

DESEMPENHO DE UM MOTOR CICLO OTTO COM INJEÇÃO DIRETA DE GÁS NATURAL

CLEITON RUBENS FORMIGA BARBOSA

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Mecânica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Samuel Washington Celere

São Carlos-SP
1997



| | |
|--------|-------------|
| Class. | TESE - EESC |
| Cott. | B238 dm |
| Tombo | 1081 97 |

Área : Engenharia Mecânica

074 7610

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC-USP

B238d Barbosa, Cleiton Rubens Formiga
Desempenho de um motor ciclo Otto com injeção
direta de gás natural / Cleiton Rubens Formiga
Barbosa. -- São Carlos, 1997.

Tese (Doutorado). -- Escola de Engenharia
de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1997.
Área: Engenharia Mecânica
Orientador: Prof. Dr. Samuel Washington Celere

1. Motor ciclo Otto. 2. Injeção direta. 3. Gás
natural. I. Título

A Deus

A minha esposa,

Lenise Paiva e ao meu filho Cleiton Júnior.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Samuel Washington Celere pela amizade e excelente orientação fornecida durante a elaboração deste trabalho;

Aos professores. Dr. Antônio Moreira dos Santos e Dr. Fernando Milliole, do SEM da EESC-USP, pelas sugestões e apoio fornecidos durante a realização deste trabalho;

Aos amigos professores Francisco de Assis Oliveira Fontes e João Telésforo Nóbrega de Medeiros da UFRN, pelo incentivo e/ou sugestões ao presente trabalho;

Ao amigos Mário Roberto da Silva (colega de pós graduação) e José Roberto Bogni (Técnico do Laboratório de Termodinâmica da EESC-USP) pela brilhante contribuição ao desenvolvimento experimental deste trabalho;

Ao Eng. Francisco Torres e Técnicos do Laboratório de Termodinâmica da EESC-USP: Roberto Prata, Roberto Lourêncio, Rubens, Sérgio (in memória), pelo apoio técnico dispensado durante a fase experimental do trabalho;

Aos irmãos Cid Robson e Carlos Alberto e ao amigo José Alfredo pela ajuda computacional;

As bibliotecárias da EESC-USP: Neuza Celere, Terezinha Coletta, Helena Peres e Elena Luíza, pela ajuda no levantamento e normatização das referências bibliográficas;

Aos Secretários do SEM-EESC: Ana Paula, Cristina, Elizabeth, Margareth e Maranhão,, pela presteza no atendimento;

Enfim, a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para o êxito do presente trabalho.

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| LISTA DE FIGURAS | i |
| LISTA DE TABELAS | v |
| LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS | vi |
| RESUMO | x |
| ABSTRACT | xi |
| CAPÍTULO 01 - INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 - OBJETIVOS DA PESQUISA | 4 |
| CAPÍTULO 02 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 5 |
| 2.1 - BREVE HISTÓRICO DOS MOTORES A GÁS | 5 |
| 2.2 - PRODUÇÃO E RESERVAS DE GÁS NATURAL | 6 |
| 2.3 - CARACTERÍSTICAS DO GÁS NATURAL | 9 |
| 2.4 - ARMAZENAMENTO E ABASTECIMENTO | 19 |
| 2.5 - SISTEMAS DE FORMAÇÃO DE MISTURA | 22 |
| 2.6 - MOTORES DE CARGA ESTRATIFICADA | 24 |
| 2.7 - CONVERSÃO DE MOTORES PARA GÁS NATURAL | 32 |
| CAPÍTULO 03 - SISTEMAS DE INJEÇÃO ELETRÔNICA DE COMBUSTÍVEL PARA MOTORES DE IGNIÇÃO POR CENTELHA | 40 |
| 3.1 - SISTEMAS DE CONTROLE INTEGRADOS | 40 |
| 3.2 - INJEÇÃO ELETRÔNICA DE COMBUSTÍVEL | 42 |
| 3.3 - SISTEMA DE INJEÇÃO MULTI-POINT (MPI) | 50 |
| 3.3.1 - Estratégias de Injeção Multi-Point (MPI) | 55 |
| 3.4 - SISTEMA DE INJEÇÃO SINGLE-POINT (SPI) | 57 |

| | |
|--|----|
| 3.5 - INJETOR ELETRÔNICO DE COMBUSTÍVEL | 60 |
| | 61 |
| CAPÍTULO 04 - ANÁLISE TERMODINÂMICA DO MOTOR | |
| 4.1 - CICLO PADRÃO DE AR OTTO | 61 |
| 4.2 - MÁXIMO TRABALHO DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA | 64 |
| 4.3 - BALANÇO TÉRMICO DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO | 66 |
| CAPÍTULO 05 - O RENDIMENTO VOLUMÉTRICO | 69 |
| 5.1 - CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES | 69 |
| 5.2 - DEFINIÇÕES E CONDIÇÕES DE REFERÊNCIA | 70 |
| 5.3 - O PROCESSO DE ADMISSÃO IDEAL | 73 |
| 5.4 - OS PROCESSOS DE ADMISSÃO E EXAUSTÃO EM MOTORES DE QUATRO TEMPOS | 74 |
| 5.5 - VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM O RENDIMENTO VOLUMÉTRICO | 78 |
| 5.6 - EFEITOS QUASI-ESTÁTICOS | 79 |
| 5.6.1 - Eficiência Volumétrica do Ciclo Padrão Ar-Combustível | 79 |
| 5.6.2 - Efeitos da Razão Ar-Combustível, Fase e Composição do Combustível | 81 |
| 5.6.3 - Efeitos da Fração do Combustível Vaporizado, do Calor de Vaporização e da Transferência de Calor | 83 |
| 5.6.4 - Efeitos da Razão de Compressão e Razão da Pressão de Admissão e Exaustão | 84 |
| 5.7 - EFEITOS DINÂMICOS E QUASI-ESTÁTICOS COMBINADOS | 85 |
| 5.7.1 - Perdas por Fricção | 86 |
| 5.7.2 - Efeito RAM | 90 |
| 5.7.3 - Fluxo Reverso na Admissão | 91 |
| 5.7.4 - Tuning | 91 |
| 5.7.5 - Efeitos da Velocidade, Área da Válvula e do Tempo | 93 |
| 5.8 - EFICIÊNCIA VOLUMÉTRICA REDUZIDA AS CONDIÇÕES PADRÃO | 96 |
| 5.9 - RELAÇÃO ENTRE O RENDIMENTO VOLUMÉTRICO E OUTROS PARÂMETROS DE DESEMPENHO DO MOTOR | 98 |

| | |
|---|------------|
| CAPÍTULO 06 - MATERIAIS E MÉTODOS | 100 |
| 6.1 - PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS | 100 |
| 6.2 - DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS E INSTALAÇÕES | 110 |
| 6.2.1 - Sistema de Injeção Direta de Gás Natural | 111 |
| 6.2.2 - Módulo Eletrônico de Controle da Injeção | 116 |
| 6.2.3 - Sistema de Ignição Transistorizada | 118 |
| 6.2.4 - Sistema Gravimétrico de Medição do Consumo de Gás Natural | 120 |
| | |
| CAPÍTULO 07 - RESULTADOS E ANÁLISE | 138 |
| 7.1 - SISTEMA DE INJEÇÃO DIRETA DE GÁS NATURAL | 138 |
| 7.2 - DESEMPENHO DO MOTOR | 140 |
| | |
| CAPÍTULO 08 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES | 158 |
| 8.1 - CONCLUSÕES | 158 |
| 8.2 - SUGESTÕES | 160 |
| | |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 151 |
| | |
| LITERATURA CONSULTADA | 170 |
| | |
| ANEXO A - FÓRMULAS UTILIZADAS PARA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE DESEMPENHO DO MOTOR DE TESTES APRESENTADAS NAS PLANILHAS 7.1 A 7.8 | 181 |
| | |
| ANEXO B - EQUAÇÕES GERAIS APLICADAS EM SISTEMAS TERMODINÂMICOS ABERTOS | 187 |
| | |
| ANEXO C - ANÁLISE DAS INCERTEZAS | 193 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| FIGURA 2.1 - Distribuição das Reservas de Gás Natural Comprovadas no Mundo..... | 7 |
| FIGURA 2.3 - Distribuição Geográfica das Jazidas de Gás Natural e Rede de Gasodutos no Brasil..... | 8 |
| FIGURA 2.4 - Curvas de Temperatura adiabática de Chama para a Gasolina e o Metano em função da Razão Equivalente..... | 15 |
| FIGURA 2.5 - Diagrama Esquemático de um Posto de Abastecimento de Veículos com GNC..... | 22 |
| FIGURA 2.6 - Sistema de Combustão Hesselman..... | 27 |
| FIGURA 2.7 - Motores de Carga Estratificada de Produção Comercial: O Sistema de Combustão Controlada TCCS da TEXACO e o Sistema FM da MAN..... | 29 |
| FIGURA 2.8 - Esquema de um Motor Ciclo Otto de Carga Estratificada e Ignição por Tocha..... | 30 |
| FIGURA 2.9 - Diagrama Típico de um Sistema de Conversão Mecânico Bi-combustível para uso do GNC ou GLP..... | 34 |
| FIGURA 2.10 - Diagrama Típico de um Sistema de Conversão Eletrônico Bi-combustível para uso do GNC ou GLP..... | 35 |
| FIGURA 2.11 - Curvas de Desempenho de motor operando com Gasolina e GNC em regime de Plena Carga..... | 39 |
| FIGURA 3.1 - Sistema de Controle Integrado Típico de um Motor..... | 41 |
| FIGURA 3.2 - Configuração de uma ECU..... | 41 |
| FIGURA 3.3 - Curva Típica de Corte de Combustível em Altas Rotações do Motor..... | 43 |
| FIGURA 3.4 - Taxa de Purificação dos Gases de Exaustão Típica de um Catalisador de 3-Vias..... | 44 |
| FIGURA 3.5 - Sistema de Retroalimentação com Sensor Lambda..... | 45 |

| | |
|--|----|
| FIGURA 3.6 - Controle Típico de um Sistema de Recirculação de Gases de Exaustão..... | 47 |
| FIGURA 3.7 - Projeção de Utilização dos Sistemas de Formação de Mistura em Carros de Passeio na Europa..... | 49 |
| FIGURA 3.8 - Tempos de Resposta Típicos dos Sistemas de Injeção Eletrônica de Combustível e Carburador Versus o Tempo de Resposta Requerido para Boa Dirigibilidade e Emissões Aceitáveis..... | 50 |
| FIGURA 3.9 - Diagrama Esquemático de um Sistema de Injeção Multi-Point..... | 51 |
| FIGURA 3.10 - Sistema Típico de Gerenciamento Eletrônico de Injeção Multi-point (MPI)..... | 52 |
| FIGURA 3.11 - Circuito de Combustível de um Sistema de Injeção Multi-Point (MPI)..... | 53 |
| FIGURA 3.12 - Montagem Típica de uma Válvula Injetora de um Sistema Multi-point (MPI), com Indicação do Gradiente de Pressão Entre a Linha de Combustível e o Coletor de Admissão..... | 54 |
| FIGURA 3.13 - Estratégias de Injeção Simultânea, em Grupo e Seqüencial para Sistemas de Injeção Multi-point (MPI)..... | 57 |
| FIGURA 3.14 - Diagrama Esquemático de um Sistema de Injeção Single Point..... | 59 |
| FIGURA 4.1 - Diagramas de Pressão versus Volume ($P \times V$) e Temperatura versus Entropia ($T \times S$) para o Ciclo Padrão de Ar Otto..... | 61 |
| FIGURA 4.2 - Curvas de Rendimento Térmico versus Razão de Compressão... | 64 |
| FIGURA 4.3 - Volume de Controle para um Motor de Combustão Interna, com Indicação dos Fluxos de Energia e Massa Através das Fronteiras..... | 67 |
| FIGURA 5.1 - Condições de Referência para Determinação do Rendimento Volumétrico..... | 72 |
| FIGURA 5.2 - Processos de Admissão e Exaustão de um Motor de Ignição por Centelha de 4 tempos. (a) Pressões Médias na Admissão; (b) Diagramas de Válvulas e Pressão versus Volume; (c) Sistema de Exaustão; (d) Pressões Indicadas (p) e Levantamento de Válvulas em Função do Ângulo n Árvore de Manivelas(θ). A | |

| | |
|--|-----|
| Linha cheia é a Plena Carga e a Pontilhada em Regime Cargas Parciais..... | 75 |
| FIGURA 5.3 - Efeito do Vapor do Combustível na Pressão Parcial do Ar. Razão da Pressão de Admissão do Ar ($P_{a,i}$) para Pressão de Admissão da Mistura (P_i) Versus Razão Equivalente (ϕ) para Vapor de Iso-octano, propano, metano, vapor de metanol e hidrogênio..... | 82 |
| FIGURA 5.4 - Efeito da Razão de Pressões de Admissão e Escape na Eficiência Volumétrica do Ciclo Ideal..... | 85 |
| FIGURA 5.5 - Perdas de pressão no sistema de admissão de um motor de ignição por centelha em regime permanente, curso = 89 mm e diâmetro = 84 mm..... | 88 |
| FIGURA 5.6 - Pressão no coletor de exaustão em função da carga e velocidade de um motor de ignição por centelha de 4 cilindros..... | 89 |
| FIGURA 5.7 - Pressão instantânea no coletor de admissão e exaustão de um motor de ignição por centelha de 4 tempos. P_1 = coletor de admissão; P_2 =coletor de exaustão..... | 92 |
| FIGURA 5.8 - Eficiência Volumétrica Versus Velocidade Média do Pisão de um Motor de 04 Cilindros com Injeção Indireta de Diesel e um Motor de 06 Cilindros de Ignição por Centelha..... | 93 |
| FIGURA 5.9 - Efeitos de diferentes fenômenos de escoamento do ar na eficiência Volumétrica do motor em função da velocidade. A linha sólida é a curva final de η_v versus a rotação..... | 95 |
| FIGURA 6.1 - Diagrama Esquemático de Montagem dos Equipamentos de Controle do Motor de Testes no Dinamômetro..... | 101 |
| FIGURA 6.2- Diagrama esquemático do sistema de controle e monitoramento da injeção direta de gás natural, do monitoramento da ignição e pressão indicada do motor de testes. | 112 |
| FIGURA 6.3 - Diagrama Esquemático do Conjunto de Injeção Direta de Gás Natural a Baixas Pressões..... | 114 |
| FIGURA 6.4 - Diagrama de Corpo Livre da Válvula de Retenção do Conjunto de Injeção Direta de Gás Natural..... | 115 |
| FIGURA 6.5 - Diagrama Elétrico da Unidade de Gerenciamento Eletrônico da Injeção de Gás natural..... | 117 |

Gracias por visitar este Libro Electrónico

Puedes leer la versión completa de este libro electrónico en diferentes formatos:

- HTML(Gratis / Disponible a todos los usuarios)
- PDF / TXT(Disponible a miembros V.I.P. Los miembros con una membresía básica pueden acceder hasta 5 libros electrónicos en formato PDF/TXT durante el mes.)
- Epub y Mobipocket (Exclusivos para miembros V.I.P.)

Para descargar este libro completo, tan solo seleccione el formato deseado, abajo:

