

JOSÉ AUGUSTO MARINHO SILVA

**“IMPACTOS AMBIENTAIS DO AUTOMÓVEL”
ANÁLISE NUMÉRICA DO CICLO TERMODINÂMICO
DE UM MOTOR DE 170kW OPERANDO A GÁS NATURAL**

**Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de
São Paulo, para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Automotiva.**

**Área de Concentração:
Engenharia Automotiva**

Orientador:
Prof. Dr. Guenther Carlos Krieger Filho

São Paulo
2005

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL
DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU
ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA. DESDE QUE
CITADA A FONTE.

Marinho Silva, José Augusto
“Impactos Ambientais do Automóvel”. Análise Numérica
do Ciclo Termodinâmico de um Motor de 170kW
Operando a Gás Natural. São Paulo, 2005.

Tese (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.
Departamento de Engenharia Automotiva.

1. Motores 2. Combustão 3. Gás Natural Veicular - GNV
I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo. Departamento de
Engenharia Mecânica. Departamento de Engenharia
Automotiva II. t

FOLHA DE APROVAÇÃO

José Augusto Marinho Silva
“Impactos Ambientais do Automóvel”
Análise Numérica do Ciclo Termodinâmico de um Motor de 170kW Operando
a Gás Natural.

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de
São Paulo, para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Automotiva.

Área de Concentração:
Engenharia Automotiva

Aprovado em: ____ / ____ / ____

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____

Instituição _____

Assinatura _____

Prof. Dr. _____

Instituição _____

Assinatura _____

Prof. Dr. _____

Instituição _____

Assinatura _____

Agradecimentos

Ao orientador, Prof. Dr. Guenther Carlos Krieguer Filho, pelo apoio e confiança.

Ao Sr. Bart Laton e ao Sr. Wilson Muraro da *Daimler-Chrysler do Brasil*, pela disponibilidade das informações do motor analisado e pela atenção prestada.

À Carlos Montalbán pela ajuda final.

Dedico aos meus pais, irmão e
avós Ortelinda Marinho e José Marinho (*in memorium*).

“O Homem super Infinitamente o Homem”.

(Pascal)

Resumo

A principal contribuição deste trabalho de conclusão do curso de mestrado em Engenharia Automotiva, está associada com o estudo do comportamento termodinâmico do gás natural veicular na câmara de combustão dos motores automotivos. Torna-se possível através da simulação numérica, estimar o comportamento do motor em diversas circunstâncias de cargas, utilizando-se desde modelos de extrema simplicidade, devido as simplificações adotadas, até o aprofundamento da complexidade dos fenômenos ocorridos nos diversos tipos de motores.

O objetivo principal deste trabalho é a elaboração de um modelo numérico para analisar o ciclo termodinâmico do motor *Mercedes-Benz M366LAG*, a fim de validar os dados numéricos com os dados obtidos experimentalmente, fornecidos pela *Daimler-Chrysler do Brasil*.

Sob a ótica da Engenharia Automotiva, conclui-se que o modelo numérico desenvolvido apresentou resultados condizentes em relação a confrontação com os dados da pressão média efetiva do motor, obtidos em banco de prova.

Abstract

The contribution of this work in Automotive Engineering is one study of thermodynamic cycle of one automotive motor.

The principal objective is the elaboration of one numerical model to analysing the internal combustion engine at the Mercedes-Benz M366LAG.

By the optical of Automotive Engineering, the numerical model developed is satisfactory in relation with experimental informations.

Lista de Figuras

Figura 1 - Emissões relativas de poluentes por tipo de fontes – 2004	16
Figura 2 – Evolução dos fatores médios de emissão de CO dos veículos movidos a álcool e a gasolina da RMSP	16
Figura 3 - Evolução da frota de veículos automotores leves na RMSP	17
Figura 4 – Fiscalização para o controle da emissão de fumaça preta	18
Figura 5 – Escala Ringelmann	18
Figura 6 - Índice de desconformidade da frota circulante - veículos diesel	19
Figura 7 - Fumaça - Evolução das concentrações na RMSP	19
Figura 8 - Motor 2 tempos - expansão e escape, admissão e compressão	33
Figura 9 - Motor 4 tempos - admissão, compressão, expansão e escape	33
Figura 10 - Velocidade de Propagação da Chama para Diversos Gases em Relação à Proporção de Ar Primário da Combustão [m/s]	40
Figura 11 – Ciclo Padrão a Ar Otto	64
Figura 12 – Esquema Típico da Geometria da Câmara de Combustão de um Motor de Combustão Interna. Figura extraída do manual do <i>Chemkin</i> .	76

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Influência das Diversas Produções Nacionais na Composição Química do GNV	30
Tabela 2 – Ensaio de Emissão Gaosa e Material Particulado – Ciclo dos 13 Pontos	53
Tabela 3 – Parâmetros do Motor Mercedes-Benz M366LAG	78
Tabela 4 – Composições das Misturas dos Combustíveis Utilizadas na Simulação Numérica	79

Lista de Gráficos

Gráficos 1 e 2 – Modelo sem reação de combustão	81
Gráfico 3 – Pressão Média em 2598rpm	82
Gráficos 4 e 5 – Pressão Média - Diferença entre os ajustes da correlacão de Woschni, ajuste <i>default</i> e refinamento do ajuste, respectivamente – motor a 1560rpm e CH ₄ 90%.	83
Gráficos 6 e 7 – Fração Molar de CO. Não observa-se diferença entre os mesmos ajustes do gráfico anterior – motor a 1560rpm e CH ₄ 90%.	83
Gráficos 8 e 9 – Pressão Média a 1560rpm com 77% e 90% de CH ₄ , respectivamente.	84
Gráficos 10 e 11 – Fração Molar de CO a 1560rpm com 77% e 90% de CH ₄ , respectivamente.	84
Gráfico 12 – Curva de Pressão do Motor M366 LAG	85
Gráfico 13 – Pressão Média Efetiva do Motor operando a 1560rpm	86
Gráfico 14 – Temperatura Média em 1560rpm.	87
Gráfico 15 – Perda de Calor Médio em 1560rpm.	87
Gráfico 16 – Fração Molar do Metano.	88
Gráfico 17 – Fração Molar do CO	89
Gráfico 18 – Fração Molar do NOx	90

Agradecimentos	iv
Dedicatória	v
Resumo	vii
Abstract	viii
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	x
Lista de Gráficos	x
1. Introdução	1
1.1 Do Design à Engenharia Automotiva	3
1.2 Complexidade e Interdisciplinaridade	3
2. Sistema Climático, Transporte e a Poluição Atmosférica	5
2.1 Efeito Estufa	7
2.2 Camada de Ozônio	8
2.3 Chuva Ácida	8
2.4 Principais Gases Poluentes	9
3. Transporte	13
3.1 A Poluição na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP)	13
3.2 Fontes de Poluição do Ar no Estado de São Paulo	14
3.3 PROCONVE - Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores	17
3.4 Veículos Pesados	18

4.	Combustíveis Veiculares	20
4.1	Diesel	20
4.2	Clean Diesel	21
4.3	Óleo Combustível	21
4.4	Gasolina	21
4.5	Gasolina Oxigenada	21
4.6	Gasolina Reformulada/Reformada	21
4.7	Querosene	21
4.8	Biodiesel	22
5.	GNV	24
5.1	Breve Histórico no Brasil	24
5.2	O Uso do GNV em Veículos	25
5.3	Desempenho dos veículos convertidos	26
5.4	Vantagens técnicas no uso de GNV	26
5.5	Vantagens econômicas	27
5.6	Segurança	28
5.7	Mistura e Distribuição de combustível	28
5.8	Potência Elétrica Fornecida pela Vela	28
5.9	Desgastes	29
5.10	Óleo Lubrificante	29
5.11	Outras Características do GNV	29
5.12	Rendimento Volumétrico	30
5.13	Produção Nacional	30

6.	Motores	31
6.1	Breve Referência Histórica dos Motores e dos Meios de Transporte	31
6.2	Aplicações e Importância dos Motores a Combustão Interna	31
6.3	Classificação Quanto ao Tipo de Ignição	32
6.4	Motores Rotativos	34
7.	Combustão	35
7.1	Química da Combustão	35
7.2	Limites de Inflamabilidade	37
7.3	Temperatura de Ignição ou de Inflamação	38
7.4	Energia de Ignição ou Inflamação	38
7.5	Auto Combustão	38
7.6	Propagação da Combustão	39
7.7	Velocidade de Propagação da Chama	39
7.8	Deflagração	39
7.9	Detonação	40
8.	Revisão Bibliográfica	41
8.1	M366LAG	54
9.	Modelagem Numérica da Câmara de Combustão Interna de Motores Automotivos	59
9.1	Dados de Entrada	60
9.2	Geometria da Câmara de Combustão	60
9.3	Dados de Operação do Motor	60
9.4	Mistura Admitida e Combustão	61

10.	Análise Numérica de Motores de Ignição por Centelha	62
10.1	Ciclo Padrão a Ar Otto	63
10.2	Propriedades Termodinâmicas da Mistura Ar-Combustível	66
11.	Modelo Numérico do Motor Mercedes-Benz M366LAG	75
11.1	Parâmetros do Motor Real	78
12.	Resultados da Simulação Numérica	81
13.	Conclusões	91
13.1	Sobre a Utilização do Chemkin 4.0	91
13.1.1	Recomendações para Trabalhos Futuros	92
13.2	Sobre o Motor Simulado e Variáveis Paramétricas	92
14.	Referências	94
15.	Anexo	98