



Universidade Federal da Bahia
Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica

**DESENVOLVIMENTO DE UMA VÁLVULA DINAMICAMENTE
CONTROLÁVEL PARA MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA**

Roberto Guimarães de Sousa

Salvador
2007

Universidade Federal da Bahia

Roberto Guimarães de Sousa

**DESENVOLVIMENTO DE UMA VÁLVULA DINAMICAMENTE
CONTROLÁVEL PARA MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA**

Trabalho apresentado ao Programa de Pós-graduação em Mecatrônica, programa conjunto entre o Departamento de Engenharia Mecânica e o Departamento de Ciência da Computação da Universidade Federal da Bahia como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Mecatrônica.

Orientador: Prof. Dr. Eng. Herman Augusto Lepikson

Salvador
2007

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Bernadete Sinay Neves,
Escola Politécnica da UFBA

S719d Sousa, Roberto Guimarães de
Desenvolvimento de uma válvula dinamicamente controlável para motores
de combustão interna / Roberto Guimarães de Sousa - Salvador, 2007.

--- f. : il.

Orientador : Prof.Dr. Eng. Herman Augusto Lepikson
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, 2007.

1.Motores de combustão interna. 2.Válvulas I. Lepikson, Herman Augusto.
II.Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica. III. Título.

CDD 20.ed. 621.43

TERMO DE APROVAÇÃO

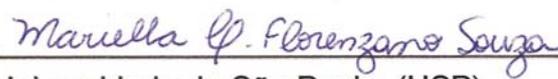
ROBERTO GUIMARÃES DE SOUSA

DESENVOLVIMENTO DE UMA VÁLVULA DINAMICAMENTE CONTROLÁVEL PARA MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Mecatrônica, Universidade Federal da Bahia, pela seguinte banca examinadora.

Herman Augusto Lepikson - Orientador 
Doutor em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)
Universidade Federal da Bahia

Marcelo José Pirani 
Doutor em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)
Universidade Federal da Bahia

Mariella Consoni Florenzano Souza 
Doutora em Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo (USP)
Ford Motor Company

Salvador, 28 de novembro de 2007

Dedico à minha família (minha esposa, meus pais, e minha avó) que me apoiaram incondicionalmente em todos os momentos difíceis durante a execução deste projeto de dissertação.

"Há mais pessoas que desistem do que pessoas que fracassam".

- HENRY FORD

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Herman, por ter me mostrado a luz em vários momentos importantes desse trabalho, e também por ter me possibilitado realizar a viagem de estudo à Alemanha, período onde o trabalho sofreu um grande amadurecimento.

Ao Professor Günther Höehne, da Universidade Técnica de Ilmenau e toda a sua equipe, pela acolhida e por terem dado suporte durante a viagem realizada.

Ao amigo Serafin da empresa Out-Line que deu amplo suporte na fabricação e nos ajustes do protótipo construído.

A todos os estagiários e bolsistas com os quais tive o prazer de trabalhar e passar alguma experiência, no Centro de Capacitação Tecnológica em Automação Industrial.

Ao Laboratório de Geotecnia, em especial ao professor Luiz Edmundo, por ter colaborado com equipamentos essenciais a este trabalho.

A Lúcia Lago, apoio administrativo de Mestrado, que ao longo desse tempo se mostrou uma pessoa eficiente e uma grande amiga.

Agradeço também Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia - FAPESB pelo apoio financeiro para fabricação do protótipo.

A todos os companheiros e amigos nos diversos laboratórios, que sempre se colocaram à disposição para quaisquer necessidades durante a dissertação.

À minha esposa, Jane, por todo o amor, apoio e companheirismo durante todos os momentos desta difícil caminhada.

Enfim, sinto-me sinceramente devedor a todos que, direta ou indiretamente, me apoiaram e me ensinaram algo relevante para a conclusão desse trabalho de dissertação.

RESUMO

Os motores automotivos utilizam sistema mecânico para acionamento das válvulas de exaustão e admissão. O sistema de acionamento mecânico de válvulas tem se mostrado confiável e eficiente por muitos anos, porém, a falta de flexibilidade para variar tempos e cursos das válvulas é umas das maiores causas da baixa eficiência e alto consumo de combustível nos Motores de Combustão Interna.

Atualmente grande importância tem sido dada à redução no consumo de combustível, melhorias no desempenho e redução nos níveis de emissão.

Reconhecendo este compromisso, indústrias automotivas juntamente com a comunidade científica estudam tecnologias capazes de viabilizar as Válvulas com Tempos Variáveis (Variable Valve Time - VVT). Entre esses novos tipos de dispositivos estão os sistemas denominados Camless (desprovido de cames) que utilizam atuadores independentes que possibilitam o controle dos movimentos das válvulas. Esta tecnologia promete aumentar a economia de combustível e potência além de reduzir as emissões e custos de fabricação do motor.

Este trabalho aborda o desenvolvimento de um atuador eletro-hidráulico capaz de atender a demanda típica de motores automotivos. Mais especificamente, se propõe a atender à necessidade de flexibilização do controle das variáveis envolvidas no processo de combustão em motores de combustão interna. Entre suas principais características, o sistema desenvolvido prioriza as possibilidades de controle independente de cada válvula, variando seus tempos de ciclo, curso e velocidade de assentamento.

Palavras-Chave: Motores de combustão interna, Válvulas Camless, Sistemas Mecatrônicos.

ABSTRACT

Great part of automotive engines use mechanical valvetrains to activate the intake and exhaust valves. The valve motion is timed to the camshaft and crankshaft rotation.

This type of valve actuation has been proven for many years efficient and reliable. However, the lack of flexibility of mechanical valvetrain to vary timing and lift of intake valves, is one of the major causes for significantly lower fuel efficiency.

In the coming years, particular importance will be assigned to reducing the fuel consumption. Increasing demands on the performance of automobile engines require the production of more mechanical energy for a given amount of chemical fuel with reduced emissions.

Recognizing this compromise, automobile manufacturers have been attempting to provide vehicles capable of variable valve timing (VVT). The Camless technology require independent valve actuators that offers programmable valve motion control capability. This technology promises, increased fuel economy, horsepower and reduced emissions and manufacturing cost.

This work describes the conceptual design of an electro-hydraulic actuator. More specifically, it is a device capable of producing engine valve displacement at typical automotive demands. The goals for maximum displacement and frequency are 10 mm and 50 Hz respectively. The unit must be capable of varying valve displacement and time.

Keywords: Camless, Internal Combustion Engines, Valves, Mechatronic.

SUMÁRIO

CAPITULO 01 - INTRODUÇÃO.....	- 1 -
1.1. OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO.....	- 2 -
1.2. METODOLOGIA ADOTADA.....	- 3 -
1.3. ESCOPO DA DISSERTAÇÃO.....	- 4 -
CAPITULO 02 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	- 5 -
2.1. BREVE HISTÓRIA DO MOTOR CICLO OTTO.....	- 5 -
2.2. MOTOR DE QUATRO TEMPOS.....	- 6 -
2.3. VÁLVULAS E COMANDO DE VÁLVULAS.....	- 8 -
2.3.1. Válvula de Exaustão.....	- 10 -
2.3.2. Válvula de Admissão.....	- 12 -
2.3.3. Limitações para a Sobreposição das Válvulas.....	- 13 -
2.3.4. Tempos de Válvulas para Diferentes Aplicações.....	- 14 -
2.4. PARÂMETROS OPERACIONAIS DE VÁLVULAS.....	- 17 -
2.4.1. Absorção e Dissipação de Calor em Válvulas de Exaustão.....	- 17 -
2.4.2. Temperatura, Tensão e Durabilidade.....	- 18 -
2.5. VÁLVULAS CONTROLÁVEIS.....	- 19 -
2.6. CARACTERÍSTICAS DE UM MCI CAMLESS.....	- 23 -
2.6.1. Variação dos tempos da válvula de admissão.....	- 23 -
2.6.2. Variação dos tempos da válvula de exaustão.....	- 25 -
2.6.3. Variação do curso da válvula.....	- 26 -
2.6.4. Estabilidade em regimes sem carga - ociosos.....	- 28 -
2.6.5. Variação na velocidade da válvula.....	- 29 -
2.6.6. Resposta ciclo a ciclo.....	- 30 -
2.6.7. Desativação das válvulas.....	- 30 -

2.6.8. Variação na frequência de ativação	- 32 -
2.6.9. Vantagens adicionais	- 32 -
2.7. TECNOLOGIA EXISTENTE	- 33 -
2.8. PROPOSTAS DE ATUADORES PARA MOTORES CAMLESS	- 38 -
2.8.1. Atuação por solenóide	- 38 -
2.8.2. Atuação Hidráulica e Pneumática	- 43 -
2.8.3. Atuação Piezelétrica	- 52 -
2.9 ANÁLISE COMPARATIVA DOS ATUADORES	- 53 -

CAPITULO 03 - O PROCESSO DE PROJETO - 54 -

3.1. PROJETO INFORMACIONAL	- 55 -
3.2. PROJETO CONCEITUAL	- 56 -
3.3. PROJETO PRELIMINAR	- 61 -
3.4. PROJETO DETALHADO	- 62 -
3.5. FABRICAÇÃO	- 62 -
3.6. HARDWARE E SOFTWARE	- 63 -
3.7. TESTES E VALIDAÇÃO	- 63 -

CAPITULO 04 - PROJETO, FABRICAÇÃO E MONTAGEM - 65 -

4.1. PROJETO INFORMACIONAL	- 65 -
4.1.1. Estudo do ciclo de vida e clientes da válvula	- 66 -
4.1.2. Identificação das Necessidades dos Clientes	- 68 -
4.1.3. Estabelecimento dos Requisitos da Qualidade	- 70 -
4.1.4. Análise de Sistemas Equivalentes	- 71 -
4.1.5. Análise dos Parâmetros de um Motor Comercial	- 72 -
4.1.6. Especificações de Projeto	- 73 -
4.2. PROJETO CONCEITUAL	- 75 -
4.2.1. Função Global	- 75 -
4.2.2. Estrutura Funcional	- 76 -
4.2.3. Matriz Morfológica	- 79 -
4.2.4. Síntese de Concepções Alternativas	- 81 -
4.2.5. Avaliação e Seleção das soluções	- 83 -
4.3. PROJETO PRELIMINAR	- 88 -
4.3.1. Circuito Hidráulico Válvulas e Acionamento	- 88 -
4.3.2. Atuador	- 90 -
4.3.3. Válvulas Direcionais	- 94 -

4.4. PROJETO DETALHADO	- 98 -
4.4.1. Dispositivo para testes do protótipo.	- 98 -
4.4.2. Materiais	- 99 -
4.4.3. Componentes	- 100 -
4.4.4. Hardware	- 101 -
4.4.5. Software.....	- 103 -
4.5. FABRICAÇÃO	- 104 -
4.6. TESTES E VALIDAÇÃO.....	- 107 -
CAPITULO 05 - ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	- 108 -
5.1. VARIAÇÃO DE CURSOS	- 108 -
5.2. VARIAÇÃO DE TEMPOS	- 113 -
5.3. VARIAÇÃO DA PRESSÃO.....	- 115 -
5.4. AMORTECIMENTO HIDRÁULICO	- 116 -
CAPITULO 06 - CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS.....	- 119 -
6.1. PRINCIPAIS RESULTADOS A DESTACAR	- 120 -
6.2. LIMITAÇÕES DO TRABALHO	- 123 -
6.3. TRABALHOS COMPLEMENTARES	- 123 -
6.4. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	- 124 -
REFERÊNCIAS.....	- 126 -

LISTA DE TABELAS

2.1. – Parâmetros típicos de motores a gasolina ou diesel.	- 15 -
2.2. – Parâmetros típicos de motores ciclo Diesel e Otto.	- 16 -
2.3. – Análise comparativos dos diversos tipos de atuação.	- 53 -
3.1. – Matriz Morfológica Generalizada.	- 59 -
3.2. – Princípios de solução ou concepções alternativas.	- 60 -
3.3. – Matriz de decisão (FORCELLINI, 2003).	- 61 -
4.1. – Especificações importantes para funcionalidade.	- 73 -
4.2. – Especificações importantes para estrutura.	- 74 -
4.3. – Especificações importantes para fabricação.	- 74 -
4.4. – Legenda: interfaces do sistema técnico.	- 76 -
4.5. – Matriz morfológica.	- 79 -
4.6. – Síntese de concepções alternativas.	- 82 -
4.7. – Tabela Passa/Não Passa.	- 85 -
4.8. – Matriz de Avaliação baseada nos requisitos de qualidade.	- 86 -
4.9. – Conceito escolhido.	- 87 -
4.10. – Materiais utilizados no protótipo.	- 99 -
4.11. – Componentes utilizados no protótipo.	- 100 -
4.12. – Componentes do sistema de aquisição e controle.	- 101 -
4.13. – Componentes principais do conjunto.	- 105 -
5.1. – Velocidade média de amortecimento (m/s).	- 117 -

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Ciclo de trabalho de um motor ciclo Otto.....	- 6 -
Figura 2.2. Variação de pressão no cilindro.....	- 7 -
Figura 2.3. Comando de válvulas e virabrequim.....	- 8 -
Figura 2.4. Diagrama de tempos de válvulas.....	- 9 -
Figura 2.5. Diagrama de tempos – ângulo do virabrequim.....	- 10 -
Figura 2.6. Efeito da sobreposição em alta velocidade.....	- 11 -
Figura 2.7. Efeito do atraso do fechamento da válvula de admissão em altas velocidades.....	- 12 -
Figura 2.8. Emissão de gases para a atmosfera em função da sobreposição.....	- 14 -
Figura 2.9. Diagrama de tempos para diversos motores.....	- 15 -
Figura 2.10. Absorção e dissipação de calor em válvulas de exaustão.....	- 17 -
Figura 2.11. Efeito da temperatura nas tensões das válvulas.....	- 18 -
Figura 2.12. Tensões nas válvulas.....	- 19 -
Figura 2.13. Motor convencional e Motor Camless.....	- 20 -
Figura 2.14. Histograma das Atividades de Patentes.....	- 22 -
Figura 2.15. Variação nos tempos da válvula de admissão.....	- 24 -
Figura 2.16. Variação nos tempos da válvula de exaustão.....	- 26 -
Figura 2.17. Variação do curso das válvulas.....	- 27 -
Figura 2.18. Cursos diferentes para o par de válvulas.....	- 28 -
Figura 2.19. Perfil da curva de posição para diferentes velocidades em motores camless.....	- 29 -
Figura 2.20. Polia Variável.....	- 34 -
Figura 2.21. Honda VTEC com múltiplos comes.....	- 35 -
Figura 2.22. Conjunto de peças no comando de válvulas - Honda VTEC.....	- 35 -
Figura 2.23. Variocam – Porsche 911.....	- 36 -
Figura 2.24. VANOS – BMW 316ti.....	- 36 -
Figura 2.25. Layout mecânico de um solenóide.....	- 38 -
Figura 2.26. Diferentes configurações – atuação com solenóide.....	- 40 -
Figura 2.27. SVA – <i>Smart Valve Actuation</i>	- 42 -

Figura 2.28. ECU – <i>Central Eletronic Control Unit</i>	- 42 -
Figura 2.29. EBV – <i>Electronic Ball Valve</i>	- 43 -
Figura 2.30. Aplicação do Princípio de Pascal para transmissão de forças	- 44 -
Figura 2.31. HVA- <i>Sturman Industries</i>	- 46 -
Figura 2.32. Histórico de desenvolvimento - <i>Sturman Industries</i>	- 46 -
Figura 2.33. Pêndulo hidráulico.	- 47 -
Figura 2.34. Pêndulo hidráulico com amortecimento.	- 48 -
Figura 2.35. Atuadores Piezo-hidráulico.....	- 49 -
Figura 2.36. Proposta eletro-hidráulica	- 50 -
Figura 2.37. Proposta eletro-hidráulica	- 50 -
Figura 2.38. Proposta eletro-hidráulica	- 51 -
Figura 2.39. Atuador eletro-pneumático	- 51 -
Figura 2.40. Atuador piezelétrico	- 52 -
Figura 3.1. Modelo consensual de fases	- 55 -
Figura 3.2. Metodologia proposta para o projeto conceitual.....	- 57 -
Figura 3.3. Função Global.....	- 57 -
Figura 3.4. Estrutura funcional generalizada.....	- 58 -
Figura 3.5. Estrutura funcional generalizada.....	- 63 -
Figura 4.1- Ciclo de Vida do Produto	- 67 -
Figura 4.2 - Curva de Potência e Torque.....	- 72 -
Figura 4.3 - Função global da válvula	- 75 -
Figura 4.4 - Atuadores: diferentes direções e tipos de movimento.....	- 76 -
Figura 4.5 - Estrutura funcional - 01.....	- 77 -
Figura 4.6 - Estrutura funcional - 02.....	- 78 -
Figura 4.7 - Estrutura funcional - 03.....	- 78 -
Figura 4.8 - Circuito hidráulico do protótipo.	- 89 -
Figura 4.9 – Força da mola x Pressão no cilindro	- 90 -
Figura 4.10 – Diagrama de corpo livre da válvula.....	- 91 -
Figura 4.11 – Força e velocidade x diâmetro.....	- 93 -
Figura 4.12 – Cilindro do atuador hidráulico.....	- 94 -
Figura 4.13 – Corpo da válvula.....	- 95 -
Figura 4.14 – Carretel da válvula.....	- 95 -
Figura 4.15 – Conjunto de acionamento.....	- 96 -
Figura 4.16 – Funcionamento das válvulas.....	- 97 -
Figura 4.17 – Conjunto completo.....	- 99 -
Figura 4.18 – Detalhe do alojamento do o’ring.....	- 100 -
Figura 4.19 – Circuito eletrônico do hardware de potência.....	- 102 -
Figura 4.20 – Placa do circuito eletrônico.....	- 102 -

Figura 4.21 – Hardware montado.....	- 102 -
Figura 4.22 – Grafcet do programa.	- 103 -
Figura 4.23 – Bancada, base e protótipo montados.....	- 104 -
Figura 4.24 – Conjunto desmontado.	- 106 -
Figura 5.1 – Variação de cursos – 1000rpm.....	- 109 -
Figura 5.2 – Picos nos cursos – 1000rpm.....	- 110 -
Figura 5.3 – Variação de cursos – 2000rpm.....	- 111 -
Figura 5.4 – Variação de cursos – 3000rpm.....	- 111 -
Figura 5.5 – Variação de cursos – 4000rpm.....	- 112 -
Figura 5.6 – Variação de cursos – 5000rpm.....	- 113 -
Figura 5.7 – Variação de tempos das válvulas – ângulo do virabrequim.....	- 114 -
Figura 5.8 – Variação de tempos – 10mm, 2000rpm.	- 114 -
Figura 5.9 – Variação de Pressão: 50 e 100bar, 2000rpm.....	- 115 -
Figura 5.10 – Zona de amortecimento, 2 -10 mm, 1000rpm.....	- 117 -

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MCI	Motores de Combustão Interna
VVT	<i>Variable Valve Timing</i>
DIP	Desenvolvimento Integrado de Produtos
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CLP	Controlador Lógico Programável
ICE	Ignição por Centelha Elétrica
PMI	Ponto Morto Inferior
PMS	Ponto Morto Superior
AA	Admissão Abre
AF	Admissão Fecha
EA	Exaustão Abre
EF	Exaustão Fecha
INPI	Instituto Nacional de Propriedade Industrial
VTEC	<i>Variable Valve Timing and lift Electronic Control</i>
VVT-i	<i>Variable Valve Timing - intelligent</i>
VVC	<i>Variable Valve Control</i>
SVA	<i>Smart Valve Actuation</i>
ECU	<i>Electronic Control Unit</i>
EVA	<i>Electronic Valve Control</i>
EBV	<i>Electronic Ball Valve</i>
H&P	Hidráulica e Pneumática
HVA	<i>Hydraulic Valve Actuation</i>
rpm	Rotações por minuto
CLP	Controlador lógico Programável
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
PDA	<i>Personal Digital Assistants</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

B	Intensidade do campo magnético
n	Número de espiras por comprimento de um solenóide
μ_0	Permeabilidade magnética no vácuo
I	Corrente elétrica
F_m	Força eletromagnética
L_s	Comprimento de um solenóide
τ	Tensão de cisalhamento
P	Pressão
μ	Viscosidade dinâmica
v	Velocidade
A	Área

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Os motores de combustão interna (MCI) têm sido objeto de profundos aperfeiçoamentos por conta da demanda cada vez maior por motores mais econômicos, mais potentes e menos poluentes, especialmente no caso de motores de uso automotivo.

Com o objetivo de melhorar este desempenho, novas tecnologias estão sendo desenvolvidas, principalmente aquelas em que os recursos da mecatrônica passaram a potencializar possibilidades de novas soluções.

Um dos elementos mais estudados tem sido as válvulas do motor. Os motores atuais utilizam o comando de válvulas mecânico para ativar a abertura e fechamento das válvulas de admissão e exaustão. Este tipo de atuação tem se mostrado muito confiável e eficiente, porém pouco flexível para variar o tempo e curso das válvulas, requisito fundamental para se obter maior eficiência em diferentes condições de operação, incluindo menor consumo de combustível e menor nível de emissões.

A atuação baseada em comando de válvula e came inviabiliza o ajuste ótimo da combustão. Os comandos atuais apresentam valores fixos para o curso da válvula, para os tempos de abertura e duração dos eventos das válvulas. Estes eventos fixos representam um compromisso entre requisitos conflitantes em diferentes condições operacionais, comprometendo o desempenho ou a economia de combustível. O projeto de MCI é realizado de maneira que seja atendida uma condição operacional específica ou intermediária o que pode comprometer o seu desempenho em condições operacionais diferenciadas.

No Brasil, uma atenção especial é dada aos MCIs de ciclo diesel, já que grande parcela do transporte de cargas e de pessoas é realizado via terrestre por veículos de médio e grande portes tracionados por motores de ciclo diesel. O objeto de estudo deste trabalho pode contribuir para a redução de emissões e melhorar o rendimento térmico também destes motores.

As comunidades acadêmica e industrial vêm estudando o desenvolvimento de soluções capazes de controlar o tempo e abertura das válvulas e integrá-lo ao sistema de injeção

eletrônica visando aumentar a eficiência dos MCIs e proporcionando a criação de um sistema de gerenciamento mais abrangente da combustão.

Várias soluções vêm sendo propostas, sendo que algumas das alternativas mais interessantes e estudadas propõem a substituição do comando mecânico de válvulas por válvulas ditas mecatrônicas. Esta tecnologia, denominada "camless" (sem eixo de cames), descarta completamente este elemento mecânico na atuação das válvulas e já está sendo testado em alguns laboratórios e motores, com resultados promissores.

A utilização da tecnologia *camless* oferece grande potencial para a redução de partes móveis e conseqüente ruído e vibração. Permite, além disso, a redução de emissões de gases poluentes e de consumo, aumentar o torque em baixas rotações, a eficiência e a potência pela possibilidade de se variar dinamicamente e individualmente os tempos e cursos das válvulas. Esta tecnologia "camless" também agrega outros benefícios interessantes e também economicamente importantes, tais como a desativação de cilindros, variação da taxa de compressão, e partida do MCI sem a necessidade de motor de arranque.

Por outro lado, os estudos da tecnologia *camless* têm esbarrado em alguns problemas importantes que não podem ser desprezados, destacando-se, entre eles os relacionados à energia necessária para acionar as válvulas por outro meio que não o came, a estratégia de controle integrado do novo dispositivo e a redução da velocidade de assentamento das válvulas.

1.1 OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de uma proposta de válvula mecatrônica para MCI. A solução de válvula proposta objetiva substituir o mecanismo utilizado atualmente nos MCIs de ciclo diesel ou Otto por alternativa mais flexível, atendendo às diversas solicitações a que são submetidas em um motor durante sua vida útil e trazendo importantes benefícios, como as citadas melhoria de desempenho, redução de emissões de gases e consumo de combustível.

O dispositivo proposto deve ser capaz de atender às demandas típicas de motores comerciais, e, além disso, deve possibilitar a variação e o controle do curso da válvula, dos tempos de abertura e fechamento assim como controlar a velocidade de assentamento da válvula. Ele deve também proporcionar a flexibilidade desejada para o gerenciamento global

da combustão sem o comprometimento da segurança, confiabilidade e robustez do sistema, sem consumir energia demasiada.

Em síntese, deseja-se atender aos diversos regimes operacionais impostos ao motor durante seu funcionamento ajustando-se os parâmetros relativos ao movimento das válvulas com auxílio computacional. Neste sentido será projetado, construído e avaliado uma válvula mecatrônica dinamicamente controlável.

1.2 METODOLOGIA ADOTADA

Para reduzir a probabilidade de falha no processo de projeto e possibilitar a obtenção de um produto de qualidade que atenda às necessidades para a qual foi projetado, foram utilizadas ferramentas e metodologias de Desenvolvimento Integrado de Produtos – DIP que nortearam as quatro fases deste trabalho: Projeto Informacional, Projeto Conceitual, Projeto Preliminar e Projeto Detalhado.

Como resposta às demandas geradas a partir do Projeto Informacional, se define e justifica, no Projeto Conceitual, o princípio adotado para atuação da válvula tanto no avanço como retorno, bem como os seus requisitos para controle de tempos e cursos. Nas fases de Projeto Preliminar são definidos os elementos necessários para a variação do curso e para o amortecimento da velocidade da válvula no seu assentamento, sendo este último um parâmetro crítico para a vida útil da válvula e para redução dos níveis de ruído do dispositivo.

O Projeto Detalhado se ocupa dos desenhos dos experimentos e do protótipo a ser usado para validação dos conceitos. Nesta etapa são também desenvolvidos dispositivos para acomodação e testes da válvula, assim como a incorporação de sensores para aquisição de dados visando aos experimentos em laboratório.

O projeto prevê a construção de um protótipo e toda infra-estrutura básica que viabilize o pleno funcionamento do dispositivo, assim como os meios e métodos para testes, aquisição de dados e validação do conceito.

A estratégia de funcionamento do protótipo é baseada na simulação de situações inerentes a motores comerciais. Para isto, os testes são desenvolvidos utilizando-se diferentes parâmetros de cursos, tempos, pressões e rotações.

Após os testes iniciais serão coletados dados para análise prévia e ajustes. Os testes serão repetidos sucessivamente até a obtenção de informações para validar as conclusões.

1.3 ESCOPO DA DISSERTAÇÃO

Após ter sido mostrado o contexto geral do trabalho neste capítulo 1, parte-se para o desenvolvimento da dissertação a partir do estudo do estado da arte e uma pesquisa bibliográfica e técnica. O capítulo 2 apresenta o embasamento teórico que sustentou o desenvolvimento do modelo proposto para comprovação da hipótese e do conseqüente protótipo.

Inicialmente é feito um apanhado geral do estado da arte dos estudos de motores e comando de válvulas atuais e motores *camless*, mostrando as possibilidades até hoje auferidas e demonstrando as principais vantagens que o novo sistema pode proporcionar. Em seguida, são apresentadas as diferentes propostas já estudadas/analísadas pela comunidade internacional, seus potenciais e limitações, concluindo-se com uma síntese das melhores opções a serem aprofundadas para o modelo proposto neste trabalho.

No capítulo 3 é apresentada a estrutura da metodologia desenvolvida e utilizada no trabalho. São detalhados os métodos utilizados no projeto, bem como as ferramentas e recursos utilizados e as abordagens definidas para construção de protótipo, experimentação e validação dos resultados.

O capítulo 4 cuida do detalhamento dos projetos: informacional, conceitual, preliminar e detalhado do sistema, assim como dos processos de fabricação e montagem do protótipo e do experimento. O capítulo 5 aborda os testes e resultados alcançados.

O Capítulo 6 sintetiza as conclusões sobre os resultados obtidos, pondera as principais características e limitações encontradas na abordagem seguida e finaliza com sugestões e perspectivas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo se faz um breve histórico dos motores de combustão interna ciclo Otto descrevendo suas características básicas de funcionamento. Em seguida, uma análise da tecnologia envolvida no comando de válvula tradicional é feita, para suportar a do sistema com válvulas controláveis e motores *camless*, seus principais benefícios e dificuldades, bem como os principais trabalhos propostos até o momento.

2.1 BREVE HISTÓRIA DO MOTOR CICLO OTTO

O motor de ignição por centelha elétrica (ICE) começou a ser concebido em 1862 quando, o físico francês Alphonse Beau de Rochas propôs as condições necessárias para que um motor de combustão interna, a quatro tempos, funcionasse com um máximo de economia. Rochas chegou a descrever também, a seqüência de eventos, por meio do qual a economia e a eficiência poderiam ser conseguidas. Essa seqüência, que totalizava 4 tempos é, em síntese, o que hoje ocorre basicamente em quase todo motor ICE. Porém, Rochas não chegou a construir motor algum, tendo apenas formulado as condições de funcionamento econômico que ele havia imaginado.

O motor foi construído experimentalmente apenas em 1872, e só foi realizado praticamente em 1876 por Nikolaus Otto, que foi, inclusive, quem determinou o ciclo teórico sob o qual trabalha o motor ICE . Quando a firma alemã *Otto und Langen* passou a fabricar os motores a 4 tempos, de pistões móveis ligados a um virabrequim, este tipo de motor passou a se chamar popularmente de motor Otto. (MILHOR, 2002, p. 3)

2.2 MOTOR DE QUATRO TEMPOS

Nos motores 4 tempos, um ciclo de trabalho corresponde a duas voltas da árvore de manivelas. Na medida que a árvore de manivelas (virabrequim) realiza o movimento rotativo, os pistões se movem dentro dos cilindros, entre o ponto morto superior (PMS) e o ponto morto inferior (PMI). As bielas são responsáveis por transmitirem o movimento da árvore de manivelas para os pistões. Com as duas voltas da árvore de manivelas, 4 tempos são executados por um cilindro, como ilustra a figura 2.1.

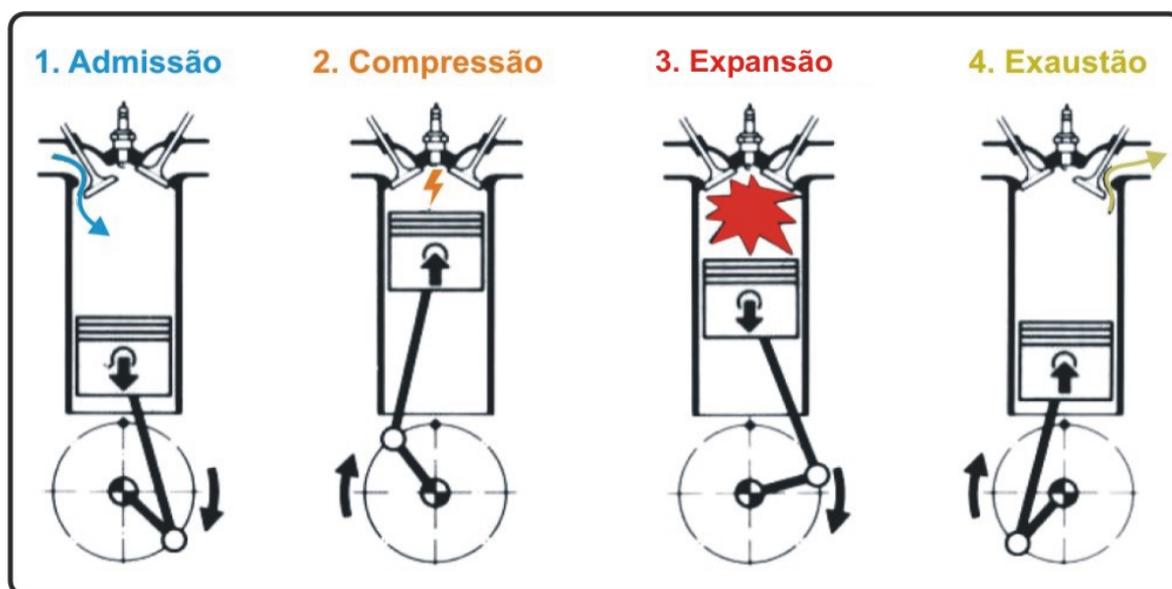


Figura 2.1. Ciclo de trabalho de um motor ciclo Otto (BOSCH, 1995).

Para cada cilindro, um conjunto de válvulas é responsável pela admissão da mistura ar/combustível e exaustão dos produtos da combustão da mistura. Denominadas válvula de admissão e válvula de escape respectivamente, elas podem variar em número de motor para motor. As válvulas são acionadas pelo eixo comando de válvulas, que por sua vez é acionado pela árvore de manivelas. Os quatro tempos do funcionamento de um motor estão descritos a seguir.

Admissão: A admissão se caracteriza pelo movimento do pistão do PMS para o PMI com a válvula de admissão aberta e a válvula de exaustão fechada. Com o movimento do pistão, a mistura ar-combustível flui para dentro do cilindro devido ao diferencial de pressão causado entre a câmara do cilindro e o coletor de admissão.

Compressão: Durante a compressão, o pistão se desloca do PMI para o PMS, com as válvulas fechadas, comprimindo a mistura ar-combustível na câmara de combustão. Antes do pistão atingir o PMS, o sistemas de ignição produz uma centelha, através da vela de ignição do respectivo cilindro. A centelha provoca a queima da mistura, fazendo com que a pressão no cilindro se eleve abruptamente.

Expansão: A pressão alta no cilindro, causada pela explosão da mistura, faz com que o pistão se desloque do PMS para o PMI, com as válvulas ainda fechadas. É durante a expansão que a energia contida no combustível é liberada, transformado-se em movimento linear do pistão e logo em seguida em movimento rotativo no virabrequim.

Exaustão: Na exaustão, o pistão se desloca do PMI para o PMS. A válvula de exaustão se abre fazendo com que o produto da queima da mistura ar-combustível seja expelido do cilindro para a atmosfera.

A pressão no cilindro varia com a posição do pistão. A Fig. 02 ilustra esta variação da pressão no cilindro a abertura e fechamento das válvulas de admissão e exaustão assim como a fase que está sendo realizada (VAN BASSHUYSEN; SCHÄFER,2004).

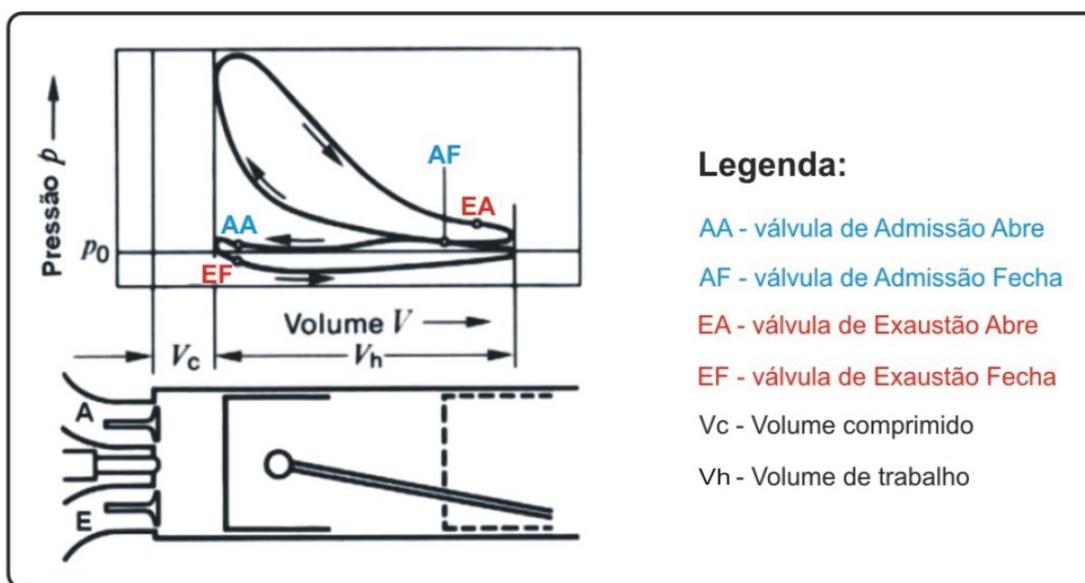


Figura 2.2. Variação de pressão no cilindro (BOSCH, 1995).

Existe uma faixa em que as válvulas de admissão e escape podem variar seus tempos de abertura e fechamento de acordo com o projeto do perfil dos cames no comando de válvulas. Como já foi dito anteriormente, a atuação das válvulas num motor de combustão interna (MCI) com comando de válvulas está atrelada à rotação do motor, sendo normalmente referenciada ao ângulo do virabrequim e aos PMI e PMS. A estratégia de abertura e

fechamento das válvulas varia de acordo com o propósito para qual o motor é fabricado, o que será melhor analisado no item 2.3 a seguir.

2.3 VÁLVULAS E COMANDO DE VÁLVULAS

O comando de válvulas está acoplado mecanicamente ao virabrequim, portanto, as rotações dos dois sistemas são atreladas. Quando o motor aumenta a rotação, conseqüentemente faz o comando de válvulas girar numa rotação maior, segundo uma relação de transmissão fixa. Estas rotações atreladas resultam na principal limitação do uso do comando de válvulas. Com o giro do comando de válvulas, cames a ele acoplados e em interface com as válvulas do motor fazem a conversão de movimento rotativo em movimento linear no que resulta na abertura das válvulas, que retornam posteriormente pela ação de molas, o que pode ser melhor visualizado no exemplo da figura 2.3.

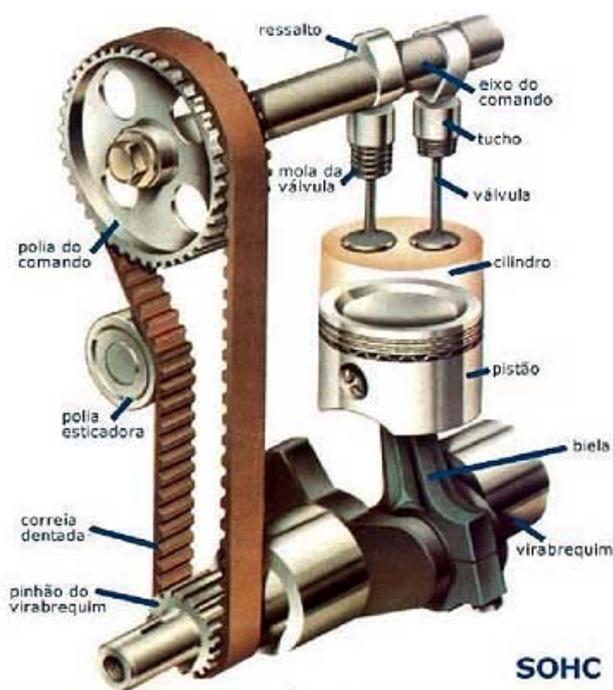


Figura 2.3. Comando de válvulas e virabrequim (GOODYEAR, 2005)

Para cumprir sua função, a válvula de admissão deve abrir e, a válvula de escape fechar perto do PMS. Para facilitar o escoamento dos gases de exaustão para fora do cilindro, a abertura da válvula de exaustão é antecipada e ocorre antes que o pistão chegue ao PMI, assim

como seu fechamento é atrasado até um ponto em que o pistão já reverteu seu sentido, no PMS, deslocando-se em direção ao PMI, como pode ser visto no diagrama da figura 2.4.

De maneira similar, para permitir um melhor preenchimento do cilindro com a mistura ar/combustível a válvula de admissão abre antes de o pistão atingir o PMS no tempo de exaustão. A válvula de admissão permanece aberta durante todo o curso de admissão fechando perto do início do ciclo de compressão.

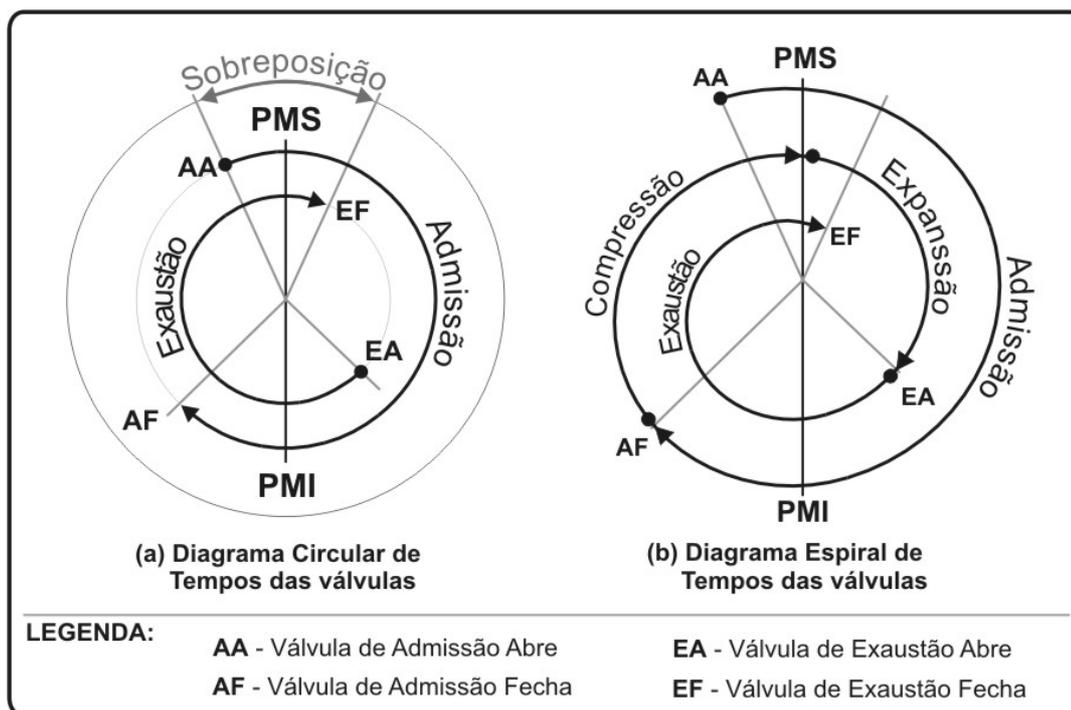


Figura 2.4. Diagrama de tempos de válvulas I (HEISLER, 1995).

Quando os períodos de abertura das válvulas de admissão e exaustão são combinados em dois semicírculos tem-se o diagrama circular de tempos das válvulas, que pode ser observado na figura 2.4(a). Quando os ciclos de admissão, compressão, expansão e exaustão são mostrados juntamente com os períodos de abertura das válvulas em um diagrama espiral contínuo, tem-se o diagrama espiral de tempos de válvulas ilustrado na figura 2.4 (b).

O movimento angular do virabrequim que ocorre quando as válvulas de admissão ou exaustão abrem antes do PMS ou PMI respectivamente é comumente chamado de *valve lead angle*. O deslocamento antes das válvulas de admissão e exaustão fecharem depois do PMS e PMI respectivamente, é denominado *valve lag angle*. O deslocamento angular total quando as válvulas de admissão e exaustão estão abertas simultaneamente na região do PMS é denominada *overlap period*. (FERGUSON; KIRKPATRICK, 2000; STONE, 1999; HEISLER, 1995). Essas sobreposições e atrasos serão analisadas adiante.

Uma melhor visualização da abertura e fechamento progressivo das válvulas de admissão e escape, a sobreposição e os tempos envolvidos pode ser conseguido através do diagrama de tempos e ângulos do virabrequim, figura 2.5 O diagrama mostra, aproximadamente, que os primeiros 20° de abertura e os últimos 20° de fechamento das válvulas apresentam uma variação de curso mínima, porém, entre estes dois extremos o curso muda rapidamente.

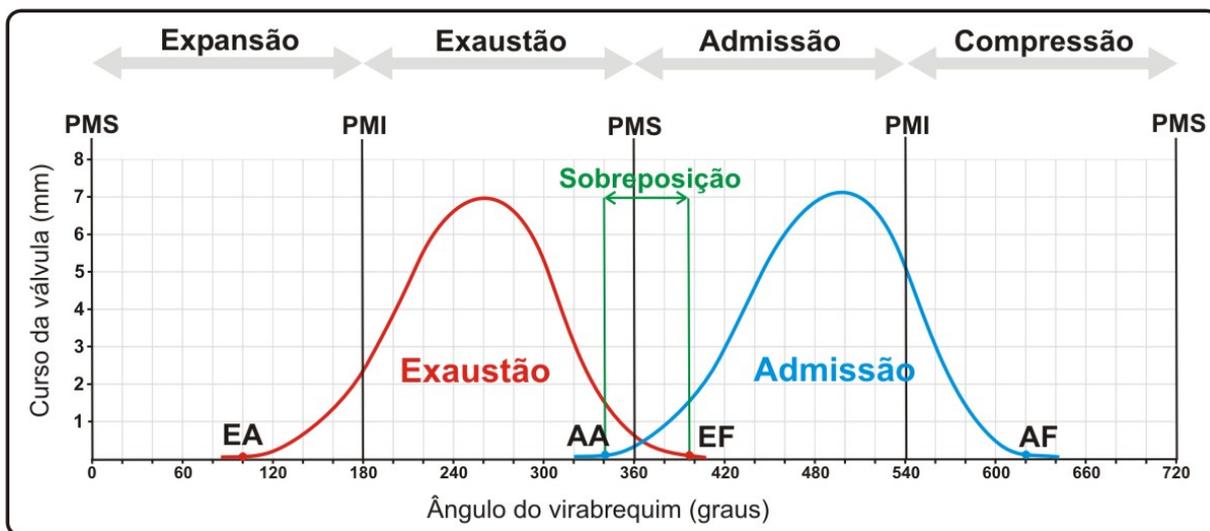


Figura 2.5. Diagrama de tempos – ângulo do virabrequim (DONALDSSON, 2003).

2.3.1 Válvula de Exaustão

Para tentar maximizar a expulsão dos gases de exaustão do cilindro, o came é projetado para abrir a válvula no momento em que o pistão reduz sua velocidade e se aproxima do PMI. Conseqüentemente, quando a válvula de exaustão se abre, os gases remanescentes no cilindro ainda apresentam uma pressão residual relativamente alta, em torno de 3-4 bar (300-400kpa) o que provoca, pela própria ação da energia existente, a expulsão dos gases da queima para o sistema de exaustão e para a atmosfera.

Por outro lado, esta abertura antecipada da válvula de exaustão provoca uma pequena perda no ciclo de expansão, que deve ser compensada pela energia economizada pela redução do trabalho no ciclo de exaustão, e também deve ser calculado de modo que a válvula se abra apenas quando o pistão estiver desacelerando na região próxima ao PMI.

A válvula de Exaustão é mantida aberta durante todo o ciclo de exaustão e no início do

ciclo de admissão, fechando logo após o PMS. O atraso no fechamento da válvula induz um vácuo na porta de exaustão e na câmara de combustão, proporcionando o melhor preenchimento desta com a nova mistura Ar/Combustível a ser queimada e facilitando o escoamento dos gases residuais ainda presentes no cilindro, como pode ser visualizado na figura 2.6 a seguir (ALEXANDER et al, 2002; HEISLER, 1995).

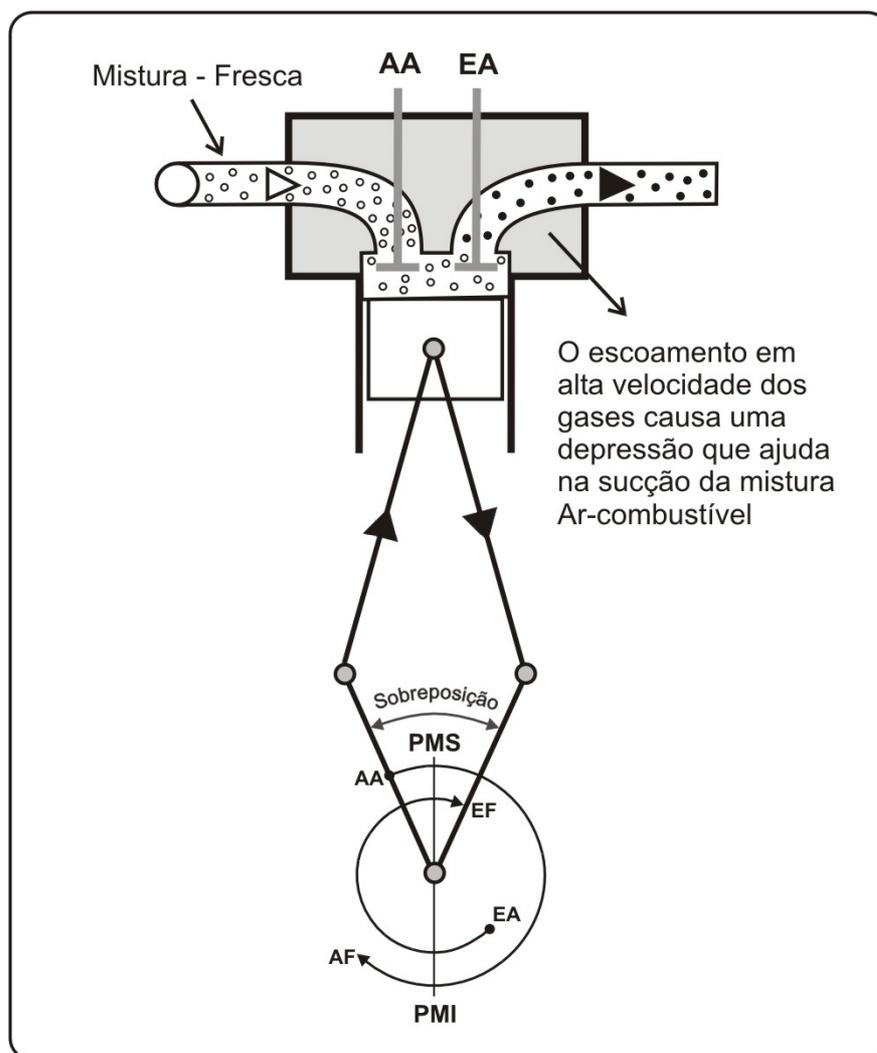


Figura 2.6. Efeito da sobreposição em alta velocidade (HEISLER, 1995).

O efeito provocado pela sobreposição é tão maior quanto for a rotação e, na abertura da válvula, deve aumentar de forma correspondente.

2.3.2 Válvula de Admissão

Para induzir a entrada de maior quantidade de mistura fresca para o interior do cilindro, a válvula de admissão deve iniciar seu curso de abertura no final do ciclo de exaustão quando a quantidade de gases da queima dentro do cilindro ainda possui energia cinética suficiente para provocar uma depressão na câmara de combustão. O seu escoamento em alta velocidade pela porta de escape, arrasta os gases remanescentes e induz ao preenchimento do cilindro com a nova mistura.

Por outro lado, se a válvula de admissão abre muito cedo no ciclo de exaustão, pressões ainda elevadas no cilindro podem induzir no escoamento do gás pela válvula de admissão até o coletor de admissão ao invés de escoar pelo sistema de exaustão.

A válvula de admissão permanece aberta durante todo o ciclo de admissão e parte do início do ciclo de compressão. O ângulo percorrido pelo virabrequim depois do PMI e antes que a válvula de admissão se feche é utilizado para o aproveitamento da inércia da nova mistura, proporcionando mais tempo para o preenchimento do cilindro e conseqüentemente aumentando a densidade do carregamento, como ilustra a figura 2.7 (ALEXANDER et al, 2002; HEISLER, 1995).

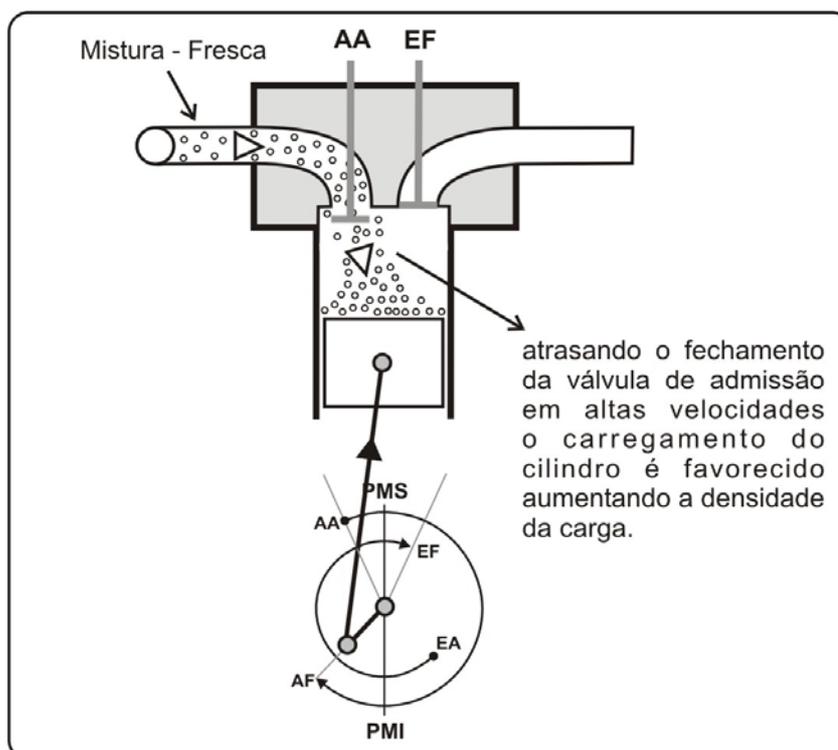


Figura 2.7. Efeito do atraso do fechamento da válvula de admissão em altas velocidades (HEISLER, 1995).

O atraso no fechamento da válvula de admissão até o ponto em que inicia-se a compressão aumenta a eficiência volumétrica do cilindro para médias e altas rotações do motor; todavia, em baixas rotações, provoca uma densidade insuficiente para o preenchimento adequado do cilindro, sendo este muito reduzido.

2.3.3 Limitações para a Sobreposição das Válvulas

Como já foi abordado, atrasar o fechamento da válvula de exaustão e adiantar a abertura da válvula de admissão resulta na abertura simultânea das duas válvulas ou sobreposição.

A sobreposição permite o aumento da eficiência volumétrica do cilindro. É causado pelo escoamento dos gases de exaustão em alta velocidade, provocando uma depressão no cilindro que permite que a nova mistura preencha-o mais rapidamente, ocorrendo tanto nos motores ciclo Otto como ciclo Diesel.

Por outro lado, a estratégia de utilização da sobreposição conduz ao surgimento de efeitos negativos como o aumento da poluição causada pelos gases de exaustão, pois a depender da velocidade de operação, parte da mistura é arrastada para fora do cilindro.

Na válvula de exaustão a sobreposição trás benefícios quando o motor está operando em altas rotações onde as perdas são menores. Quando a velocidade do motor é reduzida uma parcela da mistura será carregada juntamente com os gases da queima para o sistema de exaustão.

A perda de mistura Ar/combustível será tanto maior quanto menor for a velocidade do motor para uma dada sobreposição, assim como será tanto maior quanto for o atraso no fechamento da válvula. Conseqüentemente, será observado um aumento de hidrocarbonetos e de monóxido de carbono na composição dos gases de exaustão.

Três curvas que representam diferentes ângulos de atraso no fechamento da válvula, medidos em graus do virabrequim, a rotação do motor e o índice de emissões de hidrocarbonetos e monóxido de carbono podem ser analisados na figura 2.8 (a).

Na válvula de admissão, o efeito da sobreposição quando a válvula borboleta está parcialmente fechada faz com que a pressão no coletor de admissão diminua e isto pode ocorrer até que uma situação reversa ocorra entre o coletor e o cilindro, ou seja a pressão no coletor seja inferior a pressão no cilindro fazendo com que os gases de exaustão escoem para o coletor de admissão. Conseqüentemente, já que a nova mistura vai ser diluída com os gases

da queima diminuindo a quantidade de ar disponível na nova carga do cilindro, parte dos gases exauridos pelo escape não terá sofrido a completa combustão devido a falta de oxigênio, com consequência no aumento da quantidade de hidrocarbonetos e de monóxido de carbono na composição dos gases de exaustão aumentando as emissões para atmosfera, como pode ser visualizado na figura 2.8 (b). (SELLNAU e RASK, 2003).

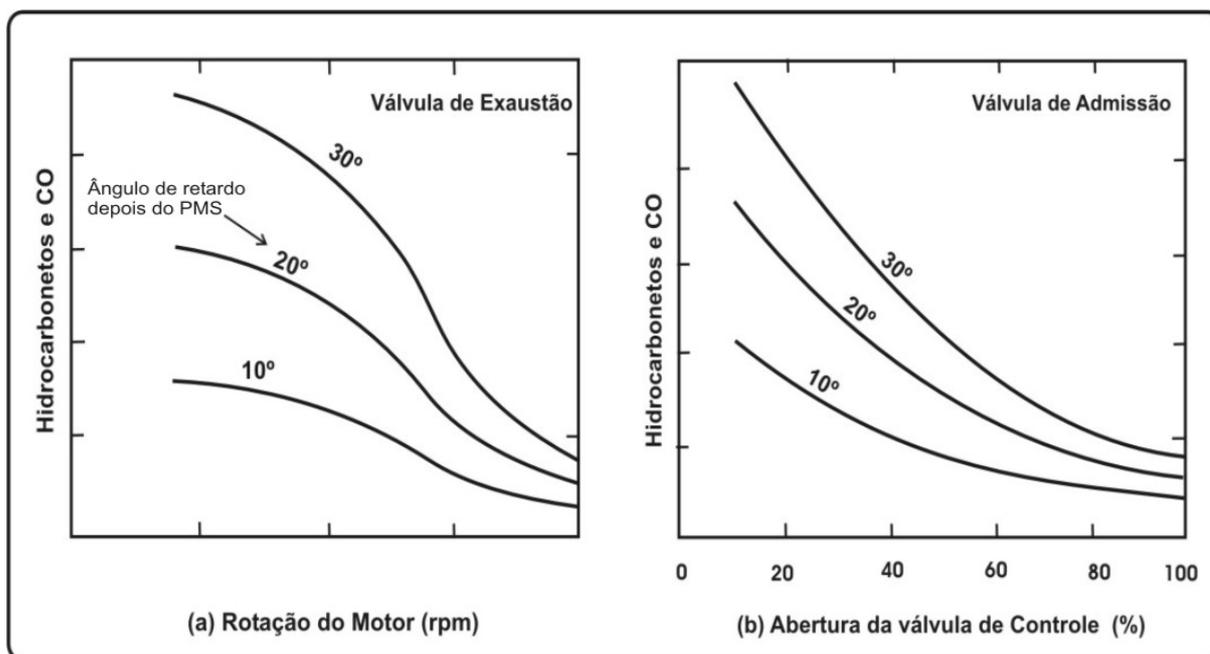


Figura 2.8. Emissão de gases para a atmosfera em função da sobreposição (HEISLER, 1995).

2.3.4 Tempos de Válvulas para Diferentes Aplicações

Os ângulos mais comuns para abertura e fechamento de válvulas variam consideravelmente de acordo com a aplicação para qual o motor foi projetado, neste sentido pode-se classificar os motores em quatro grandes categorias:

- i. **Motores de veículos leves:** de pequeno porte, que trabalham em regimes de altas rotações com ciclo Otto ou Diesel.
- ii. **Motores de veículos de passageiros:** de médio porte, que trabalham em regime de médias ou baixas rotações com ciclo Diesel ou Otto.
- iii. **Motores Industriais ou de aplicações marinhas:** de grande porte que trabalham em regime de baixas rotações com ciclo Diesel.

iv. **Motores de competição e corrida:** altas rotações com ciclo Otto.

A grande maioria dos motores com ciclo Otto ou Diesel utilizados na atualidade, sejam eles estacionários ou veiculares, podem ser enquadrados no diagrama de tempos de válvulas da figura 2.9 (a), na tabela 2.1 estão descritos os parâmetros típicos para motores de veículos leves, tais como carros de passeio, carts, cortadores de grama, modelos em escala, etc.

Tabela 2.1 – Parâmetros típicos de motores a gasolina ou diesel (HEISLER, 1995).

Válvula de admissão abre antes do PMS	10° - 30°
Válvula de admissão fecha depois do PMI	40° - 75°
Válvula de exaustão abre antes do PMI	40° - 75°
Válvula de exaustão fecha depois do PMS	10° - 30°

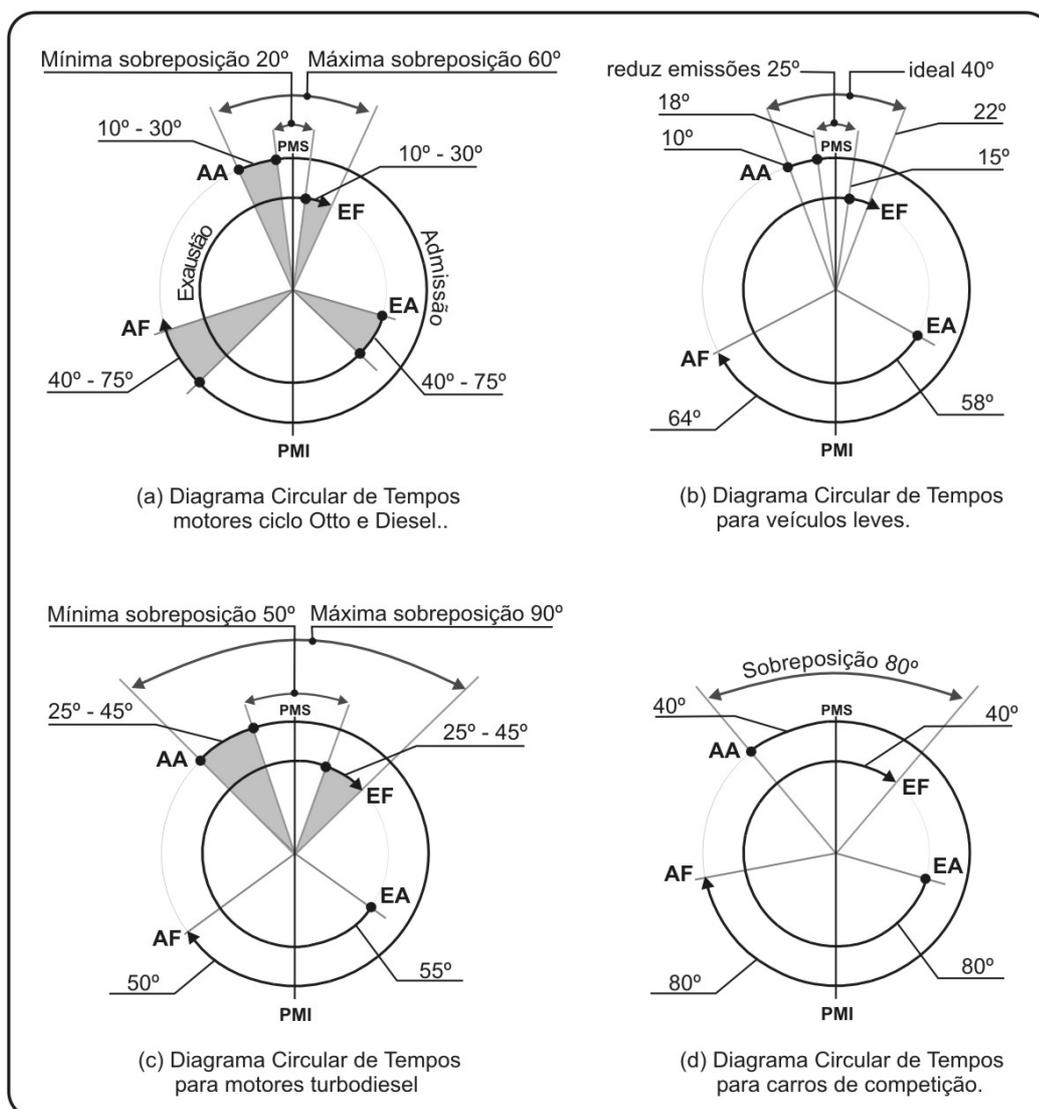


Figura 2.9. Diagrama de tempos para diversos motores (HEISLER, 1995).

O diagrama de tempos típico para carros de salão, figura 2.9 (b), mostra a abertura e fechamento da válvula de admissão em 18° antes do PMS e 64° depois do PMI, respectivamente. A válvula de exaustão opera tipicamente abrindo 58° antes do PMI e fecha 22° depois do PMS. Isto proporciona uma sobreposição de 40°. Visando reduzir as emissões, pode-se verificar, nos modelos atuais, a abertura da válvula de admissão em torno de 15° e fechamento da válvula de exaustão em torno de 25°, perfazendo uma sobreposição de 25°. Esta estratégia diminui as emissões sem comprometer o desempenho do motor.

Os Motores de ciclo Diesel pelo fato de não possuírem o controle de ar na entrada do cilindro não são susceptíveis à poluição causada pela sobreposição de válvulas, por isso podem ser beneficiados pelo atraso no fechamento da válvula de admissão. Motores turbodiesel podem ser beneficiados tanto pelo atraso no fechamento da válvula de admissão, quanto pelo adiantamento na abertura da válvula de admissão. A sobreposição pode ser estendida até limites operacionais que não permitam o escoamento de gases de exaustão pelo coletor de admissão ou prejudiquem o preenchimento do cilindro. Estes motores são normalmente utilizados para veículos de passageiros, e os tempos típicos destes tipos de motores são ilustradas na figura 2.9 (c), tendo como limites os parâmetros ilustrados na tabela 2.2.

Motores de competição naturalmente aspirados com ciclo Otto, que operam em altas rotações, podem tirar proveito da extrapolação dos limites de fechamento e abertura das válvulas de exaustão e admissão, Fig. 2.9 (c). Isto ocorre devido à falta de compromisso com o consumo de combustível e emissões para atmosfera. Para estes motores os parâmetros típicos são ilustrados na tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Parâmetros típicos de motores ciclo Diesel e Otto (HEISLER, 1995).

		Motores ciclo Diesel de médio Porte	Motores de veículos leves de ciclo Otto	Motores de competição de ciclo Otto
Válvula de admissão	Abertura antes do PMS	25° - 45°	10° - 18°	40°
	Fechamento após PMI	50°	64°	80°
Válvula de descarga	Abertura antes do PMI	55°	58°	80°
	Fechamento após PMS	25° - 45°	15° - 22°	40°

2.4 PARÂMETROS OPERACIONAIS DE VÁLVULAS

Com intuito de auxiliar no projeto da válvula mecatrônica, torna-se necessário analisar sob que condições operam as válvulas de admissão e descarga. Tais parâmetros serão úteis nas decisões do projeto relativas ao dimensionamento, especificação de materiais e demais componentes.

2.4.1 Absorção e Dissipação de Calor em Válvulas de Exaustão

Cerca de 70% da quantidade de calor absorvido pela válvula, produto do processo de combustão, ocorre por condução através da cabeça da válvula quando esta se encontra fechada e 30% através do corpo da válvula quando esta se encontra aberta e os gases de exaustão escoam pela porta de escape, como ilustra a figura 2.10.

Dos 70% absorvidos quando a válvula está fechada, apenas 24% é transferido através do guia da válvula. A maior parte do calor é transferida através da área circunferencial que envolve a sede da válvula quando ela se encontra fechada. Todavia, quando a válvula se abre, os gases da queima escoam através da garganta de escape para o sistema de exaustão, sendo este o único caminho para rejeitar o calor da cabeça da válvula, guia e cabeçote. A região mais quente da válvula é geralmente a parte inferior e paralela à margem de assentamento e não o centro da cabeça de válvula.

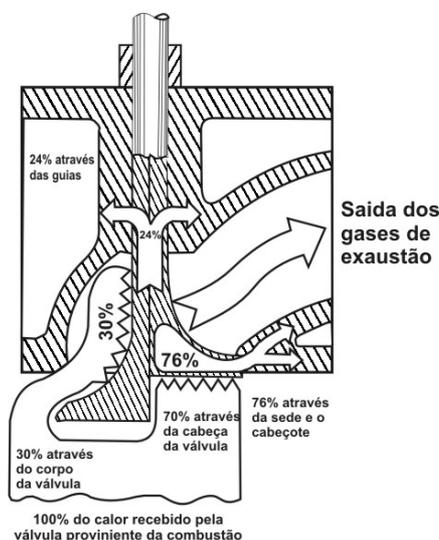


Figura 2.10. Absorção e dissipação de calor em válvulas de exaustão (HEISLER, 1995).

2.4.2 Temperatura, Tensão e Durabilidade

Com o aumento da temperatura, as tensões limite da liga de aço ou níquel da válvula de exaustão diminuem inicialmente de maneira pouco acentuada, e em taxas elevadas quando a temperatura excede 600°C, veja-se a figura 2.11.

Todavia, apesar da tensão limite ser suficiente, a tensão de limite à fadiga demonstra ser insuficiente na faixa de temperatura entre 700 e 900°C. A figura 2.11 ilustra o limite de fadiga para altas temperaturas.

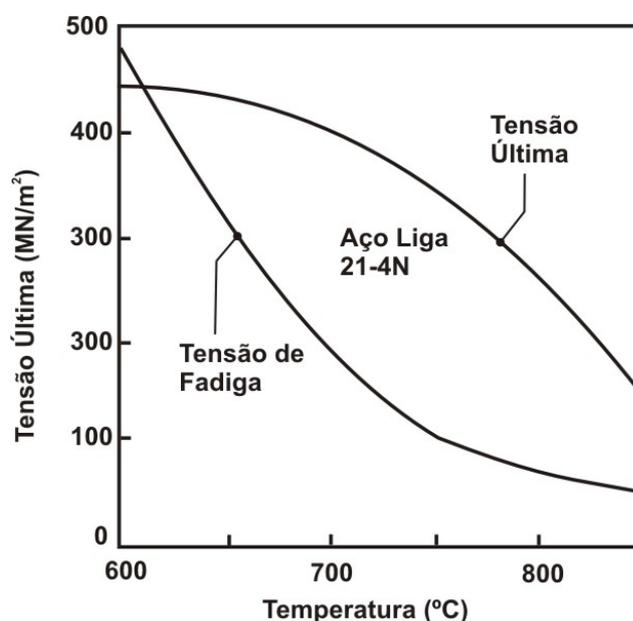


Figura 2.11. Efeito da temperatura nas tensões das válvulas (HEISLER, 1995).

A dificuldade de especificar materiais adequados para o trabalho das válvulas deve-se à combinação de três tipos de carregamentos impostos entre a cabeça e o pescoço da válvula:

- i. A pressão de compressão do gás suportada pela cabeça da válvula em cada ciclo de expansão, figura. 2.12(a)
- ii. A tensão radial (longitudinal) de impacto produzida entre o pescoço da válvula e sua cabeça todas as vezes que a válvula se fecha, figura. 2.12 (b).
- iii. A tensão circunferencial ao redor do assento na cabeça da válvula causada pela temperatura cíclica, que geram expansões e contrações sucessivas na cabeça da válvula, figura. 2.12 (c).

Quando combinados os carregamentos dinâmicos e térmicos tem-se uma solicitação final elevada, o que pode acarretar em distorções permanentes e eventual colapso.

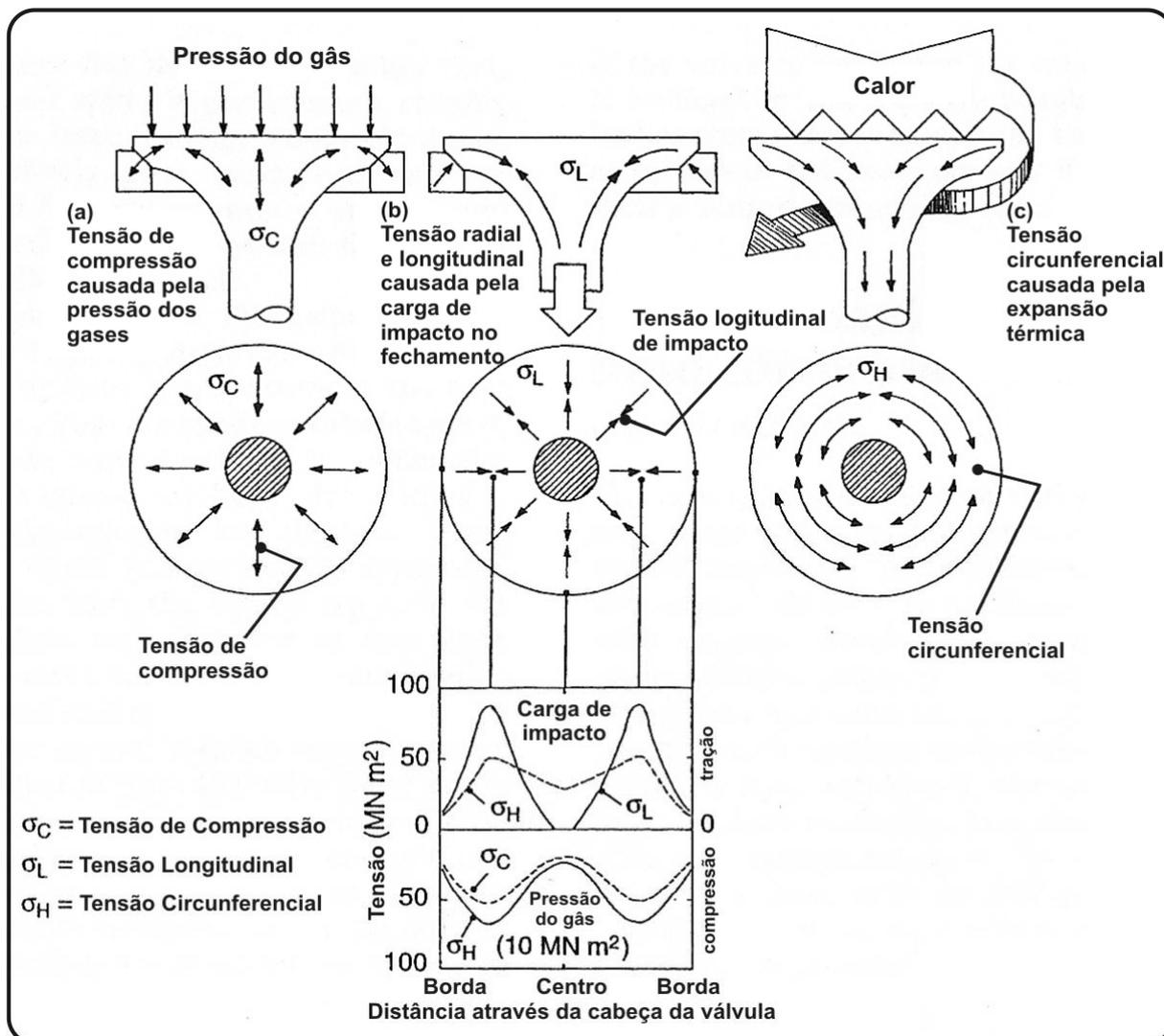


Figura 2.12. Tensões nas válvulas (HEISLER, 1995).

2.5 VÁLVULAS CONTROLÁVEIS

A idéia da utilização de válvulas controláveis que possibilitassem algum ajuste remoto tem sido apreciada como tema de pesquisa por projetistas de motores de todo o mundo desde o aprimoramento dos comandos e dos sistemas elétricos automotivos. A princípio as propostas eram baseadas em sistemas eletro-mecânicos ou eletro-hidráulicos que permitiam o ajuste do curso de abertura da válvula, porém de forma pouco flexível.

Esta proposta, apesar de antiga, ainda não está presente nos motores comerciais e continua uma meta perseguida pelos projetistas da atualidade, porém com a introdução de possibilidades adicionais, como a variação dos tempos e frequências de válvula (BRADER, 2001)

Uma grande vantagem dos projetistas de hoje em relação aos antecessores é a possibilidade de introdução dos computadores, que podem atuar de maneira eficaz no controle e simulação dos sistemas no MCI, dando origem às válvulas mecatrônicas.

As Válvulas mecatrônicas para MCI permitem, diferentes das primeiras tentativas, a eliminação do comando de válvula, dando origem ao conceito de MCI – *camless*. Estas válvulas oferecem o controle dinâmico, contínuo, variável e independente de diversos aspectos do movimento das válvulas. Isto representa um avanço significativo sobre o dispositivo mecânico convencional, visto que proporciona ao sistema o ajuste de tempos, fases e curso de cada válvula de forma independente. Um exemplo comparativo entre a tecnologia convencional e a proposta *camless* pode ser visualizado na figura 2.13.

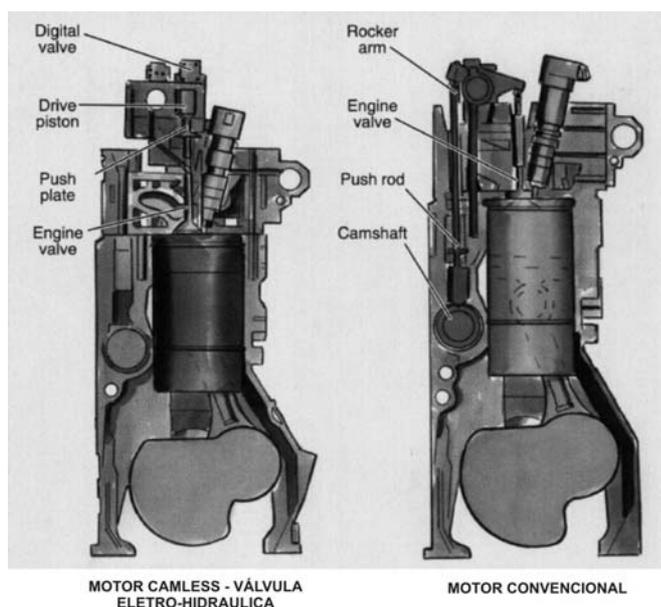


Figura 2.13. Motor convencional e Motor Camless (HEISLER, 1995).

Este dispositivo traduz um novo conceito de motor, que desvincula o tempo das válvulas do giro do motor e minimiza o compromisso entre desempenho e rendimento térmico para diferentes condições operacionais.

Adicionalmente, é possível controlar a velocidade das válvulas, permitir sua desativação e modificar sua frequência de atuação. Isto também traz vantagens adicionais, na medida em que representa a liberdade de todos os parâmetros de deslocamento da válvula e resulta numa melhoria significativa de consumo de combustível, mais torque e potência, melhorias na estabilidade de funcionamento do motor, menor emissão de gases para a atmosfera e uma

gama significativa de outras melhorias e possibilidades (WILSON, 2004; LEVIN; SCHECHTER, 1996).

A idéia de válvulas utilizando atuadores passíveis de controle tem sido mencionada na literatura técnica por mais de 100 anos, quando projetistas já anunciavam que dispositivos deste gênero aumentariam significativamente a potência do motor (ROCHELEAU apud GOULD, 1991). Recentemente o foco está mais voltado para a economia energética e redução da poluição.

Somente em 1960 tem-se o primeiro registro de patente deste tipo de dispositivo. Esta patente oferece atuadores hidráulicos para atuação das válvulas (REGGIO, 1960). Este dispositivo baseava-se numa atuação hidráulica atrelada ao movimento do virabrequim de uma maneira rígida, o que limitava a variação dos tempos das válvulas, porém representa o primeiro esforço no sentido de tornar real a tecnologia *camless*.

A partir de 1980 muitas idéias foram concebidas e algumas foram de fato colocadas em prática em MCIs para testes experimentais. Naquele momento, os custos do sistema tornavam economicamente inviável a produção desses motores. Um outro problema era o suporte computacional disponível, pouco avançado, que dificultava as modelagens computacionais e a própria implementação de uma estratégia de controle mais avançada dos dispositivos controláveis.

Um bom exemplo desta situação foi o desenvolvimento do MCI modelo V-8-6-4 pela Cadillac em 1981. O motor de 6.0 litros V-8 era capaz de operar com 4,5 litros V-6 ou 3.0 litros V-4 através da desativação mecânica de cilindros controlada por um computador de bordo que acionava o comando elétrico baseado numa estratégia rígida pré-definida (LAMM, 1980).

Devido a problemas computacionais, uma série de reclamações relativas a desempenho, principalmente no momento da mudança de regime, impossibilitaram a continuidade da produção e a idéia foi abandonada. Em 2004, devido à evolução dos computadores e técnicas de controle, a Cadillac retomou o projeto incluindo a possibilidade de variar os cursos de abertura das válvulas. O novo motor pode operar com 8 ou 4 cilindros, porém já apresenta resultados promissores que impulsionam a empresa a um projeto mais ambicioso, que visa à possibilidade de trabalho de 4 a 8 cilindros, a depender da demanda (BRADER, 2001).

A evolução dos computadores e técnicas de controle, o aumento significativo do preço dos combustíveis fósseis nos últimos anos, o aquecimento global e as novas regulamentações ambientais, têm induzido ao desenvolvimento de tecnologias para o melhor aproveitamento energético. Nos últimos anos, várias empresas têm intensificado os esforços no

desenvolvimento da tecnologia “camless” principalmente no sentido de as tornar economicamente viável para produção em série.

Exemplos recentes podem ser destacados como: os atuadores eletro-hidráulicos já desenvolvidos pela Sturman Corporation (STURMAN, 2005), Ford (LEVIN E SCHECHTER, 1996) e pela MCE-5 (RABHI, 2000) ou atuadores eletromagnéticos desenvolvidos pela FEV (FEV, 2000) e Valeo (VALEO, 2005), entre outras propostas apresentadas pela comunidade científica internacional.

O aumento significativo no interesse comercial pode ser observado na figura 2.14, que demonstra a evolução nos pedidos de patentes nos *US Patent & Trademark Office Category* referenciados ao termo *camless* nos últimos 40 anos. Nesta figura, pode-se observar o aumento significativo dos pedidos de patentes a partir da década de 90 e a especial importância entre 2006 e 2007 que apesar de não representar dois anos completos já acumula um total de 119 patentes registradas.

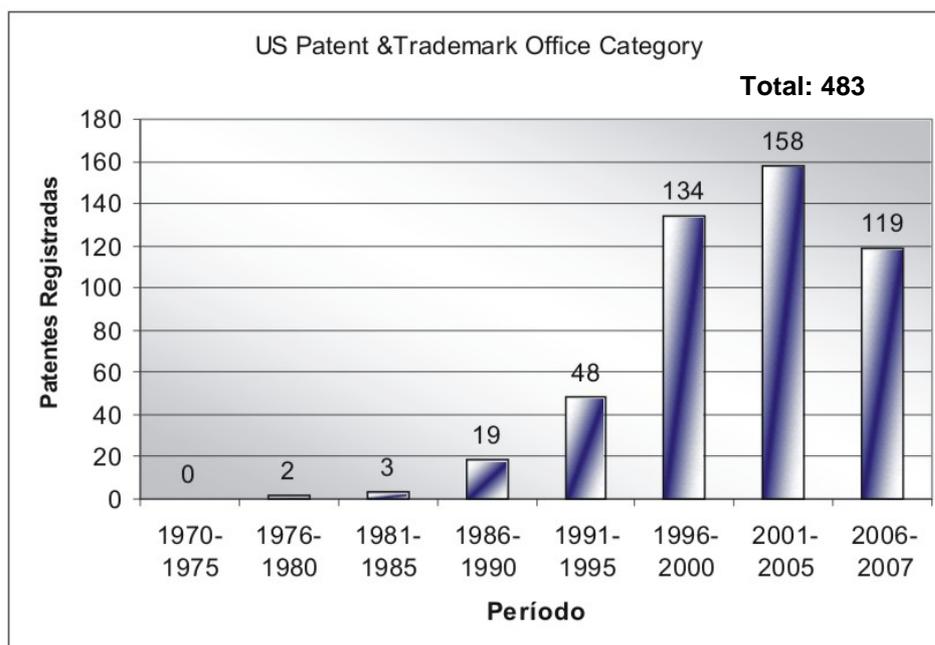


Figura 2.14. Histograma das Atividades de Patentes (US Patent & Trademark Office Category, 2007).

Se a mesma pesquisa for realizada utilizando o termo VVT - *Variable Valve Timing*, outro termo muito utilizado, porém restrito apenas à alterações temporais, obtem-se uma resposta de 1395 patentes para o mesmo período.

Numa pesquisa em nível nacional, utilizando diferentes combinações dos termos acima, traduzidos para a língua portuguesa, nenhuma referência foi encontrada no INPI – Instituto Nacional de Propriedade Industrial.

Na discussão que será feita a seguir serão comentados os principais resultados de patente que podem ser de interesse para este trabalho.

2.6 CARACTERÍSTICAS DE UM MCI CAMLESS

Neste item, serão detalhadas as principais características e benefícios dos comandos por válvulas mecatrônicas dinamicamente controláveis em substituição do comando de válvulas tradicional, baseado em atuação por came e retorno por mola. Para melhor entendimento, as características serão referenciadas às possibilidades operacionais obtidas com o controle dos parâmetros das válvulas.

2.6.1 Variação dos tempos da válvula de admissão

A possibilidade de variar os tempos das válvulas de admissão pode proporcionar basicamente os seguintes benefícios:

- i. Redução de perdas na admissão: controlar a capacidade de carga do motor através do controle do ar de admissão, como tradicionalmente é feito, promove um aumento significativo das perdas térmicas, o que diminui o trabalho útil do motor e, conseqüentemente, sua eficiência térmica. A possibilidade de controlar a válvula de admissão pode mudar esta situação. Neste caso, a válvula borboleta permaneceria aberta, independente da solicitação do motor. O controle de capacidade pode ser realizado pelo fechamento antecipado ou atrasado da válvula de admissão, veja figura 2.15, reduzindo ou aumentando o volume de ar no início da compressão sem a necessidade de restrições à passagem do ar, eliminando perdas de carga e aumentando o aproveitamento do combustível (GERR, 2004; TSAO, 2000; LEVIN e SCHECHTER, 1996).

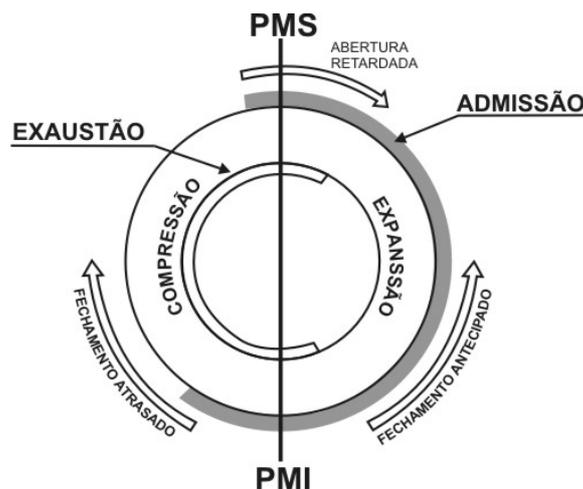


Figura 2.15. Variação nos tempos da válvula de admissão (adaptado de: LEVIN e SCHECHTER, 1996).

- ii. Aumento de torque: os motores que utilizam comando de válvulas usualmente produzem uma curva de torque com um valor de pico situado na faixa de velocidade média do motor. Este valor médio fixado pelos valores pré-definidos de tempos e curso das válvulas traz como consequência uma deterioração do desempenho para baixas e altas velocidades. Uma otimização nos tempos de abertura e fechamento das válvulas rende uma curva de torque mais achatada devido ao aumento da eficiência volumétrica (TSAO, 2000). Segundo Levin e Schechter (1996) é possível se obter um aumento de torque de até 50% em baixas velocidades e um aumento médio de 10% em toda faixa de velocidades, além de uma eficiência volumétrica maior e redução dos gases residuais (URATA et al, 1993). Segundo experiências realizadas por Hatano et al (1993) utilizando cames com diferentes perfis de velocidades em motores de quatro cilindros, foi possível aumentar o torque em baixa rotação em cerca de 15% e em altas rotações o aumento chegou a 21%.

- iii. Aumento da taxa de queima: para atingir uma boa eficiência da queima por ciclo, a maior parte da combustão deve ser completada no início do ciclo de expansão. Isto requer uma rápida taxa de queima e, para tanto, a maior turbulência possível da mistura de ar/combustível na câmara de combustão. Em baixas rotações, especialmente quando o motor opera sem ou com pequena carga, o nível de turbulência no cilindro é insuficiente para provocar uma queima rápida. Atrasando a abertura da válvula de admissão para após o PMS, até onde o pistão adquire uma velocidade significativa, aumenta a velocidade dos gases de admissão o que promove um aumento na taxa de queima (GERR, 2004; LEVIN e SCHECHTER, 1996)

iv. Variação das relações de pressão; variando o tempo de fechamento da válvula de admissão conseqüentemente varia-se a taxa de compressão efetiva, assim como a taxa de expansão. Um motor turbinado convencional pode utilizar apenas uma fração da energia útil da exaustão em altas rotações. Neste caso, uma parte substancial dos gases de exaustão deve ser desviada da turbina para prevenir o excesso de pressão e temperatura na admissão, evitando danos ou colapso no motor. Operando com o motor *camless*, um controle preciso no atraso ou antecipação no fechamento da válvula pode ser utilizado para reduzir a compressão, evitando este problema. A redução no volume de ar admitido pelo cilindro é compensada pelo aumento da pressão de admissão. O benefício imediato provém do aumento da eficiência do ciclo, a partir do momento em que o pistão realiza apenas uma parte do trabalho de compressão. Variando a relação de pressão pode ser útil também para motores de ciclo Diesel, onde normalmente é desejado em algumas situações operar com relações de pressão menores do que a máxima (TSAO, 2000; LEVIN e SCHECHTER, 1996).

2.6.2 Variação dos tempos da válvula de exaustão

A possibilidade de variar os tempos das válvulas de exaustão pode proporcionar basicamente os seguintes benefícios:

i. Melhoria da taxa de expansão: a taxa de expansão efetiva é determinada pelo tempo de abertura da válvula de exaustão. Normalmente a válvula de exaustão começa a abrir antes do PMI para promover o tempo suficiente para todos os gases da queima deixarem o cilindro em regimes de alta velocidade. Isto faz com que a taxa de expansão efetiva seja menor do que o esperado em outros regimes. Em baixas rotações, por exemplo, este tempo é muito maior do que o necessário para exaurir os gases da queima, ocasionando perdas de energia útil. A partir da possibilidade de variar os tempos das válvulas de exaustão, esta deficiência pode ser eliminada retardando a abertura da válvula de exaustão em baixas velocidades, e melhorando o rendimento a partir de um ajuste de tempos baseado na velocidade do motor. Considerando a alta velocidade de resposta na abertura das válvulas mecatrônicas, o retardo na abertura da válvula de exaustão pode ser realizado mesmo em altas velocidades. Visando auxiliar o ciclo de expansão e,

conseqüentemente, o trabalho útil e torque. Para baixas rotações esta possibilidade de ajuste do tempo de abertura representa ganhos significativos na redução do consumo de combustível, para maiores detalhes ver as referências que seguem (JALILI, WAGNER, DDFARNIA, 2003; TSAO, 2000; LEVIN e SCHECHTER, 1996; URATA et al, 1993).

- ii. Recirculação Interna dos Gases: a recirculação interna dos gases influi diretamente na fração do volume residual de gases queimados no cilindro. Uma alta quantidade de volume residual diminui os picos da temperatura de combustão e reduz a quantidade de óxidos de nitrogênio (NO e NO₂) durante a combustão. O fechamento da válvula de exaustão antes do PMS permite reter a última porção dos gases da queima no cilindro, por outro lado, se o retardo no fechamento for excessivo, certa quantidade de gases do sistema de exaustão pode retornar ao cilindro pela ação do pistão no ciclo de admissão. Quanto mais tarde é realizado o fechamento da válvula de exaustão, maior quantidade de gases de exaustão entra no cilindro. A possibilidade de variar os tempos da válvula de exaustão elimina a necessidade de recirculação externa, assim, o controle deste fechamento efetivamente controla a quantidade de gases residuais no cilindro. A figura 2.16 ilustra as possibilidades mencionadas nos itens i e ii.

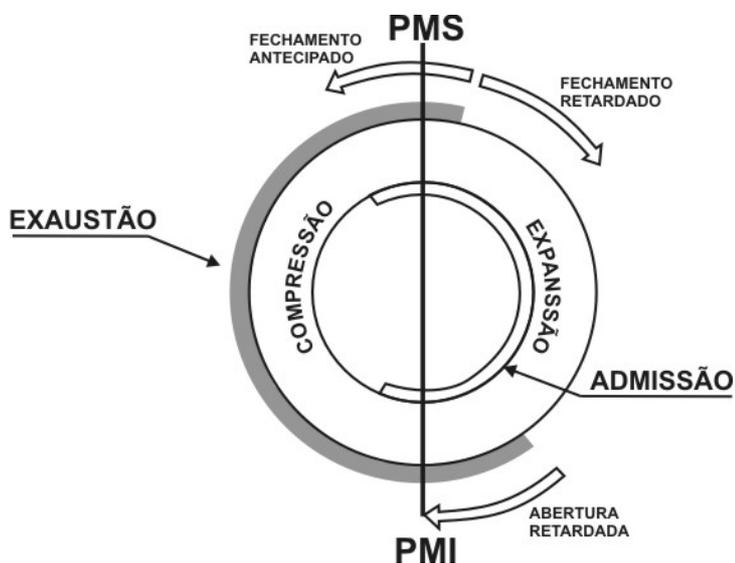


Figura 2.16. Variação nos tempos da válvula de exaustão (adaptado de: LEVIN e SCHECHTER, 1996).

2.6.3 Variação do curso da válvula

O controle da variação do curso das válvulas pode proporcionar basicamente os seguintes benefícios:

- i. Redução no consumo energético: num motor com o comando de válvulas convencional os cursos das válvulas de exaustão e admissão são projetados para assegurar uma boa eficiência volumétrica e diminuir o efeito de bombeamento no ciclo de exaustão para regimes pré-determinados, o que implica em perdas no rendimento nas demais. Cursos menores para as válvulas podem ser adequados em baixas rotações, visando o menor consumo de combustível. Portanto variando o curso das válvulas do motor (figura 2.17) em função da rotação pode aumentar a eficiência térmica e reduzir o consumo de combustível (LEVIN e SCHECHTER, 1996).

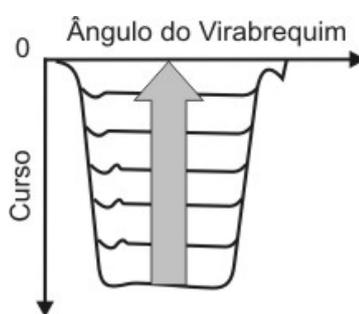


Figura 2.17. Variação do curso das válvulas (LEVIN e SCHECHTER, 1996).

- ii. Controle do Movimento do ar: num motor *camless* com duas válvulas de admissão por cilindro o padrão do escoamento de ar dentro do cilindro pode ser influenciado pela variação independente dos cursos das válvulas. Se as duas válvulas de admissão abrirem com cursos diferentes, como ilustra a figura 2.18, o ar escoava para dentro do cilindro formando duas correntes diferentes de ar, que, quando misturadas podem gerar padrões diferentes de escoamentos. Como os dois cursos das válvulas podem ser ajustados de forma independente, diferentes padrões podem ser obtidos, o que representa a possibilidade de um ajuste fino no escoamento de ar para dentro do cilindro. Sellnau e Rask (2003) e Wilson et al (1993), pesquisaram o mapeamento do escoamento em veículos com quatro válvulas por cilindro. Comandos de válvulas especiais foram utilizados para obter cursos diferentes para os pares de válvulas, incluindo a desativação de uma das válvulas. Os testes demonstraram que a variação dos cursos representou uma grande influência na carga do cilindro, sendo até mais representativo do que a variação do projeto da cabeçote. A melhoria de eficiência no consumo de combustível chegou a 3%. Também foram observados a melhoria de estabilidade da combustão, aumento do trabalho útil e redução nas emissões para a atmosfera (SELLNAU e RASK, 2003; TSAO, 2000; LEVIN e SCHECHTER, 1996).