

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE DE UM SISTEMA DE INJEÇÃO ELETRÔNICA  
DIRETA DE COMBUSTÍVEL ADAPTADO EM UM MOTOR DE  
COMBUSTÃO INTERNA COM IGNIÇÃO POR CENTELHA**

**RODRIGO FERNANDO ESTELLA DOS SANTOS**



Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Luís Carlos Passarini

São Carlos  
- 2000 -

Class. TESE-EESC

Cutt. S5089

Tombo 0108/00

31100008603

1083026

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

S237a Santos, Rodrigo Fernando Estella dos  
Análise de um sistema de injeção eletrônica direta  
de combustível adaptado em um motor de combustão  
interna com ignição por centelha / Rodrigo Fernando  
Estella dos Santos. -- São Carlos, 2000.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de  
São Carlos-Universidade de São Paulo, 2000.

Área: Engenharia Mecânica.

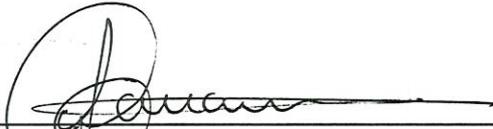
Orientador: Prof. Dr. Luís Carlos Passarini.

1. Injeção direta de combustível. 2. Motores ICE.  
3. Mistura. 4. Desempenho. I. Título.

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Engenheiro **RODRIGO FERNANDO ESTELLA DOS SANTOS**

Dissertação defendida e aprovada em 28.02.2000  
pela Comissão Julgadora:



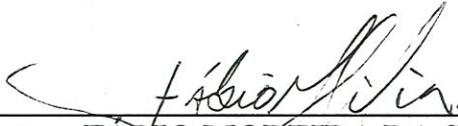
---

Prof. Doutor **LUIS CARLOS PASSARINI (Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



---

Prof. Doutor **ANTONIO MOREIRA DOS SANTOS**  
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



---

Prof. Doutor **FABIO MOREIRA DA SILVA**  
(Universidade Federal de Lavras - UFLA)



---

Prof. Associado **ARTHUR JOSÉ VIEIRA PORTO**  
Coordenador da Área de Engenharia Mecânica



---

**JOSÉ CARLOS A CINTRA**  
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

*Aos meus pais pela luta, amor e confiança  
e meus irmãos que são pessoas  
que tanto amo.*

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Luís Carlos Passarini, pela orientação, dedicação, confiança e amizade.

Ao Professor Antônio Moreira dos Santos, pelas valiosas contribuições dadas a este trabalho.

Ao amigo Roberto Lourenço, por estar sempre disposto a ajudar e pela grande amizade adquirida ao longo deste trabalho.

À Gi, amiga e companheira, pela ajuda e incentivo nas horas difíceis.

Aos amigos Bila, Mariano, Panamá, Kelen, Fabiana, Lú, Teodora, Vanessa, Ana Lúcia, Geraldo, Celso, Alexandre, Adriano, Dinho, Claudião, Neilor, Todinho, Volnei, Hubinger, Torres, Felipe, Zé Antônio, Alex, Klaus, Luben, Márcio, Marcelo, Fernando Camargo, Fernando Schiavon, Luciano, Luchesi, João, Hélio, Roberto e Léo.

À Beth e Ana Paula, pela amizade e pela ajuda prestada durante o trabalho.

Aos professores, secretárias e funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica.

Às demais pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	iii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
1 INTRODUÇÃO	1
2 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA COM IGNIÇÃO POR CENTELHA	3
2.1 Preparação da Mistura	6
2.1.1 Marcha Lenta	8
2.1.2 Zona de Economia ou Carga Parcial	8
2.1.3 Zona de Potência ou Plena Carga	8
2.2 Carburador	9
2.2.1 Carburador Básico	9
2.3 Motivação para o Controle Eletrônico do Motor	11
2.3.1 Emissões de Gases Poluentes	11
2.3.2 Economia de Combustível	12
3 INJEÇÃO ELETRÔNICA DE COMBUSTÍVEL	14
3.1 O Sistema de Injeção Eletrônica Indireta de Combustível	14
3.1.1 Circuito de Alimentação de Combustível	17
3.1.2 Circuito de Admissão de Ar	20
3.1.3 Circuito Elétrico/Eletrônico	21
3.1.4 Dispositivos para o Controle das Emissões de Poluentes	24
3.2 Controle do Sistema de Injeção Eletrônica	26
3.2.1 Funcionamento a Frio	27
3.2.2 Autoadaptação	27
3.2.3 Funcionamento em Aceleração	27
3.2.4 Funcionamento em Desaceleração	28

3.2.5	Funcionamento em “Cut-Off”	28
3.2.6	Proteção contra Rotações Excessivas	28
3.2.7	Controle da Detonação	28
4	INJEÇÃO ELETRÔNICA DIRETA DE COMBUSTÍVEL EM MOTORES DE IGNIÇÃO POR CENTELHA	29
4.1	Carga Estratificada	29
4.2	Injeção Direta	31
4.2.1	Configuração do Sistema de Injeção Direta	34
4.2.2	Vantagens do Sistema de Injeção Direta	35
4.2.3	Sistema de Injeção Direta a Baixas Pressões	40
4.2.4	Configuração do Sistema Proposto neste Trabalho	44
4.2.5	O Álcool	45
4.3	Objetivos	45
5	MATERIAIS E MÉTODOS	46
5.1	Materiais	46
5.1.1	Dinamômetro de Correntes de Foucault	46
5.1.2	Motor	47
5.1.3	Sistema de Injeção Eletrônica	47
5.1.4	Conjunto de Injeção Direta	48
5.1.5	Sistema Gravimétrico para Medição do Consumo de Combustível	49
5.2	Métodos	51
5.2.1	Determinação da Localização do Conjunto de Injeção Direta no Cilindro	51
5.2.2	Ensaio Dinamométrico	55
5.2.3	Ensaio com o Sistema de Injeção Direta	56
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
6.1	Centelha	59
6.2	Mistura Admitida no Sistema ID	61

6.3 Falta de Homogeneização da Mistura Admitida pelo Cilindro no Sistema ID	61
6.3.1 Geometria da Câmara de Combustão nos Motores com ID a Alta Pressão	62
6.3.2 Qualidade do Jato de Combustível	64
6.3.3 Influência do Tipo de Carga	65
6.3.4 O Momento da Injeção	67
6.4 Funcionamento do motor entre 4800 e 5100 rpm com o Sistema de Injeção Direta Adaptado Proposto neste Trabalho	67
7 CONCLUSÕES	68
7.1 Sugestões para Trabalhos Futuros	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

---

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Sequência de operações de um motor do ciclo Otto	4
Figura 2.2 – Suposição das válvulas de admissão e escape	5
Figura 2.3 – Relação entre $\lambda$ e potência, consumo e emissões	7
Figura 2.4 – Razões A/C para diferentes acelerações de um motor	7
Figura 2.5 – Carburador de um motor ICE	9
Figura 2.6 – Esquema de um carburador básico	10
Figura 3.1 – Exemplo de um sistema de injeção eletrônica de combustível	15
Figura 3.2 – Momento da injeção de combustível	16
Figura 3.3 – Bomba elétrica de combustível	17
Figura 3.4 – Regulador de pressão	19
Figura 3.5 – Bico injetor de combustível	19
Figura 3.6 – Central eletrônica do comando da injeção	23
Figura 3.7 – Sensor de rotação do motor	23
Figura 3.8 – Sensor sonda lambda	24
Figura 3.9 – Sistema de recirculação dos gases de escape	26
Figura 4.1 – Concepção idealizada da combustão de carga estratificada	30
Figura 4.2 – Vista em corte do motor D4, da Toyota, que utiliza o sistema IEDC	34
Figura 4.3 – Comparação entre os sistemas IEDC e IEIC	35
Figura 4.4 – Ciclo padrão de ar Otto	36
Figura 4.5 – Motor GDI, da Mitsubishi	38
Figura 4.6 – Motor D4, da Toyota	39
Figura 4.7 – Motor AL2, da Audi	40
Figura 4.8 – Esquema do sistema de injeção direta de HILDEBRAND JR.	41
Figura 4.9 – Gerador de pulsos analógico	42
Figura 4.10 – Torque em função da rotação	43
Figura 4.11 – Potência reduzida em função da rotação	43
Figura 4.12 – Consumo específico em função da rotação	44
Figura 5.1 – Motor Volkswagen utilizado para os ensaios	47
Figura 5.2 – Sistema de injeção direta proposto neste trabalho	50

---

Figura 5.3 – Vista do bloco do motor furado	53
Figura 5.4 – Foto de um porta-injetor utilizado no motor	54
Figura 5.5 – Foto de uma das carcaças metálicas dos bicos injetores	54
Figura 5.6 – Foto de um injetor sem a carcaça metálica	55
Figura 5.7 – Foto de um injetor com a carcaça metálica	55
Figura 5.8 – Esquema de como foram obtidos os sinais do motor durante os ensaios	57
Figura 6.1 – Desempenho do motor na configuração original	58
Figura 6.2 – Organograma mostrando o caminho seguido na procura das causas do baixo rendimento do motor operando com o sistema ID	59
Figura 6.3 – Imagem ilustrativa do osciloscópio utilizado nos ensaios de laboratório	60
Figura 6.4 – Curva de vazão dos bicos injetores	62
Figura 6.5 – Geometria da câmara de combustão nos motores com ID a alta pressão	63
Figura 6.6 – Cabeça côncava de um pistão utilizado em sistemas ID a alta pressão	63
Figura 6.7 – Distribuição da mistura dentro do cilindro nos sistemas ID que trabalham a alta pressão de combustível	66
Figura 6.8 – Distribuição da mistura no sistema proposto neste trabalho	67

---

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Evolução dos limites de controle dos gases de escape	12
Tabela 2.2 – Requisitos de economia da CAFE	13
Tabela 5.1 – Dados técnicos do motor	49

---

## RESUMO

SANTOS, R.F.E. (2000). *Análise de um sistema de injeção eletrônica direta de combustível adaptado em um motor de combustão interna com ignição por centelha*. São Carlos. 77p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Desde a criação dos motores de ignição por centelha (ICE), ou ciclo Otto, extensivos estudos têm sido realizados afim de se alcançar alto desempenho, baixa emissão de poluentes e boa economia de combustível, simultaneamente. Recentemente, indústrias automobilísticas, após retomarem suas pesquisas, começaram a produzir motores com sistemas de injeção eletrônica direta de combustível. Essa tecnologia apresenta características que contribuem de forma positiva na busca dos objetivos citados acima. São apresentados aqui o estado da arte da injeção direta de combustível em motores do ciclo Otto, a tecnologia atual para viabilizar sua realização, as características dos motores que utilizam este sistema, uma comparação com os sistemas que utilizam a injeção indireta de combustível e os resultados de ensaios realizados com um sistema de injeção direta adaptado em um motor que operava originalmente com sistema de injeção indireta.

Palavras-chave: injeção direta de combustível; motores ICE; mistura; desempenho.

**ABSTRACT**

SANTOS, R.F.E. (2000). *Analysis of a fuel direct electronic injection system adapted in a spark-ignition engine*. São Carlos. 77p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Since the invention of the spark-ignition engine (SI), or Otto cycle engine, extensive studies have been accomplished in order to reach high performance, low emission and good fuel economy, simultaneously. Recently, automotive industries have restarted the production of electronically controlled engines with fuel direct injection systems. The technology of direct injection presents characteristics that contribute in a positive way to reach the objectives above mentioned. They are presented here the state-of-the-art of direct fuel injection in SI engines, the current technology to make possible its accomplishment, the characteristics of the engines using this system, a comparative experimental study between this system and the indirect fuel injection one and the results of rehearsals accomplished with a direct injection system adapted in a engine that operated originally with indirect injection system.

Keywords: fuel direct injection; spark-ignition engine; mixture; performance.

## 1 INTRODUÇÃO

A partir da criação dos motores de ignição por centelha (ICE), em 1862, extensivos estudos têm sido realizados a fim de se obter o melhor desempenho possível do motor. Desde então, a evolução dos motores não tem parado. Com o advento da eletrônica aplicada à motores de combustão interna e com o controle sobre emissão de gases poluentes, exigido por órgãos federais, as indústrias automobilísticas passaram a substituir o carburador pela injeção eletrônica de combustível, uma vez que esta melhora o desempenho do motor, levando a um menor consumo, maior potência e baixa emissão de poluentes.

Recentemente, após retomarem suas pesquisas, algumas indústrias automobilísticas começaram a produzir motores com sistemas de injeção eletrônica direta de combustível, onde este é injetado diretamente dentro do cilindro do motor.

O trabalho apresentado visa adaptar um sistema deste tipo em um motor que funciona originalmente com injeção indireta de combustível, coletar os dados de torque, potência e consumo de combustível e comparar os resultados dos dois sistemas de injeção.

Um aspecto importante deste trabalho é que o motor utilizado nos ensaios é movido à álcool, ao invés da gasolina, como em todos os motores desenvolvidos até recentemente pelas indústrias automobilísticas.

No *Capítulo 2*, são mostrados alguns conceitos básicos sobre o funcionamento do motor ICE, um breve histórico sobre sua evolução e alguns requisitos necessários para se obter um melhor desempenho.

O *Capítulo 3* apresenta o sistema de injeção eletrônica indireta de combustível, que é o sistema mais comum nos motores produzidos atualmente. É explicado todo o esquema de funcionamento do sistema e seus componentes.

No *Capítulo 4*, é mostrado o sistema de injeção eletrônica direta de combustível, seu funcionamento e suas vantagens. O sistema proposto e os objetivos deste trabalho também são apresentados.

A metodologia e os materiais utilizados durante os ensaios realizados com o motor em laboratório são expostos no *Capítulo 5*.

No *Capítulo 6*, há uma discussão sobre toda parte experimental do trabalho e a apresentação dos resultados obtidos.

E, finalmente, o *Capítulo 7* apresenta as conclusões do trabalho e algumas sugestões para trabalhos futuros.

## 2 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA COM IGNIÇÃO POR CENTELHA

A história do motor de combustão interna com ignição por centelha (ICE), ou ciclo Otto, teve início em 1862, quando o físico francês Beau de Rochas propôs uma seqüência de operações que, futuramente, tornaria-se típica na grande maioria dos motores ICE (OBERT, 1971). Esta seqüência (Figura 2.1) é a seguinte:

Admissão: neste curso a mistura ar-combustível é aspirada para o interior do cilindro do motor, com a válvula de admissão aberta e a válvula de escape fechada. A mistura ar-combustível começa a ser formada no coletor de admissão pela introdução do combustível na corrente de ar. Durante o tempo de admissão, o êmbolo (ou pistão) desloca-se do ponto morto superior (PMS) para o ponto morto inferior (PMI). O volume varrido entre o PMS e o PMI é conhecido como cilindrada unitária do motor, e a soma das cilindradas unitárias dos cilindros é a cilindrada total do motor.

Compressão: com as duas válvulas fechadas, a mistura é comprimida pelo pistão no seu movimento de subida, deslocando-se do PMI ao PMS.

Expansão: ainda com as duas válvulas fechadas, uma centelha provoca a ignição da mistura, iniciando a combustão, o que provoca aumento da temperatura e da pressão e, conseqüentemente, a expansão dos gases, que empurram o pistão para baixo, transformando a energia química da combustão em energia mecânica.

Escape: com a válvula de admissão fechada e a de escape aberta, o pistão sobe do PMI ao PMS e expulsa os gases resultantes da queima.

É importante salientar que a abertura e fechamento das válvulas não ocorrem propriamente quando o pistão atinge o PMS ou o PMI. O que realmente ocorre é o seguinte:

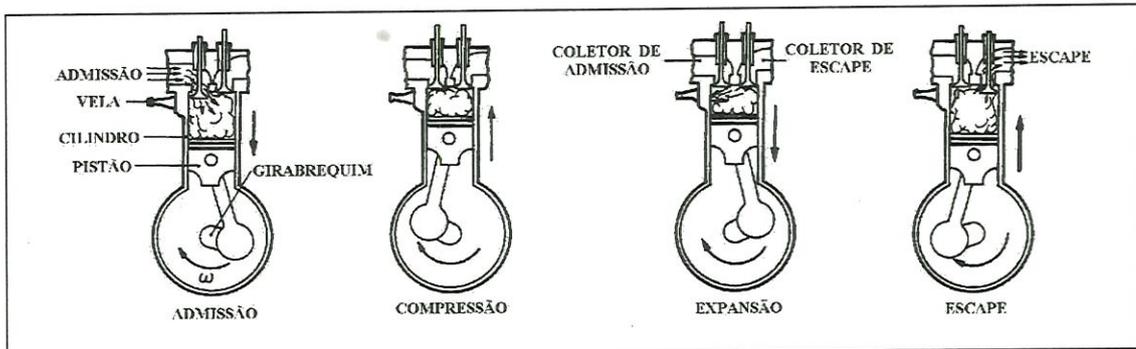


Figura 2.1: Seqüência de operações de um motor do ciclo Otto (FERGUSON, 1986).

- a válvula de admissão inicia sua abertura antes do pistão atingir o PMS durante o tempo de escape a fim de obter um melhor enchimento do cilindro, aumentando assim o rendimento volumétrico;

- a válvula de admissão fecha depois que o pistão passa pelo PMI para aproveitar a inércia da mistura e a velocidade nula do pistão, conseguindo assim um maior enchimento do cilindro;

- a válvula de escape inicia sua abertura antes do pistão atingir o PMI durante a explosão a fim de abaixar a pressão dos gases de combustão antes do início da descarga. Esta abertura antecipada provoca uma perda do trabalho útil, mas ela é largamente compensada pela diminuição no trabalho de bombeamento, fazendo com que o trabalho útil total seja maior;

- a válvula de escape fecha depois que o pistão supera o PMS para aproveitar a inércia dos gases e a baixa velocidade do pistão, conseguindo assim expulsar uma maior quantidade de gases residuais, melhorando portanto o rendimento do motor (PENIDO FILHO, 1983).

Esta superposição, ou cruzamento de válvulas (Figura 2.2), melhora o desempenho do motor em altas rotações.

Apesar de ter formulado as condições de funcionamento deste motor, Rochas não chegou a construí-lo. Somente em 1876, o engenheiro alemão Nikolaus Otto, utilizando as idéias de Rochas, construiu um motor ICE de quatro tempos (OBERT, 1971). O primeiro motor deste tipo produzido por Otto consistia de um cilindro horizontal com um diâmetro de 161 mm e um curso de 300 mm, uma taxa de compressão de 2,5:1, desenvolvia 3 HP à 180 rpm e sua eficiência térmica era de

14% (AMANN, 1990). Como os resultados de suas pesquisas com este motor foram bastante satisfatórios, Otto passou a fabricá-lo em uma indústria. Depois disso, este motor passou a ser conhecido como motor Otto (OBERT, 1971).

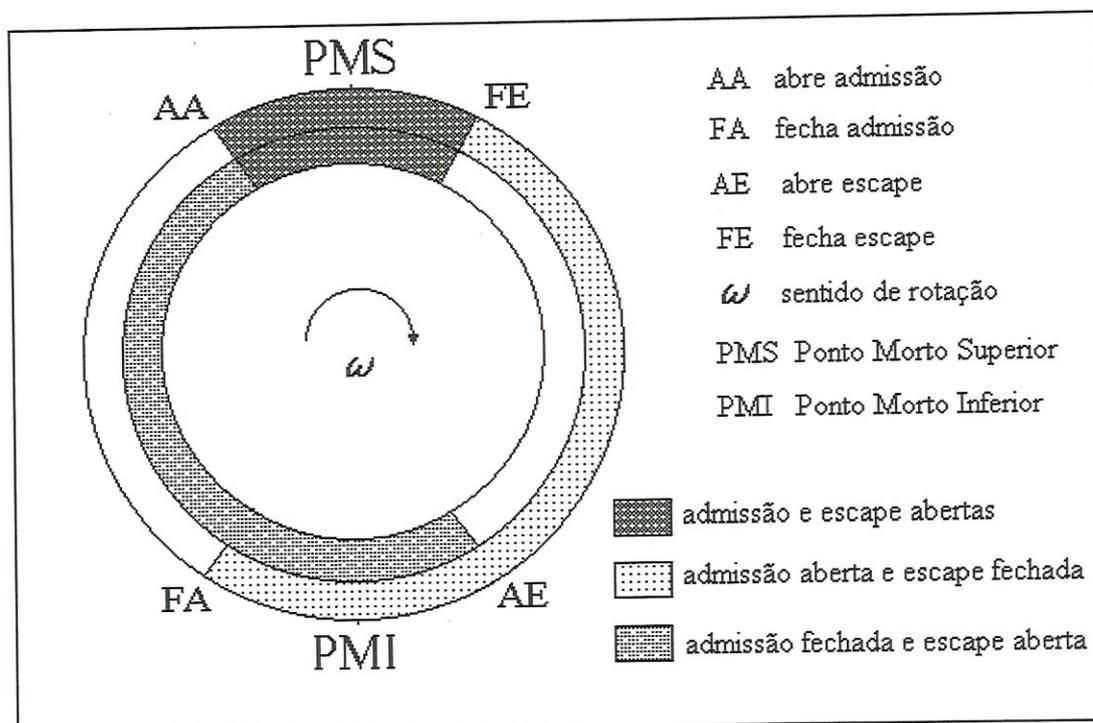


Figura 2.2: Superposição das válvulas de admissão e escape.

No início, o motor ICE era movido à gás liquefeito de petróleo (GLP), só depois surgiu a gasolina. Desde então, a evolução deste motor não tem parado, especialmente depois da primeira crise do petróleo, em 1973. Esta crise, fruto de hostilidades entre os países produtores e os países consumidores, criou a necessidade de se consumir menos gasolina e preservar o meio ambiente dos gases de escape dos automóveis (ANTÓNIO, 1996).

Uma das alternativas para se atingir esta economia de combustível e diminuição da emissão de gases poluentes é melhorar a preparação e a queima da mistura ar-combustível (A/C) admitida pelo cilindro durante o funcionamento do motor.

## 2.1 Preparação da Mistura

Um motor ICE pode operar com uma grande variação da relação ar-combustível admitida pelos cilindros. Esta relação (A/C) é definida como sendo a razão entre as quantidades de ar e de combustível na mistura. A razão entre a relação A/C real admitida pelo motor e a A/C estequiométrica<sup>1</sup> é definida como fator de excesso de ar ( $\lambda$ ):

$$\lambda = \frac{\text{A/C real}}{\text{A/C estequiométrica}}$$

$$\text{A/C} = \frac{\text{massa de ar}}{\text{massa de combustível}}$$

onde:

$\lambda = 1 \rightarrow$  mistura estequiométrica;

$\lambda > 1 \rightarrow$  mistura pobre (com menos combustível que a estequiométrica);

$\lambda < 1 \rightarrow$  mistura rica (com mais combustível que a estequiométrica).

Se o fator  $\lambda$  estiver na faixa de 0,85 a 0,95, o motor desenvolve sua máxima potência. Se  $\lambda$  estiver entre 1,0 e 1,1, o motor opera com a máxima economia de combustível. Se estiver entre 0,75 e 0,85, o motor tem um bom desempenho nas transições entre os modos de operação<sup>2</sup>. Boa transição é sinônimo de boa aceleração. A “Figura 2.3” mostra a relação entre  $\lambda$  e potência, consumo e emissões de poluentes. Como pode ser visto, nem sempre a mistura estequiométrica é a ideal (AUTOMOTIVE, 1988).

---

<sup>1</sup> Mistura estequiométrica é a quimicamente correta para que ocorra uma combustão completa.

<sup>2</sup> Da marcha lenta para a carga parcial, por exemplo.

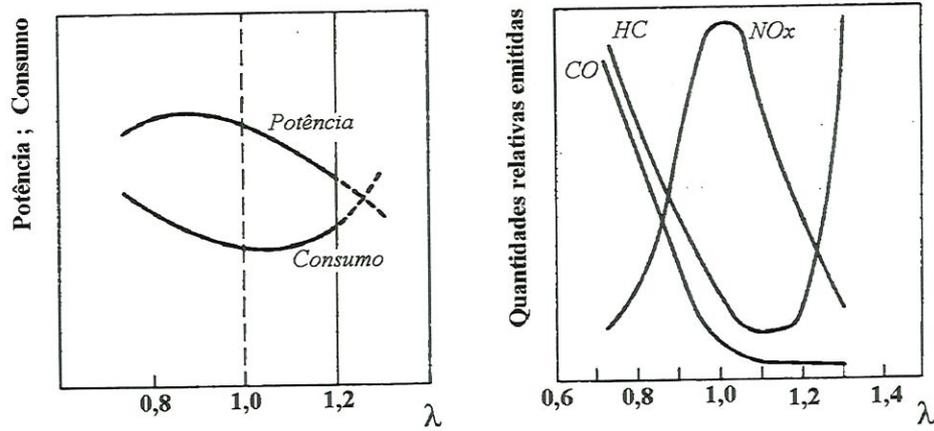


Figura 2.3: Relação entre  $\lambda$  e potência, consumo e emissões (AUTOMOTIVE, 1988).

A relação A/C varia conforme as condições de operação e de carga de alimentação do motor. As três condições principais são:

- Marcha lenta e carga baixa;
- Zona de economia com cargas médias;
- Zona de potência com carga máxima.

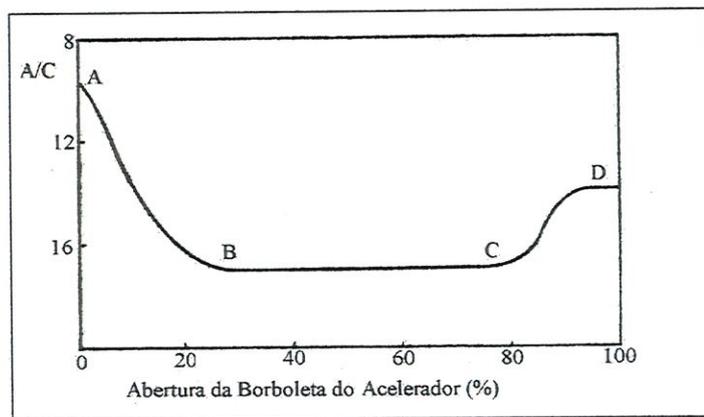


Figura 2.4: Razões A/C para diferentes acelerações de um motor (OBERT, 1971).

### **2.1.1 Marcha Lenta**

Um motor está em marcha lenta quando não há carga resistiva externa no motor e a borboleta de aceleração está fechada. Nestas condições, o motor requer uma mistura rica (ponto A da Figura 2.4), devido ao cruzamento das válvulas de admissão e de escape e, como a pressão no interior do cilindro no final do curso de escape é maior que a pressão no coletor de admissão, os gases resultantes da combustão entram no coletor, diluindo-se com a mistura fresca. Isto faz com que diminua-se o poder de queima da mistura que entra no cilindro e necessite-se de maior quantidade de combustível para uma boa combustão.

Com o aumento gradativo da carga, a percentagem de gás queimado que dilui-se com a mistura fresca diminui, de forma que a mistura admitida pelo cilindro pode ser progressivamente empobrecida (OBERT, 1971).

### **2.1.2 Zona de Economia ou Carga Parcial (linha BC)**

Do início da abertura da borboleta do acelerador até aproximadamente 3/4 da abertura total, o motor está operando na condição de carga parcial, ou seja, nesta faixa o motor pode trabalhar com uma mistura mais pobre.

Na zona de economia, a razão ar-combustível pobre diminui a velocidade da chama na câmara de combustão, o que pode causar a extinção da chama devido as propriedades químicas deste tipo de mistura, levando a um menor rendimento do motor. Para compensar isto, a centelha deve ser avançada para maior aproveitamento da combustão (OBERT, 1971).

### **2.1.3 Zona de Potência ou Plena Carga (linha CD)**

A partir de 3/4 de abertura da borboleta do acelerador até sua abertura total, o motor está operando à plena carga. Neste caso, a mistura deve ser enriquecida porque presume-se que a potência máxima esteja sendo exigida (OBERT, 1971).

Um inconveniente da mistura rica é que proporciona combustão incompleta, devido a falta de oxigênio. Assim haverá formação de depósitos de carbono na

câmara, anéis, válvulas e nos eletrodos da vela, prejudicando o funcionamento do motor. Uma outra desvantagem é o aumento no consumo de combustível do motor. A vantagem é que, devido a falta de oxigênio, a temperatura no interior da câmara de combustão é menor, pois a temperatura de combustão está relacionada com a razão A/C (SANTOS, 1998).

Para preparar a mistura ar-combustível, os motores, até pouco tempo atrás, usavam carburadores. Nos motores mais recentes, o carburador deu lugar a injeção de combustível controlada eletronicamente. Veremos a seguir os princípios fundamentais destes dispositivos preparadores de mistura.

## 2.2 Carburador

Por definição, a função de um carburador é misturar hidrocarbonetos ao ar. O carburador do motor ICE (Figura 2.5) tem a função de dosar o combustível que será introduzido na corrente de ar admitida pelos cilindros e, promover a maior taxa de vaporização possível deste combustível. A relação A/C deve ser mantida dentro dos limites prescritos pelo projeto do motor (OBERT, 1971).

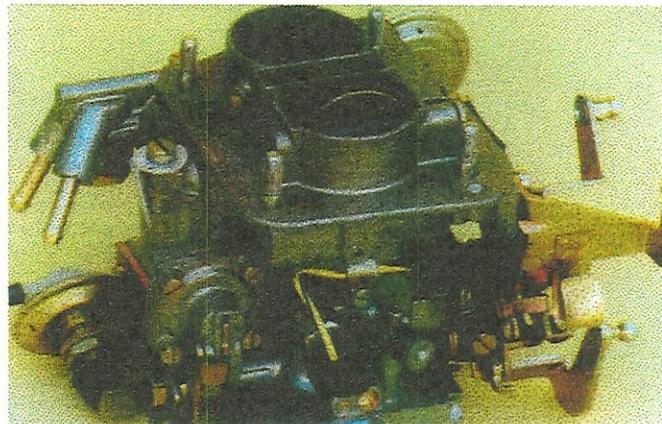


Figura 2.5: Carburador de um motor ICE (SEM, 1998).

### 2.2.1 Carburador Básico

O elemento básico da maioria dos carburadores consiste em uma passagem de ar de geometria fixa, contendo uma restrição com a forma de venturi. Na garganta

deste venturi está localizado um injetor de combustível, que vem de uma câmara de bóia de nível constante. O fluxo de ar é controlado por uma válvula borboleta, situada após o venturi. A “Figura 2.6” mostra o esquema de um carburador básico. Neste carburador, o fluxo de ar atravessa a passagem do venturi, diminuindo assim sua pressão. A diferença entre a pressão na entrada de ar e a pressão estática na garganta do venturi é usada para regular a vazão de combustível (TAYLOR, 1971).

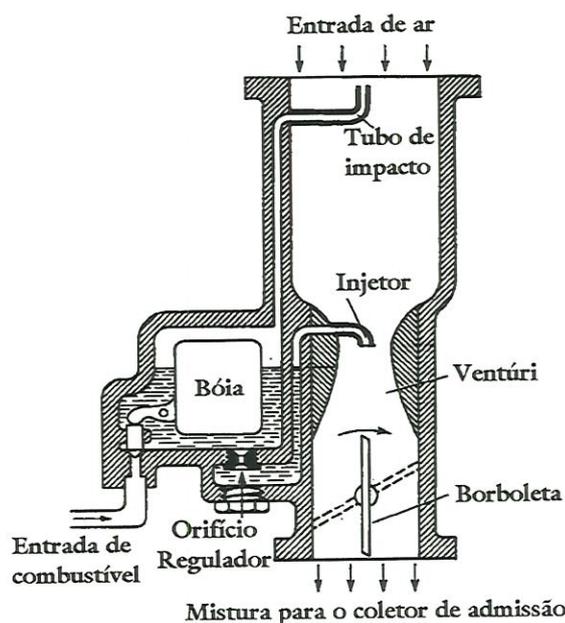


Figura 2.6: Esquema de um carburador básico (TAYLOR, 1971).

Todo carburador é constituído dos seguinte sistemas (SANTOS, 1998):

- sistema de alimentação de combustível;
- sistema de marcha lenta;
- sistema principal;
- sistema suplementar de alta rotação;
- sistema de aceleração rápida e;
- sistema de afogamento.

O combustível é introduzido no ar, na garganta do venturi, por meio de um bocal, alimentado pela câmara da bóia, através de um orifício medidor de combustível. O nível de combustível na câmara da bóia é mantido constante por

meio de uma válvula controlada pela bóia. A pressão acima do combustível é mantida igual à pressão total de admissão de ar, por meio de um tubo de impacto, que mede a pressão total na entrada de ar (TAYLOR, 1971).

### 2.3 Motivação para o Controle Eletrônico do Motor

Desde que o motor de combustão interna começou realmente a ser utilizado como máquina motriz, muitas pesquisas têm sido realizadas a fim de se alcançar alto desempenho, baixa emissão de gases poluentes e boa economia de combustível, simultaneamente. Os resultados destas pesquisas levaram as indústrias automobilísticas a substituir o carburador pelos sistemas de injeção de combustível. Embora as vantagens fossem muitas, no início esta iniciativa era considerada um programa de risco, tanto para o consumidor como para o fabricante, de forma que não foi atrativo até que surgisse uma motivação bem forte que modificasse esse quadro. A motivação para esta substituição veio na década de 70 e foi influenciada, principalmente, pelas normas de emissões de gases de exaustão, impostas nos Estados Unidos, no estado da Califórnia, e pela necessidade de se economizar cada vez mais combustível durante a crise do petróleo (PASSARINI, 1993).

#### 2.3.1 Emissões de Gases Poluentes

Como a combustão nos motores ICE não é perfeita, além das moléculas de  $H_2O$  e  $CO_2$ , os gases de exaustão contém também monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio ( $NO_x$ ), hidrocarbonetos não queimados (HC), óxidos de enxofre e outros compostos. Normalmente, os gases controlados por legislações são CO,  $NO_x$  e HC (PASSARINI, 1993).

O controle de emissões começou nos Estados Unidos em 1966. Desde então o governo federal americano impôs os limites de controle para todos os estados, e os requisitos foram se tornando progressivamente mais difíceis de serem seguidos. A “Tabela 2.1” mostra a evolução dos limites de controle dos gases de exaustão. É importante dizer que estes padrões são seguidos pelo Brasil, uma vez que o país adotou a legislação americana para motores de ciclo Otto (PASSARINI, 1993).

Tabela 2.1: Evolução dos limites de controle dos gases de escape (PASSARINI, 1993).

ANO	Requisitos (g/milha)					
	EPA (governo federal)			CARB.		
	HC	CO	NOx	HC	CO	NOx
1968	3,2	33,0	-			
1971	2,2	23,0	-			
1978	1,5	15,0	2,0	0,41	9,0	1,5
1980	0,41	7,0	2,0			
1990				0,41	7,0	0,4/0,7
1991	0,41	3,4	1,0			
1993				0,25	3,4	0,4
1994	0,25	3,4	0,4			
1995				0,125	3,4	0,4
1997				0,075	3,4	0,2
1998				0,075	3,4	0,2
1999				0,06	2,8	0,2

Obs.: EPA: Envirolment Protection Agency = Agência de Proteção do Meio Ambiente.

CARB: Califórnia Air Resources Board = Conselho de Meios Atmosféricos da Califórnia.

### 2.3.2 Economia de Combustível

Com a crise do petróleo, alguns países se esforçaram em melhorar o consumo de combustível através de regulamentações governamentais. Os requisitos do governo americano, por exemplo, são estabelecidos em termos de uma taxa média de milhas por galão para a produção de todos os modelos por uma montadora para qualquer ano. Esse requisito é conhecido pelas montadoras pela sigla CAFE (Corporate Avarage Fuel Economy = Economia Média Unificada de Combustível) e, de tempos em tempos, este requisito de consumo fica cada vez mais rigoroso e difícil

de ser alcançado. A “Tabela 2.2” mostra a evolução deste requisito (PASSARINI, 1993).

Tabela 2.2: Requisitos de economia da CAFE (PASSARINI, 1993).

ano	milhas/galão (MPG)	km/l
1978	18	7,7
1979	19	8,1
1980	20	8,5
1991	27,5	11,7
1996	33	14

É importante observar que o cumprimento destas normas ou requisitos envolve diretamente a otimização do desempenho do motor. Para isto, o motor deverá apresentar um baixo consumo específico<sup>3</sup>, pois só assim será possível economizar combustível, emitir menor quantidade de poluentes e não perder a dirigibilidade (HILDEBRAND JR., 1998).

O consumo específico é um parâmetro que está intimamente relacionado com o rendimento global de um motor. Diminuí-lo significa aumentar o rendimento térmico e isto não é uma tarefa tão simples, visto que esta tentativa vem sendo feita há pelo menos 120 anos, desde o advento dos primeiros motores do ciclo Otto até hoje (HILDEBRAND JR., 1998).

Para se tentar atingir os objetivos citados acima e seguir as normas impostas pelos governos federais, os fabricantes foram aperfeiçoando o carburador até onde foi possível. Depois disso, a solução encontrada foi adotar o sistema de injeção eletrônica de combustível nos motores ICE. Este sistema é mostrado no próximo capítulo.

---

<sup>3</sup> Consumo específico é a quantidade de combustível necessária para gerar uma unidade de potência em uma unidade de tempo.

### 3 INJEÇÃO ELETRÔNICA DE COMBUSTÍVEL

Segundo PASSARINI (1993), historicamente, houve tentativas de se introduzir a ignição e a injeção de combustível eletronicamente controlada, durante o final dos anos 50 e o início dos anos 60. Os usuários, particularmente, não aceitavam as inovações e além disso, depois de mais de 100 anos controlando o motor com controles fluídicos, as montadoras relutavam em abandonar uma tecnologia que dominavam bem e que lhes tinha custado caro. Nos anos 70 dois eventos transformaram a indústria automobilística: as legislações de emissões de gases poluentes e economia de combustível, já citados anteriormente, e o desenvolvimento da eletrônica digital de estado sólido, que poderia ser usada para controlar o motor a custo relativamente baixo. Assim, as montadoras começaram a controlar os motores através da eletrônica, primeiramente com os carburadores eletrônicos<sup>4</sup> e depois com os sistemas de injeção eletrônica indireta de combustível.

#### 3.1 O Sistema de Injeção Eletrônica Indireta de Combustível

O sistema de injeção eletrônica indireta de combustível surgiu depois de anos de pesquisa, visando garantir uma boa eficiência de funcionamento do motor, melhorando o desempenho, o consumo e reduzindo as emissões de gases nocivos através de uma resposta em tempo real às diferentes condições de funcionamento do motor. A “Figura 3.1” mostra um exemplo de um sistema deste tipo, onde:

- |                                      |                                                |
|--------------------------------------|------------------------------------------------|
| 1- tanque de combustível             | 10- sensor de vazão de ar                      |
| 2- bomba elétrica                    | 11- sensor lambda                              |
| 3- filtro                            | 12- sensor limitador do bico de partida à frio |
| 4- central eletrônica                | 13- sensor de temperatura do motor             |
| 5- bico injetor                      | 14- distribuidor                               |
| 6- regulador de pressão              | 15- válvula auxiliar de ar                     |
| 7- coletor de admissão               | 16- bateria                                    |
| 8- bico de partida à frio            | 17- chave de ignição                           |
| 9- sensor da borboleta de aceleração |                                                |

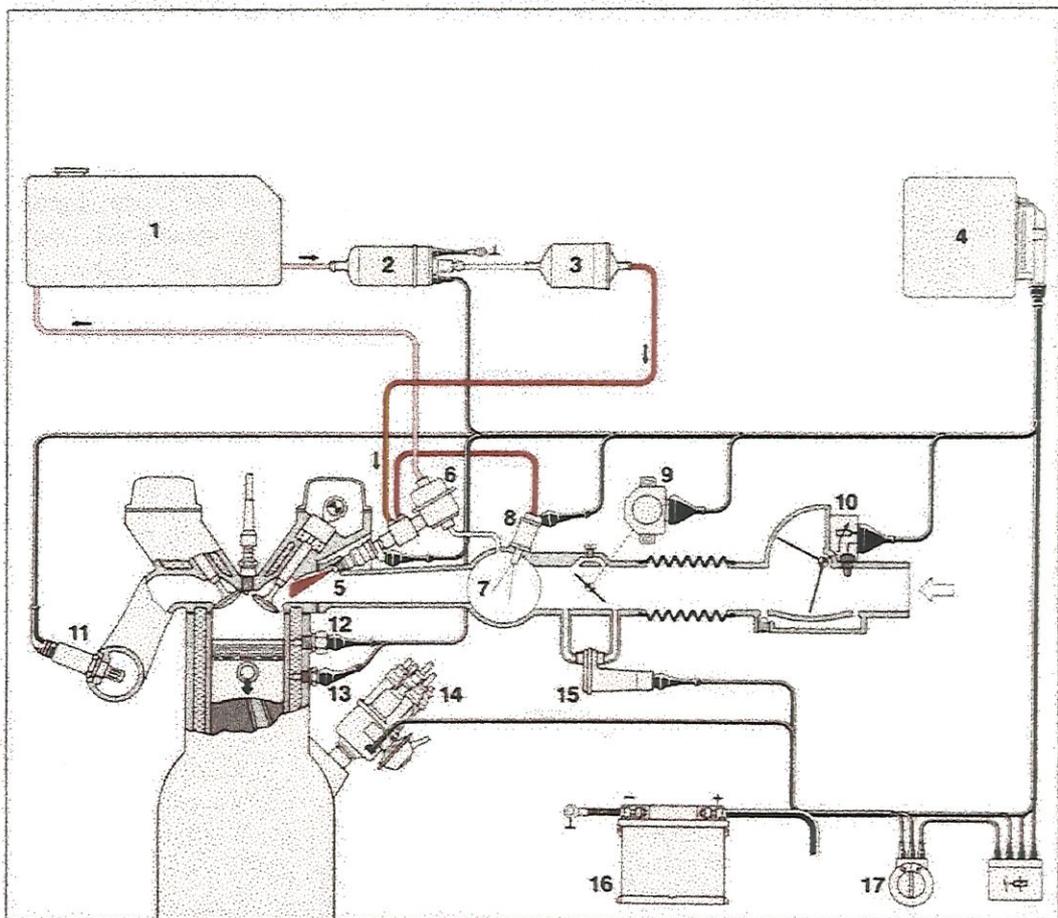


Figura 3.1: Exemplo de um sistema de injeção eletrônica de combustível (AUTOMOTIVE, 1988).

<sup>4</sup> Os carburadores eletrônicos foram utilizados durante pouco tempo, em uma fase de adaptação das montadoras e logo foram abandonados.

Este sistema (Figura 3.2), tem como função manter a proporção correta da mistura A/C em todas as condições de operação do motor. Ele deve injetar uma quantidade exata de combustível capaz de misturar-se com o ar introduzido no cilindro. Esta injeção é feita por válvulas (bicos ou eletroinjetores) injetoras e ocorre no coletor de admissão, próximo à borboleta do acelerador no caso do sistema SPI (Single Point Injection = Injeção em um Único Ponto) e, no pé da válvula de admissão no caso do sistema MPI (Mult Point Injection = Injeção em Pontos Múltiplos). Os bicos são acionados através de pulsos elétricos enviados pela central eletrônica de controle (SANTOS, 1998). Esta central recebe sinais de sensores que indicam as condições de funcionamento do motor, analisa-os e envia os pulsos elétricos aos atuadores do motor (em especial os bicos injetores, bobinas de ignição e o atuador de marcha lenta). Uma bomba elétrica (eletrobomba) envia combustível pressurizado aos bicos (FIAT, s.d.).

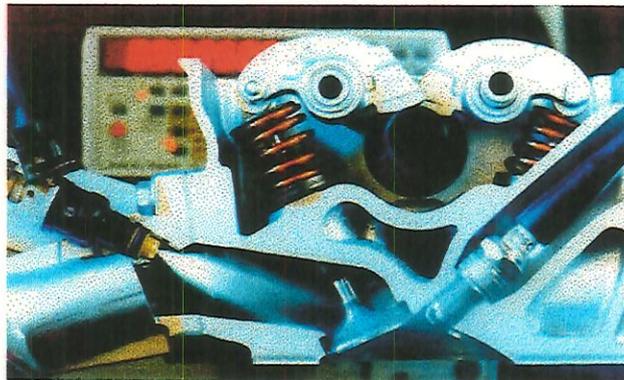


Figura 3.2: Momento da injeção de combustível (AJUDANDO, 1998).

O funcionamento completo do sistema de injeção eletrônica indireta de combustível pode ser melhor explicado dividindo-o nos seguintes subsistemas:

- circuito de alimentação de combustível;
- circuito de admissão de ar;
- circuito elétrico/eletrônico e;
- dispositivos para o controle das emissões de poluentes (FIAT, s.d.).

### 3.1.1 Circuito de Alimentação de Combustível

A alimentação do combustível no sistema é realizada através de uma eletrobomba introduzida no tanque, ou próxima à ele, que succiona o combustível e o envia ao filtro e, daí, para os bicos injetores. A pressão no fornecimento do combustível para os eletroinjetores é mantida constante e proporcional ao valor da pressão no coletor de admissão pelo regulador de pressão. Quando ocorre uma queda ou elevação de pressão no sistema, o regulador atua, diminuindo ou aumentando o retorno de combustível para o tanque até que a pressão se estabilize (SANTOS, 1998).

A *eletrobomba* (Figura 3.3), é composta basicamente por um motor elétrico, uma bomba de roletes, uma válvula de alívio de pressão e uma válvula de retenção. Fixada no eixo do rotor do motor elétrico, a bomba de roletes succiona o combustível do tanque e o envia, através da linha, até o tubo de distribuição e os bicos injetores, sob pressão. Este mesmo combustível refrigera e lubrifica todos os componentes da bomba (SANTOS, 1998).

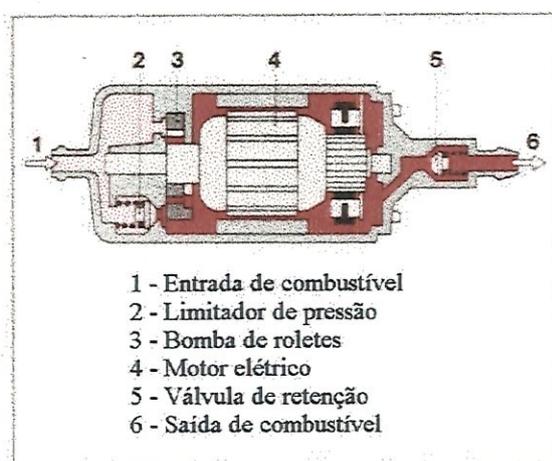


Figura 3.3: Bomba elétrica de combustível (AUTOMOTIVE, 1988).

O *filtro de combustível* tem a função de reter as impurezas contidas no combustível. É formado por uma carcaça de metal para resistir a alta pressão da bomba e por um suporte interno que contém um elemento de papel com elevada capacidade filtrante (SANTOS, 1998). Este filtro é indispensável para garantir o correto funcionamento do bico injetor, dada a grande sensibilidade deste último a

corpos estranhos contidos no circuito de alimentação. Por isso é aconselhável substituí-lo dentro dos prazos previstos pelos fabricantes (FIAT, s.d.).

O *tubo distribuidor de combustível*, cuja função é enviar o combustível aos eletroinjetores, engloba o regulador de pressão e os próprios eletroinjetores. A entrada do combustível é fixada no tubo distribuidor por um parafuso de vedação cônico. A recirculação do combustível é efetuada através de um tubo contido dentro do tubo distribuidor ligado, por fora, à tubulação de retorno que vai ao tanque (FIAT, s.d.).

O *regulador de pressão* (Figura 3.4), é um dispositivo diferencial de membrana, regulado para operar com uma certa pressão, imposta pelos fabricantes<sup>5</sup>. O combustível em pressão, proveniente da eletrobomba, exerce uma força sobre o diafragma, a qual é oposta pela pressão da mola reguladora. Ao superar a pressão de regulação, a válvula de defluxo abre e o combustível excedente retorna ao tanque, estabilizando a pressão no circuito. Além disso, através da tomada de depressão, o vácuo existente no coletor de admissão age sobre a membrana do regulador, reduzindo a carga exercida pela mola reguladora. Deste modo, é mantido constante o diferencial de pressão existente entre o combustível e o coletor de admissão, em qualquer condição de funcionamento do motor. Consequentemente, a vazão do eletroinjetor depende somente do tempo de injeção estabelecido pela central eletrônica (FIAT, s.d.).

---

<sup>5</sup> A pressão é tomada pela central eletrônica como parâmetro fixo. Assim, se o regulador for alterado, a relação da mistura prevista para o motor pode mudar.

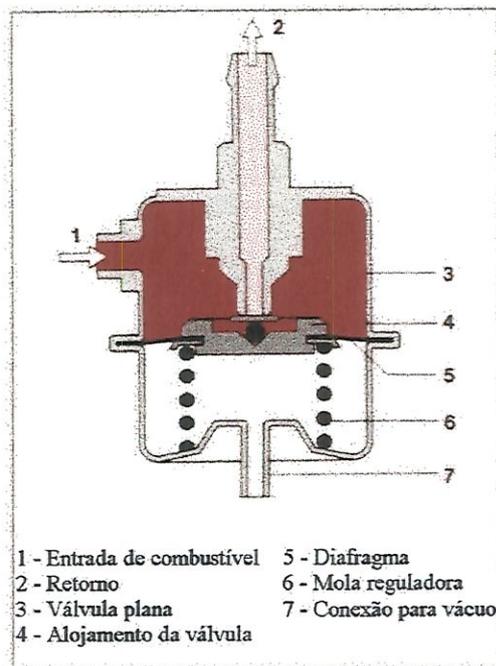


Figura 3.4: Regulador de pressão (AUTOMOTIVE, 1988).

Os *bicos injetores* (Figura 3.5), que são válvulas de agulha com acionamento eletromagnético, têm a função de injetar combustível pulverizado no coletor de admissão. A abertura desta válvula ocorre devido a um sinal elétrico enviado pela central eletrônica, que determina o tempo e a frequência desta abertura e, conseqüentemente, a quantidade de combustível necessária para cada condição do motor (SANTOS, 1998). A fixação dos bicos é efetuada pelo tubo distribuidor de combustível.



Figura 3.5: Bico injetor de combustível (YAMAGUCHI, 1997).

### 3.1.2 Circuito de Admissão de Ar

Este subsistema é constituído por vários componentes que efetuam o transporte correto da quantidade de ar necessária para o motor, nas diferentes condições de funcionamento. Todo ar aspirado pelo deslocamento dos pistões do motor, após passar pelo filtro, se encaminha para o sensor de vazão de ar, onde são medidos seu volume e sua temperatura. O volume de ar admitido é controlado pela borboleta de aceleração, que é acionada pelo pedal do acelerador. Esta borboleta possui interruptores que tem como função enviar sinais à central eletrônica, informando sua posição.

A função de dosar a quantidade de ar fornecida ao motor em função da exigência do motorista através do acelerador é do *corpo de borboleta*. Ele está fixado ao coletor de admissão e a borboleta é aberta através de um conjunto de alavancas que desenvolve um sistema de abertura de maneira a obter, em relação ao curso do pedal do acelerador, pequenos ângulos de abertura da borboleta com o pedal pouco pressionado e ângulos maiores com o pedal muito pressionado. Com o pedal completamente relaxado (motor em marcha lenta), o ar suplementar necessário é fornecido pelo atuador de marcha lenta do motor (FIAT, s.d.).

Para informar a posição da borboleta de aceleração à central eletrônica, existe um sensor composto de um potenciômetro cuja parte móvel é comandada pelo eixo da própria borboleta. Este potenciômetro está colocado numa peça de plástico munido de duas abas, nas quais há dois furos com a função de garantir a fixação e a posição do sensor em relação a borboleta (FIAT, s.d.).

Um outro sensor deste circuito é o de temperatura do ar aspirado, instalado no tubo de admissão. Ele é formado por um corpo de latão do qual sai um conector de plástico que protege o elemento resistivo. Este elemento resistivo envia sinais à central eletrônica em função da variação da temperatura do ar.

Para determinar a quantidade deste ar aspirado, há o sensor de vazão de ar, que é constituído de uma palheta sensora em cujo eixo está acoplado um potenciômetro. Com a passagem do ar a palheta desloca-se, acionando o potenciômetro, que envia um sinal à central eletrônica informando a quantidade de ar admitido (SANTOS, 1998).

Quando o motor está em marcha lenta, ou seja, com a borboleta de aceleração completamente fechada, ele requer uma maior quantidade de ar durante as fases de aquecimento ou ao ligar os acessórios elétricos para que o motor possa manter constante sua rotação. Para conseguir isto, o sistema utiliza um motor de passo a passo, ou *atuador de marcha lenta*, fixado ao corpo de borboleta subordinado à central eletrônica<sup>6</sup> que, durante o funcionamento, desloca uma haste munida de obturador que varia a seção de passagem do conjunto “by-pass” e, conseqüentemente, a quantidade de ar aspirada pelo motor (FIAT, s.d.).

A função de informar a pressão dentro do coletor de admissão é do *sensor de pressão absoluta*. Geralmente ele fica alojado dentro do vão do motor e é ligado através de mangueiras ao coletor. Este sensor contém um elemento sensível dentro de uma peça de plástico que é composto de uma ponte de resistências serigrafadas numa placa de cerâmica muito fina de forma circular, montada na parte inferior de um suporte de forma anular (FIAT, s.d.).

### 3.1.3 Circuito Elétrico/Eletrônico

Este circuito tem a função de ligar e alimentar eletricamente todos os componentes do sistema de injeção eletrônica. Ele é constituído principalmente por uma central eletrônica de comando e pelos seguintes elementos:

- sensor de posição da borboleta aceleradora;
- relê duplo de alimentação do sistema;
- sensor de temperatura do líquido de arrefecimento do motor;
- eletrobomba de combustível;
- bicos injetores;
- sensor de pressão absoluta;
- sensor de temperatura do ar aspirado;
- atuador de marcha lenta do motor;
- sensor de rotação do motor;
- bobinas de ignição;

---

<sup>6</sup> A central eletrônica utiliza os parâmetros de velocidade angular do motor e temperatura da água para regular este tipo de ação.

- sonda lambda;
- eletroválvula de controle dos vapores de combustível;
- velas de ignição;
- interruptor inercial de segurança<sup>7</sup>;
- sensor de detonação<sup>8</sup> e;
- aquecedor do corpo de borboleta.

A *central eletrônica de comando da injeção* (Figura 3.6), é uma unidade do tipo digital com microprocessador, caracterizada pela elevada velocidade de cálculo, precisão, confiabilidade, versatilidade, baixo consumo de energia e sem necessidade de manutenção. Nela estão todos os dados sobre as condições de funcionamento do motor que lhe são transmitidas pelos diversos sensores. A função da central é elaborar os sinais provenientes dos sensores e comandar os atuadores a fim de obter o melhor funcionamento possível do motor (FIAT, s.d.).

O *sensor de rotação do motor* (Figura 3.7), é fixado no suporte do tensionador da correia dentada e fica de frente para a polia da árvore de manivelas. Ele é constituído de um estojo tubular dentro do qual há um ímã permanente e uma bobina. O fluxo magnético criado pelo ímã sofre, devido à passagem dos dentes da polia, oscilações derivadas da variação do entreferro. Estas oscilações induzem uma força eletromotriz na bobina em cujas extremidades manifesta-se uma tensão alternada positiva e negativa (FIAT, s.d.).

---

<sup>7</sup> Em caso de colisão do veículo, o interruptor inercial de segurança desativa a eletrobomba de combustível.

<sup>8</sup> A detonação, conhecida também como batida de pino, ocorre devido às oscilações de alta frequência da pressão e temperatura no interior da câmara, provocadas pela auto-ignição da mistura.

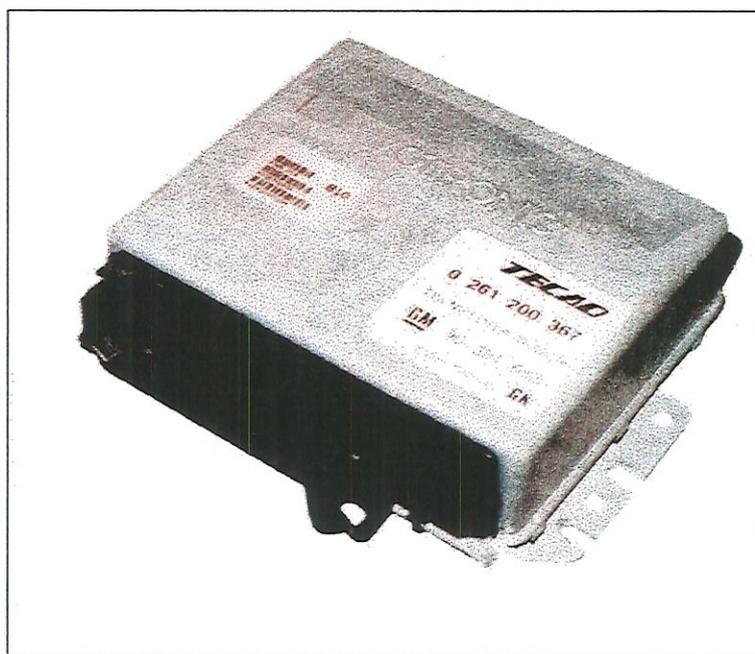


Figura 3.6: Central eletrônica do comando da injeção (PARAÍSO, 1998).

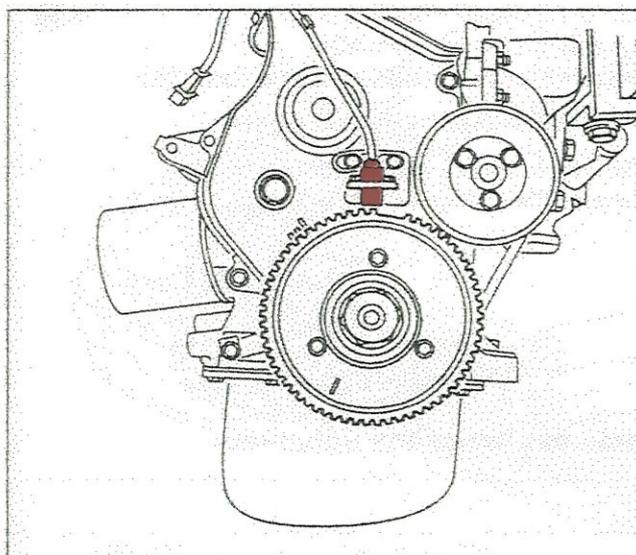


Figura 3.7: Sensor de rotação do motor, em vermelho (FIAT, s.d.).

O *sensor de temperatura da água* está instalado no corpo da válvula termostática e é formado por um corpo de latão que serve de proteção ao elemento resistivo. Tem a função de informar a temperatura da água à central eletrônica.

### 3.1.4 Dispositivos para o Controle das Emissões de Poluentes

As principais fontes de agentes poluentes no automóvel são o escapamento dos gases resultantes da combustão, a evaporação de combustível das tubulações e do tanque e a evaporação do cárter do motor.

Para acatar às severas disposições legislativas sobre a emissão de resíduos nocivos dos motores de combustão interna, além de uma dosagem sempre mais precisa da mistura A/C, o sistema dispõe dos seguintes dispositivos:

- sensor sonda lambda;
- circuito anti-evaporação do combustível e;
- recirculação dos gases de escape.

O *sensor sonda lambda* (Figura 3.8), mede o conteúdo de oxigênio nos gases de escape. O sinal de saída do sensor é enviado à central eletrônica para a regulação da mistura A/C a fim de manter a relação da mistura o mais próximo possível do valor estequiométrico. Assim, para obter uma mistura ideal, é necessário que a quantidade de combustível injetado esteja o mais próximo possível da quantidade teórica necessária para ser completamente queimado em relação à quantidade de ar aspirada pelo motor.

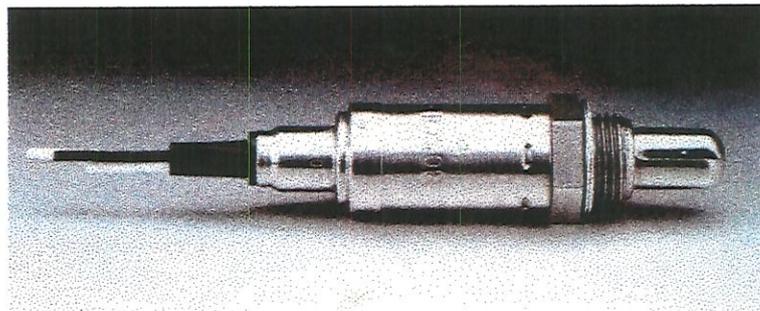


Figura 3.8: Sensor sonda lambda (PARAÍSO, 1998).

A sonda, que é fixada antes do catalisador, é composta de uma peça de cerâmica recoberta por uma leve camada de platina, fechada numa extremidade, introduzida num tubo protetor e alojada num corpo de metal que fornece ainda mais proteção e permite a montagem no coletor de escapamento. A parte externa da cerâmica encontra-se exposta à corrente do gás de escapamento, enquanto que a parte interna está em comunicação com o ar ambiente. O funcionamento da sonda baseia-

se no fato de que, com temperaturas acima de 300°C, o material de cerâmica utilizado torna-se condutor de íons de oxigênio. Nestas condições, se a quantidade de oxigênio nos dois lados da sonda é diferente, é gerada entre as duas extremidades uma variação da tensão, a qual é índice de medida para a diferença da quantidade de oxigênio nos ambientes do lado do ar e do lado do gás de escape (FIAT, s.d.).

Quando a sonda fornece um nível baixo de tensão, a central eletrônica reconhece que a mistura é pobre e aumenta a quantidade de combustível injetado. Quando a sonda fornece um nível alto de tensão, a central reconhece que a mistura é rica e diminui a quantidade de combustível injetado. Assim, a sonda lambda faz variar os tempos de injeção, de modo que o motor funcione com um coeficiente lambda ( $\lambda$ ) continuamente oscilante entre 0,98 e 1,02 aproximadamente.

O *circuito antievaporação do combustível* impede que os vapores de gasolina que se formam no tanque e no sistema de alimentação evaporem-se para a atmosfera, soltando os hidrocarbonetos leves neles contidos, poluindo-a. O sistema trabalha quando, com temperaturas externas elevadas, após uma parada prolongada do veículo, a temperatura do combustível (visto que o tanque não é mais resfriado pela ventilação produzida pela velocidade do veículo), aumenta e cria um aumento da pressão dentro do tanque. Este aumento pode ocorrer com o tanque cheio ou não (FIAT, s.d.).

O dispositivo de *recirculação dos gases de escape*, chamado EGR (Exhaust Gas Recirculation = Recirculação dos Gases de Escape), foi recentemente desenvolvido. Este sistema (Figura 3.9), faz voltar ao motor uma parte dos gases da combustão, colocando um coletor no escapamento direcionado para a aspiração. A diluição de uma parte de gases de escape na mistura admitida pelo cilindro faz com que diminua-se as emissões de  $\text{NO}_x$  e HC. A formação deste tipo de poluição se dá a partir das altas temperaturas de combustão, que podem ser diminuídas com esta carga de gás do escapamento.

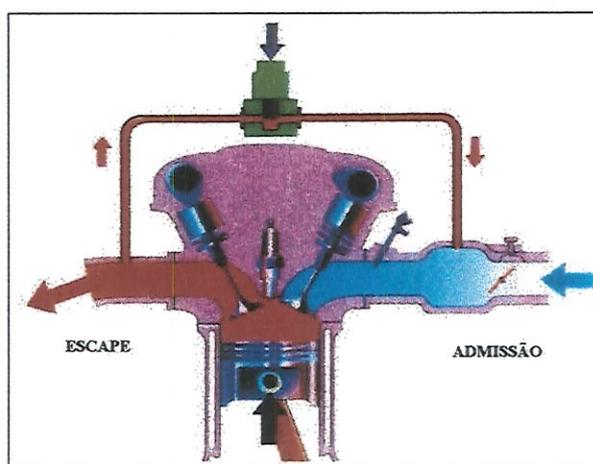


Figura 3.9: Sistema de recirculação dos gases de escape (GÁS, 1998)

Uma recirculação natural acontece no motor durante o cruzamento das válvulas. Com a utilização do EGR, coloca-se em comunicação os coletores de descarga e de admissão, controlando melhor a quantidade do gás que retorna ao motor. No centro do cabo condutor, há uma válvula que intercepta a passagem do coletor, controlada através de um chip que mantém a central eletrônica constantemente informada sobre a quantidade de gás que está retornando. O inconveniente deste sistema é que, quando colocado em alguns motores, há a tendência ao acúmulo de detritos no sensor da válvula EGR, fazendo com que ela permaneça aberta e a passagem de gás fique liberada, provocando falhas no desempenho do motor. Mas os fabricantes já estão desenvolvendo uma válvula com desenho menos sujeito a esse tipo de defeito (GÁS, 1998).

### 3.2 Controle do Sistema de Injeção Eletrônica

As estratégias de controle da injeção têm o objetivo de fornecer ao motor a quantidade correta de combustível e no momento certo, em função das condições de operação do motor (FIAT, s.d.).

Algumas destas condições de operação já foram descritas anteriormente. Outras, mais específicas, são descritas a seguir (FIAT, s.d.):

### 3.2.1 Funcionamento a Frio

Nestas condições, acontece uma evaporação reduzida de combustível, fortes condensações nas paredes internas do coletor de admissão e um aumento da viscosidade do óleo lubrificante que, com baixas temperaturas, aumenta a resistência à rotação dos órgãos mecânicos do motor.

A central eletrônica reconhece esta condição e corrige o tempo de injeção com base no sinal de temperatura do líquido de arrefecimento. Assim, com temperaturas muito baixas, o bico injetor fica aberto por mais tempo e a mistura é enriquecida e, conforme a temperatura do motor vai aumentando, a abertura do bico vai diminuindo e a mistura empobrecendo. Alguns sistemas utilizam um bico exclusivo de partida à frio (Figura 3.1, pág. 15).

### 3.2.2 Autoadaptação

A central está provida com uma função de autoadaptação da mistura que tem a tarefa de memorizar os desvios de mapeamento de base e correções impostas pela sonda lambda que podem aparecer de maneira persistente durante o funcionamento. Estes desvios<sup>9</sup> são memorizados, permitindo uma adaptação do funcionamento do sistema às progressivas alterações do motor e dos componentes em relação às características do motor quando era novo.

### 3.2.3 Funcionamento em Aceleração

Nesta fase, a central aumenta adequadamente a quantidade de combustível exigida pelo motor em função dos sinais provenientes do potenciômetro da borboleta de aceleração, do sensor de pressão absoluta e do sensor de rotação do motor.

---

<sup>9</sup> Estes desvios são devido ao envelhecimento dos componentes do sistema e do motor.

### **3.2.4 Funcionamento em Desaceleração**

Durante esta fase de utilização do motor, quando o sinal do potenciômetro da borboleta de aceleração indica uma diminuição do ângulo de abertura da borboleta aceleradora e a rotação for elevada, a central, agindo sobre o atuador de marcha lenta do motor, diminui, gradativamente, a quantidade de ar que passa pelo “by-pass”.

### **3.2.5 Funcionamento em “Cut-Off”**

A estratégia de “cut-off” (corte de combustível em desacelerações) é efetuada quando a central reconhece a borboleta na posição de marcha lenta e a rotação do motor é ainda elevada. A central ativa esta estratégia somente quando a temperatura do líquido de arrefecimento ultrapassar um valor preestabelecido.

O reconhecimento da borboleta aceleradora em posição aberta reativa a alimentação do motor.

### **3.2.6 Proteção Contra Rotações Excessivas**

É efetuada uma redução dos tempos de controle dos bicos injetores ao ser ultrapassado um determinado valor de rotações.

### **3.2.7 Controle da Detonação**

Esta função tem a tarefa de detectar a presença do fenômeno da detonação através da elaboração do sinal proveniente do respectivo sensor. A central confronta continuamente os sinais provenientes do sensor com um valor limite, o qual, por sua vez, é atualizado continuamente, para considerar os ruídos e o envelhecimento do motor.

## 4 INJEÇÃO ELETRÔNICA DIRETA DE COMBUSTÍVEL EM MOTORES DE IGNIÇÃO POR CENTELHA

Antes de se discutir à respeito de injeção direta, é necessário uma abordagem sobre carga estratificada, que, como veremos adiante, é o tipo de mistura A/C mais atuante neste sistema.

### 4.1 Carga Estratificada

Uma mistura estratificada é aquela que possui regiões de razões A/C variáveis (desde ultra-ricas à ultra pobres) formadas simultaneamente no interior da câmara de combustão (TOMODA et al., 1997).

A estratificação da carga possibilita estender o limite inferior de inflamabilidade das misturas A/C, melhorando as propriedades termodinâmicas do fluido de trabalho, de modo que a operação com excesso de ar permite obter maior economia de combustível (FRENC & REYMOND, 1980).

Segundo OBERT (1971), no motor Otto de carga estratificada, a mistura é inflamada pela vela de ignição e a frente de chama deve se deslocar a todas as misturas de combustíveis. A finalidade da carga estratificada é evitar a detonação e, portanto, permitir altas razões de compressão ou combustíveis de baixa octanagem (ou ambos). A mistura é mais resistente à detonação, pois o gás final não necessariamente é uma mistura inflamável e também porque o tempo de permanência ou aquecimento do combustível é menor, uma vez que a injeção começa mais tarde no

curso de compressão. O princípio da carga estratificada pode ser visualizado supondo um movimento circular do ar no cilindro no curso de compressão (Figura 4.1).

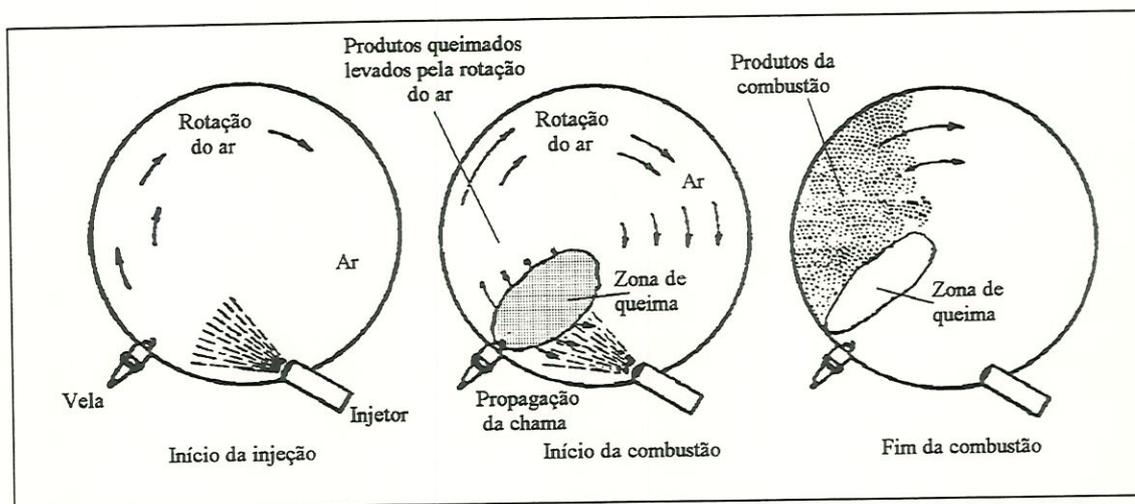


Figura 4.1: Concepção idealizada da combustão de carga estratificada (OBERT, 1971).

Segundo HEYWOOD (1988), os motores de carga estratificada começaram a ser desenvolvidos a partir da década de 20, com o intuito de se construir um motor com um rendimento global maior do que aquele encontrado nos motores do ciclo Otto carburados. A finalidade é desenvolver um motor com taxas de compressão consideradas ótimas para o desempenho de um motor do ciclo Otto (de 12 à 15:1). Para tanto, o motor deve combinar os melhores aspectos do ciclo Otto e do ciclo Diesel, apresentando as seguintes características:

- injeção de combustível diretamente na câmara de combustão, durante o tempo de compressão para evitar o problema de detonação;
- controle de potência feito variando-se a quantidade de combustível injetado, com a entrada de ar não estrangulada para minimizar o trabalho de bombeamento;
- a inflamação do combustível, a medida que ele se mistura com o ar, deve ser feita com uma vela de ignição, para obter maior controle do processo de combustão.

Segundo YAMAGUSHI (1997), para que ocorra a transição entre carga estratificada e mistura homogênea numa operação contínua, a Toyota emprega um esquema denominado de carga semi-estratificada, onde o combustível é injetado em duas porções, uma no tempo de admissão (injeção antecipada) e outra no tempo de compressão (injeção atrasada).

Na injeção atrasada o combustível, em cargas parciais, é injetado antes da ignição por um intervalo predeterminado, de modo que vaporize-se o suficiente para que ocorra sua queima. Na injeção antecipada, à plena carga, o combustível é injetado no tempo de admissão para que obtenha-se uma mistura homogênea espalhada por todo o cilindro (HARADA et al., 1997).

Para TOMODA et al. (1997), a qualidade do jato de combustível, isto é, a controlabilidade da direção, dispersão e homogeneização do combustível injetado, é um dos mais importantes fatores para realizar formação de mistura estratificada de um motor do ciclo Otto. Otimizar a câmara de combustão e o fornecimento de ar e ainda diminuir o intervalo injeção-ignição seriam outros fatores que contribuem na obtenção de carga estratificada.

## 4.2 Injeção Direta

A história da injeção direta de combustível em motores do ciclo Otto é tão antiga quanto o próprio motor. Experiências nesta área têm sido realizadas desde antes da Segunda Guerra Mundial, utilizando para isto instalações do tipo das empregadas nos motores diesel (HILDEBRAND JR., 1998).

Antes da invenção de carburadores sofisticados, alguns dos motores aeronáuticos adaptaram sistemas de injeção direta usando a tecnologia de motores de ignição por compressão. Esta tecnologia desapareceu com o progresso dos carburadores. Durante este período de pesquisas, os motores com injeção direta adaptaram a estratégia de injeção antecipada, isto é, o combustível era injetado durante o curso de admissão para preparar a mistura homogênea. Devido a isto, não era possível obter-se uma boa economia de combustível (IWAMOTO et al., 1997).

Segundo GLÖECKLER et al. (1981), em 1930, o Instituto Alemão de Pesquisas de Aviação iniciou um concentrado programa de desenvolvimento em injeção direta de combustível na câmara de combustão, utilizando um injetor de motor diesel. A meta era realizar um completo enchimento do cilindro, resultando em máxima potência do motor. Este experimento teve como resultado um aumento na potência da ordem de 4%.

Em 1931, TAYLOR et al. realizaram testes com injeção direta em um motor do ciclo Otto afim de comparar os resultados com os obtidos utilizando o sistema de carburador. Tiveram como resultado um aumento de 7 a 11% na potência máxima e uma melhora significativa no consumo específico de combustível.

Em 1935, ROTHROCK e WALDRON, da National Advisory Committee for Aeronautics (NACA), fizeram testes com injeção direta a fim de analisar os efeitos do avanço do ângulo de injeção do combustível, temperatura do motor e velocidade de combustão.

Durante a Segunda Guerra Mundial, os alemães utilizaram extensivamente a injeção direta nos motores de seus aviões (HILDEBRAND JR., 1998).

Em 1957, DOLZA et al., num motor monocilíndrico, realizaram ensaios com injeção direta com o intuito de comparar este sistema com o de carburador convencional nas diferentes condições de velocidade, carga e temperatura do motor.

DAVIS et al. (1961), da Texaco Research Center - Beacon, utilizaram um sistema de injeção direta dentro do cilindro com o objetivo de desenvolver um motor com alta eficiência térmica associada com combustão de misturas pobres (economia). Este processo, chamado TCP (Texaco Combustion Process), tinha como principal característica a rotação da mistura ar-combustível na câmara de combustão. Essa rotação (Figura 4.1), ocorria devido ao ângulo existente entre o bico injetor e a parede do cilindro. Os objetivos destas pesquisas foram alcançados, porém a produção de motores que utilizassem este processo não foi adiante devido ao alto custo de fabricação.

Em 1963, HUSSMANN et al. testaram um sistema de injeção direta para analisar o comportamento do motor durante a operação com carga estratificada e o efeito da variação do intervalo de tempo entre injeção de combustível e ignição da mistura.

De 1965 até o final dos anos 80, outros motores com este sistema foram desenvolvidos, como o MAN-FM em 1968, o Ford-PROCO em 1971, o Daimler-Benz OCC em 1976 e o IRVW-Futura, da Volkswagen, em 1989 (QUEIROZ & TOMANIK, 1997). Segundo IWAMOTO et al. (1997), neste período extensivos estudos continuaram sendo realizados com o sistema de injeção direta a fim de se

alcançar uma alta economia de combustível. Concluiu-se que o motor com este sistema deveria ser operado em uma condição extremamente pobre, estratificando a carga e preparando uma mistura levemente rica ao redor da vela de ignição. Em função disso, vários conceitos de combustão em carga estratificada foram propostos neste período. Estes conceitos adotaram uma configuração na qual a vela está localizada bem próxima ao jato de combustível. Embora tenha sido confirmado que pode ser realizada uma combustão estável com esta configuração, os seguintes problemas impediram que estes conceitos fossem desenvolvidos para produção em massa:

*Emissão de hidrocarbonetos:* grande quantidade de hidrocarbonetos foi emitida devido à dificuldade de se completar a combustão.

*Incrustação na vela de ignição:* com o jato de combustível próximo à vela, formava-se fuligem em seus eletrodos.

*Baixo desempenho:* a variação do tempo de injeção realizada pelo equipamento mecânico de injeção de combustível empregado neste período era limitado, e a mudança da injeção atrasada para a antecipada não era possível. Consequentemente, esses motores deveriam ser operados com a mistura estratificada uniforme em altas cargas. Afim de se prevenir a emissão de fuligem, a taxa de excesso de ar deveria ser mantida alta, resultando em baixo desempenho.

*Diluição do óleo lubrificante:* era difícil impedir que as gotas de gasolina chocassem-se com as paredes do cilindro ou com a superfície do pistão. Neste contato a gasolina diluía o óleo lubrificante.

*Acúmulo de sedimentos na câmara de combustão:* com este sistema de injeção, formava-se uma camada de combustível líquido sobre o pistão causando o acúmulo de sedimentos na câmara de combustão.

Após 1990, a economia de combustível continuou sendo o principal objetivo da indústria automobilística, pois este é o fator chave para a economia de energia e redução de CO<sub>2</sub>, um dos gases mais nocivos à camada de ozônio. Para alcançar este objetivo, pesquisas na área energética começaram estabelecer as tecnologias de injeção direta que realmente podem ser aplicadas nos motores atualmente produzidos.

Outros fatores que têm contribuído para o avanço dos estudos nesta área são os progressos obtidos nas tecnologias de tratamento de gases provenientes da combustão e o aperfeiçoamento dos sistemas de controle do motor e de sistemas de injeção eletrônica de combustível. Para reforçar a necessidade de se continuar aperfeiçoando este sistema, há ainda leis que regulamentam as emissões dos gases de escape dos motores.

#### 4.2.1 Configuração do Sistema de Injeção Direta

A injeção eletrônica direta de combustível (IEDC) na câmara de combustão dos cilindros de um motor do ciclo Otto (Figura 4.2), é um conceito que oferece muitas vantagens sobre os mais sofisticados motores com sistema de injeção indireta (IEIC). O potencial termodinâmico para reduzir o consumo específico de combustível, juntamente com as vantagens da partida rápida, melhoraram a resposta em regime transiente do motor e possibilitaram uma maior precisão no controle da mistura ar-combustível (ZHAO et al., 1997). Uma comparação ilustrativa entre os sistemas IEDC e IEIC é apresentada na “Figura 4.3”.

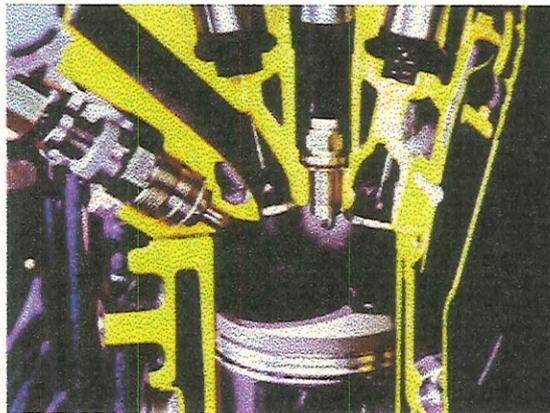


Figura 4.2: Vista em corte do motor D4, da Toyota, que utiliza o sistema IEDC (YAMAGUCHI, 1997).

#### 4.2.2 Vantagens do Sistema de Injeção Direta

Para HARADA et al. (1997), o motor ICE à gasolina com sistema de injeção direta é o mais eficiente tanto na economia de combustível quanto no alto desempenho. Este sistema apresenta as seguintes vantagens:

- alta resposta de aceleração e ótima dirigibilidade em condições de baixa temperatura devido a injeção ser direta na câmara de combustão do cilindro;
- alta eficiência volumétrica e características anti-detonantes devido a baixa temperatura da carga de ar.

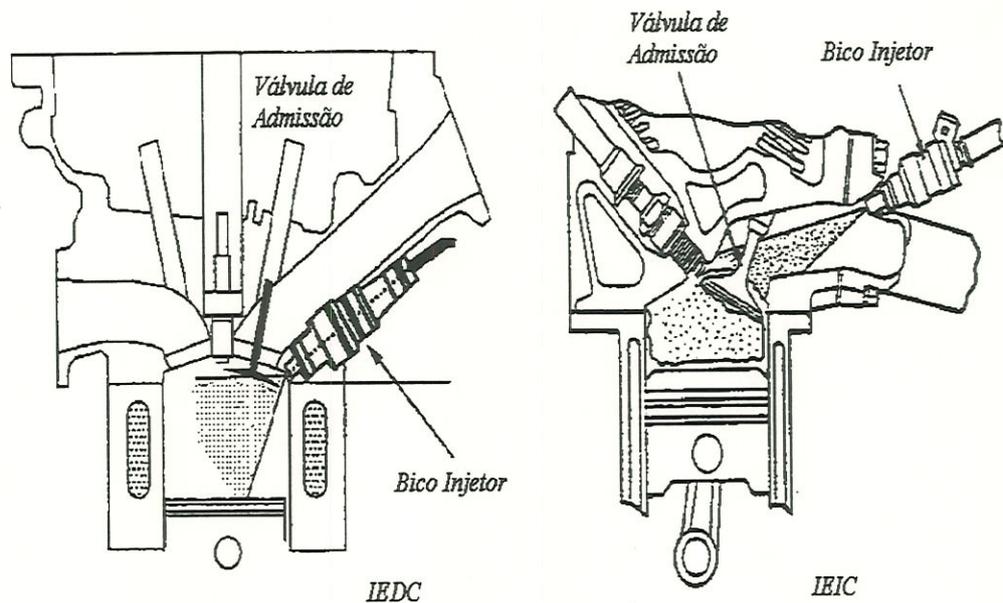


Figura 4.3: Comparação entre os sistemas IEDC e IEIC (ZHAO et al., 1997).

KOWALEWICZ (1984), cita outras vantagens:

- menor índice de emissões;
- maior economia, principalmente em cargas parciais;
- possibilidade de queimar combustíveis de baixa octanagem.

Entretanto, é importante salientar que para se obter as vantagens acima citadas, é necessário que o combustível seja injetado com pressões da ordem de 10 a 50 MPa (LENZ, 1992).

Termodinamicamente falando, o sistema ID apresenta algumas vantagens. Como na injeção indireta o combustível é injetado no pé da válvula de admissão (no caso do sistema de múltiplos pontos de injeção), a pressão de vapor reinante pela sua vaporização parcial assume um valor percentual da pressão do ar, e a pressão parcial do ar admitido diminui. Já no sistema ID, somente ar é admitido, então a pressão deste ar no interior do cilindro é maior. O que deve resultar em um maior trabalho líquido do motor.

Analisando o ciclo padrão de ar Otto<sup>10</sup> (Figura 4.4a), é como se o gráfico fosse deslocado para cima (Figura 4.4b), pois os processos 1-2 (compressão da mistura) e 3-4 (exaustão da mistura) estarão ocorrendo com pressões maiores.

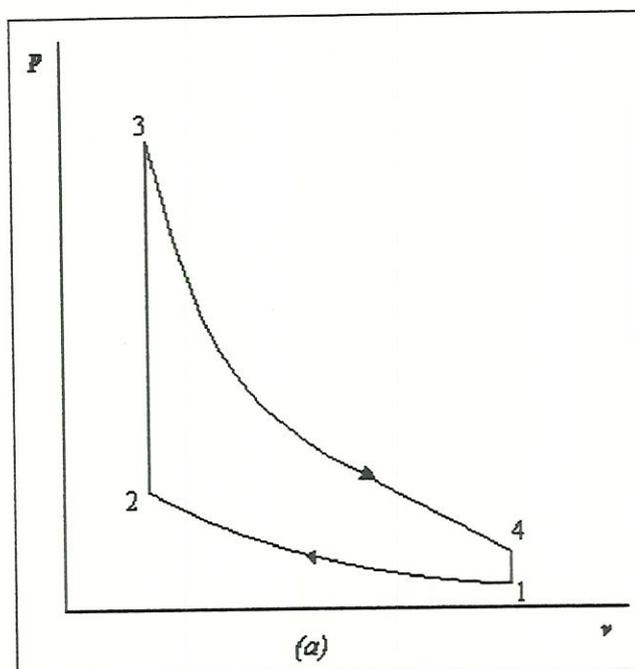


Figura 4.4a: Ciclo padrão de ar Otto (WYLEN, 1993).

Ainda, no sistema ID, como as pressões do ar admitido e da mistura no interior do cilindro são maiores, e a quantidade de ar admitido é maior, a combustão é mais completa, o que resulta em uma maior pressão de expansão no cilindro, levando o ponto 3 do gráfico do ciclo Otto para cima, ou seja, aumentando-se ainda mais o trabalho líquido do motor.

<sup>10</sup> No ciclo padrão de ar Otto, o trabalho líquido do motor é representado pela área da figura formada pelos pontos 1, 2, 3 e 4.

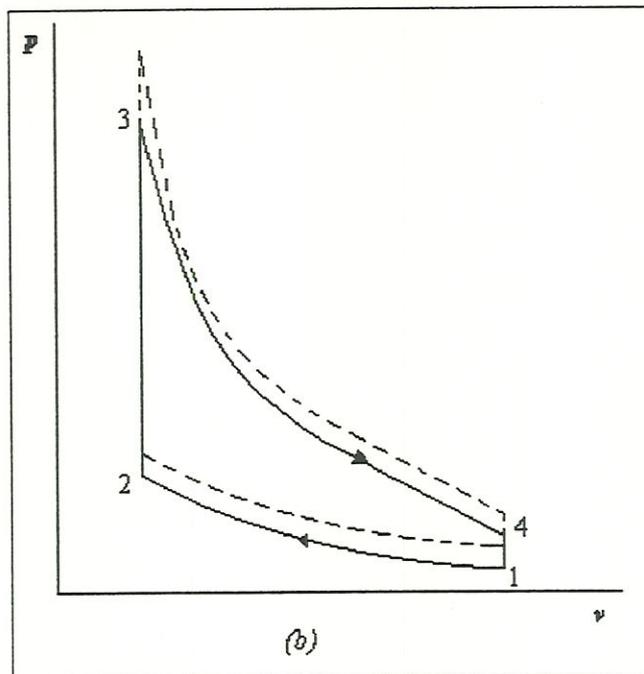


Figura 4.4b: Ciclo padrão de ar Otto (a curva tracejada representa o cilindro admitindo somente ar).

Segundo GETTING (1997), as principais indústrias automobilísticas, como a Mitsubishi, Toyota, Audi, Chrysler e Mercedes-Benz, já trabalham com seus respectivos motores com IEDC.

A Mitsubishi lançou seu motor com injeção direta (GDI - Gasoline Direct Injection, Figura 4.5) no mercado japonês em agosto de 1996. A injeção direta de gasolina permite ao motor<sup>11</sup> operar com misturas muito pobres, da ordem de 35:1, para condições de cruzeiro, o que ajuda a melhorar a economia de combustível em mais de 30% em carga parcial.

Um aumento na eficiência volumétrica permite que a taxa de compressão aumente de 10,5:1, da versão convencional do motor, para 12:1 no GDI. Este aumento na taxa de compressão ajuda o motor obter um aumento de 10% no torque e na potência.

<sup>11</sup> Este motor tem 4 cilindros em linha, 1800 cilindradas e 16 válvulas.

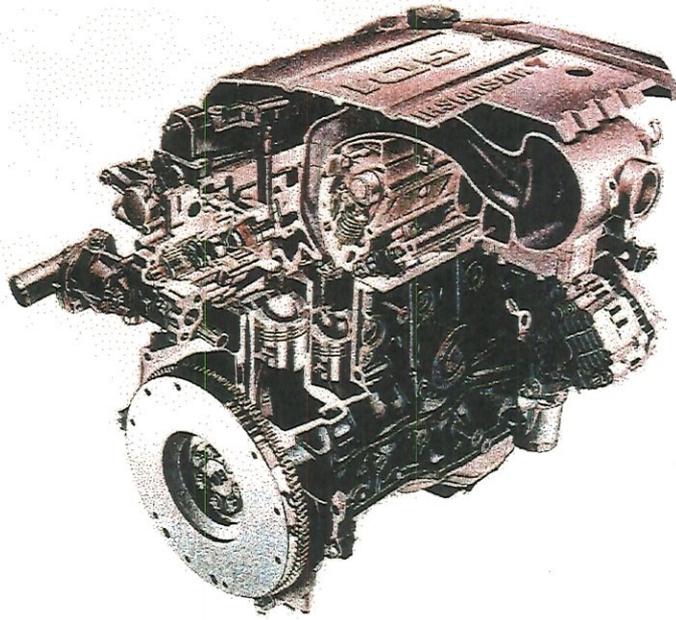


Figura 4.5: Motor GDI, da Mitsubishi (GETTING, 1997).

A válvula “by-pass” de admissão de ar, que tem a função de atuar entre os modos de injeção antecipada e atrasada, é um elemento chave do GDI. Para passar da injeção antecipada para a atrasada, a razão A/C é gradualmente aumentada pelo “by-pass” para aproximadamente 18:1, enquanto a quantidade de combustível é mantida constante. Então a razão A/C é elevada até 35:1 na injeção atrasada pelo aumento da quantidade de ar e diminuição da quantidade de combustível.

O motor da Toyota (denominado D4), com 4 cilindros em linha, 16 válvulas e 2000 cilindradas, é um pouco mais evoluído que o da Mitsubishi. O D4 (Figura 4.6) possui dois dutos de admissão separados para cada cilindro, sendo que em um deles existe uma válvula do tipo borboleta que é controlada eletronicamente e no outro encontra-se um dispositivo gerador de vórtices do tipo helicoidal. Deste modo, quando o motor está operando em regime de carga estratificada, a válvula borboleta é fechada e o ar é introduzido no motor pelo duto que possui o gerador de vórtices. Isto faz com que o ar entre no cilindro com auto grau de redemoinhos (QUEIROZ & TOMANIK, 1997).

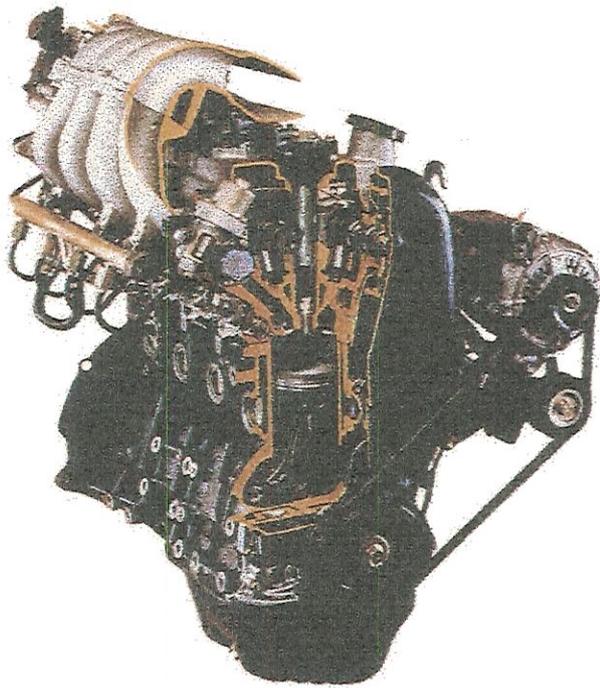


Figura 4.6: Motor D4, da Toyota (GETTING, 1997).

A estratificação da carga é feita pela alta pressão de injeção, entre 80 e 120 bar, pela concavidade posicionada assimetricamente na cabeça do pistão e pela configuração geométrica do duto de admissão (YAMAGUSHI, 1997).

O D4 emprega três modos diferentes de injeção, possibilitando ao motor operar com diferentes razões A/C. Para cargas parciais e trafego com até 100 km/h, é usado o sistema de recirculação de gases de exaustão (EGR), o motor trabalha com carga estratificada com a injeção de combustível ocorrendo no tempo de compressão. A razão A/C neste caso encontra-se entre 25 e 50:1. Para plena carga ou acelerações rápidas, quando se deseja obter altas potências, o motor trabalha com mistura estequiométrica, com razão A/C em torno de 12 a 15:1 e, nesta situação, a injeção de combustível ocorre no tempo de admissão. Entretanto, entre as regiões de carga estratificada, mistura homogênea e estequiométrica, existe uma zona de combustão que compreende misturas homogêneas pobres, com razão A/C entre 15 e 23:1 (HILDEBRAND JR., 1997).

A Audi também lançou seu motor com injeção direta recentemente (Figura 4.7). Trata-se do AL2, um motor de 1200 cilindradas, com 3 cilindros, cada um possuindo 5 válvulas. O AL2 produz 75 cv a 5500 rpm, 11,7 kgfm de torque e tem

uma economia de combustível entre 15 e 20% em relação ao motor similar convencional da montadora, chegando a fazer mais de 33 km/l.

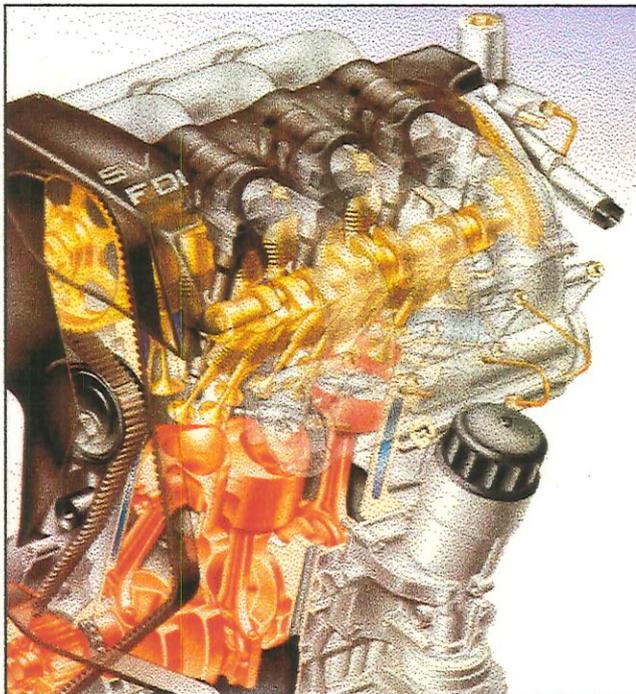


Figura 4.7: Motor AL2, da Audi (GETTING, 1997).

O sistema utilizado neste trabalho é baseado no proposto por HILDEBRAND JR. (1998), com algumas modificações. Este sistema utiliza a injeção direta a baixas pressões.

#### 4.2.3 Sistema de Injeção Direta a Baixas Pressões

O sistema usado por HILDEBRAND JR. (Figura 4.8), caracterizou-se por posicionar o bico injetor de combustível na lateral do cilindro, entre o PMS e o PMI, e não no topo, na câmara de combustão, como na grande maioria dos sistemas idealizados até agora. Isto permite que se injete o combustível à uma pressão bem menor<sup>12</sup> que a utilizada nos outros motores com injeção direta, o que diminui

<sup>12</sup> Neste sistema o combustível era injetado à 6 bar, enquanto que a média para os outros motores é de 100 bar.

consideravelmente o custo de produção destes, pois a pressão de injeção dita a complexidade de todos os componentes do sistema de fornecimento de combustível.

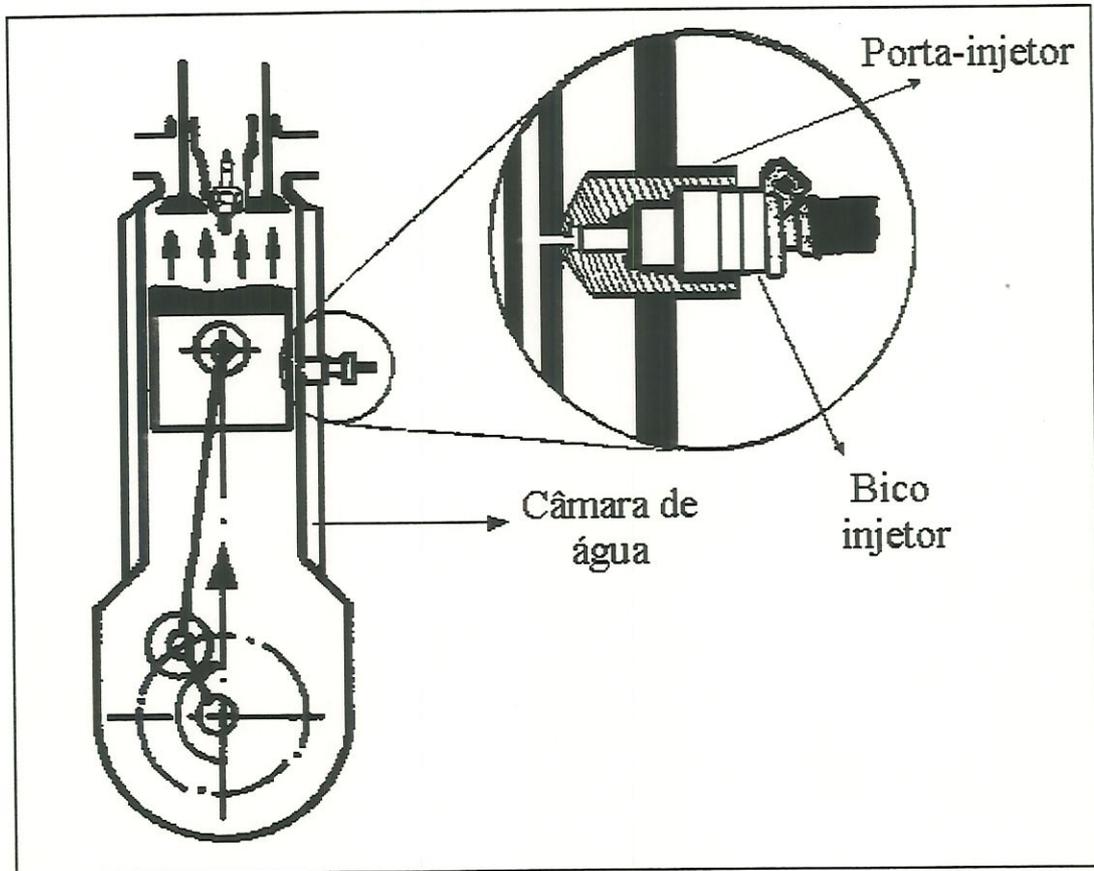


Figura 4.8: Esquema do sistema de injeção direta de HILDEBRAND JR. (1998).

Um aspecto importante deste sistema é que ele utiliza um dispositivo, que HILDEBRAND JR. chamou de gerador de pulsos analógico (Figura 4.9), para acionar os bicos injetores, já que o sistema não é controlado eletronicamente. A duração dos pulsos<sup>13</sup> deste equipamento é que controla o tempo de injeção.

<sup>13</sup> Determinada em função da posição do pistão e da pressão reinante no interior do cilindro.

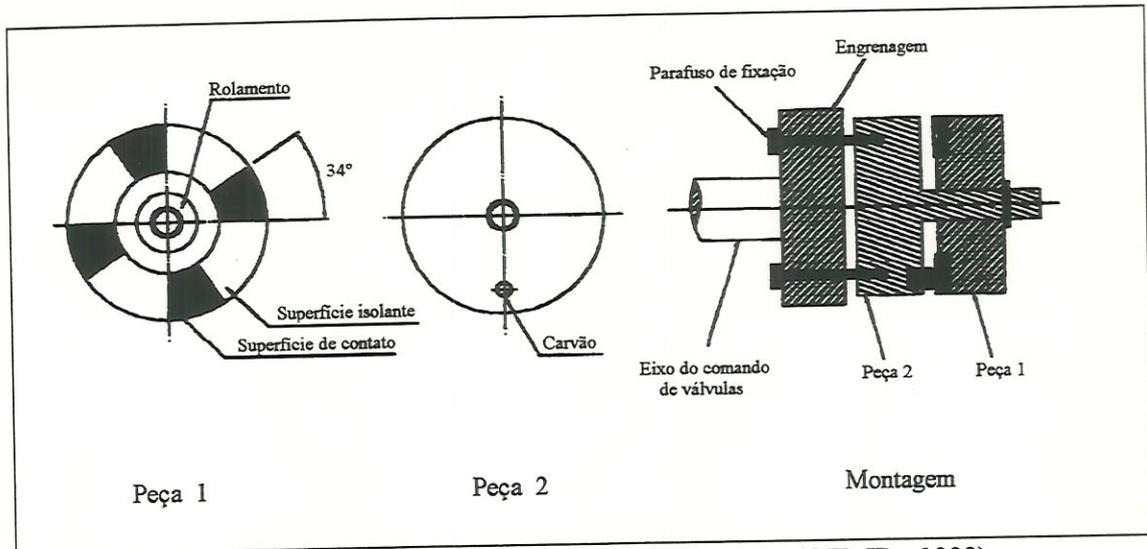


Figura 4.9: Gerador de pulsos analógico (HILDEBRAND JR., 1998).

Uma placa do gerador, que contém um carvão, é fixada no eixo do comando de válvulas, e outra, que possui superfícies de contato, fica parada com cada contato conectado ao pólo negativo do respectivo bico injetor. O pólo positivo do bico é ligado diretamente no pólo positivo da bateria. Ao girar, o carvão passando pelo contato promove o aterramento do bico, fechando o circuito e acionando o bico enquanto durar o contato (HILDEBRAND JR., 1998).

Um inconveniente deste gerador é que o acionamento do bico (ou seja, o tempo de injeção) torna-se cada vez menor com o aumento da rotação. Com isso, a utilização deste gerador de pulsos limitou a faixa de rotações para ensaios do motor entre 1000 e 2000 rpm, devido ao pequeno tempo de abertura dos bicos à altas rotações.

Outra característica deste sistema é que a extremidade do bico injetor não fica próxima o bastante da parede interna do cilindro, pois a construção do porta-injetor impossibilitou que isto ocorresse. Este fato, aliado à baixa pressão de injeção, não permitiu uma boa pulverização do jato de combustível, dificultando a homogeneização da mistura.

Mesmo utilizando o gerador de pulsos analógico e possuindo uma mistura não homogênea, HILDEBRAND JR. conseguiu uma sensível melhora no torque e na potência nos regimes de 1400, 1600 e 1800 rpm, e uma boa redução no consumo

específico de combustível nos regimes de 1600 e 1800 rpm, comparando seu sistema com o de carburador (Figuras 4.10, 4.11 e 4.12).

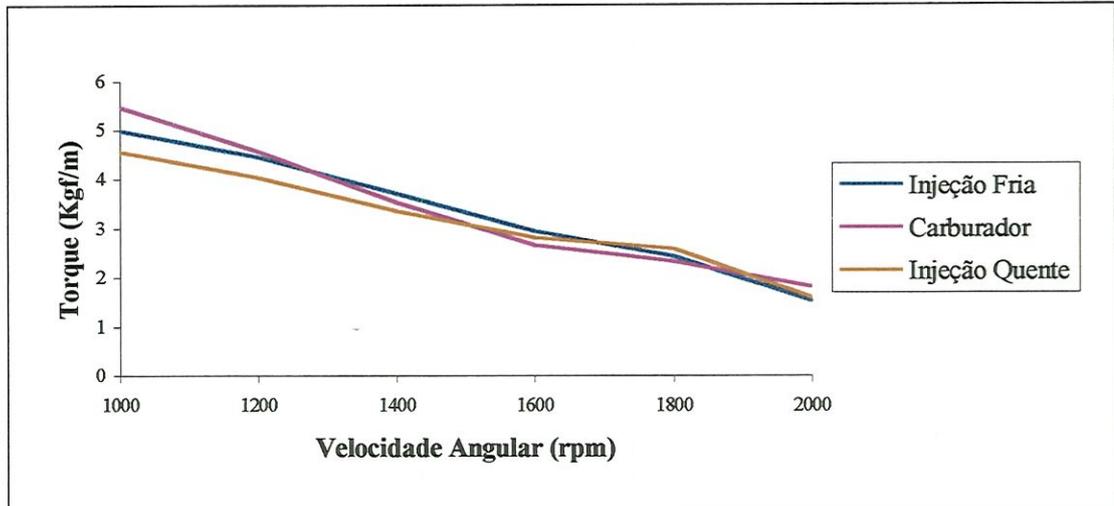


Figura 4.10: Torque em função da rotação (HILDEBRAND JR., 1998).

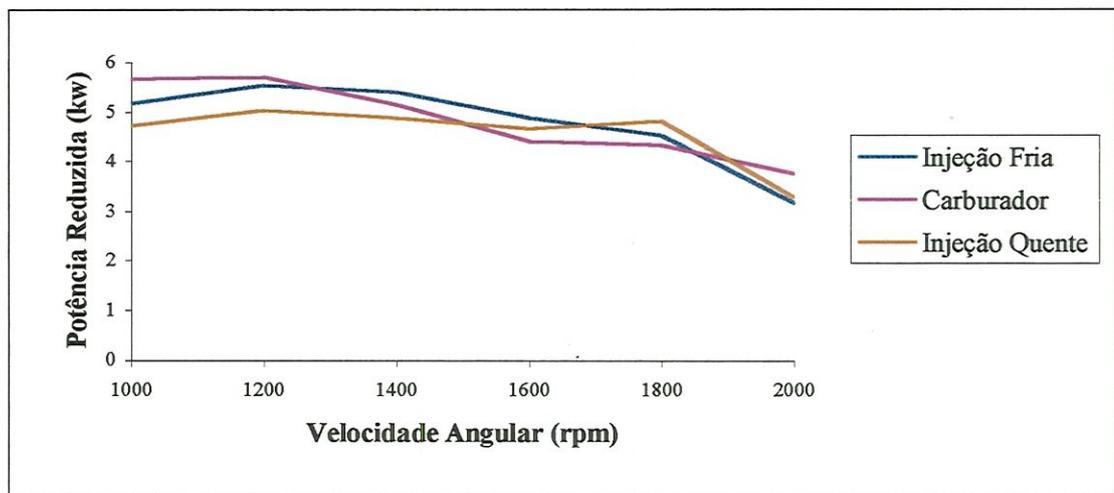


Figura 4.11: Potência reduzida em função da rotação (HILDEBRAND JR., 1998).

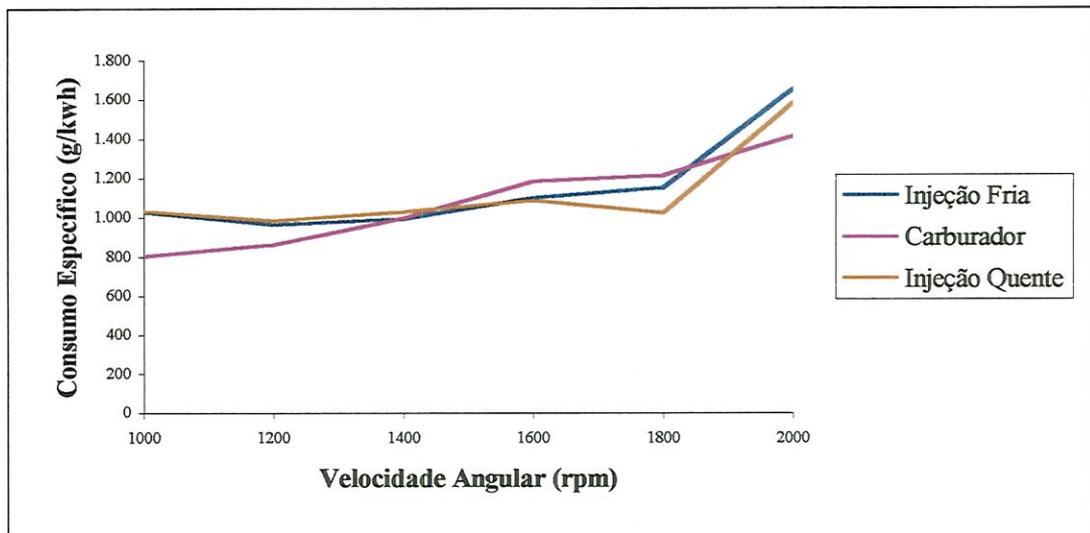


Figura 4.12: Consumo específico em função da rotação (HILDEBRAND JR., 1998).

#### 4.2.4 Configuração do Sistema Proposto neste Trabalho

O sistema de injeção direta proposto neste trabalho (Figura 5.2, pág. 50), é baseado no de HILDEBRAND JR., com algumas modificações. As principais são:

- o sistema será controlado eletronicamente;
- o motor utilizado será um do ciclo Otto, enquanto HILDEBRAND JR. utilizou um motor originalmente diesel;
- serão comparados os dados entre injeção direta e indireta, enquanto HILDEBRAND JR. comparou injeção direta com carburador;
- o porta-injetor será projetado de modo a preservar as características do jato de combustível injetado.

O combustível utilizado no sistema proposto será o álcool etílico, ao invés da gasolina, utilizada em todos os motores com injeção direta desenvolvidos até recentemente pelas indústrias automobilísticas.

#### 4.2.5 O Álcool

Em novembro de 1975, movido pela necessidade de produzir combustíveis alternativos e baseado na boa capacidade instalada para a produção do açúcar e do álcool, o governo brasileiro criou o Programa Nacional do Álcool (PROÁLCOOL). Procurava-se a substituição do uso da gasolina como combustível propulsor de motores do ciclo Otto, já que havia o risco de findarem-se as reservas de petróleo.

O Brasil, visando promover a adaptação para a nova conjuntura energética originada com a criação do PROÁLCOOL, através de órgãos como o Instituto de Pesquisas Tecnológicas e o Laboratório de Termodinâmica da Escola de Engenharia de São Carlos, desenvolveu inúmeras pesquisas com o intuito de promover a alteração dos motores, o que permitiu alcançar resultados muito importantes no que diz respeito ao novo combustível: automóveis até então movidos a gasolina passaram a funcionar bem com o álcool (ÁVILA, 1994).

Os motores movidos a álcool etílico hidratado atingiram um tal nível de desenvolvimento, que passaram a ser mais duráveis que os consagrados motores a gasolina em razão da melhor qualidade do álcool como combustível (mais puro e mais limpo), que proporciona pouquíssimos resíduos de combustão e pequenas contaminações do óleo lubrificante, além do baixo nível de emissões de poluentes (ÁVILA, 1994).

#### 4.3 Objetivos

Este trabalho tem como objetivos:

- levantar o estado da arte relativo aos sistemas de injeção de combustível em motores de combustão interna;
- adaptar injetores de baixa pressão, originalmente desenvolvidos para operar em sistema de injeção indireta, para operação com injeção direta;
- analisar o desempenho do sistema de injeção direta desenvolvido.

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

### 5.1 Materiais

Foram usados durante os ensaios, além dos equipamentos básicos já existentes no laboratório, os seguintes componentes:

- dinamômetro de correntes de Foucault, da marca SCHENCK, modelo LWF0152, tipo W70;
- motor VOLKSWAGEN de 999 cilindradas, modelo AT 1000, a álcool;
- conjunto de injeção direta para fornecimento de combustível, modelo Bosch Motronic MP 9.0, para motores 1.0 a álcool;
- sistema gravimétrico para medição do consumo de combustível;
- captador magnético retirado de um controlador de disco rígido de computador;
- osciloscópio Tektronix modelo 5113.

#### 5.1.1 Dinamômetro de Correntes de Foucault

Este é um dos mais antigos tipos de dinamômetro. O mais simples deles consiste em um disco que, acionado pelo motor em prova, gira em um campo magnético. A intensidade do campo é controlada pela variação de corrente que passa através de um conjunto de bobinas em ambos os lados do disco, cujo comportamento é idêntico ao de um condutor que corta as linhas de força de um campo magnético. Na ausência de

circuito externo, as correntes induzidas no disco passam a aquecê-lo. Para potências elevadas o aquecimento do disco torna-se excessivo e difícil de controlar (OBERT, 1971). O dinamômetro utilizado no laboratório é um da marca SCHENCK, modelo LWF0152, tipo W70.

### 5.1.2 Motor

O motor utilizado para os ensaios em laboratório é um VOLKSWAGEN AT1000, do ciclo Otto (Figura 5.1). As características deste motor são apresentadas na “Tabela 5.1”, na página 49:



Figura 5.1: Motor Volkswagen utilizado para os ensaios.

### 5.1.3 Sistema de Injeção Eletrônica

O sistema de injeção eletrônica utilizado aqui é o MOTRONIC MP9.0, da Bosch. Segundo o fabricante, neste sistema, a injeção de combustível e a ignição são controlados através da central eletrônica segundo critérios comuns de otimização. Através do processamento digital de dados e do emprego de microprocessadores, é possível converter um grande número de dados operacionais em dados de injeção e ignição controlados por mapeamento.

Em resumo, o emprego deste sistema garante ao motor uma exata mistura A/C em todos os regimes de funcionamento do motor, proporcionando uma perfeita combustão e gases de escape mais limpos, além de outras vantagens.

#### 5.1.4 Conjunto de Injeção Direta

O sistema de fornecimento de combustível do tipo injeção direta utilizado nos experimentos no motor caracteriza-se por utilizar os mesmos componentes utilizados no sistema de injeção indireta (bomba elétrica, tubo distribuidor e conjunto de bicos injetores). Isto para que não fosse necessário alterar a pressão de injeção e, deste modo, trocar todos os componentes do sistema de fornecimento de combustível, aumentando significativamente os custos do novo sistema. O sistema utilizado aqui é mostrado nos itens 4.2.3 e 4.2.4.

Para injetar o combustível dentro da câmara de combustão foi necessário fazer algumas alterações no motor.

A primeira foi preparar os bicos para injetarem diretamente o combustível. Para isto foi necessário construir, no laboratório, porta-injetores. Estes porta-injetores têm a função de alojar os bicos e garantir uma perfeita vedação tanto da pressão do interior do cilindro para fora, quanto da água de arrefecimento para fora do motor e para dentro do cilindro. A “Figura 5.2” mostra um esquema do sistema de injeção direta proposto neste trabalho.

Tabela 5.1: Dados técnicos do motor:

número de cilindros	4 em linha
cilindrada total	999
diâmetro x curso	67,1 x 70,6 mm
taxa de compressão	13,5 ± 0,3 : 1
aspiração	Natural
material do bloco	Ferro fundido
material do cabeçote	Alumínio
número de válvulas por cilindro	2
refrigeração	Água
injeção eletrônica	Bosch
combustível	Álcool

### 5.1.5 Sistema Gravimétrico para Medição do Consumo de Combustível

O sistema de medição gravimétrico utilizado foi construído por HILDEBRAND JR. (1998). Este foi inserido na linha de fornecimento de combustível entre o reservatório e a bomba de alimentação. Quando abre-se a saída do reservatório, o combustível flui para o recipiente de vidro localizado sobre o prato de uma balança, fazendo o ponteiro da balança caminhar para o lado à montante do sensor fotoelétrico. Uma vez fechada a saída do reservatório, o motor passa a consumir o combustível contido no recipiente e, desta forma, o ponteiro da balança se aproximará de um sensor fotoelétrico. No instante que o ponteiro corta o feixe luminoso no sensor, o circuito eletrônico dispara um cronômetro digital e neste momento é colocado sobre o prato da balança um peso padrão. A colocação deste peso faz com que o ponteiro caminhe novamente para o lado à montante do sensor e, uma vez que o consumo de combustível do recipiente continua, o ponteiro vai se aproximar do sensor novamente. Quando o feixe luminoso é cortado pela segunda

vez, o cronômetro é parado automaticamente pelo circuito eletrônico e o tempo registrado é correspondente ao consumo de uma massa de combustível igual aquela do peso padrão colocado na balança.

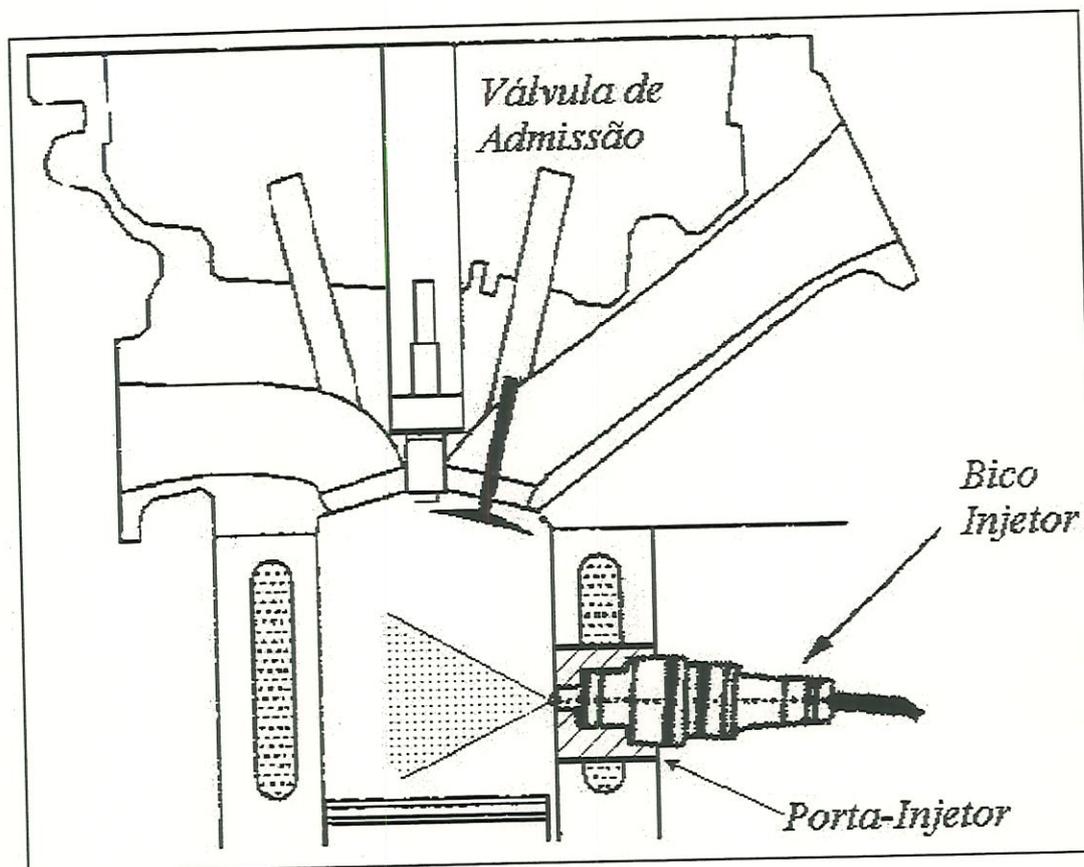


Figura 5.2: Sistema de injeção direta proposto neste trabalho.



## 5.2 Métodos

A seguir são mostrados os métodos que foram utilizados durante os ensaios com o motor.

### 5.2.1 Determinação da Localização do Conjunto de Injeção Direta no Cilindro

O sistema Bosch opera com pressão de injeção estipulada em 3 bar (0,3 MPa). Este sistema não conta com a utilização de válvulas de retenção nem sistema de arrefecimento adicional. Por isso, o sistema foi colocado numa situação onde a pressão no interior do cilindro é menor que 3 bar no momento inicial da injeção.

Como a pressão e temperatura são maiores no tempo de combustão, deve-se determinar uma localização para o conjunto de injeção onde a pressão no interior do cilindro não ultrapasse um valor crítico que prejudique o funcionamento dos bicos injetores neste tempo do ciclo. Este valor foi estipulado em 8 bar, pois produz uma força suportável sobre a armadura do bico, de modo que ele não abra pela pressão dos gases.

Para se calcular a localização exata do bico injetor no cilindro foi necessário, inicialmente, saber qual era a pressão de combustão<sup>14</sup>. Segundo PENIDO FILHO (1983), para calcular esta pressão é necessário utilizar a seguinte fórmula:

$$P_{comb} = 7 \times TC - 3 \quad [\text{kgf/cm}^2] \quad (5.1)$$

onde:

$P_{comb}$  é a pressão de combustão e;

$TC$  é a taxa de compressão do motor.

---

<sup>14</sup> Esta é a pressão na câmara de combustão quando o pistão está no PMS no final compressão e início da explosão.

Como a taxa de compressão do motor utilizado é de 13,5:1, chegou-se à pressão de 91,5 kgf/cm<sup>2</sup> ou 89,7 bar.

Agora, calcula-se o volume dentro do cilindro quando o pistão está posicionado na altura do bico injetor. Para isto, utilizou-se a próxima equação, admitindo-se expansão adiabática.

$$P_1 \times V_1^k = P_2 \times V_2^k \quad (5.2)$$

onde:

$P_1$  é a pressão de combustão, em kgf/cm<sup>2</sup>;

$V_1$  é o volume da câmara de combustão;

$P_2$  é a pressão crítica determinada com a finalidade de não prejudicar o funcionamento dos injetores (8 bar ou 8,16 kgf/cm<sup>2</sup>);

$V_2$  é o volume dentro do cilindro quando o pistão está posicionado na altura do bico e;

$k = 1,4$  ( $k = cp/cv$ , admitindo que seja admitido somente ar).

Conhecidos  $P_1$ ,  $P_2$  e  $k$ , calculou-se  $V_1$ :

$$V_1 = \frac{CCU}{TC - 1} \quad (5.3)$$

onde:

$CCU$  é a cilindrada unitária do motor, no caso 999/4.

Com o valor de  $CCU$ , chegou-se ao valor de 19,97 ml para  $V_1$ .

Substituindo os valores conhecidos na equação (5.2), tem-se  $V_2 = 112,22$  ml.

Conhecendo-se  $V_2$ , calculou-se o volume deslocado pelo pistão ( $V_{desl}$ ) do PMS até a altura dos bicos:

$$V_{desl} = V_2 - V_1 = 92,25 \text{ ml} \quad (5.4)$$

E então calculou-se o deslocamento do pistão dividindo-se  $V_{desl}$  pela área da cabeça do pistão. O deslocamento encontrado foi de 26,10 mm. Portanto a nova posição para o injetor foi 26,10 mm abaixo do PMS. Isto nos daria uma janela de  $227^\circ$  do girabrequim disponível para a injeção de combustível, ou seja, o injetor teria desde  $113,5^\circ$  antes do PMI do tempo de admissão até  $113,5^\circ$  depois do PMI do tempo de compressão para injetar o combustível.

A “Figura 5.3” mostra o bloco do motor já furado<sup>15</sup> na altura calculada.

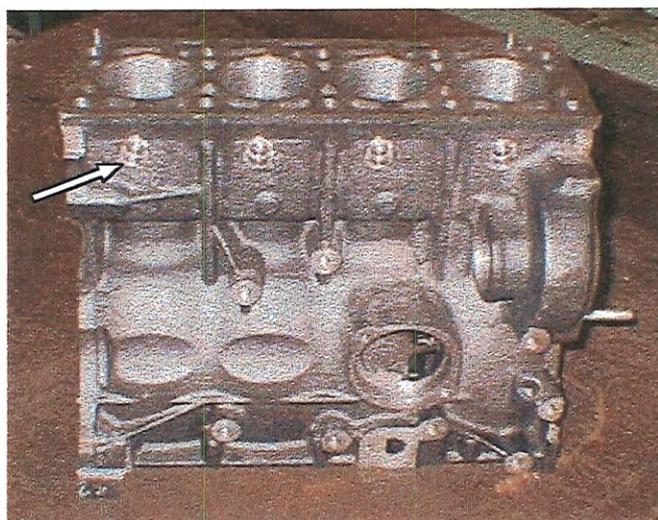


Figura 5.3: Vista do bloco do motor furado (a seta indica um dos quatro furos).

Como citado no item 5.1.3, foram construídos porta-injetores com a finalidade de alojar os bicos de modo a garantir uma perfeita vedação tanto da pressão do interior do cilindro para fora, quanto da água de arrefecimento para fora do motor e para dentro do cilindro. A “Figura 5.4” mostra uma foto de um destes porta-injetores.

<sup>15</sup> O bloco foi furado na Oficina Mecânica da EESC, com o auxílio de técnicos do Laboratório de Engenharia Térmica e Fluidos (NET&F) e do Núcleo de Manufatura Avançada (NUMA).

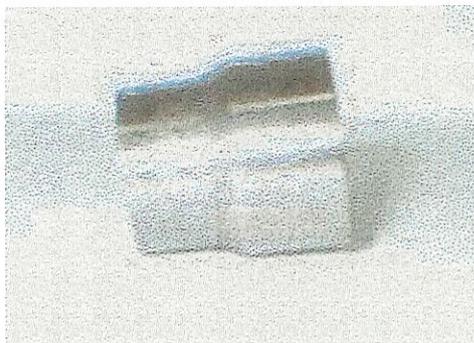


Figura 5.4: Foto de um porta-injetor utilizado no motor.

Porém estes porta-injetores não foram suficientes para garantir uma perfeita vedação devido à uma pequena folga existente entre o diâmetro da extremidade da saída do injetor e o diâmetro interno do porta-injetor quando o sistema foi posto em funcionamento, à pressão dos gases queimados e à alta temperatura que foi submetida a parte plástica dos bicos, o que causou um derretimento parcial destes. Entretanto, a integridade dos bicos não foi afetada. Mesmo assim foi necessário construir-se uma carcaça metálica para substituir a parte plástica frontal de cada um dos bicos. Esta carcaça foi acoplada ao bico e, depois, ao porta-injetor por interferência. O fato desta carcaça (Figura 5.5) ser metálica eliminou o problema do derretimento e, como as dimensões externas da carcaça eram iguais às internas dos porta-injetores, garantiu-se uma perfeita vedação.



Figura 5.5: Foto de uma das carcaças metálicas dos bicos injetores.

As “Figuras 5.6 e 5.7” mostram, respectivamente, um bico sem a carcaça e outro com a carcaça metálica.



Figura 5.6: Foto de um injetor sem a carcaça metálica.



Figura 5.7: Foto de um injetor com a carcaça metálica.

### 5.2.2 Ensaios Dinamométricos

Os ensaios dinamométricos foram realizados com base nos procedimentos estabelecidos na norma ABNT 5484, que prescreve o método de ensaio de motores projetados para veículos automotivos. Ela prescreve a avaliação do desempenho e a apresentação das curvas características de potência, momento de força e consumo específico de combustível a plena carga em função da velocidade angular do motor.

Os testes foram realizados sempre com o objetivo de se confrontar o comportamento do motor operando com sistema de injeção direta com o sistema de injeção indireta.

Para a coleta dos dados foi necessário esperar o motor entrar em regime, o que ocorreu quando a temperatura dos gases de exaustão estabilizou-se<sup>16</sup>.

O ponto de ignição foi ajustado em cada rotação de ensaio para a condição de melhor torque observado.

### 5.2.3 Ensaio com o Sistema de Injeção Direta

Inicialmente, era necessário saber o momento exato da injeção de combustível em cada cilindro. Para isto foi utilizado um osciloscópio Tektronix modelo 5113 acoplado ao motor. Através deste osciloscópio era possível saber o momento exato do início da injeção e sua duração em função da posição do pistão dentro do cilindro e da ignição.

Um captador magnético pegava um sinal de um ímã colado no eixo do comando de válvulas que indicava sempre quando o cilindro estava no PMS. Este sinal, juntamente com o proveniente do sensor Hall do distribuidor, determinavam o PMS do início da admissão (Figura 5.8).

---

<sup>16</sup> A temperatura dos gases de exaustão estabiliza-se após 2 minutos de funcionamento, aproximadamente, segundo o fabricante. Este é o tempo necessário para o sensor sonda lambda começar a atuar no motor.

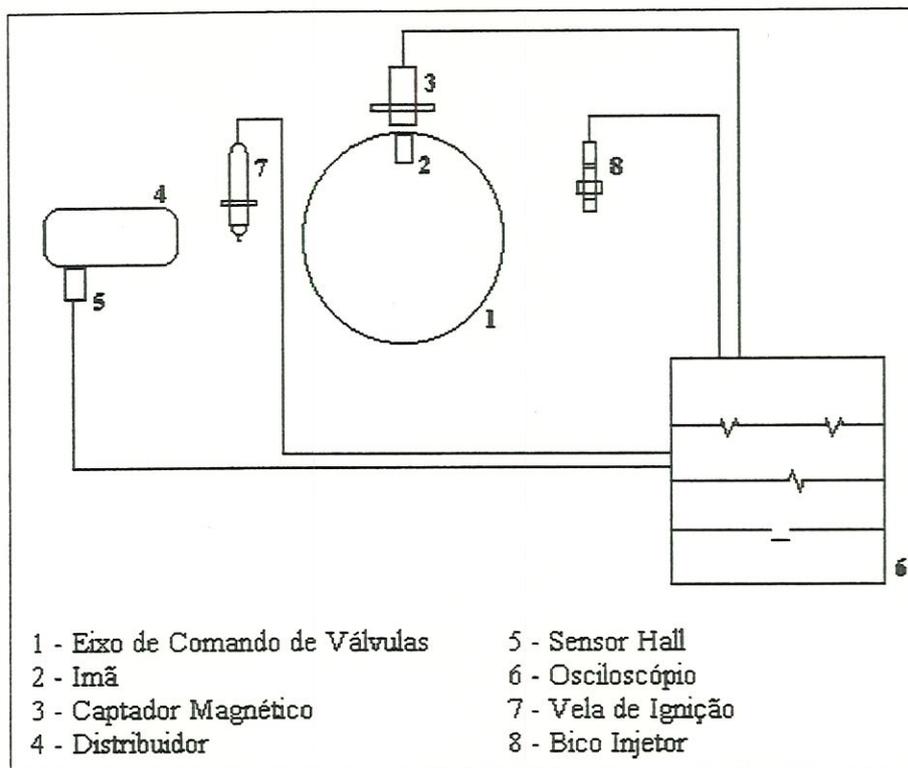


Figura 5.8: Esquema de como foram obtidos os sinais do motor durante os ensaios.

Para realizar os ensaios com o motor funcionando com o sistema de injeção direta, primeiramente fazia-o entrar em regime utilizando o sistema convencional, isto porque não era possível saber se o motor funcionaria com injeção direta em todas as condições de operação. Quando o motor já estava em regime, mudava-se para o sistema de injeção direta através de uma chave seletora, acoplada ao controle eletrônico do motor. Foram feitas alterações na carga e rotações do motor.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O motor funcionou normalmente no seu sistema convencional, com a injeção de combustível feita antes da válvula de admissão. Os ensaios foram realizados de acordo com a norma NBR 5484, já descrita anteriormente. Os resultados do desempenho do motor na configuração original são mostrados na “Figura 6.1”. Para cada ponto observado no sistema original, tentava-se levantar o correspondente no sistema ID.

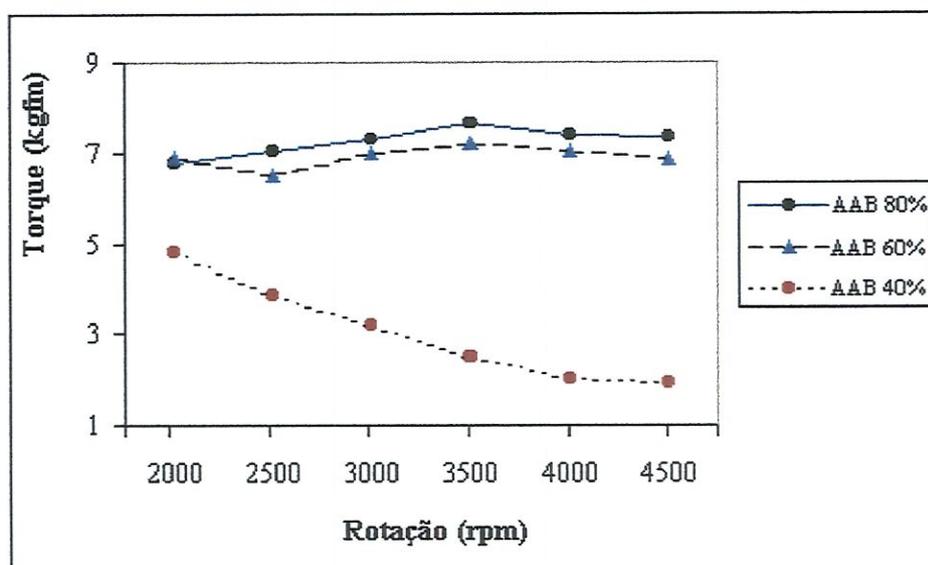


Figura 6.1: Desempenho do motor na configuração original (AAB: ângulo de abertura da borboleta de aceleração)

Porém, após realizar todos os ensaios em laboratório, chegou-se à conclusão de que o sistema de injeção direta adaptado ao motor apresentou baixo desempenho. O sistema ID funcionou somente na faixa entre 4800 e 5100 rpm e, mesmo nestas condições, o motor operou com baixa carga resistiva. Este resultado

inesperado levou a questionar as causas para tão baixo rendimento. O que estaria prejudicando a combustão nos cilindros?

Na “Figura 6.2”, é apresentado um organograma que mostra o caminho seguido na procura das causas do baixo rendimento do motor operando com o sistema ID.

Para que o motor funcione normalmente, é necessário que haja a presença de uma mistura inflamável e de uma centelha, no momento correto, para a ignição desta mistura.

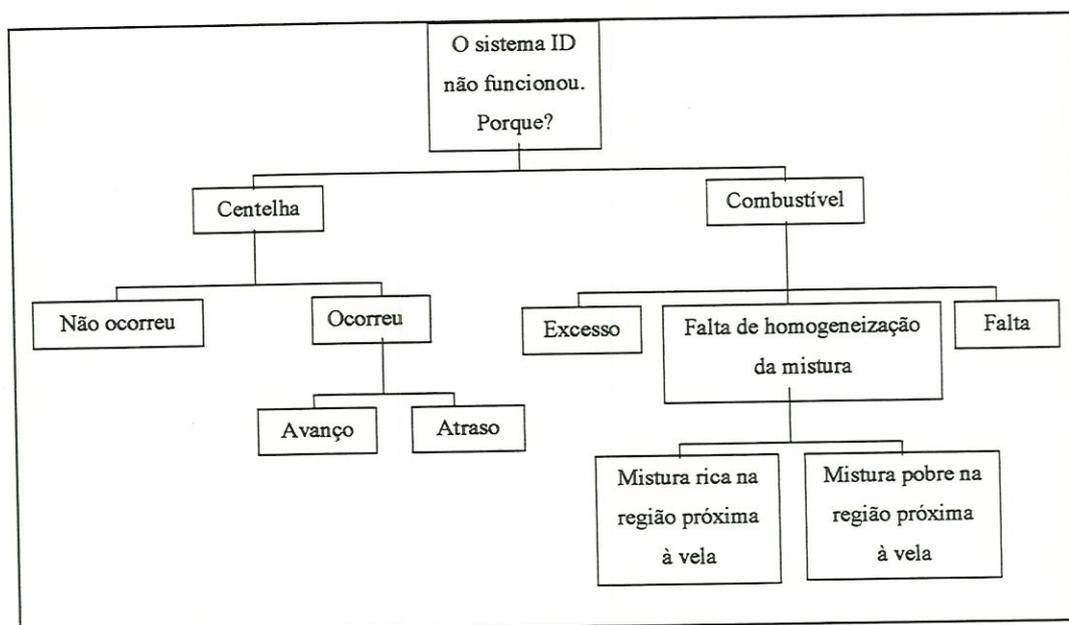


Figura 6.2: Organograma mostrando o caminho seguido na procura das causas do baixo rendimento do motor operando com o sistema ID.

## 6.1 Centelha

Inicialmente, foi confirmada a presença da centelha. Com esta confirmação, era necessário agora analisar o momento em que está ocorrendo a centelha. Ver se ela está ocorrendo antes ou depois do tempo certo, ou seja, examinar se estava sendo antecipada ou atrasada. Para indicar o ponto exato da centelha, utilizou-se um osciloscópio, já citado anteriormente. O osciloscópio mostrava, durante o funcionamento do motor, 3 curvas (Figura 6.3). Na curva (1), cada pulso indica o PMS do início da admissão do primeiro cilindro, ou seja, a distância entre um pulso e outro corresponde a 2 voltas do girabrequim ( $720^\circ$ ). Na curva (2), o pulso indica o

momento da centelha dentro deste cilindro. E, na curva (3), o pulso indica o início e a duração da injeção de combustível. Utilizando-se a escala do osciloscópio foi possível saber a quantos graus do girabrequim ocorria a centelha.

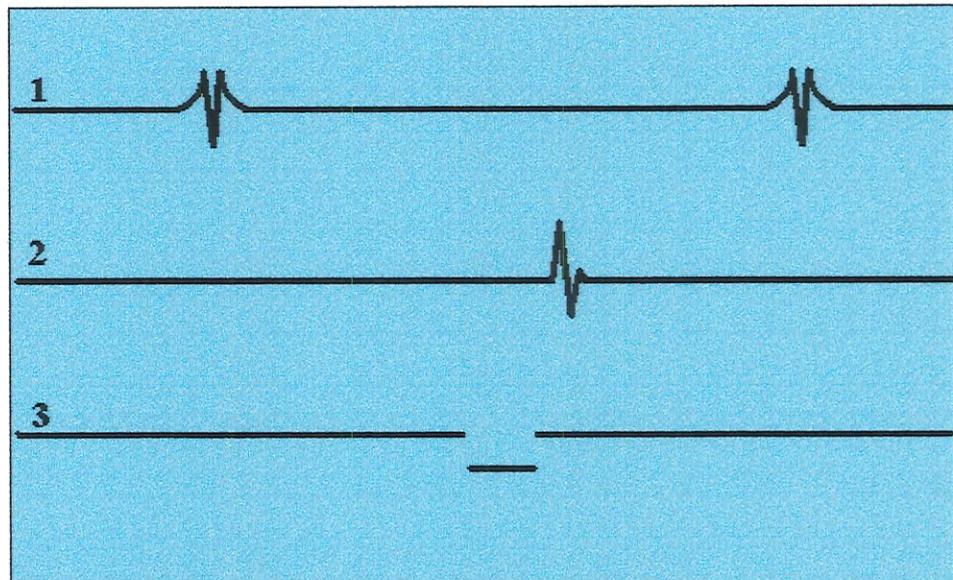


Figura 6.3: Imagem ilustrativa do osciloscópio utilizado nos ensaios de laboratório.

Para se adiantar ou atrasar o momento da centelha de um motor é necessário modificar a posição do distribuidor<sup>17</sup> do motor para antes ou para depois do ponto em que se encontra inicialmente. Porém, como este motor é controlado eletronicamente, a própria central eletrônica encarrega-se de fazer estes ajustes. Entretanto, no motor estudado, existe um dispositivo<sup>18</sup> que tem a função de permitir que a central eletrônica efetue esta operação. Se este for desconectado do motor, pode-se alterar o ponto da centelha girando-se o distribuidor por até 27°. Foi o que ocorreu. Mas, mesmo com estes procedimentos, o sistema ID não funcionou, o que mostrou que o problema não era a centelha.

<sup>17</sup> Cabe ao distribuidor a tarefa de distribuir às velas a corrente de alta tensão proveniente da bobina que irá produzir a faísca necessária no processo de combustão.

<sup>18</sup> Este dispositivo tem o nome de “shortting cut” e encontra-se em uma das extremidades do chicote eletrônico do motor.

Agora, sabendo-se que o problema não era a centelha, foi necessário investigar a mistura admitida pelo cilindro no sistema ID. Saber se ela era rica ou pobre ou se estava havendo falta de homogeneização dela.

## 6.2 Mistura Admitida no Sistema ID

Para saber se a mistura admitida pelo cilindro era rica ou pobre no sistema ID, foi necessário analisar a curva (3) do osciloscópio (Figura 6.3) para determinar o início e a duração da injeção de combustível em função da posição do pistão dentro do cilindro. Com estes dados e com a curva de vazão dos bicos injetores, fornecida pela Bosch (Figura 6.4), foi possível calcular o quanto de combustível foi realmente admitido, visto que, após os ensaios, constatou-se que acima de 3000 rpm, mesmo com o motor operando com baixa carga resistiva, parte deste combustível era injetado quando o pistão estava acima do ponto de injeção, o que causava a perda de parte do combustível injetado.

Acima de 3000 rpm, a perda de combustível<sup>19</sup> leva-nos a concluir que a mistura A/C admitida neste sistema era pobre, o que poderia estar dificultando uma boa combustão.

## 6.3 Falta de Homogeneização da Mistura Admitida Pelo Cilindro no Sistema ID

Após a análise da centelha e do tipo da mistura admitida pelo cilindro, concluiu-se que, o que mais prejudicou o desempenho do motor foi a falta de homogeneização da mistura dentro do cilindro. Isto ocorreu devido à um conjunto de fatores, que discutiremos a seguir.

---

<sup>19</sup> Os cálculos apontaram que era injetado no sistema proposto apenas 55% da quantidade de combustível injetado no sistema convencional, nas mesmas condições de operação.

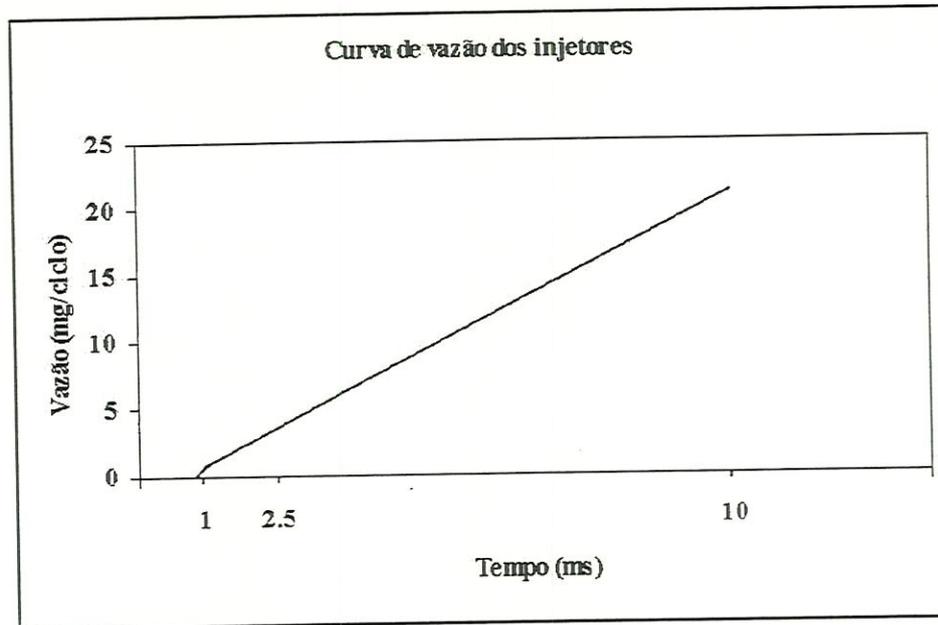


Figura 6.4: Curva de vazão dos bicos injetores, modelo 963C-álcool, em função do tempo, fornecida pela Bosch.

### 6.3.1 Geometria da Câmara de Combustão nos Motores com ID a Alta Pressão

A geometria diferenciada da câmara de combustão é uma das principais características dos motores que trabalham com injeção direta de combustível a alta pressão. A grande maioria dos motores desenvolvidos para este sistema adotou uma configuração onde uma parte da mistura é levada diretamente ao redor da vela de ignição, com a finalidade de garantir que haja uma porção suficientemente rica de mistura próximo à vela, garantindo assim a combustão, já que no sistema ID a alta pressão o motor trabalha com carga estratificada. O direcionamento do combustível à vela ocorre devido às posições do bico injetor, da vela (Figura 6.5) e, principalmente, à geometria da cabeça do pistão.

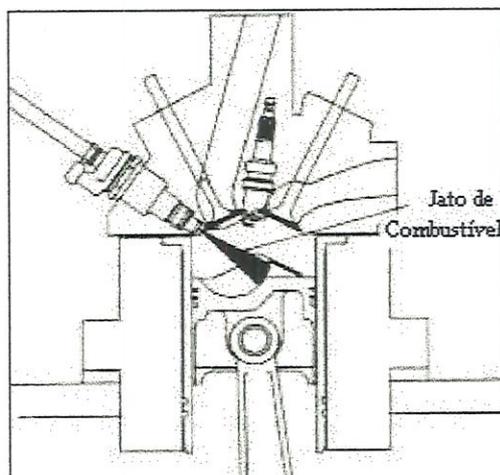


Figura 6.5: Geometria da câmara de combustão nos motores com ID a alta pressão.

A cabeça do pistão (Figura 6.6), possui uma concavidade que direciona, durante o final da compressão, o jato de combustível à vela, permitindo a operação com carga estratificada.

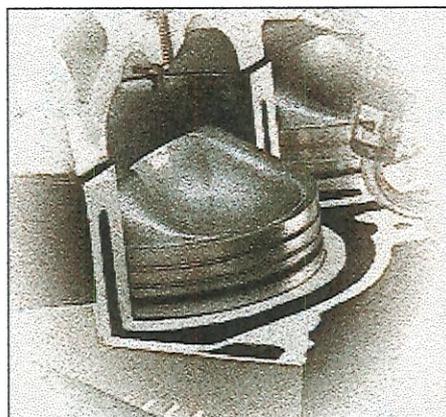


Figura 6.6: Cabeça côncava de um pistão utilizado em sistemas ID a alta pressão (GETTING, 1997).

Outro aspecto importante utilizado em alguns casos é a inclinação transversal do bico injetor em relação ao cilindro. Esta inclinação faz com que o combustível entre girando na câmara de combustão, o que auxilia na homogeneização e na combustão da mistura. Este processo pode ser visualizado na “Figura 4.1” (pág. 30).

É importante salientar que em quase todos os casos, o bico injetor situa-se no cabeçote, diferentemente do que foi proposto aqui.

### 6.3.2 Qualidade do Jato de Combustível

Outro fator que pode ter contribuído para tais resultados foi o aspecto do jato de combustível injetado no cilindro. Nos sistemas ID desenvolvidos pelas indústrias automobilísticas, a pressão de injeção, relativamente alta<sup>20</sup>, favorece a vaporização do combustível, na medida que produz gotas com um diâmetro muito pequeno para que, através da troca de calor entre a superfície da gota e o meio, a vaporização do combustível seja acelerada, pois a superfície da gota é pequena e, assim, ocorra uma boa combustão, desde o início da queima até o final da combustão. No sistema a baixa pressão isto não ocorre devido ao jato de combustível possuir gotas de diâmetro grande, o que dificulta a pulverização e, conseqüentemente, a vaporização do combustível.

Outra característica importante do jato foi o ângulo formado pela nuvem de combustível, que era de 15°. Este valor é muito pequeno, e também prejudica a pulverização do combustível, levando também à um grande tamanho da gota. Para amenizar este problema seria necessário utilizar outro tipo de bicos injetores, o que foge do escopo deste trabalho. Se tivessem sido utilizados outros bicos injetores, com melhor pulverização do combustível, o que seria possível aumentando-se o ângulo formado pelo jato de combustível, o desempenho do motor operando com o sistema ID certamente melhoraria. Porém, ao se alterar o conjunto de bicos injetores, ou utiliza-se bicos com a mesma curva de vazão dos anteriores, ou seria necessário alterar também a central eletrônica, pois é ela quem comanda o funcionamento dos bicos. Para fazer esta alteração existem dois caminhos: ou troca-se a central, o que é extremamente complicado, pois a central tem que ser totalmente adaptável a todos os componentes eletrônicos do motor e suas características; ou altera-se a programação eletrônica da central. Para realizar esta última alteração seria necessário ter acesso aos programas internos da central, o que não é possível, pois as indústrias fabricantes não fornecem estes dados.

---

<sup>20</sup> Como visto anteriormente, a pressão média para a maioria dos motores que utilizam este sistema gira em torno de 100 bar.

### 6.3.3 Influência do Tipo de Carga

O fato do combustível estar sendo injetado diretamente dentro da câmara de combustão, sugere que o motor poderia estar operando com carga estratificada em boa parte de seu funcionamento, isto devido à geometria da câmara de combustão do sistema proposto, que não era a ideal, em conjunto qualidade do jato de combustível injetado. Esta configuração é explicada mais a frente, com auxílio das “Figuras 6.7 e 6.8”.

Como já foi visto, na carga estratificada, a mistura A/C não é homogênea, mas possui regiões de razões A/C ultra-ricas e ultra pobres formadas simultaneamente no interior do cilindro. Devido à esta composição, é necessário que haja uma rotação contínua da mistura e/ou que a região próxima à vela tenha uma porção suficientemente rica desta no momento da ignição, a fim de garantir uma boa combustão, como mostrado no item 6.3.1. Porém isto não foi possível, pois o sistema foi adaptado à um motor convencional e as características originais da câmara de combustão não foram alteradas, pois isto fugiria do escopo do trabalho.

Então, o que estaria ocorrendo no interior do cilindro é que a região próxima à vela não recebe uma mistura rica o bastante para iniciar a combustão e o processo de queima então não ocorre.

Esta situação é mostrada nas “Figuras 6.7 e 6.8”. Na “Figura 6.7” é mostrada a distribuição da mistura dentro do cilindro nos sistemas ID que trabalham a alta pressão de combustível. Observa-se que na região próxima à vela, a mistura é mais rica e, a medida que se aumenta a distância da vela, a mistura fica mais pobre.

Na “Figura 6.8” é mostrada a distribuição da mistura no sistema proposto neste trabalho. Devido à qualidade do jato de combustível (item 6.3.2, pág. 64), grande parte deste escorre pela parede do cilindro e empoça na cabeça do pistão. Então tem-se a cabeça do pistão como a região de mistura mais rica dentro do cilindro e, a medida que afasta-se deste ponto a mistura fica mais pobre, deixando a região próxima à vela com uma mistura insuficientemente rica para que haja combustão. Isto explica o não funcionamento do motor, na faixa abaixo de 3000 rpm, mesmo com ele recebendo, dentro do cilindro, todo o combustível injetado pelo bico, no tempo correto.

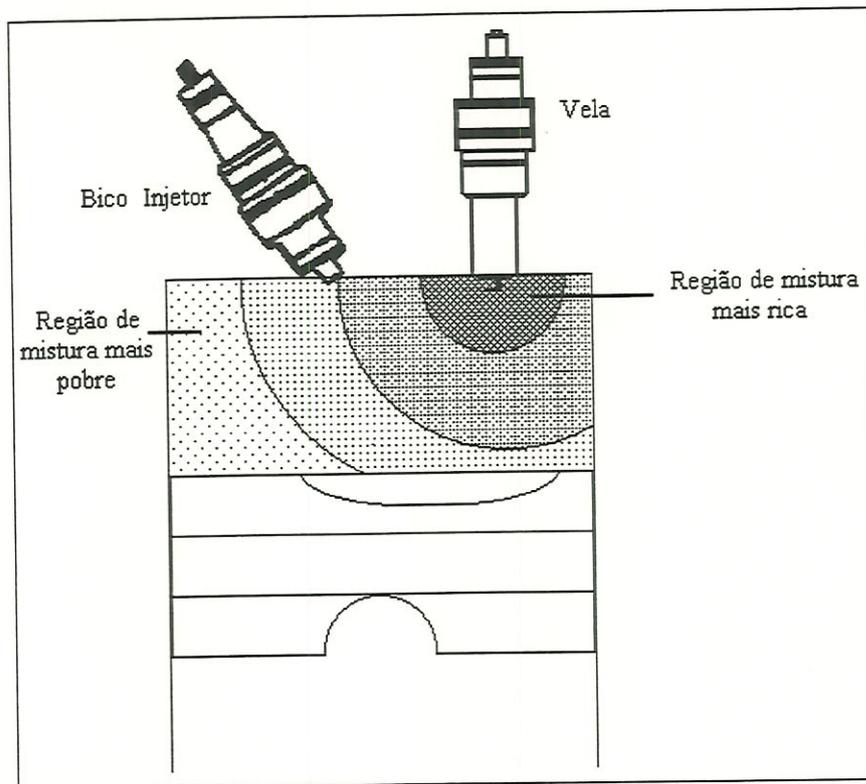


Figura 6.7: Distribuição da mistura dentro do cilindro nos sistemas ID que trabalham a alta pressão de combustível.

#### 6.3.4 O Momento da Injeção

O momento de injeção é outro fator que poderia ter prejudicado o desempenho do motor quando ele operava com injeção direta. Como o início e a duração da injeção são controlados pela central eletrônica, não era possível variar estes tempos para que todo o combustível injetado fosse para dentro do cilindro.

O problema é que, acima de 3000 rpm, o início da injeção ocorria próximo ao início do tempo de admissão, quando o pistão ainda estava acima do ponto de injeção. Então parte do combustível ia diretamente para o cárter.

Porém, mesmo que este problema fosse resolvido, provavelmente o motor não funcionaria satisfatoriamente devido a todos os fatores citados anteriormente.

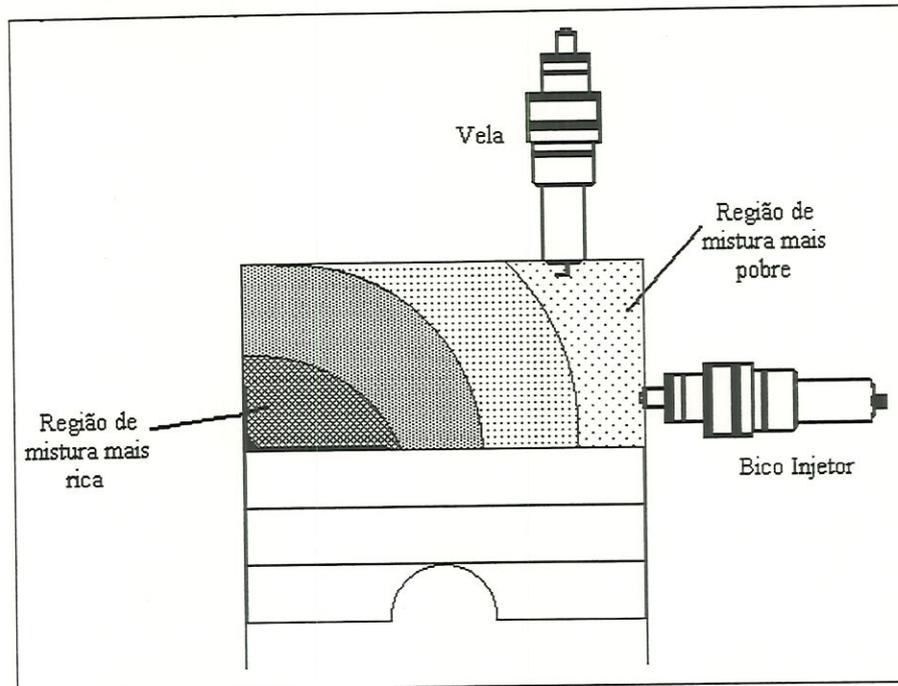


Figura 6.8: Distribuição da mistura no sistema proposto neste trabalho.

#### 6.4 Funcionamento do Motor entre 4800 e 5100 rpm com o Sistema de Injeção Direta Adaptado Proposto neste Trabalho

Depois de analisar todos os aspectos mostrados até aqui, pode-se concluir que, o sistema de injeção direta proposto neste trabalho, funcionou graças a uma combinação muito particular que levou a uma situação favorável: nesta faixa de rotações houve uma turbulência da mistura, devido aos efeitos de inércia, e assim uma porção de vapor de combustível foi levado próximo à vela, fazendo com que uma porção de mistura suficientemente rica estivesse presente nas proximidades da vela no momento da centelha, possibilitando assim parte da combustão da mistura. Isto não ocorreu em outras rotações, não permitindo então, o funcionamento do motor com este sistema.

## 7 CONCLUSÕES

A grande maioria dos sistemas de injeção eletrônica direta de combustível desenvolvidos até hoje foram bem sucedidos devido às suas principais características: a geometria diferenciada da câmara de combustão (cabeça côncava do pistão e posição do bico injetor de combustível, situado no cabeçote, próximo à vela), a alta pressão de injeção e a rotação da mistura no interior do cilindro.

O sistema proposto neste trabalho não utilizou nenhuma destas características, pois o propósito era simplesmente adaptar um sistema de injeção direta de combustível em um motor convencional, com injeção indireta, utilizando o mesmo conjunto de fornecimento de combustível, mantendo a baixa pressão de injeção, e sem alterar as características da câmara de combustão. Tudo isto para tentar obter os resultados semelhantes aos dos sistemas ID desenvolvidos pelas indústrias automobilísticas, mas com menor custo.

Devido à estes fatores, o sistema ID proposto aqui apresentou um baixo rendimento, funcionando, graças a uma combinação muito particular, apenas na faixa entre 4800 e 5100 rpm e com o motor operando sem carga.

Outros aspectos que prejudicaram o desempenho do motor com este sistema proposto foram a qualidade do jato de combustível, o momento da injeção e, principalmente, a falta de homogeneização da mistura.

Conclui-se então que, se houver, através de algumas modificações na geometria da câmara de combustão e/ou na posição dos bicos injetores de combustível, uma rotação da mistura ar-vapor de combustível, facilitando a homogeneização desta mistura, garantindo que a região próxima à vela receba uma mistura suficientemente rica no momento da ignição; utilizando-se bicos injetores específicos e otimizando-se o momento e a duração da injeção de combustível no

interior do cilindro, certamente, os problemas encontrados neste trabalho seriam solucionados e, conseqüentemente, o desempenho do motor melhoraria significativamente.

### 7.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Como proposta para futuros trabalhos utilizando um sistema de injeção direta de combustível adaptado em motores de combustão interna com ignição por centelha movido a álcool, pode-se deixar algumas sugestões:

- adotar um bico injetor com diferentes características dos bicos utilizados aqui. Usar um com maior ângulo do jato de combustível e colocá-lo numa posição dentro do cilindro diferente da proposta aqui, de modo a auxiliar na turbulência da mistura para que uma porção desta, suficientemente rica, esteja próxima à vela no momento da ignição. Isto implicaria na substituição ou em alterações da central eletrônica (vide item 6.3.2, pág.64);
- fazer alterações na geometria da câmara de combustão, a fim de criar uma rotação da mistura ar-vapor de combustível, facilitando também a homogeneização desta mistura e garantindo que a região próxima à vela receba uma porção suficientemente rica no momento da ignição;
- controlar o momento e a duração da injeção de combustível, através da troca ou alteração da central eletrônica, ou adotando-se um mecanismo que o faça;
- aquecer o álcool sob a pressão de injeção para que este tenha uma maior taxa de vaporização, melhorando assim a homogeneização da mistura e, conseqüentemente, a combustão;
- trabalhar com uma maior pressão de injeção, o que ajudaria na vaporização do combustível, pois as gotas formadas pelo jato de combustível teriam um diâmetro menor;
- projetar um sistema onde utilize-se, simultaneamente, os dois sistemas de injeção de combustível, o direto e o indireto, onde uma pequena parte do combustível seria injetada no coletor de admissão, com a finalidade de garantir que uma mistura suficientemente rica estivesse ao redor da vela no momento da centelha,

---

iniciando a combustão e auxiliando, então, a queima da mistura formada com o combustível injetado diretamente dentro do cilindro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AJUDANDO a eletrônica (1998). *Oficina Mecânica*. v.12, n. 145a, p.8-11.

AMANN, C.A. (1990). Power to burn: a history of the spark-ignition engine. *Mechanical Engineering*, v.112, n.4, p.46-54, Apr.

ANTÔNIO, M. (1996). Uma história de sucesso. *Auto Catálogo*, n.1, p.30-34, abr.

ASHLEY, C. (1996). Gasoline direct injection engine (GDI). *Automotive engineer*, v.21, n.5, p.20-23, Oct./Nov.

AUTOMOTIVE eletric/eletronic systems. (1988). Stuttgart, Bosch.

ÁVILA, M.T. (1994). *Estudo de um motor de combustão interna do ciclo Otto, movido a etanol previamente vaporizado*. São Carlos. 160p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

DANIELS, J. (1997). Toyota reveals more technology. *Automotive engineer*, v.22, n.5, p.54-61, June.

- DAVIS, C.W.; BARBER, E.M.; MITCHELL. (1961). Fuel injection and positive ignition: a basis for improved efficiency and economy. *SAE Transaction*, v.69, p.120–134.
- DOLZA, J.; KEHOE, E.A.; STOLTMAN, D.; DUNTOV, Z.A. (1957). The general motors: fuel injection system. *SAE Transactions*, v.65, p.739–746, Jan.
- FIAT AUTOMÓVEIS S.A. (s.d.). *Palio: sistema injeção/ignição IAW-1G7. /treinamento assistencial/*
- FRENCH, C.C.J. (1980). The engine challenge of the nineties. In: SYMPOSIUM OF TECHNOLOGY METAL LEVE: THE MOTOR IN THE FUTURE. p.9-26, São Paulo.
- GÁS de escape (1998). *Motor Show*, v.15, n.189, p.24-25, dez.
- GETTING more direct (1997). *Automotive Engineering*, v.105, n.12, p.81–85, Dec.
- GLÖCKLER, O. et al., (1981). Gasoline fuel injection: an overview. *Automotive engineering*, v.89, n.1, p.66–74, Jan.
- HARADA, J. et al. (1997). Development of direct injection gasoline engine. In: INTERNATIONAL CONGRESS & EXPOSITION. Detroit. (SAE Technical Paper Series 970540).
- HEYWOOD, J.B. (1988). *Internal combustion engine fundamentals*. New York, MacGraw-Hill.

- HILDEBRAND JR., L. (1998). *Análise do desempenho de um motor do ciclo otto com injeção direta de álcool etílico hidratado pré-aquecido*. São Carlos. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- HUSSMANN, A.W.; KAHOUN, F.; TAYLOR, R.A. (1963). Charge stratification by fuel injection into swirling air. *SAE Transactions*, v.71, p.421–444.
- IWAMOTO, Y. et al. (1997). Development of gasoline direct injection engine. . In: INTERNATIONAL CONGRESS & EXPOSITION. Detroit. (SAE Technical Paper Series 970541).
- KOWALEWICZ, A. (1984). *Combustion system – of high-speed piston I.C. engines*. Warszawa. Elsevier.
- LENZ, H.P. (1992). *Mixture formation in sprk-ignition engines*. New York. Springer-Verlag-Wien.
- OBERT, E.F. (1971). *Motores de combustão interna*. 2.ed. Porto Alegre, Globo.
- PASSARINI, L.C. (1993). *Projeto e análise de válvulas eletromagnéticas injetoras de combustível: uma nova proposta*. São Carlos. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- PARAÍSO e purgatório (1998). *Oficina Mecânica*. v.12, n. 145a, p.8-11.
- PENIDO FILHO, P. (1983). *Os motores à combustão interna*. v.2, São Paulo, Lemi.

- QUEIROZ, C.; TOMANIK, E. (1997). Gasoline direct injection engines - a bibliographical review. In: VI INTERNATIONAL MOBILITY TECHNOLOGY CONFERENCE AND EXHIBIT. São Paulo. (SAE Technical Paper Series 973113-E).
- RAYMOND, L. (1980). Next generation of engines. In: SYMPOSIUM OF TECHNOLOGY METAL LEVE: THE MOTOR IN THE FUTURE. p.27-45, São Paulo.
- ROTHROCK, A.M.; WALDRON, C.D. (1935). Some effects of injection advance angle, engine-jacket temperature, and speed on combustion in a compression-ignition engine. *National Advisory Committee for Aeronautics*, n.525, p.343-357, Jan.
- ROTHROCK, A.M.; SPENCER, R.C. (1939). The influence of directed air flow on combustion in a spark-ignition engine. *National Advisory Committee for Aeronautics*, n.657, p.1-14, Oct.
- SANTOS, A.M. (1998). *Desempenho de motores de combustão interna*. São Carlos. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.
- SEM manutenção (1998). *Oficina Mecânica*. v.12, n. 145a, p.8-11.
- TAYLOR, C.F.; TAYLOR, E.S.; WILLIAMS, G.L. (1931). Fuel injection with spark ignition in an otto-cycle engine. *SAE Transactions*, v.26, p.346-351.
- TAYLOR, C.F. (1971). *Análise dos motores de combustão interna*. v.1, 2.ed. São Paulo, Edgar Blücher Ltda.

- TAYLOR, C.F. (1971). *Análise dos motores de combustão interna*. v.2, 2.ed. São Paulo, Edgar Blücher Ltda.
- TOMODA, T. et al. (1997). Development of direct injection gasoline engine - study of stratified mixture formation. In: INTERNATIONAL CONGRESS & EXPOSITION. Detroit. (SAE Technical Paper Series 970539).
- WYLEN, G.J.V. (1993). *Fundamentos da termodinâmica clássica*. 3.ed. São Paulo, Edgar Blücher Ltda.
- YAMAGUCHI, J. (1997). Toyota readies direct-injection gasoline engine for production. *Automotive Engineering*, v.105, n.12, p.110–112, Dec.
- ZHAO, F.Q.; LAI, M.C.; HARRINGTON, D.L. (1997). A review of mixture preparation and combustion control strategies for spark-ignited direct-injection gasoline engines. In: INTERNATIONAL CONGRESS & EXPOSITION. Detroit. (SAE Technical Paper Series 970627).

**BIBLIOGRAFIA CONSULTADA**

FEITOSA, M.V. (1998). *Estudo da partida à frio em motores movidos à etanol*. São Carlos. 150p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

FERGUSON, C.R. (1986). *Internal combustion engines—applied thermosciences*. New York, John Wiley & Sons.

HAN, Z. et al. (1997). Effects of injection timing on air-fuel mixing in a direct-injection spark-ignition engine. In: INTERNATIONAL CONGRESS & EXPOSITION. Detroit. (SAE Technical Paper Series 970625).

JACKSON, N.S. et al. (1997). Stratified and homogeneous charge operation for the direct injection gasoline engine - high power with low fuel consumption and emissions. In: INTERNATIONAL CONGRESS & EXPOSITION. Detroit. (SAE Technical Paper Series 970543).

KANO, M. et al. (1998). Analysis of mixture formation of direct injection gasoline engine. In: INTERNATIONAL CONGRESS & EXPOSITION. Detroit. (SAE Technical Paper Series 980157).

- KARL, G. et al. (1997). Analysis of a direct injected gasoline engine. In: INTERNATIONAL CONGRESS & EXPOSITION. Detroit. (SAE Technical Paper Series 970624).
- KUWAHARA, K. et al. (1998). Mixing control strategy for engine performance improvement in a gasoline direct injection engine. In: INTERNATIONAL CONGRESS & EXPOSITION. Detroit. (SAE Technical Paper Series 980158).
- OHSUGA, M. et al. (1997). Mixture preparation for direct-injection SI engines. In: INTERNATIONAL CONGRESS & EXPOSITION. Detroit. (SAE Technical Paper Series 970542).
- PONTOPPIDAN, M. et al. (1997). Direct fuel injection - a study of injector requirements for different mixture preparation concepts. In: INTERNATIONAL CONGRESS & EXPOSITION. Detroit. (SAE Technical Paper Series 970628).
- SHIRAIISHI, T. et al. (1998). Effect of spray characteristics on combustion in a direct injection spark ignition engine. In: INTERNATIONAL CONGRESS & EXPOSITION. Detroit. (SAE Technical Paper Series 980156).