Resfriamento por circulação de água – forçada 389

19.8 Válvula termostática 390

19.9 Tipos de válvulas termostáticas 392

19.9.1 Estrangulamento 392

19.9.2 Passo 393

19.9.3 Com aquecimento 394

19.9.4 Eletrônica 394

19.10 Bomba d'água 394

19.11 Bomba d'água – elétrica 399

19.12 Ventiladores 400

19.12.1 Ventiladores mecânicos 400

19.12.2 Ventiladores – tipo viscosos 401

19.12.3 Ventiladores – elétricos 401

19.12.4 Ventiladores – CVV 403

19.13 Vaso de expansão 403

19.14 Aditivos 407

19.14.1 Etileno glicol 407

19.14.2 Propileno glicol 407

19.15 Mangueiras 409

19.16 Sistema híbrido 410

19.17 Fundamentos da transferência de calor 412

19.18 Objetivo e requisitos dos radiadores 414

19.19 Dimensionamento dos radiadores 420

Exercícios 424

Referências bibliográficas 426

Figuras 426

20 | PROJETO DE MOTORES 427

- 20.1 **Análise de mercado, *portfólio*, tecnologia, fornecedores e concorrência** 427
- 20.2 **Conceituação do produto e envelope** 429
 - 20.2.1 Tipo de aplicação 429
- 20.3 **Análise preliminar de desempenho** 431
- 20.4 **Projeto do sistema de combustão** 433
- 20.5 **Projeto estrutural do bloco** 436
- 20.6 **Projeto do trem de força** 438
- 20.7 **Projeto do absorvedor de vibrações torcionais** 441
- 20.8 **Projeto do sistema de comando de válvulas** 442
- 20.9 **Projeto do sistema sincronizador** 443
- 20.10 **Projeto do sistema de acessórios e agregados** 444
- 20.11 **Projeto do volante de inércia** 446
- 20.12 **Projeto do sistema de partida** 447
- 20.13 **Projeto de suportes e coxins** 449
- 20.14 **Protótipo virtual** 451
- 20.15 **Pesquisa e desenvolvimento do produto** 451
- 20.16 **Lançamento do produto e pós-venda** 454
- Exercícios** 454
- Referências bibliográficas** 455
- Figuras** 455

21 | VEÍCULOS HÍBRIDOS 457

- 21.1 **Introdução** 457
- 21.2 **Histórico** 458
- 21.3 **Mercado atual** 461
- 21.4 **Tendências** 464
- 21.5 **Evolução tecnológica** 466
 - 21.5.1 Sistema em série 466
 - 21.5.2 Sistema em paralelo 468
 - 21.5.3 Sistema combinado série – paralelo 469
 - 21.5.4 Híbrido médio 469
 - 21.5.5 Híbrido forte 469
- 21.6 **Funcionamento básico** 470
- 21.7 **Gerenciamento do sistema híbrido** 471
 - 21.7.1 Estratégias dos veículos híbridos – gestão de energia 473

21.7.2	Estratégias dos veículos híbridos – modos de operação	473
21.7.3	Estratégias dos veículos híbridos – modos de operação-arranque	473
21.8	Tendências tecnológicas	474
21.9	Participação do governo	474
21.10	Alternativa para o Brasil	476
	Exercícios	482
	Referências bibliográficas	484
	Figuras	485

Sistemas de injeção para motores Diesel

Atualização:

Mario A. Massagardi

Fernando C. Trolesi

Fernando Luiz Windlin

Mario E. S. Martins

Maurício Assumpção Trielli

10.1 Requisitos do sistema e classificação

Conforme visto anteriormente, no motor Diesel, o combustível deve ser injetado diretamente na câmara de combustão, finamente nebulizado à alta pressão (acima de 200 bar, podendo chegar a valores superiores a 2.000 bar), no fim do tempo de compressão e mesmo durante o de expansão.

Como a nebulização e a distribuição do combustível na câmara de combustão são fatores decisivos no processo de combustão, deve-se imaginar a importância do desempenho do sistema de injeção no desempenho do motor. Diante do exposto, os requisitos do sistema injetor são:

- Dosar a quantidade correta de combustível em cada cilindro, em função da carga e rotação desejadas.
- Distribuir o combustível, finamente nebulizado, para facilitar sua mistura com o ar.
- Iniciar a injeção no instante correto.
- Injetar o combustível com a velocidade de injeção desejada (taxa de injeção).
- Dosar o combustível com taxas de injeção adequadas.
- Finalizar a injeção instantaneamente, sem provocar gotejamento ou pós-injeção.

Para atingir esses requisitos, os motores Diesel utilizam um dos seguintes tipos de sistema de injeção:

- a) Sistema de bombeamento individual, em 3 configurações básicas:
 - a.1) elementos bombeadores montados conjuntamente numa mesma estrutura que possui um eixo de ressaltos comum para seus acionamentos (bomba em linha).
 - a.2) elementos bombeadores associados à linha de injeção e porta-injetor formando conjuntos completos para cada cilindro do motor, acionados por um eixo de ressaltos comum montado no bloco do motor (bomba-tubo-bico).
 - a.3) com uma unidade integrada de elemento bombeador e bico injetor para cada cilindro do motor, acionada por eixo de ressaltos montado no cabeçote (bomba-bico).
- b) Sistema de bomba distribuidora ou rotativa com regulação mecânica ou eletrônica que utiliza uma bomba de um único elemento bombeador acoplado a um sistema distribuidor rotativo para dosar o combustível para cada cilindro do motor.
- c) Sistema acumulador que utiliza uma bomba única para a compressão do combustível e elementos dosadores individuais para cada cilindro do motor.

O método introduzido no item c) é o mais usual na atualidade e, portanto, será descrito com maiores detalhes neste capítulo. Entretanto, para conhecimento básico, serão também descritos, sucintamente outros sistemas.

10.2 Sistema de bomba em linha

É constituído por uma bomba com eixo de ressaltos e um elemento dosador para cada cilindro. Acoplado à bomba injetora fica o regulador de débito e velocidade, disponível nas versões mecânica ou eletrônica. A Figura 10.1 mostra o sistema de bomba em linha para um motor de 6 cilindros.

Os principais componentes são: o tanque de combustível (1), o regulador (2), a bomba alimentadora ou de transferência (3), a bomba injetora (4), o avanço de ponto de injeção (5), acionado pelo eixo do motor (6), o filtro de combustível (7), o dreno de ar (8), o conjunto porta injetor (9) e as linhas de retorno do conjunto porta injetor (10) e da bomba (11).

O regulador (2) é um componente do sistema de injeção que regula automaticamente as condições de injeção e estabelece a rotação máxima de rotação do motor, evitando a ocorrência de sobrevelocidades. Nele são montadas as alavancas que fazem a interface com o operador do motor-veículo.

A bomba injetora tem a função de acrescentar pressão ao combustível e enviá-lo ao injetor no instante mais oportuno e na quantidade desejada para cada ciclo. Essas bombas têm seus componentes lubrificadas por óleo lubrificante do motor, o que lhe atribui características de robustez e durabilidade.

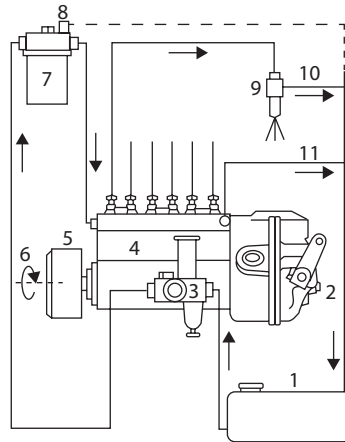


Figura 10.1 – Sistema individual de injeção. [A]

A Figura 10.2 traz a representação esquemática de uma bomba tipo P fabricada pela Bosch.

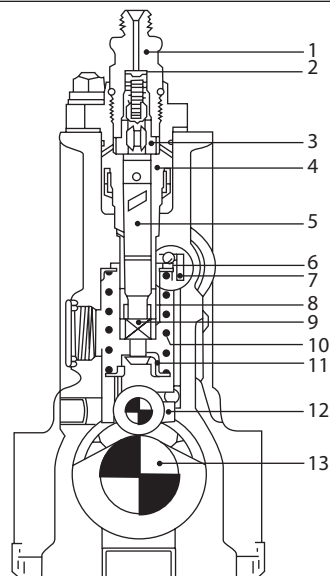


Figura 10.2 – Bomba Bosch, tipo P. [A]

A variação do débito (“quantidade” de combustível injetado por ciclo), para a variação da carga e da rotação do motor, é feita girando o pistão do elemento injetor (5) sobre seu eixo.

O pistão tem um curso constante definido pelo excêntrico (13). Durante o movimento descendente do pistão da bomba, o combustível da galeria, fornecido pela bomba de transferência preenche o volume formado no cilindro (4). Movido pelo excêntrico (13), o pistão ultrapassa o orifício de comando no cilindro (4) e estabelece o escoamento do combustível através da válvula (3) e do porta-válvula (1), dirigindo-o para o injetor. Num certo instante do deslocamento, o sulco helicoidal do pistão coloca a câmara de combustível pressurizado em comunicação com um condutor de retorno, cessando a injeção; o combustível em excesso retorna para o tanque.

Girando o pistão injetor (5) por meio da haste de regulação ou cremalheira (7), o rasgo helicoidal de controle descobrirá o orifício de comando em posições diferentes de seu curso, variando o débito de combustível.

A válvula de entrega ou de alívio de pressão (3) tem a função de manter o condutor de injeção cheio de combustível, de tal forma que a injeção resulte praticamente imediata. Quando o rasgo helicoidal do pistão injetor atinge a posição de fim de injeção, o alívio da pressão faz com que a válvula (3) inicie seu processo de fechamento. Em primeiro lugar a parte cilíndrica da válvula fecha o furo de passagem e em seguida ela recua em direção à sua sede. Isso produz uma rápida queda da pressão, evitando o gotejamento de bico injetor no cilindro do motor mantendo, entretanto, uma pressão residual na linha de injeção que impede a ocorrência de cavitação.

10.3 Sistema modular de bombas individuais

Os sistemas modulares de bombas individuais controladas eletronicamente incluem as unidades bomba-bico e bomba-tubo-bico. Esse tipo de sistema modular tem como vantagens a sua construção robusta e compacta, facilitando a obtenção de pressões de injeção superiores a 2.000 bar. O seu circuito de alta pressão é bastante reduzido, o que contribui para a obtenção de uma dinâmica de injeção mais otimizada, alta durabilidade e menores problemas decorrentes da contaminação do combustível. Mapas de calibração existentes na unidade de comando eletrônico determinam suas condições de funcionamento.

10.3.1 Unidades injetoras tipo bomba-bico

Trata-se de um módulo injetor de um cilindro com bomba de alta pressão, bico injetor e válvula eletromagnética integrados. Sua montagem é feita diretamente no cabeçote sendo acionado por meio de um balancim acionado por um ressalto existente no eixo de comando do motor.

A Figura 10.3 mostra a representação esquemática de uma unidade injetora do tipo bomba-bico. Com a válvula magnética desenergizada, o combustível entra pelo orifício de admissão (16) e flui através dos dutos internos diretamente para o orifício de retorno (15) o que possibilita o enchimento da câmara da bomba durante o curso de retorno do pistão (3) impulsionado pela mola de retorno (1).

No ciclo seguinte, com o pistão (3) impulsionado pelo eixo de ressaltos e seu balancim para bombear o combustível e com a energização da válvula magnética, o circuito de retorno se fecha e o combustível à alta pressão é bombeado ao bico (20). Quando a intensidade da onda de pressão ultrapassa os valores de pré-tensão da mola do bico (18), o injetor se abre e permite a nebulização do combustível na câmara de combustão do motor. Com a desenergização da válvula, abre-se novamente o canal de retorno de combustível, a pressão de injeção diminui rapidamente e a injeção se encerra.

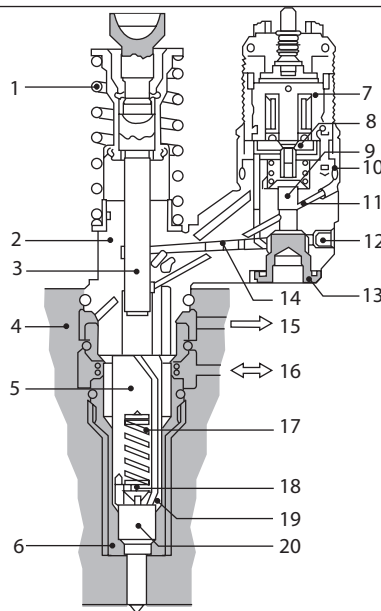


Figura 10.3 – Unidade injetora, tipo bomba-bico. [A]

10.3.2 Unidades injetoras tipo bomba-tubo-bico

Outro tipo de sistema modular de bombas individuais por cilindro é a unidade bombeadora tipo bomba-tubo-bico. De funcionamento semelhante ao das unidades bomba-bico, ele se diferencia na construção. Nesse caso, o bico e bomba não são integrados num único componente.

A Figura 10.4 ilustra a montagem dos componentes do sistema no motor. Esse sistema tem a bomba de alta pressão (6) montada no bloco do motor, onde existe também o eixo de comando com os ressaltos de injeção (7).

O conjunto porta-injetor (1), que contém o bico injetor, (3) é montado numa posição centrada no cabeçote do motor (2). Bomba e injetor são unidos por um curto tubo de alta pressão.

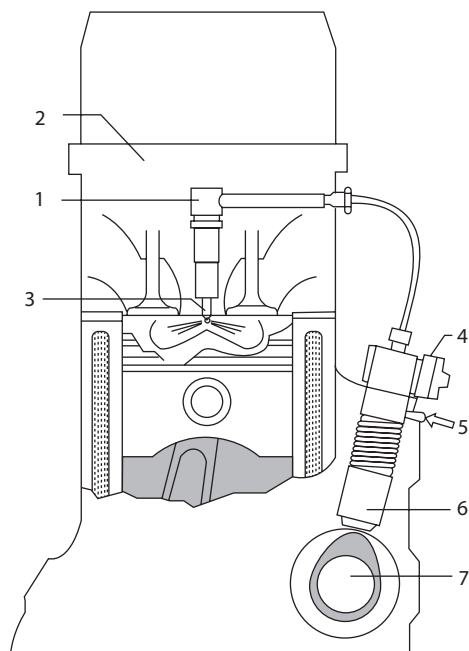


Figura 10.4 – Unidade injetora, tipo bomba-tubo-bico. [A]

10.4 Unidade de comando eletrônica

O acionamento da válvula magnética das unidades injetoras modulares é feito pela unidade de comando eletrônica. Essa unidade recebe todos os sinais vindos dos sensores instalados no sistema tais como os de posição do pedal do acelerador, de rotação e posição do virabrequim do motor, de pressão e temperatura do óleo e da água. Por meio de seus mapas de calibração, define a energização adequada da válvula magnética de forma a promover o início e a duração da injeção otimizada, sincronizada com a posição do pistão do motor.

No processador da unidade de comando eletrônica está armazenado o programa das funções que incluem, além das funções básicas para a partida e funcionamento do motor, diversas funções.

A função de pré-injeção, ou seja, a criação de uma injeção de pequeno volume de combustível pouco antes da injeção principal, tem como uma das suas funções reduzir o ruído e a vibração do motor.

Os sistemas modulares, embora acionados por eixos de ressaltos, já apresentam a possibilidade de se calibrar, com alguma liberdade, o ponto de início de injeção, o que traz vantagens na busca do melhor ponto para a redução das emissões de gases de escapamento e de material particulado. O ponto de início de injeção não dependerá mais exclusivamente do encadeamento das tolerâncias dos componentes mecânicos, mas poderá ser regulado de forma sincronizada, pelo sensoriamento da posição do pistão do motor e pelo início do acionamento da válvula magnética.

Diversas outras funções de segurança, diagnose e monitoramento, assim como funções visando à economia de combustível, podem ser integradas às unidades de comando eletrônicas. Elas também podem se comunicar com outros sistemas do motor e veículo, enviando e recebendo sinais para o painel e sistemas de transmissão e de freio do veículo, entre outros.

10.5 Bicos injetores

Os bicos injetores são componentes de extrema precisão, responsáveis por nebulizar finamente o combustível na câmara de combustão do motor. Quanto melhor for a pulverização, maior será a eficiência térmica do motor (ver Capítulo 3 – Propriedades e curvas características dos motores). Em consequência, se obtém mais economia de combustível com menor emissão de gases poluentes.

Os modernos motores Diesel estão equipados com bicos injetores que devem injetar combustível sob pressão em ambientes submetidos a pressões e temperaturas elevadas, tudo para que o motor obtenha melhor desempenho.

Os bicos de pino são mais utilizados em motores de injeção indireta (ver Capítulo 7 – A combustão nos motores

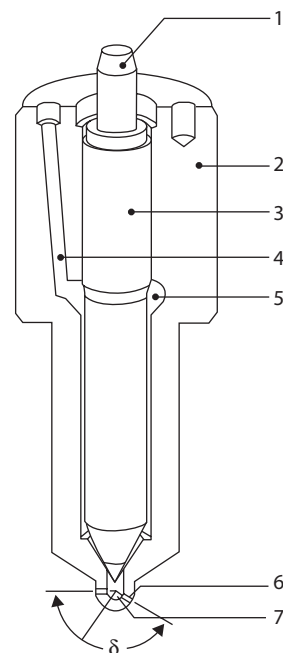


Figura 10.5 – Bico injetor, tipo agulha. [A]

alternativos) e têm a vantagem de exigirem manutenção menos frequentes, pois o próprio movimento do pino promove a limpeza dos depósitos.

Os bicos de agulha são utilizados em motores de injeção direta (ver Capítulo 7 – A combustão nos motores alternativos) por causa da necessidade de melhor nebulização do combustível. Podem ser utilizados um ou mais orifícios de pequeno diâmetro, conhecendo-se casos de 12 furos de 0,2 a 0,3 mm.

10.6 Sistema distribuidor ou de bomba rotativa

Essas bombas compactas e com um regulador acoplado foram, e ainda são, utilizadas em pequenos tratores e motores de geradores. Sua construção compacta e o fato de serem lubrificadas pelo próprio combustível traz vantagens de custo, porém as torna muito sensíveis à exposição de combustível contaminado e/ou mal filtrado.

Tem-se como exemplo a bomba tipo rotativa apresentada na Figura 10.6, de regulador mecânico.

Nessa bomba injetora, a bomba de transferência (de palhetas) alimenta um distribuidor constituído de um cabeçote hidráulico por meio de uma válvula de medição ou dosadora, que controla o débito em função da carga desejada. O volume existente entre os êmbolos apontados na Figura 10.6 é alimentado por um canal do cabeçote que, ao girar, coloca outro canal de comunicação com os injetores de cada cilindro; simultaneamente os êmbolos são empurrados para o centro, pelo anel excêntrico.

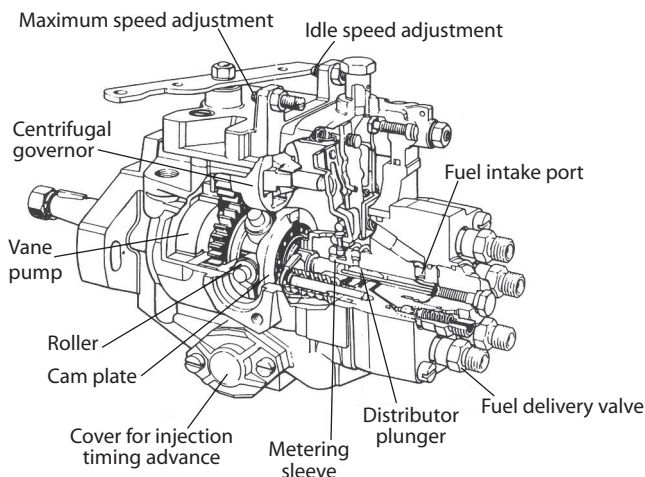


Figura 10.6 – Bomba rotativa. (C)

A Figura 10.6 mostra o cabeçote hidráulico, que funciona simultaneamente como bomba injetora e como distribuidor.

O combustível provém da bomba de palhetas ao mesmo tempo em que o cabeçote gira. Passa pela válvula de admissão onde é dosada a quantidade. Num certo instante o canal de admissão coincide com um dos canais de alimentação do rotor central, fazendo o combustível escoar pelo canal central entre os pistões bombeadores.

Em seguida, o rotor, ao girar, coloca o canal central em comunicação com um dos canais que alimentará um injetor. Ao mesmo tempo, os pistões injetores são empurrados para o centro pelos ressaltos do anel de ressaltos.

No caso da Figura 10.6, mostra-se o cabeçote de uma bomba para motor de 4 cilindros, onde se observam 4 canais de admissão, 4 canais de alimentação dos injetores e 4 ressaltos no anel.

10.7 Sistema acumulador ou tipo *Common Rail*

Sistemas desse tipo foram inicialmente usados em motores de grandes potências, de baixa rotação, e recentemente, com o advento do comando eletrônico, o seu uso se expandiu para diversas aplicações, desde motores para carros de passeio e utilitários (leves, médios e pesados) até locomotivas e navios.

A principal vantagem é aliar alta pressão de injeção, de mais de 2.000 bar, com a possibilidade de realizar injeções múltiplas (pré-injeção, injeção principal e pós injeção) e com flexibilidade para ajustar o início de injeção, de modo a adaptá-los a cada regime de funcionamento do motor, realizando essas funções com pequenas tolerâncias e alta precisão durante toda a vida útil.

Os elementos básicos são: uma bomba principal (1) que fornece combustível em alta pressão a uma galeria comum (2) que, por sua vez, disponibiliza combustível para todos os injetores (4).

O processo de injeção é comandado pela programação e mapas armazenados na unidade eletrônica de comando (3) que aciona eletricamente cada um dos injetores.

No sistema de injeção *Common Rail*, a produção de pressão e a injeção são fenômenos independentes. A bomba fornece combustível sobre pressão mesmo em baixas rotações do motor. Por outro lado, o instante e a quantidade de injeção são calculados na unidade de comando eletrônico, e o acionamento elétrico dos injetores permite injeções com precisão, independentemente das tolerâncias dos componentes mecânicos do motor.

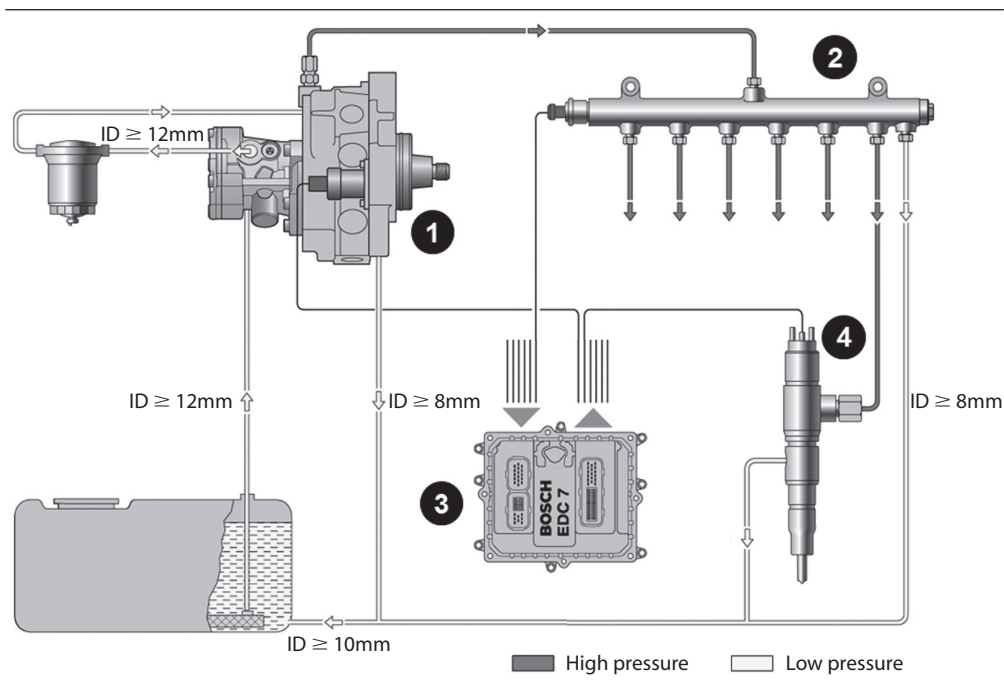


Figura 10.7 – Sistema *Common Rail*. [A]

10.7.1 Bomba de alta pressão

A bomba de alta pressão (Figura 10.8) tem a função de disponibilizar combustível suficientemente pressurizado em todas as faixas de funcionamento e por toda vida útil do motor. Isso inclui a disponibilização de reserva de combustível, necessária para um processo rápido de partida e um rápido aumento da pressão da galeria comum. A bomba de alta pressão é montada ao motor Diesel preferencialmente no mesmo lado que a bomba injetora distribuidora convencional. Ela é acionada pelo motor por meio de acoplamento, engrenagem, corrente ou correia dentada, com no máximo 3.000 rpm. A sua lubrificação é feita pelo combustível ou pelo óleo lubrificante do motor.

A bomba de engrenagens (14) alimenta o circuito de lubrificação, refrigeração e câmara do pistão da bomba de alta pressão. O eixo de acionamento (1) com seu ressalto excêntrico (2) movimenta os três pistões da bomba (3). Quando o PMI é ultrapassado, a válvula de admissão (5) fecha e o combustível na câmara de elemento (4) não pode escapar. Ele pode então ser comprimido pela pressão de débito da bomba de pré-alimentação. A pressão que se forma abre a válvula de escape (6) assim que a pressão no *Rail* é atingida, o combustível comprimido entra no circuito de alta pressão (7). Modernas versões dessas bombas admitem combustível na quantidade requerida pelo motor

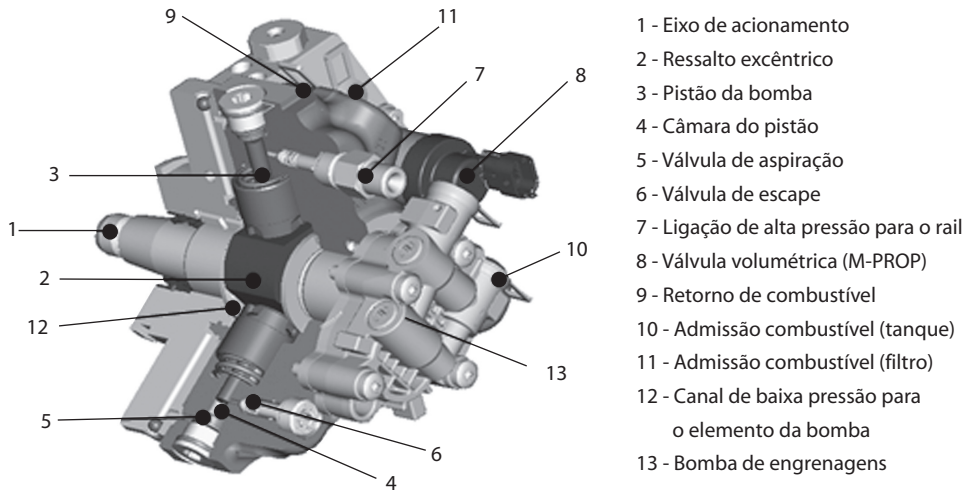


Figura 10.8 – Bomba de alta pressão. [A]

para a carga e rotação do momento. Isso é feito eletronicamente, quando o combustível é admitido na bomba pelo canal apropriado (11) e daí passa para a válvula volumétrica (8). Esta recebe o sinal eletrônico e reduz o seu orifício de retorno para vaziar todo o excesso de combustível para o retorno (9), admitindo para o canal de baixa pressão (13) para o elemento somente a quantidade necessária. Com isso se evita se pressurizar combustível em excesso e, conseqüentemente, gerar o aquecimento desnecessário deste. O combustível frio permite que o veículo se utilize de tanque de combustível plástico ao invés dos metálicos.

10.7.2 Injetor

O instante do início e o volume de injeção são ajustados por intermédio do injetor de comando elétrico. Ele substitui o conjunto injetor (bico e porta injetor) dos sistemas convencionais de injeção Diesel.

Semelhantes aos porta-injetores existentes nos motores de injeção direta Diesel DI (*Direct Injection*), os injetores são fixados com garras no cabeçote do cilindro. Com isso os injetores *Common rail* são adequados para instalação nos motores Diesel DI sem modificações significativas no cabeçote do cilindro.

O injetor pode ser dividido em diversos blocos de função, injetor de orifício com agulha do injetor, sistema servo hidráulico, válvula magnética e as ligações pertinentes e canais de combustível.



Figura 10.9 – Injetor – DI. [A]

O combustível (Figura 10.10) é conduzido da ligação de alta pressão (4) através de um canal (10) para o bico, bem como através do estrangulador de admissão (7) para a câmara de controle da válvula (8). A câmara de controle é ligada ao retorno de combustível (1) através do estrangulador de saída (6), que pode ser aberto pela válvula magnética.

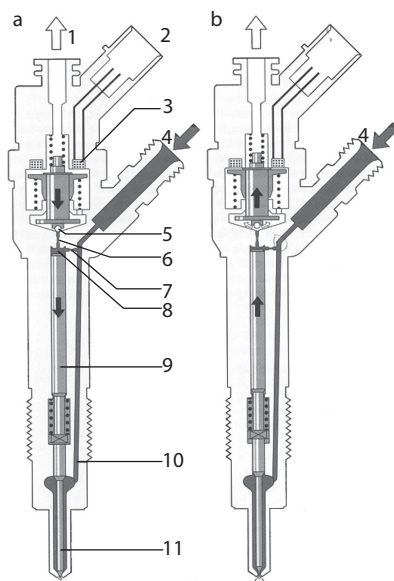


Figura 10.10 – Injetor. [A]

Quando o estrangulador de saída está fechado, predomina a força hidráulica sobre o pistão de comando da válvula (9) sobre aquela do estágio de pressão da agulha do injetor (11). Conseqüentemente, a agulha é pressionada no assento e veda o canal de alta pressão em relação ao compartimento do motor. O combustível não pode fluir para a câmara de combustão. Na ativação da válvula magnética o estrangulador de saída é aberto. Isso faz com que a pressão na câmara de comando da válvula caia, diminuindo também a força hidráulica sobre o pistão de comando da válvula. Assim que a força hidráulica se apresenta inferior àquela sobre o estágio de pressão da agulha do injetor, a agulha se abre para que o combustível possa passar pelos furos de injeção para dentro da câmara de combustão (Figura 10.10). A quantidade injetada portanto, será proporcional ao tempo de abertura do bico, e por consequência, ao de ativação da válvula magnética.

10.7.3 Injeção modulada *Common Rail*

No sistema de injeção modulada *Common Rail* existe a possibilidade de realização de pré e pós-injeção (Figura 10.11) em significativo número de injeções parciais.

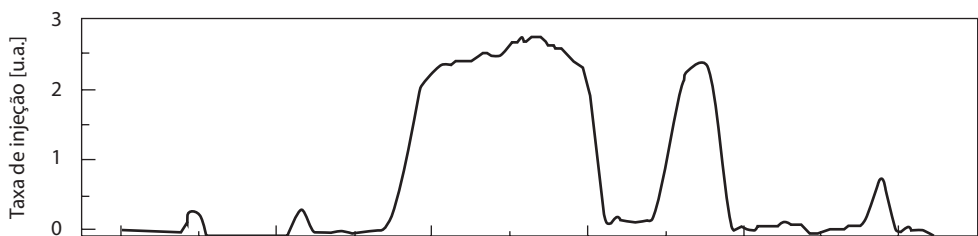


Figura 10.11 – Injeção modulada. [A]

A pré-injeção pode ser anteposta ao PMS em até 90°. Para o início da pré--injeção em 40°APMS (antes do PMS), o combustível pode atingir a superfície do pistão e da parede do cilindro e provocar uma diluição inadmissível da lubrificação. Na pré-injeção é introduzida uma pequena quantidade de óleo diesel (1... 4 mm³) no cilindro, provocando um “pré-acondicionamento” da câmara de combustão, podendo melhorar o grau de eficiência da queima, produzindo os seguintes efeitos: compressão ligeiramente elevada por uma pré-reação ou queima parcial, reduzindo o atraso da ignição da injeção principal e reduzindo a pressão de combustão, tornando-a mais suave (menos ruidosa).

Esses efeitos reduzem os ruídos da combustão, o consumo de combustível e, conseqüentemente, a emissão de poluentes.

A injeção principal está diretamente ligada com a capacidade do motor de absorver a carga desejada. Mas, a sua modulação para acontecer o mais tarde possível traz vantagens na redução da temperatura de pico de combustão e na possibilidade de acontecerem reações químicas que formam gases tóxicos como os óxidos de nitrogênio. A modulação da injeção principal significa a capacidade do sistema *common-rail* de gerar uma taxa de elevação de pressão de forma trapezoidal, com valor menor no início e maior em seu final, retardando a injeção como um todo. A pós-injeção normalmente está ligada à necessidade de se aumentar a temperatura dos gases de escapamento a fim de permitir a queima de contaminantes e conseqüentemente a regeneração de filtros de pós--tratamento instalados no escapamento ou promover condições ideais de operação eficiente de redutores catalíticos. Portanto, sua função está diretamente ligada com a função e regeneração de dispositivos de controle de emissões instalados no escapamento do motor.

A capacidade de gerar injeções múltiplas e controladas, com alta precisão e baixas tolerâncias somente é possível em sistemas *common-rail* que tenham injetores com válvulas eletromagnéticas de respostas rápidas, ou em vez delas, tenham seu controle feito com pilhas de cristais piezoelétricos.

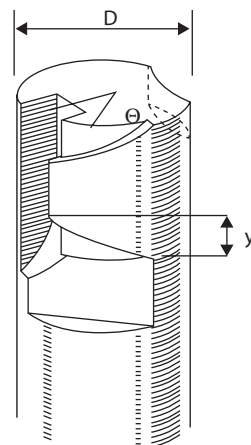
EXERCÍCIOS

- 1) O esquema abaixo mostra um dos elementos de uma bomba injetora instalada num motor 2T de 6 cilindros. O curso útil “y” varia com o ângulo de rotação θ , segundo a expressão:

$$y = 5 \cdot 10^{-2} \theta - 2 \cdot 10^{-4} \theta^2 \text{ com "y" em mm e } \theta \text{ em graus.}$$

Considerando-se o motor a 2.600 rpm e $\theta = 60^\circ$ a partir da posição de débito nulo, pede-se:

- O volume injetado num ciclo, sendo $D = 6\text{mm}$;
- Estimar a potência do motor, admitindo-se que $0,2 \text{ kg/CV h}$ é um consumo específico razoável para um motor de ignição espontânea, cujo combustível é de massa específica $\rho = 0,84 \text{ kg/L}$;



- c) Qual o curso da cremalheira, sabendo-se que o diâmetro primitivo de seu setor de engrenagens acionado por esta é de 20 mm?

(Para a realização deste exercício, faz-se necessário buscar maiores informações sobre bombas injetoras em linha.)

Respostas:

a) 386,8 mm³; b) 253,4 CV; c) 10,5 mm.

- 2) Um motor Diesel no banco de provas apresenta um consumo de 400 g em 40 s, à rotação de 2800 rpm. Sendo o motor 4T, de 6 cilindros. Qual o débito por cilindro da bomba injetora? ($\rho_{\text{comb}} = 0,84 \text{ kg/L}$)

Resposta:

85 mm³/inj x cil.

- 3) Como é feito o controle da pressão de injeção no motor Diesel?

Resposta:

Pela tensão da mola do bico injetor.

- 4) Um motor Diesel a 4T, de locomotiva, tem 8 cilindros e uma potência de 1.200 CV a 600 rpm. Utiliza como combustível um óleo pesado de $\text{pci} = 10.000 \text{ kcal/kg}$ e $\rho_{\text{comb}} = 0,9 \text{ kg/L}$ e tem uma eficiência global de 42%. Quanto deve ser o volume em mm³ de combustível injetado por cilindro, por ciclo?

Resposta:

1399,5 mm³ /inj x cil.

- 5) Um motor Diesel a 4T de 6 cilindros, na rotação de 1.800 rpm, a plena carga, tem um consumo específico de 0,2 kg/CV.h de óleo diesel de massa específica 0,82kg/L e desenvolve uma potência de 100 CV. Se utiliza uma bomba Bosch em linha (de elementos injetores individuais). Qual deve ser o débito em mm³ por cilindro?

Resposta:

75,3 mm³ /inj x cil.

- 6) Num motor Diesel de 6 cilindros a 4T, numa certa condição de funcionamento a 2.000 rpm, apresenta potência de 100 CV e o consumo específico é 0,18 kg/CV.h. Sabendo-se que o óleo diesel tem massa específica 0,82 kg/L, qual o débito em $\text{mm}^3/\text{injeção} \times \text{cilindro}$?

Resposta:

61 $\text{mm}^3 / \text{inj} \times \text{cil}$.

- 7) Numa bomba injetora Diesel em linha (elementos injetores individuais), para um motor de 6 cilindros a 4T, os pistões injetores têm um diâmetro de 5 mm e, para uma dada posição do acelerador têm um curso útil de 3 mm. Quando o motor está a 2.000 rpm, qual o consumo de combustível em L/h?

Resposta:

21,2 L/h.

- 8) Num motor Diesel a 4T, a 2.000 rpm, o avanço da injeção é 15° , o ângulo de injeção é 30° , o retardamento é 1 ms e supõe-se que após o início da combustão, o crescimento da pressão seja linear. Supondo que a pressão máxima aconteça 2° após o fim da injeção e que o gradiente da pressão seja $3 \text{ kgf/cm}^2/\text{grau}$. Qual a pressão máxima atingida, se no início da combustão a pressão é 30 kgf/cm^2 ?

Resposta:

90 Kgf/cm^2 .

- 9) Cite três diferenças fundamentais entre o funcionamento do motor Otto e o do Diesel.

Resposta:

Diferenças fundamentais:

	Ciclo Otto	Ciclo Diesel
Na admissão:	Mistura Combustível-Ar	Só Ar
Ignição:	Por faísca	Espontânea
Combustão:	Por propagação de chama	Por autoignição

- 10) Por que no ciclo-padrão ar-diesel, que procura representar o ciclo real do motor Diesel, o fornecimento do calor da fonte quente é imaginado isobárico?

Resposta:

Em virtude da injeção progressiva do combustível.

- 11) Num motor Diesel, ao passar de um combustível de $NC = 45$ para outro de NC diferente, observa-se uma variação do retardamento de 2,08 ms para 1,6 ms a 2.000 rpm.

O NC do novo combustível é maior ou menor que o do original? Justifique. De quanto deverá ser variado o ângulo de avanço da injeção para manter o mesmo ponto de início da combustão?

Respostas:

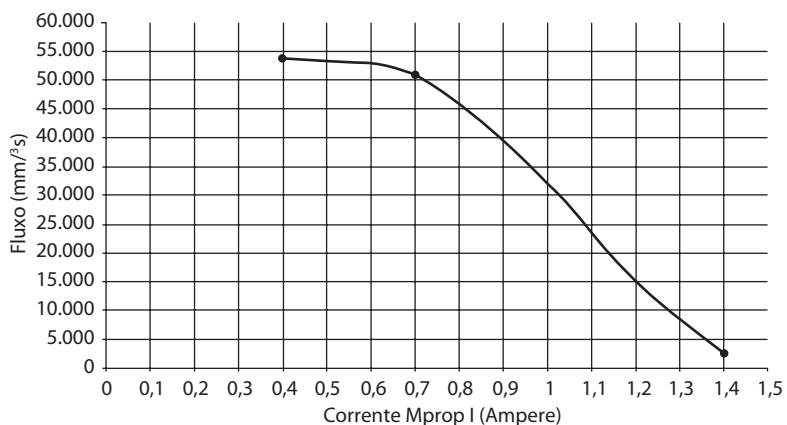
- a) A diminuição do tempo de retardamento, indica menor resistência à autoignição, portanto combustível de maior NC .
 b) Variação do ângulo de avanço: 5,76 graus.
-

- 12) Como é feito o controle da pressão de injeção no *Common Rail*?

Resposta:

Pela válvula de escape da bomba de alta pressão, mantendo a pressão no "Rail".

- 13) O fluxo na bomba de pressão em regime de trabalho a 2.500 rpm num motor 4 cilindros para aplicação comercial consome o equivalente à injeção de $140 \text{ mm}^3/\text{curso}$ em cada cilindro.



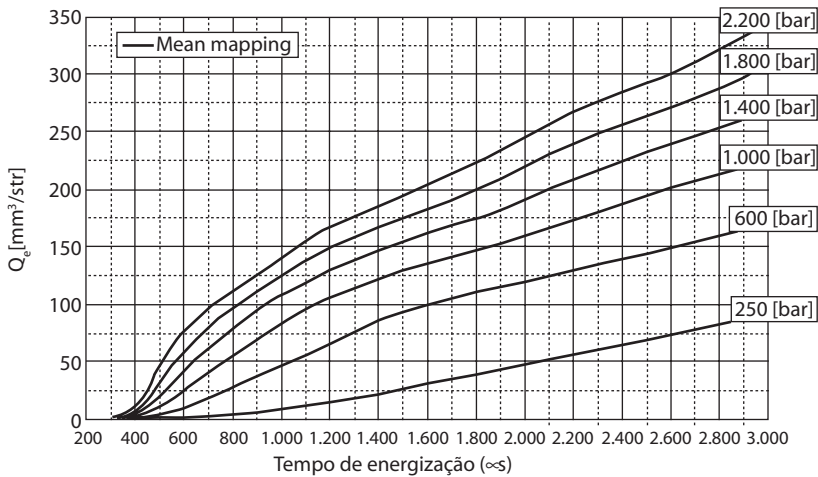
Nesta condição o sistema *Common Rail* opera à pressão de trabalho 1.800 bar com fluxos de comando e retorno dos injetores totais correspondentes a 3% do volume injetado. Calcule a corrente de atuação da válvula volumétrica M_{prop} esperada para ajuste de fluxo da bomba CP.

- 14) Num dado regime de operação um motor 6 cilindros recebe 160 mm³/injeção do sistema *Common Rail* em operação à pressão de rail 2.200 bar. Considerando que neste regime a calibração do motor alcance 1.620 Nm de torque, qual seria o tempo de energização esperado para esse mesmo injetor.

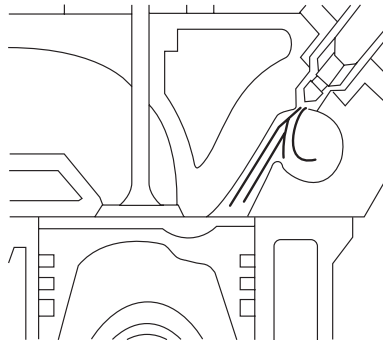
Considere:

$$Q_{inj} = \text{trq} / (1,5 * n_{cyl})$$

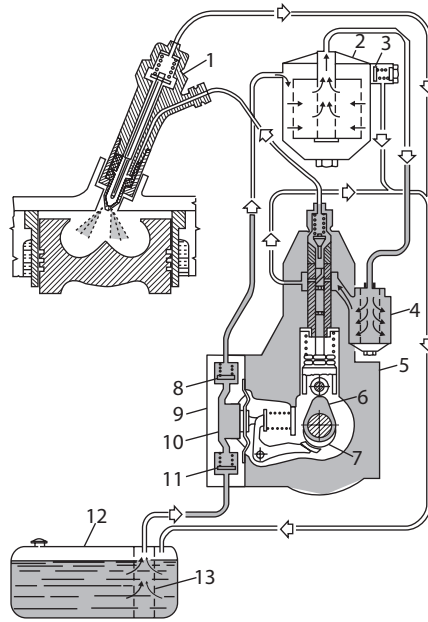
Curva de injeção do injetor CRI:



- 15) Identificar a câmara de combustão representada na figura abaixo.



16) Identificar os componentes do sistema de injeção na figura abaixo.



Referências bibliográficas

1. BRUNETTI, F. *Motores de combustão interna*. Apostila, 1992.
2. GIACOSA, D. *Motori endotermici*. Ulrico Hoepli Editores SPA, 1968.
3. JÓVAJ, M. S. et al. *Motores de automóvel*. Editorial Mir, 1982.
4. OBERT, E. F. *Motores de combustão interna*. Globo, 1971.
5. TAYLOR, C. F. *Análise dos motores de combustão interna*. São Paulo: Edgard Blücher, 1988.
6. HEYWOOD, J. B. *Internal combustion engine fundamentals*. M. G. H. International Editions, 1988.
7. VAN WYLEN, G. J.; SONNTAG, R. E. *Fundamentos da termodinâmica clássica*. São Paulo: Edgard Blücher, 1976.
8. STONE, R. *Introduction to internal combustion engines*. SAE, 1995.

Figuras

Agradecimentos às empresas / aos sites:

- A. Bosch – Sistemas de Injeção.
- B. *Automotive Engineering International*. Várias edições.
- C. Delphi Automotivo.

