

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

MÓDULO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAÇÃO DA
OCTANAGEM DE COMBUSTÍVEIS.

por

José Eduardo Barbosa Moraes

Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Novembro de 2003.

MÓDULO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAÇÃO DA
OCTANAGEM DE COMBUSTÍVEIS.

por

José Eduardo Barbosa Moraes
Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para obtenção do Título de:

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Energia.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Barbosa Mello.

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Paulo Otto Beyer. - UFRGS

Prof. Dr^a. Lígia Damasceno Marczak. – UFRGS.

Prof. Dr. Luiz Carlos Gertz. - ULBRA

Prof. PhD. Jun. S. O. Fonseca.
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, Novembro de 2003.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa Maria Suzana Gaspar da Silva e ao meu filho Pedro Henrique Gaspar da Silva Moraes, por estarem sempre ao meu lado apoiando-me, e por serem eles a motivação de todas minhas conquistas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor orientador Dr. Pedro Barbosa Mello pela oportunidade da realização deste trabalho, e por ter me orientado de maneira tranqüila.

Ao PROMEC, representado em seu corpo de funcionários e docentes.

A Petrobrás representada pelos engenheiros: Diocles Dalávia e Dinarte dos Santos , por ter patrocinado e possibilitado a realização deste trabalho.

Agradecimentos especiais ao engenheiro Dinarte dos Santos pela co-orientação exercida e ao engenheiro e amigo Dilamar Oliveira pela colaboração prestada.

Também agradeço ao professor Dr. Mario Henrique Macagnan e professora Dra. Sônia Girardi Benke, pela indicação ao PROMEC e pela confiança depositada.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo principal demonstrar uma nova metodologia que utilizará um motor automotivo adaptado a um módulo experimental onde será possível realizar-se medições da intensidade de detonação, e a partir desses valores determinar a octanagem dos combustíveis ensaiados, sendo este um método que oferece uma nova alternativa de baixo custo se comparado aos métodos tradicionais que utilizam motores CFR (Co-operative Fuel Research) fabricados pela Waukesha para determinação da octanagem dos combustíveis.

O módulo experimental é composto por um motor automotivo acoplado a um freio eletromagnético e por sensores instalados em pontos estratégicos do motor que informam, em tempo real, os valores dos parâmetros de funcionamento do mesmo.

A octanagem, para ser medida, a exemplo do que ocorre nos motores CFR, depende da ocorrência de detonação que é provocada durante a realização dos ensaios para que o valor de sua intensidade e o valor dos demais parâmetros de funcionamento do motor neste instante possam ser registrados. Para que pudesse ocorrer detonação em baixa rotação fez-se necessário à alteração do volume da câmara de combustão do motor utilizado, a fim de aumentar sua taxa de compressão e favorecer o aparecimento do fenômeno.

Durante a realização dos ensaios, no módulo experimental, utilizaram-se dois computadores para monitorar os parâmetros de funcionamento do motor e armazenar as informações adquiridas a partir da placa de aquisição de dados que transforma os sinais analógicos dos sensores em informações digitais, as quais serão utilizadas nos cálculos e na construção de gráficos para análise dos resultados do experimento.

Após realizar-se os ensaios utilizando-se combustíveis de referência com diferentes valores de octanagem, foi possível determinar a exatidão dos resultados obtidos pelo método proposto comparando-os com os valores obtidos no motor CFR, sendo que o módulo experimental permitiu medir os valores de octanagens com uma incerteza de $\pm 1,66$ octanas em um intervalo de confiança de 95,45%.

ABSTRACT

This work has a main objective to demonstrate a new methodology that will be used for one suitable automotive engine to the one experimental module where it will be possible to carry through measurements of the detonation intensity and from these values, to determine the octane number of the assayed fuels, being that this method offers a new alternative of low cost when compared to the traditional methods that use engines CFR (Co-operative Fuel Research), to determinate the octanagem of fuels, manufactured for the Waukesha. The experimental module is composed of a connected automotive engine to electromagnetic brake and sensors strategically placed in points of the engine that inform in real time the values of the parameters of functioning of exactly. To determinate the octane number, the example of that occurs in engines CFR, depends on the detonation occurrence that is provoked during the accomplishment of the assays so that the value of its intensity and the value of the too much parameters of functioning of the engine can be registered during the occurrence of the same one. So that detonation in low rotation could occur it was necessary to modify the volume of the camera of combustion of the used engine, in order to increase the tax of compression of exactly and favoring the appearance of the phenomenon. During the accomplishment of the assays in the experimental module, two computers are used to monitor the parameters of functioning of the engine and to store the information acquired from the plate of acquisition of data that transforms the analogical signals of the sensors into digital information that will be used in the calculations and into the construction of graphs that are used to analyze the results of the experiment. After accomplishment of assays using combustible of reference with different values of octane number, it was possible to determine which the precision of the results gotten for the considered method comparing them with the values gotten in engine CFR, being that the experimental module allowed to measure the values of octane number with an uncertainty of $\pm 1,66$ octanes in a reliable interval of 95,45%.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	MOTIVAÇÃO DO TRABALHO	2
1.2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	6
2.1	COMBUSTÃO NOS MOTORES DE IGNIÇÃO POR CENTELHA	6
2.2	SISTEMA DE GERENCIAMENTO DO MOTOR.....	8
2.2.1	Sensor de Oxigênio.....	10
2.2.2	Sensor de Detonação.....	12
2.2.3	Sensor de posição da borboleta aceleradora (TPS).....	13
2.2.4	Sensor de Pressão Absoluta no Coletor de Admissão (MAP).....	14
2.2.5	Sensor de rotação e posição da árvore de manivelas.....	15
2.3	COMBUSTÃO ANORMAL	16
2.3.1	Ignição de Superfície ou Pré-ignição.....	17
2.3.2	Detonação.....	17
2.4	ORIGEM DA TAXA DE OCTANAGEM.....	20
2.4.1	Taxa de octanagem real.....	22
2.4.2	Propriedades do combustível e teste de octanagem.....	23
2.4.3	Taxa de octanagem no âmbito comercial.....	24
2.4.4	Diferença MON – RON.....	25
2.4.5	Tipos de motores para taxar os combustíveis.....	25
2.4.6	Determinação da octanagem.....	26
2.4.7	Relação entre octanagem e potência.....	27
2.4.8	A octanagem e o desgaste do motor.....	27
2.4.9	A octanagem e o ajuste dos motores.....	28
2.4.10	Relação entre a octanagem e a aditivação.....	28
2.5	PARÂMETROS REQUERIDOS DE OCTANAGEM.....	29
2.5.1	Requerimento de número de octanagem (RNO) dos motores.....	29
2.5.2	Efeito da Taxa de Compressão.....	29
2.5.3	Efeito da relação ar-combustível.....	30
2.5.4	Efeito da mudança do avanço de Ignição.....	31
2.5.5	Efeito da temperatura e da carga.....	32
2.5.6	Efeito da velocidade do motor.....	32
2.5.7	Efeito dos depósitos nos cilindros.....	33
2.5.8	Efeito das condições atmosféricas.....	33
2.6	ANÁLISE DE ERROS	34
3	EXPERIMENTO	36
3.1	APARATO EXPERIMENTAL.....	36
3.1.1	Computadores.....	37
3.1.2	Placa de Aquisição	37
3.1.3	Motor.....	38
3.1.4	Procedimento para Preparação do motor.....	39
3.1.5	Circuito Condicionador do Detonador.....	42
3.1.6	Circuito de Carga e Controle de Velocidade.....	43
3.1.7	Sensores TPS e MAP.....	44
3.2	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	45

3.3	CARACTERÍSTICAS DOS COMBUSTÍVEIS UTILIZADOS	45
4	METODOLOGIA.....	47
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	53
5.1	AJUSTE DOS PARÂMETROS DA EQUAÇÃO GERAL (5).	53
5.2	CÁLCULO DAS INCERTEZAS DE MEDIÇÃO.	53
5.3	GRÁFICOS DE AJUSTE DA IDMED. X IDCALC.	54
5.4	RESULTADOS FINAIS	61
6	CONCLUSÃO.....	63
7	BIBLIOGRAFIA	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ALQ	- Alquilado
C	- Carbono
CFR	- Co-operative Fuel Research
H	- Hidrogênio
HC	- Hidrocarboneto
IDcalc.	- Intensidade de Detonação Calculada
IDmed.	- Intensidade de Detonação Medida
IAD	- Índice Antidetonação
γ	- Taxa de Calor Específico a volume e pressão constantes
MAP	- Manifold Air Pressure
MMT	- Metilciclopentadieno Manganês Tricarbono
MON	- Motor Octane Number
MTBE	- Metil Terciário Butil Éter
O	- Oxigênio
PMS	- Ponto Morto Superior
RON	- Research Octane Number
RPM	- Rotações por Minuto.
S	- Sensibilidade
SC	- Sensibilidade do Condicionador
UCE	- Unidade de Controle Eletrônico
n	- Número de pontos de medição
TPS	- Throttle Position Sensor
TEL	- Tetraethyllead
V	- Volts
σ	- Incerteza de Medição
σ^2	- Variância
% ALQ	- Percentual de Alquilado contido no combustível.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Título	Pág.
(2.1).	Desenvolvimento de chama em um processo de combustão. Fonte:[Heywood, 1988].....	6
(2.2).	Pressão no Cilindro x Avanço de Ignição.Fonte:[Taylor, 1988].....	7
(2.3).	Variação do Torque x Avanço de Ignição. Fonte:[Heywood, 1988].....	8
(2.4).	Avanço de Ignição x Pressão no cilindro em relação ao PMS.Fonte:[Heywood, 1988].....	9
(2.5).	Sistema de Injeção Eletrônica. Fonte:[Envenenado, 2003].....	9
(2.6).	Curva característica de uma Sonda Lambda. Fonte:[NGK, 2003].....	11
(2-7a).	Circuito comunicação Sonda Lambda x UCE sistema sem aquecimento. Fonte:[NGK, 2003].....	12
(2-7b).	Circuito comunicação Sonda Lambda x UCE sistema com aquecimento. Fonte:[NGK, 2003].....	12
(2.8).	Sensores de Detonação. Fonte:[Injetronic, 2003.].....	13
(2.9).	Sensor de Posição da Borboleta – TPS. Fonte: [Oficina Brasil, 2003].....	14
(2.10).	Sensor MAP. Fonte:[Injetronic, 2003].....	15
(2.11).	Representação do conjunto bobina / imã permanente. Fonte: [IPUC, 2003].....	15
(2.12).	Gás extremo (U) à frente da frente de chama (A). Fonte: [Heywood,1998].....	17
(2.13).	Combustão Anormal com Detonação. Fonte: [Heywood,1998].....	18
(2.14a-b).	Efeito típico de avaria provocada pela detonação. Fonte: [Hastings, 2003].....	18
(2.14c-d).	Efeito típico de avaria provocada pela detonação. Fonte: [Hastings,2003].....	19
(2.15).	Forma de onda provocada pela detonação. Fonte: [Heywood,1998].....	22
(2.16).	Aditivo antidetonante da gasolina. Fonte: [Westbrook,1992].....	24
(2.17).	Knockmeter utilizado para leitura da Intensidade de Detonação. Fonte: [Geocities, 2003].....	26
(3.1).	Representação esquemática do experimento.....	36
(3.2).	Conversor A/D da Computer Boards.....	38
(3.3).	Fotografia do motor Fiat Palio utilizado no experimento.....	39
(3.4).	Cabeçote de válvulas rebaixado.....	40
(3.5).	Medição do volume da câmara de combustão.....	40
(3.6).	Medição do volume do recuo de válvulas.....	41
(3.7).	Simulação do sinal do condicionador de detonação.....	42
(3.8).	Sensor de rotação.....	42
(3.9).	Freio eletromagnético.....	43

(3.10).	Fotografia da célula de carga.....	44
(3.11).	Fotografia do Motor CFR. Fonte:[labmot, 2003].....	46
(4.1).	Curva de dados experimentais proposta.....	47
(4.2).	Gráfico de ajuste primeira aproximação.....	50
(4.3).	Gráfico de ajuste de curva.....	51
(4.4).	Janela de seleção de parâmetros solver. Fonte:[Microsoft Excel].....	51
(4.5).	Janela de opção de solver. Fonte:[Microsoft Excel].....	52
(5.1).	Gráfico de ajuste relativo ao ensaio 1.....	55
(5.2).	Gráfico de ajuste relativo ao ensaio 2.....	56
(5.3).	Gráfico de ajuste relativo ao ensaio 3.....	56
(5.4).	Gráfico de ajuste relativo ao ensaio 4.....	57
(5.5).	Gráfico de ajuste relativo ao ensaio 5.....	57
(5.6).	Gráfico de correlação Linear Ensaio 1.....	58
(5.7).	Gráfico de correlação Linear Ensaio 2.....	59
(5.8).	Gráfico de correlação Linear Ensaio 3.....	59
(5.9).	Gráfico de correlação Linear Ensaio 4.....	60
(5.10).	Gráfico de correlação Linear Ensaio 5.....	60
(5.11).	Gráfico de correlação linear CFR versus Módulo Experimental.....	62

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela	Título	Pág.
(1.1).	Condições de teste do CFR (MON). Fonte: [ASTM D2700, 1998].....	4
(1.2).	Condições de teste do CFR (ROM). Fonte: [ASTM D2699, 1998].....	4
(1.3).	Condições de teste para o método proposto.....	5
(2.1).	Propriedades dos hidrocarbonetos. Fonte: [Gasoline FAQ, 2003].....	21
(2.2).	Taxa de Compressão x Requerimento de Octanagem. Fonte: [Owen e Coley,1995].....	30
(2.3).	Avanço de Ignição x Requisito de Octanagem. Fonte: [SAE Handbook,1994].....	32
(2.4).	Incertezas de Medições devido à utilização dos sensores.....	35
(3.1).	Dados do Motor Fiat Palio 1.0.Fonte:[Fiat Palio,1999].....	38
(3.2).	Taxa de Compressão do motor antes e após a transformação.....	40
(3.3).	Características dos combustíveis utilizados.....	46
(4.1).	Tabela de cálculo para determinação da octanagem dos combustíveis.....	49
(4.2).	Parâmetros iniciais de referência aplicados à equação geral (5).....	51
(5.1).	Ajuste dos parâmetros da equação geral (5).....	53
(5.2).	Valores de incerteza calculados para cada um dos cinco ensaios.....	54
(5.3).	Valores de pressão MAP referência em cada ensaio.....	55
(5.4).	Valores de octanagem calculados para os cinco ensaios realizados.....	60
(5.5).	Comparação entre os valores de octanagem medida e esperada.....	61
(5.6).	Incerteza para os valores de octanagem medidas no módulo.....	62

1 INTRODUÇÃO

O módulo experimental apresentado neste trabalho tem o objetivo de servir como alternativa de baixo custo para determinação da octanagem de combustíveis, uma vez que para utilização do método tradicional usado pelas refinarias são necessários investimentos na ordem de US\$ 200.000 na aquisição de motores CFR, motores estes aceitos universalmente pelos fabricantes de combustíveis cujos procedimentos de operação e testes estão descritos nas normas da ASTM D2700 e D2699. O módulo experimental proposto permitirá medir-se com aceitável precisão e investimento na ordem de US\$ 10.000, os valores de octanagem na faixa de utilização comercial, o que pode tornar o método bastante viável se comparado à utilização de motores CFR.

Este módulo experimental, bem como os combustíveis ensaiados no mesmo foram preparados em conjunto com a Petrobrás, utilizando o laboratório de motores da Refinaria Alberto Pasqualini (REFAP) para construção e operação do módulo.

Para construção deste módulo, foi utilizado um motor automotivo da marca FIAT com 1.0 litro e volume da câmara de combustão reduzido para aumentar a taxa de compressão de 9,8: 1 para 12,72:1, favorecendo, com isso, o aparecimento da detonação. Para controle do motor foi utilizado um módulo de injeção programável da marca Electromotive o qual possibilitou a programação e o mapeamento de funcionamento do motor, bem como o monitoramento em tempo real dos parâmetros de funcionamento do mesmo. Os dados foram adquiridos por uma placa de aquisição de dados da marca “Computer Boards” integrada a placas de filtragem de sinais e sensores diretamente instalados no motor, que permitiram aquisição dos sinais. Para gerenciar o funcionamento da placa de aquisição, foi utilizado o software *Agilant Vee Pró 6.0* que permitiu ao final de cada aquisição exportar os dados adquiridos para o software Excel, onde as informações foram utilizadas para realização de cálculos e construção dos gráficos apresentados no final desta dissertação.

Os resultados dos valores de octanagem medidos para os combustíveis ensaiados no módulo experimental tiveram satisfatória precisão quando comparados com os resultados obtidos pelo motor CFR, cujo método e precisão são universalmente aceitos e podem ser vistos nos capítulos finais desta dissertação.

1.1 Motivação do trabalho

A capacidade de medir-se a octanagem dos combustíveis comercializados no Brasil se faz cada vez mais necessária, não só para possibilitar o desenvolvimento de novos motores e combustíveis, mas também no controle de qualidade dos combustíveis, pois é cada vez maior o número de casos de adulterações dos combustíveis pelo uso ilegal e indiscriminado de solventes misturados aos mesmos. Essa prática, além de prejudicar o funcionamento do motor e poluir o meio ambiente, reduz a vida útil dos motores devido aos efeitos nocivos da combustão anormal provocada pelos combustíveis adulterados, os quais, na maioria das vezes, provocam danos às partes mecânicas dos motores, principalmente às cabeças de êmbolos, como será mostrado no Capítulo 2 deste trabalho. Este motivo, aliado à vontade de criar-se uma metodologia mais econômica para medição da octanagem dos combustíveis, que motivaram a realização deste trabalho.

1.2 Revisão Bibliográfica.

O número de octanagem de uma gasolina é uma indicação da *performance* deste combustível sob variadas condições de funcionamento do motor. Duas diferentes taxas são utilizadas: Research Octane Number (RON) e o Motor Octane Number (MON). As gasolinas acabadas devem atender certas especificações de octanagem. Para isto, as refinarias controlam estes parâmetros durante a produção, e cuidam para que os combustíveis atendam as especificações antes de serem distribuídos ao consumidor final. O tradicional método de laboratório para determinação do número de octanagem é o que utiliza motores CFR para queimar a gasolina e comparar suas características com as de dois combustíveis de referência primária conhecidos [ASTM D2699 & ASTM D2700].

A tentativa de desenvolver outros métodos que possibilitem obter os resultados em menor tempo, ou até mesmo *on-line*, e que sejam mais baratos, não necessitando de mão-de-obra qualificada, tem feito com que surjam outros métodos tais como:

Espectrofotometria por infravermelho com transformada de Fourier (FTIR): A região do espectro eletromagnético permite o ajuste e a combinação de bandas fundamentais de C-H, O-H, e N-H. Para a medição o método de infravermelho utiliza-se de uma série de resultados de amostras armazenadas de combustíveis de número de octanagem conhecidos, desenvolvendo, desta maneira, um modelo quantitativo que permitirá medições em amostras futuras baseado somente nos modelos espectrais armazenados. Esta metodologia está fundamentada na medição por absorção de infravermelho de acordo com ASTM D5845.

Método de Variação Dielétrica: Análise comparativa de parâmetros da gasolina estudada com os de padrões de gasolina armazenados em um microprocessador de memória. O princípio deste método fundamenta-se na mudança das propriedades de permeabilidade dielétrica e de indução eletromagnética dos combustíveis comparados. O equipamento utilizado tem sua aplicação admitida pela federação russa e registro de estado (N 16464-97).

Os testes, segundo *o método tradicional*, são realizados utilizando os procedimentos das normas ASTM D2700 ou ASTM D2699 conforme o método a ser realizado: RON (Research Octane Number) ou MON (Motor Octane Number). Os procedimentos contidos nas normas consistem basicamente em:

- realizar uma calibração do motor CFR utilizando um combustível padrão de tolueno misturado a heptano e isoctano, conforme a faixa de octanagem que se quer ensaiar. Esta calibração consiste em ajustar a altura dos cilindros e a relação ar / combustível para que o motor opere em um padrão de intensidade de detonação que se situe no “*Knockmeter*” (medidor de detonação) entre 50 ± 2 mV. Este ajuste é tabelado na norma e leva rigorosamente em consideração a pressão atmosférica e a umidade e temperatura do ar de admissão.
- depois de calibrado o motor, as cubas e linhas de alimentação de combustível são drenados sendo então adicionada à amostra de combustível a ser testada, a qual depois de testada deve proporcionar uma intensidade de detonação entre 45 e 55 mV medidas no “*Knockmeter*”. Caso isto não ocorra deve-se recalibrar o motor com uma mistura de combustível padrão que atenda uma outra faixa de octanagem. Depois de verificada a intensidade de detonação e constatando-se estar na faixa aceitável, registra-se o primeiro valor para a amostra. Nesta etapa, drenam-se as cubas e introduz-se o primeiro combustível de referência com a octanagem conhecida de maneira que esta proporcione uma intensidade de detonação próxima da obtida pela amostra de combustível. Depois de verificada a intensidade de detonação, registra-se o valor.
- após ter rodado com o primeiro combustível referência, roda-se com o segundo combustível referência e registra-se seu valor de intensidade de detonação. Depois de realizada esta seqüência, a intensidade de detonação do combustível da amostra deve ficar entre as duas intensidades dos combustíveis de referência. Repete-se, então, mais uma leitura para cada um dos três combustíveis e anotam-se suas intensidades de detonação.

- na última etapa do teste, por interpolação dos valores médios de intensidade de detonação do três combustíveis, calcula-se o valor desconhecido da octanagem do combustível da amostra que deverá se encontrar entre os valores de octanagem do primeiro combustível de referência e do segundo combustível de referência.

Número de Octanagem Motor (MON): As condições de teste do método motor representam severas cargas e sustentadas altas velocidades. Para a maioria dos combustíveis hidrocarbonetos, incluindo ambos com ligações ou oxigenados, o número de octanagem motor (MON) será menor do que o número de octanagem de pesquisa (RON).

Tabela (1.1). Condições de teste (MON) para o motor CFR. Fonte: [ASTM D2700, 1998].

Condições de teste do Motor	Motor Octane Number
Método de Teste	ASTM D2700
Motor	CFR
Rotação do Motor (RPM)	900
Temperatura Ar de Admissão (°C)	38
Umidade do Ar (g H ₂ O/ kg ar seco)	3,56 - 7,12
Temperatura da mistura de Admissão (°C)	149
Temperatura do Refrigerante (°C)	100
Temperatura do Óleo (°C)	57
Ângulo de Ignição - variável	Vários c/ a taxa de compressão: 14 - 26 graus antes PMS.
Carburador Venturi (mm)	14,3

Número de Octanagem Pesquisa (RON): O método pesquisa representa as condições típicas de suave dirigibilidade, sem cargas pesadas consistentes no motor.

Tabela (1.2). Condições de teste (RON) para o motor CFR. Fonte: [ASTM D2699, 1998].

Condições de teste do Motor	Research Octane Number
Método de Teste	ASTM D2699
Motor	CFR
Rotação do Motor (RPM)	600
Temperatura Ar de Admissão (°C)	Várias c/ a pressão barométrica: 88kPa = 19,4°C, 101kPa = 52,2°C
Umidade do Ar (g H ₂ O /kg ar seco)	3,56 - 7,12
Temperatura da mistura de Admissão (°C)	Não Especificado
Temperatura do Refrigerante (°C)	100
Temperatura do Óleo (°C)	57
Ângulo de Ignição - variável	13 graus antes PMS.
Carburador Venturi (mm)	Ajustada de acordo com a altitude do motor: 0-500m = 14,3 mm, 500-1000m = 15.1 mm.

O método proposto por este trabalho será o da utilização do módulo experimental para determinação da octanagem, baseando-se na variação na pressão absoluta no coletor de admissão (MAP) provocada pela abertura da borboleta de aceleração, mantida a rotação do motor constante.

Tabela (1.3). Condições de teste para o Método Proposto

Condições de teste do Motor	Método Proposto
Método de Teste	Ver capítulo 2
Motor	FIAT Palio 1.0
Rotação do Motor (RPM)	1500
Temperatura Ar de Admissão (°C)	34
Umidade do Ar (g H ₂ O /kg ar seco)	Não Especificado
Temperatura da mistura de Admissão (°C)	Não Especificado
Temperatura do Refrigerante (°C)	88
Temperatura do Óleo (°C)	Não Especificado
Ângulo de Ignição - variável	26 graus antes PMS
Carburador Venturi (mm)	Não Especificado

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Combustão nos Motores de Ignição por Centelha

Na maioria dos motores convencionais de ignição por centelha a mistura ar-combustível é realizada no sistema de admissão, e induzido através das válvulas de admissão para o interior do cilindro, onde é misturado com gás residual remanescente e então é comprimida. Sobre condições normais, a combustão é iniciada antes do final do ciclo de compressão pela centelha de uma vela provocada por uma descarga elétrica. Seguindo a inflamação, uma turbulenta chama se desenvolve, conforme figura (2.1), propagando-se através da mistura de ar, combustível e gases de queima remanescentes até atingir as paredes da câmara de combustão onde é extinta [Heywood,1998].

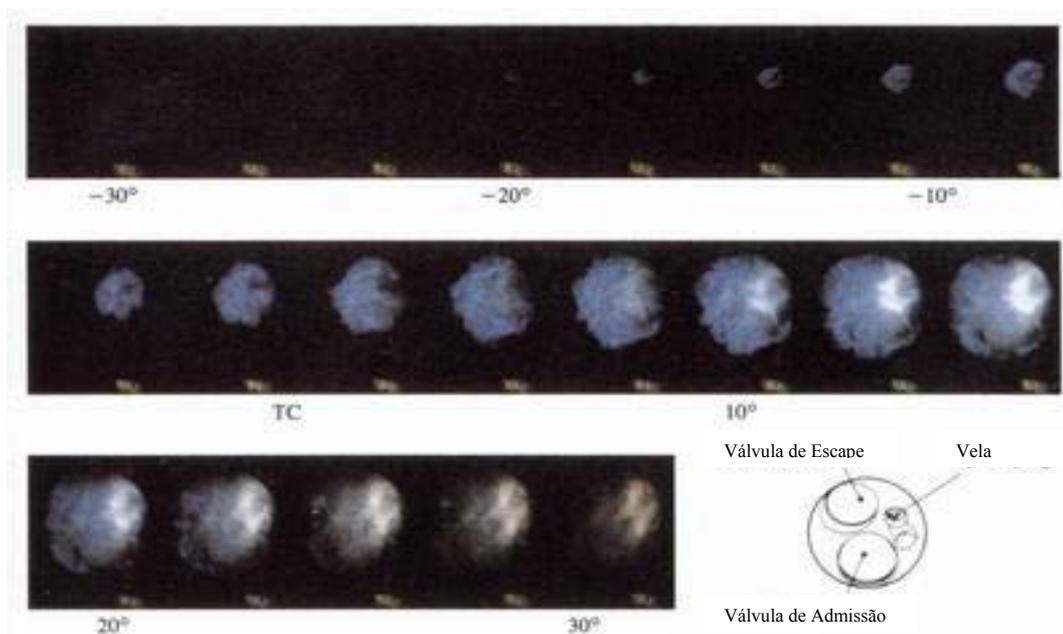


Figura (2.1). Desenvolvimento de chama em um processo de combustão. Fonte: [Heywood,1998].

A combinada duração do desenvolvimento da chama e o processo de propagação estão tipicamente entre 30 a 90 graus do ângulo de manivela. A combustão inicia antes do final do ciclo de compressão e continua até a parte inicial do ciclo de expansão, terminando no ciclo no ponto em que ocorre o maior pico de pressão no interior do cilindro. A pressão *versus* o ângulo de manivela apresentados na figura (2.2) permite entender por que o torque do motor (mantida a

velocidade do mesmo e as condições no coletor de admissão) varia à medida que é variado o ponto de centelha da vela com relação ao ponto morto superior (PMS).

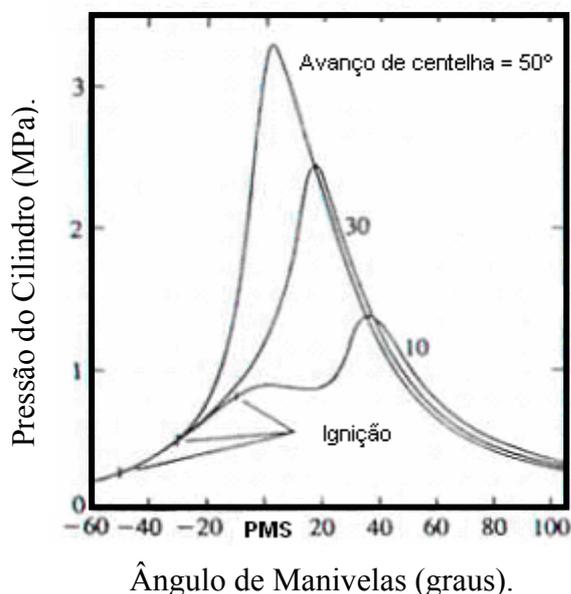


Figura (2.2). Pressão no Cilindro x Avanço de Ignição. Fonte: [Heywood,1998].

Se o início do processo de combustão através da ignição é progressivamente adiantado em relação ao PMS, o trabalho de compressão realizado pelo êmbolo e transferido para os gases, aumenta. Se o final da combustão é atrasado pelo retardo da ignição, o pico de pressão no cilindro ocorre mais tarde na expansão reduzindo sua magnitude. Estas mudanças reduzem o trabalho transferido na expansão pelos gases ao êmbolo do motor. A situação ótima é aquela na qual ocorre o máximo torque. Desta maneira o ponto de ignição avançado ou adiantado em relação a esta posição ótima resultará em menor torque e a ótima centelha de ignição ocorrerá no ponto que depende da taxa de desenvolvimento, propagação e comprimento da chama que viaja através da câmara de combustão do motor e do processo de extinção da chama que ocorre após esta atingir as paredes da câmara. Esta última, por sua vez, depende do projeto do motor e condições de operação, das propriedades da mistura de combustível, ar e gases de queima. A figura (2.3) apresenta os efeitos da variação na ignição no torque para um típico motor de ignição por centelha [Heywood,1998].

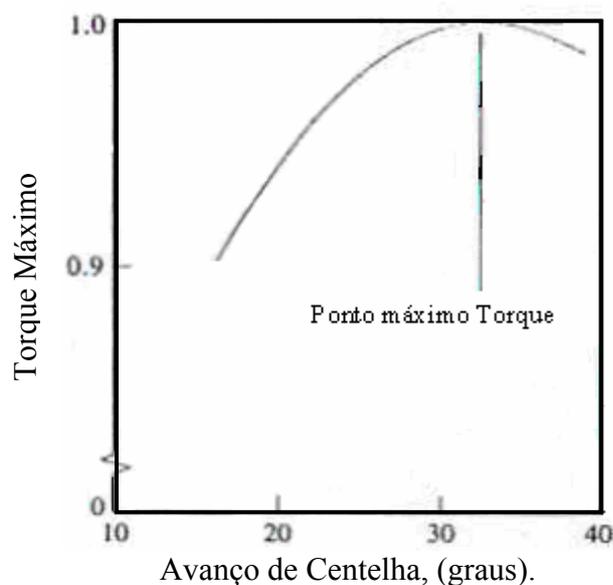


Figura (2.3).Variação do Torque x Avanço de Ignição. Fonte: [Heywood,1998].

2.2 Sistema de Gerenciamento do Motor

O sistema de gerenciamento do motor é uma das partes mais importantes da estratégia para reduzir a poluição automotiva. A vantagem do sistema é a habilidade do mesmo em manter a eficiência da combustão, assim melhorando a economia de combustível. A desvantagem é sua tendência de reduzir a potência devido aos ajustes realizados pelo mesmo. Um sistema básico de gerenciamento de um motor pode monitorar e controlar: massa do fluxo de ar, fluxo de combustível, avanço de ignição, percentual de oxigênio nos gases de escape (sensor lambda), sensor de detonação, válvulas, temperatura do gás de exaustão, temperatura do fluido refrigerante e temperatura do ar de admissão. O sensor de detonação pode ser um do tipo não ressonante instalado no bloco do motor, sendo capaz de medir uma ampla faixa de vibrações de detonação (5-15 kHz) com mínima mudança na frequência, ou um do tipo ressonante que tem uma excelente taxa de sinal de detonação entre 1000 e 1500 rpm. O sistema de gerenciamento do motor também pode compensar a altitude, a temperatura do ar ambiente, a octanagem do combustível e também controlar a partida a frio, e outros parâmetros operacionais [Kirk,1993].

O uso de combustível com octanagem demasiadamente baixa resulta em perda de economia e potência, pois o sistema de gerenciamento terá que mover os ajustes do motor para partes menos eficientes do mapa de *performance*. O sistema retarda o ângulo de avanço de ignição, a fim de reduzir a pressão no cilindro, conforme mostra a figura (2.4), até que somente um traço de detonação seja detectado, pois os danos devido à detonação, conforme descritos no capítulo 2.3.2, são mais conseqüentes do que a perda de potência ou economia de combustível.

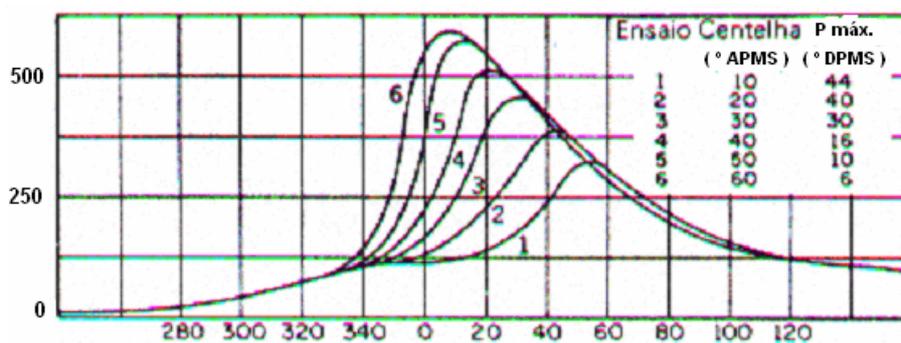


Figura (2.4). Avanço de Ignição x Pressão no cilindro em relação ao PMS. Fonte:[Taylor,1988].

A figura (2.5) apresenta as partes que compõe o sistema de gerenciamento do motor :

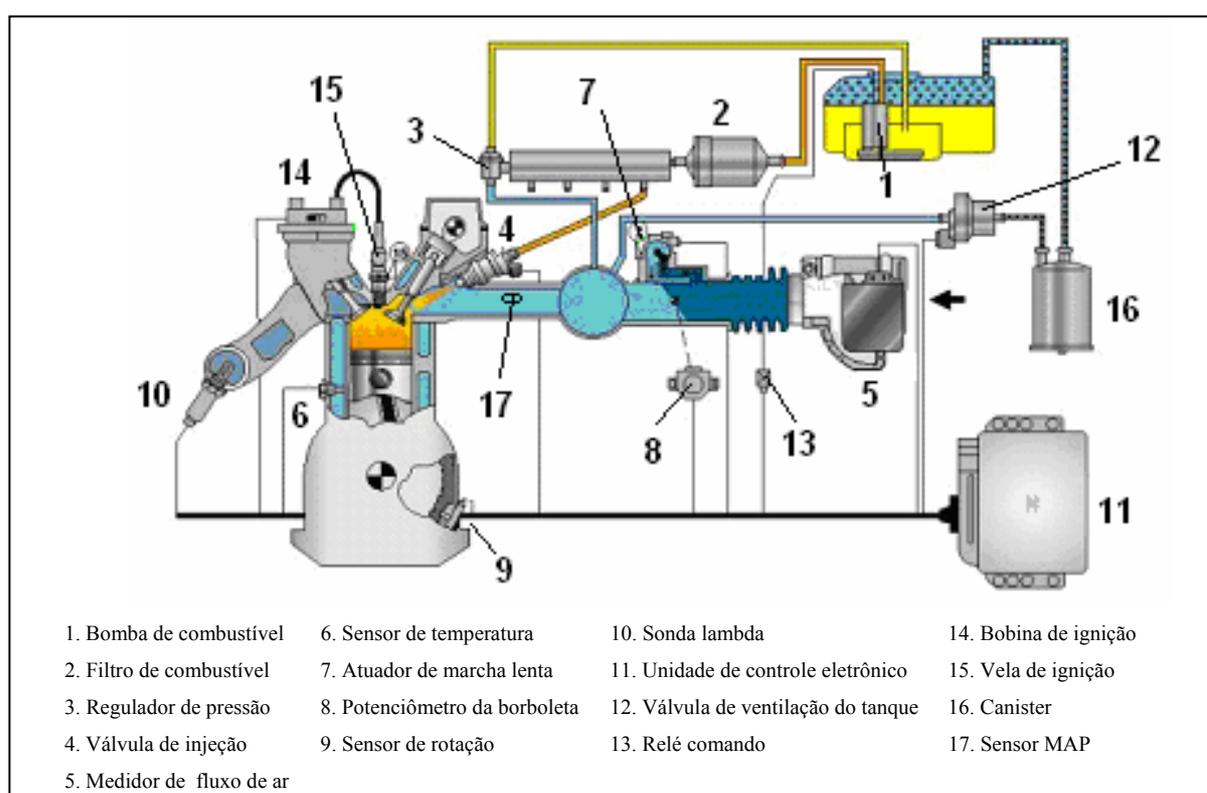


Figura (2.5). Sistema de Injeção Eletrônica. Fonte: [Envenenado, 2003].

Os motores automotivos modernos vêm equipados com sistema de injeção eletrônica, que gerencia e controla todo o funcionamento dos motores através da ECU (Eletronic Control Unit), ou ainda em português, Unidade de Controle Eletrônico (UCE), onde se encontra o mapeamento do funcionamento dos motores sobre as diferentes condições de uso. Podem-se ter as relações mais otimizadas em cada instante para que o motor funcione sem problemas, muitas vezes, até mascarando alguma situação desfavorável ao funcionamento do mesmo, como por exemplo, alteração no sincronismo de ignição devido à má qualidade do combustível utilizado.

2.2.1 Sensor de Oxigênio.

O sensor de Oxigênio, ou comumente conhecido como sonda Lambda tem como função gerar um sinal elétrico para que a unidade de comando possa variar a quantidade de combustível injetado, garantindo uma mistura ar / combustível ideal, o que reduz o nível de emissão de gases poluentes.

Sua construção consiste em um corpo cerâmico de óxido de zircônio, cuja superfície é provida de eletrodos de platina permeáveis a gás. A atuação da sonda lambda baseia-se no fato do material cerâmico ser poroso e permitir uma difusão do oxigênio do ar. A cerâmica torna-se condutora em temperaturas elevadas. Havendo uma diferença de teor de oxigênio entre os lados (o lado em contato com o gás de escape e o outro em contato com o ar ambiente) será gerada uma tensão elétrica entre os eletrodos, que será utilizada pela unidade de comando para corrigir o tempo de injeção.

A sonda lambda é responsável pela identificação de qualquer anomalia na queima através do teor de oxigênio, informando a UCE para que a mistura possa ser melhorada.

A sonda lambda de Zircônio e Ítrio é o tipo mais difundido atualmente. É constituída de um elemento de cerâmica (óxido de zircônio e óxido de Ítrio). Esse elemento está recoberto interna e externamente por uma camada de platina que cumpre a função de eletrodo.

A face interna (eletrodo de referência) está em contato com a atmosfera e a externa com os gases de escape. O elemento de zircônio, a uma temperatura acima de 300°C, conduz os íons de oxigênio, gerando uma tensão elétrica. Esta tensão elétrica é gerada se a concentração de oxigênio na parte interna e externa do elemento for diferente. O fator lambda dos gases com concentração inferior a 0,3% de 1, caracterizando mistura rica, darão origem a uma tensão > 800 mV e com concentração superior a 0,5% de 1 caracterizando mistura pobre darão origem a uma tensão < 200 mV. A figura (2.6) mostra que quando a mistura ar / combustível se aproxima da relação ideal (estequiométrica; $\lambda = 1$) existe uma variação brusca na tensão gerada, entre 0 e 1000 mV.

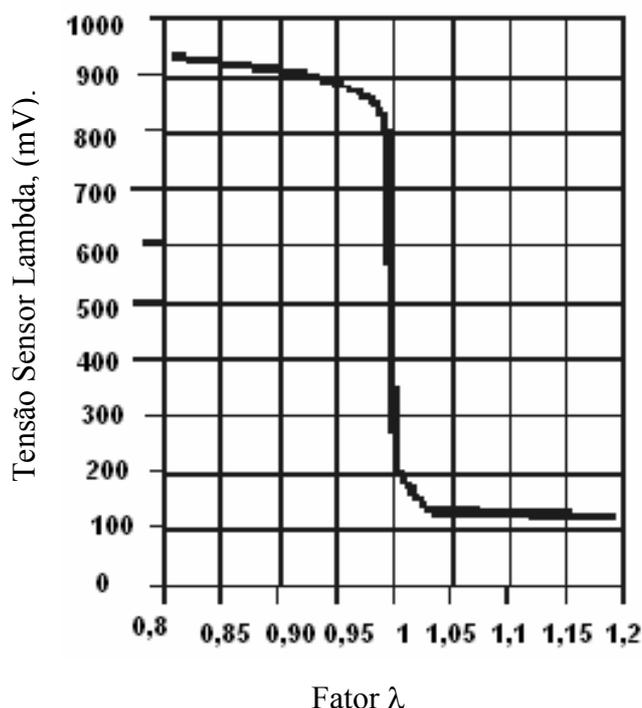


Figura (2.6). Curva característica de uma sonda lambda. Fonte:[NGK, 2003].

A UCE usa a voltagem produzida pela Sonda Lambda para instruir o sistema de mistura de combustível para enriquecer ou empobrecer a mistura. Visto que o sensor apenas produz a voltagem quando o elemento está acima de 300°C, o gás de escape leva algum tempo para aquecer o elemento a esta temperatura, após o motor ter sido acionado. Para reduzir o tempo que leva para o sensor começar a funcionar, muitos sensores hoje em dia, possuem um sistema de aquecimento interno. Com isto as sondas de zircônio e Ítrio podem ser de 2 tipos:

aquecidas: possuem um resistor interno que provoca a entrada em funcionamento independente da temperatura dos gases, podendo ser de:

- três fios: dois fios para alimentação do aquecedor; um fio para o sinal; o retorno do sinal é feito através do chassi.
- quatro fios: dois fios para alimentação do aquecedor; os outros dois para o sinal e o retorno de sinal; este último está isolado da carcaça.

sem aquecimento: não existe o resistor interno, e a entrada em funcionamento (temperatura superior a 300°C) depende da temperatura dos gases de escape. Possuem geralmente, só um fio, o de sinal.

Quando a sonda está ligada à unidade de comando eletrônico (UCE), e está inoperante (fria), podem-se apresentar duas situações, dependendo do circuito de entrada da unidade de comando:

- o sinal assume um valor de tensão de aproximadamente 0,05 Volts. Este é o caso do sistema sem aquecimento com representação esquemática na figura (2.7a).

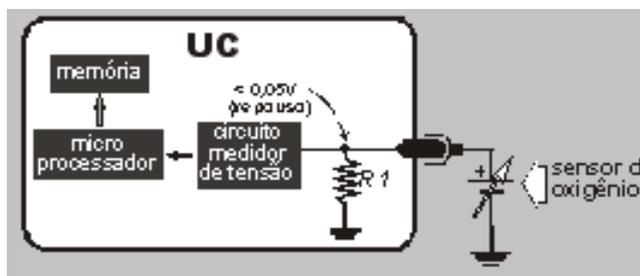


Figura (2.7a). Circuito de comunicação sonda lambda x UCE, sistema sem aquecimento.

Fonte: [NGK, 2003].

- o circuito de entrada na unidade de comando impõe um valor de tensão de aproximadamente 0,45 Volts. Este é o caso do sistema com aquecimento com representação esquemática na figura (2.7b).

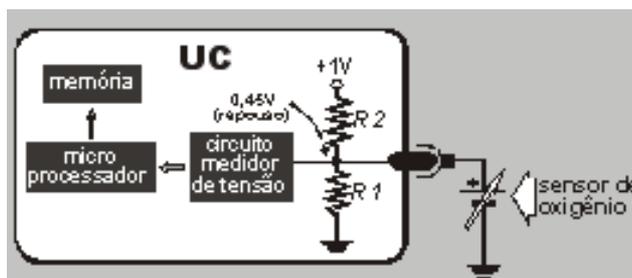


Figura (2.7b). Circuito de comunicação sonda lambda x UCE, sistema com aquecimento.

Fonte: [NGK, 2003].

2.2.2 Sensor de Detonação.

Durante os diversos regimes de funcionamento dos motores, podem ocorrer combustões aleatórias popularmente denominadas “batidas de pinos” ou detonações. Essas detonações dão origem a vibrações mecânicas dentro da câmara de combustão as quais são prejudiciais ao rendimento e a vida útil do motor. O sensor de detonação está normalmente parafusado no bloco do motor e tem como elemento sensor um cristal piezo-elétrico. Esse material quando é submetido a deformações mecânicas, gera tensões elétricas em sua superfície. Dessa forma, o sensor é capaz de captar (“ouvir”) as vibrações provocadas pelo fenômeno da detonação, transformando-as em sinal elétrico o qual é enviado à unidade de comando eletrônico do sistema (UCE). Quando a UCE detecta sinal de detonação do sensor, atrasa o ponto de ignição

(obedecendo a uma estratégia específica para cada sistema de injeção) objetivando solucionar o problema. Uma vez desaparecida a detonação a UCE volta, em pequenos passos, ao ângulo de avanço inicial, que é por volta de 12 graus antes do PMS. Na figura (2.8) são mostrados alguns modelos dos sensores de detonação.



Figura (2.8). Sensores de Detonação. Fonte: [Injetronic, 2003].

2.2.3 Sensor de posição da borboleta aceleradora (TPS).

O sensor de posição da borboleta aceleradora ou TPS (*Throttle Position Sensor*) está comumente posicionado na extremidade oposta ao came do acelerador, conforme mostrado na figura (2.9). Este sensor consiste num potenciômetro cuja função é traduzir o ângulo de abertura da borboleta de aceleração em um sinal elétrico e enviá-lo a UCE. A UCE obtém informações de acelerações ou desacelerações realizadas pelo motorista. Essas informações são utilizadas no auxílio do cálculo do tempo de injeção (tempo de abertura das válvulas injetoras) instantâneo e conseqüentemente no controle das condições de marcha lenta, freio motor, aceleração rápida, *Dash-Pot (amortecimento)*, plena carga e carga parcial. Na grande maioria dos sistemas a UCE alimenta o TPS com uma tensão de referência de aproximadamente 5 volts contínuos. A resposta do sensor varia entre sinais maiores que zero e menores que 5 volts contínuos. O TPS pode ser simples, possuindo apenas uma pista resistiva (como na maioria dos sistemas nacionais) ou duplo, com duas pistas resistivas.

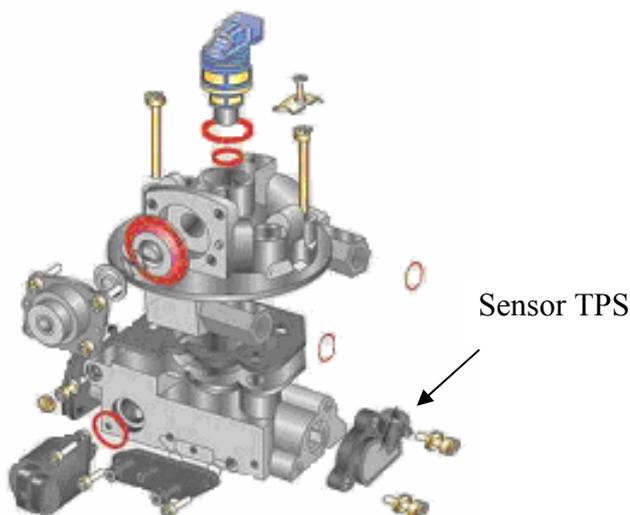


Figura (2.9). Sensor de Posição da Borboleta Aceleradora (TPS). Fonte: [Oficina Brasil, 2003].

2.2.4 Sensor de Pressão Absoluta no Coletor de Admissão (MAP).

O sensor de pressão absoluta no coletor de admissão - MAP (*Manifold Absolute Pressure*) informa a UCE a variação da pressão no interior do coletor de admissão, ou seja, informa a pressão a que está submetido o ar aspirado pelo motor. Em marcha lenta, quando a borboleta de aceleração está totalmente fechada, a pressão no interior do coletor de admissão é baixa (alta depressão). Com a borboleta totalmente aberta, a pressão no interior do coletor de admissão é alta (baixa depressão). A UCE utiliza as informações recebidas do sensor MAP para realizar os cálculos do avanço da ignição e da quantidade de combustível a ser injetado no motor. O sinal do MAP também é utilizado para medir a pressão atmosférica local. Com essa informação, o sistema é capaz de se adequar automaticamente às variações de altitude. O MAP mede a pressão atmosférica toda vez que é ligada à ignição. O sensor MAP pode ser analógico ou digital. Ambos são alimentados pela UCE com uma tensão de referência de aproximadamente 5 volts contínuos. O analógico envia a UCE um sinal de tensão de corrente contínua cuja intensidade varia com a depressão do coletor de admissão. O digital fornece a UCE um sinal pulsado (pulsos de corrente contínua - em forma de onda quadrada) cuja frequência varia com a depressão no coletor de admissão. No caso de falha do sensor MAP, a unidade de comando controlará a quantidade de combustível e o ponto de centelhamento, baseado num valor de substituição. Este valor leva em consideração, principalmente, o sinal do sensor de posição da borboleta (TPS).

Para se calcular o volume de combustível a ser injetado, a unidade de comando se baseia na temperatura do ar admitido e pressão do coletor (para se saber a densidade) e mais as informações de rotação e taxa de cilindrada do motor. Com essas informações, é possível definir a quantidade de combustível a ser injetado, mantendo-se a proporção ideal de mistura ar / combustível.

O sensor MAP mostrado na figura (2.10) trabalha com uma pequena membrana de cristal do tipo "piezo-resistivo" que varia sua resistência de acordo com o grau de deformação desta membrana. Quanto maior for o grau de deformação, maior será a sua resistência e menor será a tensão recebida pela unidade de comando (maior no sensor).

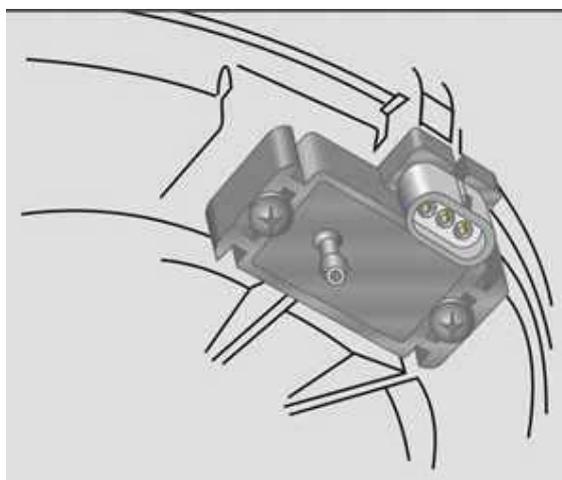


Figura (2.10). Sensor MAP. Fonte:[Injetronic, 2003].

2.2.5 Sensor de rotação e posição da árvore de manivelas.

Na árvore de manivelas há uma roda dentada (fônica) com 58 dentes com um vazio pela falta de dois dentes. O vazio indica o ponto morto superior (PMS) dos cilindros 1 e 4. O cabo é blindado, aterrado à unidade de comando para limitar as interferências.

Conforme mostrado na figura (2.11), o sensor consiste de um conjunto bobina / imã permanente que gera uma tensão alternada, quando a roda fônica gira.

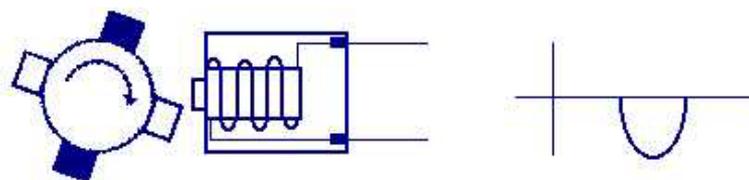


Figura (2.11). Representação do conjunto bobina / ímã permanente. Fonte: [IPUC, 2003].

Esta tensão é de aproximadamente 200 milivolts quando a rotação do motor está abaixo de 60 rpm e 120 volts quando a rotação do motor está acima de 6000 rpm. A tensão gerada depende da distância da roda de 58 dentes em relação ao sensor. A folga deve ser de aproximadamente 1mm.

Quando o dente da roda fônica aproxima-se do sensor, a tensão começa a subir positivamente devido à variação do fluxo magnético, quando o dente da roda fônica se alinha perfeitamente com o sensor, a tensão nesse ponto é nula (0 volt).

Quando se inicia o desalinhamento, a tensão começa a subir negativamente devido à variação do fluxo magnético, quando o dente da roda fônica estiver totalmente desalinhado com o sensor, a tensão volta a ser nula (0 volt).

O sinal de rotação e posição da árvore de manivelas é o mais importante para o sistema de injeção/ ignição eletrônica. É através desse sinal que a unidade de comando controla a maioria dos atuadores, como o módulo de ignição, as válvulas injetoras, o relé da bomba de combustível, etc.

Trata-se de um sinal extremamente complexo, pois, diferente de outros sensores, sua tensão gerada é alternada (sinal analógico). Também ocorre a variação do seu valor (ora tensão baixa- marcha lenta, ora tensão alta- plena carga).

A unidade de comando, deve converter esse sinal analógico em digital e também estabilizar sua tensão máxima (no caso, 5 volts). A frequência desse sinal convertido determina a rotação do motor.

2.3 Combustão Anormal

A combustão anormal revela-se de várias maneiras nos vários processos de combustão anormais existentes, porém dois tipos têm maior importância prática, que são: ignição de superfície (pré-ignição) e a detonação. A detonação tem sido um fator limitante na geração de potência em motores de combustão interna desde sua descoberta por Otto, para ajustar um motor para trabalhar em máxima potência, necessita-se entender o mecanismo e os problemas provocados pela combustão anormal. Estes fenômenos de combustão anormal são preocupantes pois quando severos podem causar danos aos motores, e quando não provoca danos, provocam: perda de potência, redução da longevidade e emissões de gases prejudiciais ao meio ambiente. Além de fazer com que o motor funcione como uma fonte de barulho.

2.3.1 Ignição de Superfície ou Pré-ignição.

A ignição de superfície é a ignição da mistura ar-combustível pelo superaquecimento das válvulas, velas, depósitos, ou por qualquer outro ponto quente no interior da câmara de combustão do motor, ou seja, é ignição provocada por outras fontes que não seja centelha da vela. Ela pode ocorrer antes da ignição pela vela (pré-ignição) ou após normal ignição (pós-ignição), podendo produzir uma única chama ou muitas chamas. A combustão incontrolada provocada pela pré-ignição é mais evidente e tem seus efeitos mais severos, no entanto, a ignição de superfície que ocorre após a centelha da vela (pós-ignição) acaba sendo controlada pelo processo de combustão. As ignições de superfície podem resultar em detonação.

2.3.2 Detonação

Detonação é o mais importante fenômeno de combustão anormal, também conhecido como “batida” devido ao barulho que resulta da auto-ignição da porção de mistura ar-combustível e gases residuais chamado de gás extremo, representado na figura (2.12) pela letra “U”, que se encontram à frente do avanço de chama, representada pela letra “A”.

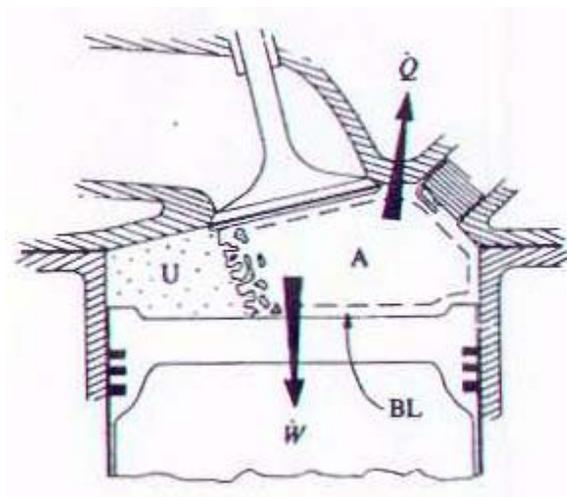


Figura (2.12). Gás extremo (U) à frente do avanço de chama (A). Fonte: [Heywood,1998].

À medida que à frente de chama avança através da câmara de combustão, esta mistura não queimada é comprimida causando aumento da sua pressão, temperatura e densidade. Uma parcela desta mistura pode, então sofrer reações químicas antes que ocorra a combustão normal. O produto destas reações pode sofrer auto-ignição espontaneamente e rapidamente liberar grande parte ou toda a energia química, conforme demonstrado na figura (2.13). Quando isto acontece, o gás extremo queima muito rapidamente, liberando sua energia a taxas de 5 a 25 vezes mais

rápido do que a combustão normal, e isto provoca uma alta frequência de oscilação da pressão no interior da câmara de combustão que produz um barulho metálico chamado detonação [Heywood,1998].

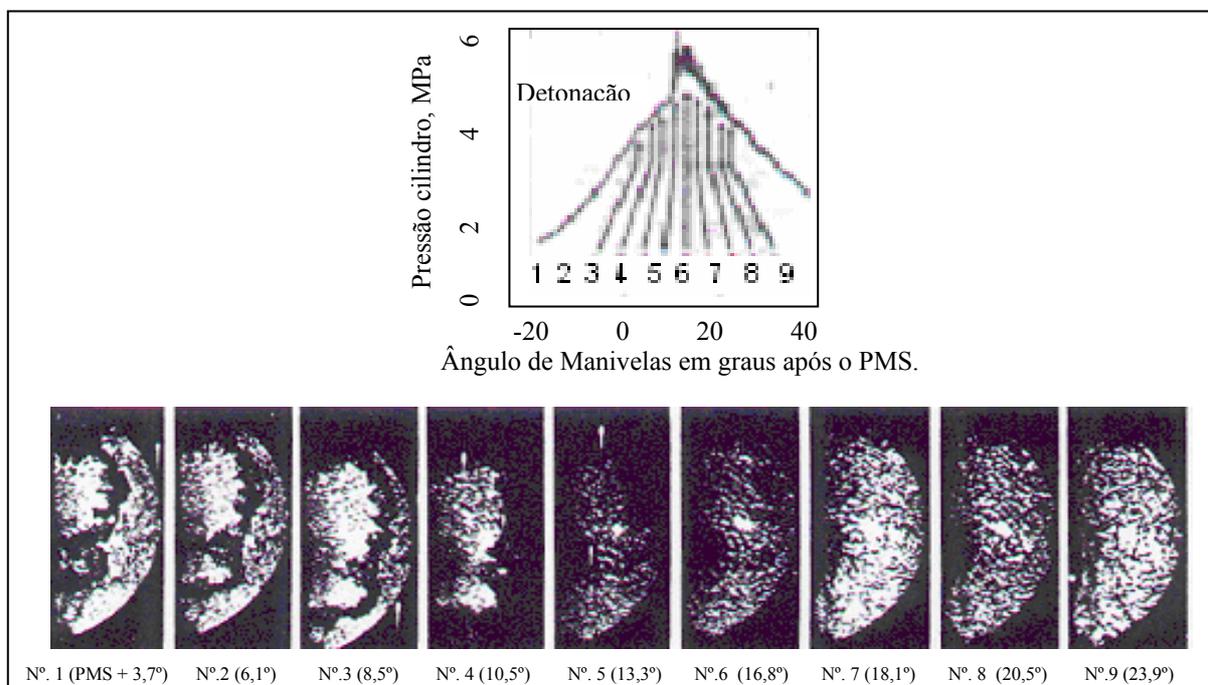


Figura (2.13). Combustão Anormal com Detonação. Fonte: [Heywood,1998].

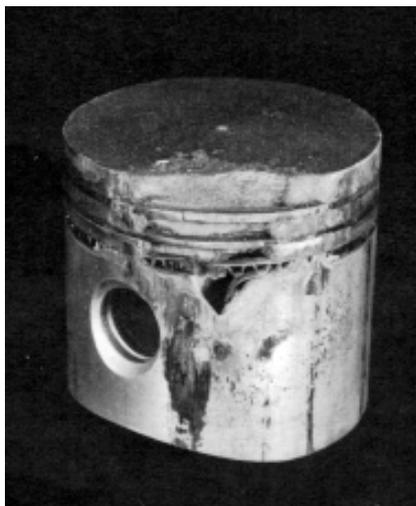
A detonação em motores de combustão interna tem recebido grande importância e atenção no projeto de motores e seleção de combustíveis. A detonação pode provocar superaquecimento em pontos das velas, com a resultante pré-ignição, isto é, ignição anterior à ocorrência da centelha. A pré-ignição severa provoca perda de potência e de economia, uma situação insatisfatória que frequentemente avaria o motor. Mesmo sem pré-ignição, a detonação severa, sustentada por longos períodos, frequentemente avaria os êmbolos de alumínio e os cabeçotes. As figuras (2.14 a-b-c-d) mostram os efeitos típicos desta avaria.



(2.14a)



(2.14b)



(2.14c)



(2.14d)

Figuras 2.14(a-b-c-d) – Efeito típico de avaria provocada pela detonação.

Fonte: [Hastings, 2003].

As válvulas de descarga e os anéis de segmento parecem sofrer com a detonação severa e duradoura. A avaria decorrente da detonação pode eventualmente conduzir a uma completa avaria das peças afetadas.

O mecanismo exato que provoca avarias como o mostrado nas figuras (2.14 a-b-c-d) não é conhecido. Parece improvável que apenas a alta pressão seja responsável, pois, nos motores em que peças susceptíveis operam relativamente frias, como nos motores não-sobrecarregados resfriados a líquido, nenhuma avaria é evidente mesmo após meses de operação com severa detonação. Uma explicação mais razoável do mecanismo de avaria reside no fato de as ondas de pressão aumentarem a taxa de transmissão de calor e, então, também a temperatura das peças susceptíveis, provocando fusão local do material ou enfraquecendo a tal ponto, que a alta pressão local provoca erosão.

Segundo Bierman, as temperaturas do cilindro não se elevam pela detonação até que a potência aumente 12% acima da potência do primeiro ruído audível [Taylor, 1988].

Devido ao ruído duvidoso, analogamente à pré-ignição ou à possibilidade de séria avaria, a detonação é um fator importante que limita a potência e a eficiência dos motores de ignição por centelha. Sem detonação, poderiam ser usadas grandes razões de compressão, dando eficiências e potências mais elevadas, ou, por outro lado, elevadas pressões de admissão poderiam ser usadas nos motores supercarregados, contribuindo para obtenção de elevadas potências. Esses fatos contribuem para os esforços contínuos no sentido de se descobrirem e produzirem fluidos

com reduzidas tendências à detonação, e para se desenvolverem projetos de cilindros e sistema de ignição que reduzam a tendência à detonação.

Segundo Ricardo 1922, a detonação decorre da auto-ignição do gás extremo, que é aquela parte da carga que ainda não foi consumida na reação normal na frente de chama. Quando a detonação ocorre, é por que a compressão do gás na extremidade, devido à expansão da parte queimada da carga, eleva sua temperatura e pressão a um ponto que o gás extremo sofre auto-ignição. Se a reação de auto-ignição é suficientemente rápida e uma quantidade suficiente de gás extremo é envolvida, a detonação pode ser observada.

Conforme visto até agora, é evidente que um requisito primário para que a detonação seja possível em um motor, consiste em ser o período de reação da mistura não queimada mais curto do que o período do percurso normal da chama de ignição pela mistura. Um segundo requisito consiste em ser a reação suficientemente intensa para que se provoquem ondas sensíveis de pressão. Em um motor, a quantidade de energia da onda de pressão provocada pela detonação dependerá da massa de gás extremo que sofre auto-ignição e da taxa de reação no processo de auto-ignição. Assim, com dada taxa de reação, quanto mais cedo ocorrer à detonação no processo de combustão, mais gás extremo participará e maior será a intensidade da detonação.

No serviço com um motor em operação normal, se as condições são modificadas no sentido da detonação, por exemplo, pelo aumento da pressão de admissão, o operador usualmente toma alguma atitude para evitar ulterior aumento em sua severidade quando a detonação se torna audível. Na operação de veículos de estrada, por exemplo, o operador usualmente, não abrirá a válvula além do ponto em que a detonação se torna audível. Nas experiências de detonação, o procedimento usual consiste em partir-se de condições que não produzem detonação e, então, gradualmente aproximar do ponto onde a detonação pode ser detectada, em cujo caso, denomina-se detonação incipiente ou marginal. Aqui, a detonação ocorre muito próximo do pico de pressão do ciclo [Taylor,1988].

2.4 Origem da taxa de octanagem.

Desde 1912 a taxa de compressão dos motores de combustão interna de ignição por centelha tem sido limitadas pelas “batidas não desejadas” que poderiam destruir rapidamente os motores. “Bater” é uma descrição muito boa do som ouvido de um motor usando o combustível com baixo número de octanas.

No início o sistema de ignição da bateria foi responsabilizado pela ocorrência da batida, pois o mesmo tinha sido adicionado junto com a partida elétrica.

Porém logo os projetistas de motores desmistificaram esta idéia e souberam que para melhorar a potência e a eficiência deveriam controlar a detonação. Foi atribuído então a Midgley, Jr., a tarefa de encontrar a causa exata das detonações. Ele então usou a monografia de Dobbie-McInnes para demonstrar que as detonações não surgiam a partir de pré-ignição como havia anteriormente sido sugerido, mas de uma elevada ascensão da pressão após a ignição. A monografia não era apropriada para uma pesquisa mais aprofundada, assim Midgley e Boyd desenvolveram uma câmara de elevada velocidade para ver o que estava acontecendo e um medidor de detonação. Ricardo tinha desenvolvido um conceito alternativo para determinação da mais alta taxa de compressão útil, porém seus números não eram de posição absoluta, pois havia muitas variáveis, tais como o ângulo de avanço de ignição, limpeza, centelha da vela, temperatura do motor, etc. [Midgley,1939].

Em 1927, Edgar Graham sugeriu utilizar dois hidrocarbonetos que poderiam ser utilizados na pureza e quantidade suficiente, o “Heptano normal” que já era obtido em pureza suficiente a partir da destilação do óleo de pinho, e um octano nomeado de pentano 2,4,4 trimetil, que era primeiramente sintetizado e que hoje é chamado de iso-octano. O octano teve um valor antidetonante elevado o que sugeriu utilizá-lo misturado a heptano, formando assim, combustíveis de referência. Isto demonstrou que todas as gasolinas disponíveis comercialmente poderiam ser correlacionadas entre misturas de 40:60 e de 60:40 de heptano: Iso-octano.

A razão para utilizar o heptano e o iso-octano normais é que ambos tem propriedades similares de volatilidade, ponto de ebulição específico, assim, as relações de 0:100 e 100:0 não devem exibir diferenças grandes na volatilidade, o que poderia afetar o teste de avaliação.

Tabela (2.1)- Propriedades dos hidrocarbonetos. Fonte:[Gasoline FAQ, 2003].

Hidrocarboneto	Ponto de Fusão (°C)	Ponto de Fervura (°C)	Densidade g/ml	Calor de Evaporação (MJ/kg)
Heptano Normal	-90,7	98,4	0,684	0,365 @ 25°C
Iso-Octano	-107,45	99,3	0,692	0,308 @ 25°C

Após terem sido padronizados combustíveis de referência, uma faixa ampla de motores e condições de testes apareceu, mas hoje, as mais comuns são: “Research Octane Number” (RON), e a “Motor Octane Number” (MON).

2.4.1 Taxa de octanagem real.

Para obter-se a máxima energia a partir da gasolina, a mistura ar-combustível dentro da câmara de combustão necessita queimar-se uniformemente à medida que a chama propaga-se desde a centelha de ignição até que todo o combustível tenha sido consumido. Isto fará com que seja entregue ao ciclo a melhor potência. Na prática, uma série de reações de pré-chama ocorrerá no ainda não queimado “gás extremo” que se encontra na frente da chama que percorre a câmara de combustão, antes que esta chegue à parede oposta da mesma. Se estas reações formarem espécies ou moléculas que possam sofrer auto-ignição antes que a frente de chama chegue, então ocorrerá a detonação. [Westbrook,1992].

A octanagem dos combustíveis reflete a habilidade do gás extremo resistir à auto-ignição espontânea quando submetido às condições de teste utilizadas. Se a auto-ignição ocorrer isto resultará em um aumento extremamente rápido da pressão com ambas as chamas tanto a desejada gerada pela centelha de ignição como a indesejada chama do gás extremo expandindo-se no interior da câmara. O pico combinado da pressão chega ligeiramente antes do pico normal da pressão operando em condições normais, provocando uma perda de potência e um superaquecimento eventual. As ondas de pressão do gás extremo sobrepõem a onda principal de pressão, originando um tipo de onda que oscila em forma de dente de serra, conforme mostrado na figura (2.15), criando um som de batida. A combinação de pressão intensa e superaquecimento podem conduzir a falhas no êmbolo, em alguns minutos. A detonação e a pré-ignição são favorecidas por altas temperaturas, assim, uma pode conduzir a outra. Sobre circunstâncias de elevada velocidade as detonações podem conduzir à pré-ignição, que acelera a destruição do motor.

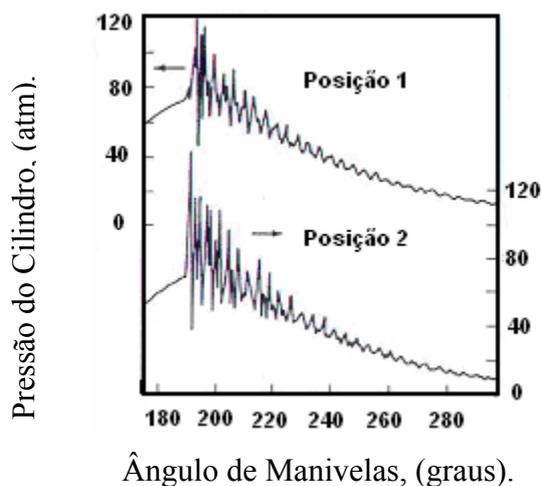


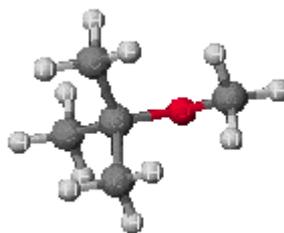
Figura (2.15). Forma de onda provocada pela detonação. Fonte:[Heywood,1998].

2.4.2 Propriedades do combustível e teste de octanagem.

A propriedade do combustível medida pelo teste de octanagem é a habilidade do gás extremo resistir à ignição espontânea sob as condições de teste especificadas. Dentro da estrutura química dos combustíveis está a habilidade de suportar as condições de pré-chama sem decompor-se em espécies que sofram auto-ignição antes que à frente de chama chegue. Os mecanismos diferentes da reação que ocorrem em vários estágios do curso de compressão da pré-chama são responsáveis pelas indesejáveis auto-ignições do gás extremo. Durante a oxidação de combustíveis de hidrocarboneto, os átomos do hidrogênio são removidos um de cada vez da molécula por reações com as espécies radicais pequenas (tais como o OH e o HO₂), e átomos de O e de H. A força de ligações carbono-hidrogênio depende de como o carbono é conectado. As cadeias retas de HC tais como as da heptano normal têm ligações secundárias do C-H que são significativamente mais fracas do que as ligações existentes do C-H em cadeias HC ramificados como o iso-octano [Westbrook,1992].

A taxa de octanagem dos hidrocarbonetos é determinada pela estrutura da molécula. Quanto mais longas e retas são as cadeias, maior é a quantidade de espécies de fácil auto-ignição produzidas pela decomposição devido a pré-chamas, enquanto que hidrocarbonetos ramificados e aromáticos são mais resistentes. Na prática, o gás extremo não queimado encontra-se a temperaturas acima de 700 °C devido à compressão e ao calor radiante e condutivo, começando então, uma série de reações de pré-chama. Estas reações ocorrem em diferentes estágios termais, com o estágio inicial (abaixo de 400 °C) começando com a adição do oxigênio molecular aos radicais de alquila, seguido pela transferência interna do átomo de hidrogênio para o novo radical formando uma espécie instaurada contendo oxigênio. Estas novas espécies são suscetíveis a cadeias ramificadas contendo radical HO₂ durante o estágio de temperaturas intermediárias (400-600°C), onde formam, principalmente, radicais de OH. Acima de 600°C a mais importante reação que produz cadeias ramificadas é a reação de um átomo de hidrogênio radical com um oxigênio molecular para formarem radicais de O e OH.

A adição de aditivos tais como de ligação alquila e oxigenados podem afetar significativamente a reação de pré-chama. Os aditivos antidetonantes, conforme ilustrado na figura (2.16), trabalham pela interferência em diferentes pontos na reação de pré-chama com os oxigenados retardando as indesejáveis reações de baixa temperatura, e os componentes da ligação alquila reagindo em regiões de temperatura intermediária para desativar a ramificação indesejável da cadeia principal [Westbrook,1992].



Metil Terciário Butil Éter (MTBE).

Figura (2.16). Aditivo antidetonante da gasolina. Fonte: [Westbrook,1992].

A habilidade antidetonante dos hidrocarbonetos está relacionada à “temperatura de auto-ignição” e não está relacionada substancialmente a energia contida no combustível, pois os oxigenados tem menor energia contida, mas alta octanagem, e nem a velocidade de chama da mistura convencional inflamada que deve ser evidente a partir da similaridade com os dois hidrocarbonetos de referência. Embora a velocidade de chama tenha importância menor, se comparada a outros fatores mais importantes tais como a taxa de compressão, estequiometria, forma da câmara de combustão, estrutura química do combustível, presença de aditivos antidetonantes, número e posição das velas de ignição, turbulência e etc., a velocidade de chama não é correlacionada com a octanagem.

2.4.3 Taxa de octanagem no âmbito comercial.

O nome correto para a fórmula $(RON + MON)/2$ é “índice antidetonação” (IAD) e representa o mais importante critério de qualidade para os motoristas .

O método inicial de medição de detonação desenvolvido em 1928 resultou em uma diversidade de condições e métodos de testes para motores, muitos dos quais tinham sido sumarizados por Campbell e Boyd. Em 1928 o comitê CFR “Co-operative Fuel Research” formou um sub-comitê para desenvolver um aparato e procedimentos para um teste uniforme de antidetonação. O resultado foi à criação de um motor de um único cilindro com válvulas na cabeça, refrigerado a água, compressão variável, diâmetro de cilindro de 3,5 polegadas e curso de 4,5 polegadas. O indicador de detonação era do tipo *Bouncing-pin* (pino saltitante). Eles selecionaram, no início condições de operação do motor o mais próximo possível das condições atuais do Método Pesquisa (RON), no entanto, correlacionando os dados dos testes com as octanagens de estrada no início dos anos 30 exibiu-se uma grande discrepância e então as condições foram mudadas para (mais alta velocidade do motor, temperatura de mistura quente, e definiram perfil de avanço de ignição), e uma nova tentativa ASTM de método de taxa de octanagem foi produzida. Este método tinha como similar às condições de operação do atual

método de octanagem motor (MON). Durante várias décadas, um grande número de métodos de testes de octanagens alternativos apareceram, estes foram variações ou do *design* de motores, ou das condições de operação especificadas. Entre 1950 e 1960 tentativas foram feitas, para internacionalmente padronizar-se e reduzir o número de procedimentos de testes de octanagem. Entre o final dos anos 40 e a metade dos anos 60, o método pesquisa (RON) tornou-se a mais importante taxação porque ele estava mais próximo de representar os requerimentos de octanagem dos motoristas usando combustíveis, veículos e estradas disponíveis. No final dos anos 60, os fabricantes de carros alemães descobriram que seus motores estavam sendo destruídos em funcionamento ao longo das *autobahns*, mesmo estando dentro das especificações de RON. Eles descobriram que ambos MON e a sensibilidade (Diferença numérica entre os números de RON e MON) também tinham que ser especificados. Hoje isto é aceito: nenhum valor de octanagem cobre todo o uso [Kirk,1993].

2.4.4 Sensibilidade dos combustíveis.

Devido aos dois métodos utilizados usarem diferentes condições de testes, especialmente na temperatura de admissão da mistura e na velocidade do motor, o combustível, que é sensível a mudanças das condições de operação terá uma maior diferença entre os dois métodos de teste, esta diferença entre a octanagem medida pelo método RON e MON é chamada de sensibilidade do combustível. Combustíveis modernos tipicamente têm sensibilidades por volta de 10 octanas [Owen e Coley,1995].

2.4.5 Tipos de motores para taxar os combustíveis.

Os valores de octanagem para uso automotivo são determinados em um motor monocilíndrico especial com taxa de compressão variável (4:1 até 18:1) conhecido como um motor “Co-operative Fuels Research” (CFR). O diâmetro do cilindro tem 82,5 mm, o curso, 114,3 mm, dando um deslocamento de 612 cm³. Os êmbolos têm quatro anéis de compressão e um anel de controle de óleo. A válvula de admissão é encoberta. A cabeça e o cilindro são uma única peça, e podem ser movidos para cima e para baixo para obter relações desejadas de taxa de compressão. O motor tem um carburador especial de quatro cubas que permite ajustar relações de ar-combustível individuais por cubas, o que facilita a rápida troca entre combustíveis de referencia e amostras. Um sensor de detonação magnetoresistivo na câmara de combustão mede mudanças rápidas de pressão causadas pelas detonações, e o sinal amplificado é medido em um

“Knockmeter” (medidor de detonação) com uma escala de 0-100 mV [ASTM D2699 & ASTM D2700].

Um sistema completo de motor para determinação de octanagem com todos os serviços de instalação custa cerca de US\$ 200.000. Somente uma companhia produz estes motores, a divisão de motores Waukesha da Dresser Industries, Waukesha, WI.

2.4.6 Determinação da octanagem.

Para determinar-se a octanagem de um combustível, o motor é preparado para uma apropriada taxa de compressão que produzirá, para a amostra testada, uma detonação de aproximadamente 50 mV no Knockmeter, quando a mistura ar-combustível é ajustada na cuba do carburador para obter a máxima detonação. Normal heptano e iso-octano são os combustíveis primários de referência conhecidos. Duas misturas destes são feitas, uma com o número de octanagem acima da esperada, e outra abaixo da mesma. Estas são colocadas em diferentes cubas, e misturadas cada uma com ar em taxas ajustadas para máxima detonação. O mais alto combustível de referência deverá produzir uma leitura por volta de 30-40 mV, e o mais baixo combustível de referência deverá produzir uma leitura por volta de 60-70 mV. A amostra é outra vez testada. Se a intensidade de detonação dela não ficar entre as dos combustíveis de referência, adicionais combustíveis de referência são preparados, e o motor reajustado para obter a detonação requerida. O real valor de octanagem dos combustíveis é obtida através da interpolação dos valores de leitura do “Knockmeter” da figura (2.17) [ASTM D2699 & ASTM D2700].



Figura (2.17). Knockmeter utilizado na leitura da intensidade de detonação.

Fonte: [Geocities, 2003].

2.4.7 Relação entre octanagem e potência.

Motores modernos com sofisticados sistemas de gerenciamento podem operar eficientemente em combustíveis com uma ampla faixa de octanagem, mas é bom lembrar que existe uma ótima octanagem para cada uma das condições de dirigibilidade nas quais podem estar submetido o motor.

Carros antigos sem os sistemas de gerenciamento são mais restritos na escolha de combustíveis, pois o motor não pode automaticamente ajustar-se para acomodar-se a combustíveis de mais baixa octanagem. Como a detonação é muito destrutiva, proprietários de carros antigos devem usar combustíveis que não detonem sob a maioria das condições de trabalho nas quais são submetidos os motores, e devem continuar utilizando este combustível, mesmo se os motores somente ocasionalmente requererem a octanagem.

Caso o motor esteja utilizando um combustível de octanagem apropriada, não se obtém mais potência a partir de combustíveis com mais alta octanagem. O motor já estará operando em ótima situação, e uma maior octanagem não terá nenhum efeito no sistema de gerenciamento. Sua dirigibilidade e economia de combustível permanecerão a mesma. Estando-se usando um combustível sensivelmente abaixo da situação ótima para o motor, então o uso de um combustível com maior octanagem, fará com que o sistema de gerenciamento do motor mova-se para a situação ótima, possibilitando resultados melhores com aumento de potência e melhoria na economia de combustível. Pode-se mudar a octanagem dos combustíveis entre estações (reduzir a octanagem no inverno) para obter o maior custo efetivo do combustível sem perder dirigibilidade.

Uma vez identificado o combustível que mantém o motor na ótima situação de funcionamento, não existirá nenhuma vantagem em utilizar-se combustível com mais alta octanagem. Os fabricantes de motores são conservativos em suas recomendações, no entanto, é possível reduzir-se a octanagem dos combustíveis utilizados sob risco e penalidade de gastar valores elevados devido a danos provocados ao motor.

2.4.8 A octanagem e o desgaste do motor.

Os combustíveis de baixa octanagem só estarão aumentando o desgaste do motor se os requisitos de octanagem não estiverem sendo atendidos, pois nesta situação o motor sofrerá maiores danos devido à detonação. Não deve-se nunca utilizar combustíveis que produzam detonações sustentadas audíveis, pois certamente o motor sofrerá danos. Se a octanagem for

suficiente, o sistema de gerenciamento do motor moverá sua regulagem para um ponto um pouco abaixo da posição de ótima situação do motor, onde então, a maior penalidade será aumentar os custos devido à menor economia de combustível. No entanto, o motor deve, sempre que possível, trabalhar na posição de ótima situação para garantir confiabilidade em longo prazo. O desgaste dos motores é relacionado principalmente aos fatores de projeto, manufatura, e fatores de manutenção e lubrificação. Uma vez estando atendidos os requisitos de octanagem do motor, o aumento da octanagem não trará nenhum efeito benéfico ao motor, a qualidade da gasolina, e o pacote de aditivos usados, estariam, sim, afetando mais a taxa de desgaste dos motores, e não a octanagem.

2.4.9 A octanagem e o ajuste dos motores.

Em geral, os sistemas de gerenciamento dos motores se autocompensarão para combustíveis de diferentes octanagens, e uma vez tendo satisfeito o ótimo requerimento de octanagem o motor estará na área de melhor *performance* do mapa de funcionamento. Ajustar o motor para obter mais potência provavelmente trará efeitos adversos tanto na economia de combustível, quanto nas emissões, a menos que se tenha acesso a um bom equipamento de diagnóstico que garanta os limites regulamentados para a região onde irá operar este motor. Desta maneira é possível legalmente, conseguir-se uma melhor *performance* para o motor usando-se um dinamômetro em conjunto com um analisador de gás de exaustão e um bem projetado e adaptado, chip de gerenciamento de performance de motores.

2.4.10 Relação entre a octanagem e a aditivação.

Para aumentar-se a octanagem dos combustíveis, não basta simplesmente comprar-se aditivos, pois não se tem um retorno efetivo de custo. Uma pesquisa realizada por Simanaitis e Kott em 1989 apresentou o custo para aumentar em uma unidade a octanagem de um galão de combustível. A variação custou em centavos de dólar para os respectivos aditivos: \$0,10 centavos para o metanol, \$0,50 centavos para o MMT, \$1,00 TEL, e até \$3,25 para o xileno.

Com os resultados desta pesquisa mostrou-se que é preferível comprar uma gasolina de mais alta octanagem como as gasolinas de competição, gasolinas de aviação, ou metanol para adicionar-se ao combustível tradicional com a intenção de aumentar-se a octanagem do mesmo, infelizmente, no caso do metanol, o preço dos graus químicos do mesmo quase que dobraram a partir de 1994 .

2.5 Parâmetros Requeridos de Octanagem.

Existem alguns parâmetros requeridos pela octanagem de relevante importância que passam a ser apresentados nesta seção.

2.5.1 Requerimento de número de octanagem (RNO) dos motores.

O Requerimento de Número de Octanagem (RNO), é determinado pelo uso de uma série de combustíveis com octanagem padronizadas que podem ser misturas de heptano normal e iso-octano (combustíveis de referência primária) ou gasolinas comerciais (referência de ebulição completa). Estas gasolinas são testadas em ampla faixa de circunstâncias e cargas, e costuma-se ir diminuindo a octanagem desta série até que apareçam traços de detonação detectáveis. As condições que requerem máxima octanagem não são consistentes, mas geralmente são de máxima aceleração começando a partir de baixa velocidade utilizando o maior carga possível. O máximo RNO é o de maior interesse, pois este usualmente define o combustível recomendado, no entanto, é reconhecido que os motoristas em geral raramente dirigem em condições tão severas como as de teste, o que permite serem satisfeitos os requisitos com combustíveis de menor octanagem [Owen e Coley,1995].

2.5.2 Efeito da Taxa de Compressão.

É sabido que para um aumento da taxa de compressão será requerido um aumento da octanagem do combustível para um mesmo projeto de motor. Aumentando a taxa de compressão aumentará a eficiência termodinâmica de acordo com a equação padrão:

$$\text{Eficiência} = 1 - (1/\text{Taxa de Compressão})^{\gamma-1} \quad (1)$$

Onde, γ : taxa de calor específico com pressão e volumes do fluido de trabalho constantes (para maioria das propostas o ar é o fluido de trabalho, podendo ser tratado como gás ideal). Existem indicações de que a eficiência térmica atinge um máximo em uma taxa de compressão de cerca de 17:1 para gasolinas combustíveis em um motor de ignição por centelha [Caris & Nelson,1959].

Os ganhos de eficiência são melhores quando o motor está em detonação incipiente, quando o sensor de detonação (realmente sensor de vibração) começa a ser usado. Motores com

baixas taxas de compressão são menos eficientes porque eles não podem entregar o máximo da potência de energia da combustão ao volante.

A tabela (2.2) mostra a relação existente entre a eficiência térmica, a taxa de compressão e o requerimento de octanagem para um típico motor com carburador, sem sistema de gerenciamento:

Tabela (2.2). Taxa de Compressão x Requerimento de Octanagem. Fonte:[Owen e Coley,1995].

Taxa de Compressão	Requerimento Octanagem	Máxima Eficiência Térmica (Borboleta Totalmente Aberta)
5:1	72	-
6:1	81	25%
7:1	87	28%
8:1	92	30%
9:1	96	32%
10:1	100	33%
11:1	104	34%
12:1	108	35%

Os motores modernos têm melhorado significativamente as condições da tabela, e a mudança das especificações dos combustíveis e projeto dos motores deverão ser melhoradas ainda mais, mas ganhos significativos podem ter que esperar melhorias nos materiais dos motores e dos combustíveis.

2.5.3 Efeito da relação ar-combustível.

Em motores mais antigos, a ciclo Otto, a grande tendência de detonação estava próxima da taxa de ar-combustível de 13,5: 1 em massa, mas isto era muito específico do motor. Motores modernos, com sistema de gerenciamento, agora têm seus requerimentos de octanagem próximos de 14,5: 1. Para um dado motor usando gasolina, a relação entre eficiência térmica, taxa ar-combustível e potência é complexa. A combustão estequiométrica (taxa ar-combustível = 14,7: 1 para uma típica gasolina não oxigenada) não é nem de máxima potência a qual ocorre em torno de 12-13:1 (mistura - rica) nem é de máxima eficiência térmica que ocorre por volta de 16-18:1 (mistura - pobre). A taxa de ar-combustível é controlada em parte pela borboleta que atua em um sistema de ciclo de fechamento usando um sensor de oxigênio na exaustão. Convencionalmente, o enriquecimento da taxa de ar-combustível para máxima potência é usado durante operação de borboleta totalmente aberta para reduzir detonação enquanto fornece melhor dirigibilidade [SAE Handbook,1994].

Em média, um aumento de duas vezes no “índice de antidetonação” é requerido para cada aumento (empobrecimento) da taxa de ar-combustível. Se a mistura é enfraquecida, a velocidade de chama é reduzida, conseqüentemente menos calor é convertido em energia mecânica, deixando calor nas paredes e cabeça do cilindro, potencializando o aparecimento da detonação. É possível enfraquecer-se a mistura suficientemente, porém a chama ainda estará presente quando a válvula de admissão abrir novamente, resultando em retrocesso de chama.

2.5.4 Efeito da mudança do avanço de Ignição.

A tendência à detonação aumenta com o aumento do avanço de ignição; para um motor com recomendados 6 graus antes do PMS de sincronismo e combustível de octanagem 93 octanas, retardando em 4 graus abaxiam a exigência de octanagem para 91 octanas, visto que avançando em 8 graus aumenta o requisito de octanagem para 96 octanas, segundo Owen e Coley,1995. Deve-se observar que este requerimento depende do projeto do motor. Ao se avançar à centelha de ignição à frente de chama começará mais cedo, e o gás extremo começará a se formar mais cedo no ciclo, possibilitando mais tempo para as espécies de auto-ignição se formarem antes que o êmbolo atinja a posição ótima para entrega de potência, como determinada pela propagação da frente de chama normal. Torna-se uma corrida entre a frente de chama e a decomposição do gás extremo em espécie de auto-ignição. Combustíveis de alta octanagem produzem gases extremos que levam mais tempo para sofrer auto-ignição, então boas frentes de chamas atingem e os consomem corretamente.

O mapa de avanço de ignição é determinado em parte pelo combustível que é pretendido utilizar no motor. O sincronismo da centelha é avançado suficientemente para assegurar que a mistura de ar-combustível queime de maneira que a máxima pressão de queima da carga esteja 15-20 graus após o PMS. A detonação ocorrerá antes deste ponto, usualmente no final da compressão e início do período de curso de expansão. O sistema de gerenciamento do motor usa o sincronismo de ignição como uma das principais variáveis de ajuste se a detonação é detectada.

Se combustíveis de muito baixa octanagem forem utilizados (varias octanas abaixo do número de requerimento do veículo para uma ótima posição), ambos, *performance* e economia, de combustível diminuirão.

O real NRO depende do projeto do motor, mas para alguns veículos, em 1978, usando combustível padrão, os seguintes “índices de antidetonação” requeridos apresentados na tabela (2.3) foram medidos. Sendo que “Padrão” é o sincronismo recomendado de ignição para o motor, provavelmente uns poucos graus antes do PMS [SAE Handbook,1994].

Tabela 2.3 - Avanço de Ignição x Requisito de Octanagem. Fonte:[SAE Handbook,1994].

Avanço de Ignição Básico			
Veículo	Retardo 5 graus	Padrão	Avanço de 5 graus
A	88	91	93
B	86	90,5	94,5
C	85,5	88	90
D	84	87,5	91
E	82,5	87	90

O real sincronismo de ignição para conseguir a máxima pressão a partir de uma combustão normal da gasolina dependerá principalmente da velocidade do motor e da taxa de propagação da chama no motor. A detonação aumenta a taxa de ascensão da pressão, assim, haverá uma superposição adicional de pressão na ascensão da pressão normal de combustão. A detonação entra em ressonância com a câmara de combustão, dando origem a uma série de picos de pressão em forma de dente de serra.

A velocidade da chama normal é razoavelmente consistente para a maioria das gasolinas de hidrocarbonetos, sendo que a mesma não é somente afetada pela octanagem, mas também pela estequiometria da mistura ar / combustível.

2.5.5 Efeito da temperatura e da carga.

Aumentando a temperatura do motor, particularmente, a temperatura da mistura ar / combustível aumenta a tendência à detonação. A sensibilidade do combustível pode indicar como ele é afetado pela variação da temperatura da carga. Aumentando a carga aumenta a temperatura do motor e a pressão do gás extremo. Assim, há a probabilidade de aumento da detonação à medida que a carga aumenta. Aumentando a temperatura do líquido de arrefecimento de 71°C para 82°C, aumenta o requerimento do número de octanagem (RNO) em 2 octanas IAD. [Chevron Research and Technology Company,1990].

2.5.6 Efeito da velocidade do motor.

Maior velocidade dos motores significa existir menos tempo para as reações de pré-chama no gás extremo ocorrer, assim reduzindo a tendência à detonação. Em motores com o sistema de gerenciamento, o sincronismo de ignição pode ser avançado com a velocidade dos motores e carga, para obter ótima eficiência na detonação incipiente.

2.5.7 Efeito dos depósitos nos cilindros.

Um motor novo pode somente requerer um combustível de 6 a 9 octanas abaixo do mesmo motor após 25000 km. Este aumento de requisito de octanagem é devido à formação de um depósito a partir de uma mistura orgânica e inorgânica resultante do combustível e do lubrificante. Elas atingem uma quantidade de equilíbrio por causa de lascas, entretanto mudanças drásticas no estilo de dirigir podem resultar em drásticas mudanças na posição de equilíbrio.

Quando o motor começa a queimar mais óleo, o requisito de octanagem pode aumentar novamente. O aumento de requisito de octanagem acima de 12 octanas não é incomum, pois depende do estilo de dirigir [Owen e Coley,1995].

Os depósitos produzem o aumento do requisito de octanagem por vários mecanismos:

- reduzem o volume da câmara de combustão, efetivamente aumentando a taxa de compressão.
- reduzem a condutividade térmica, assim aumentando a temperatura da câmara de combustão.
- catalisam indesejáveis reações de pré-chama que produzem gás extremo com baixas temperaturas de auto-ignição.

2.5.8 Efeito das condições atmosféricas.

Temperatura do Ar: aumentando a temperatura do ar ambiente de 5 a 6°C aumenta o requerimento de octanagem de um motor em 0,44 a 0,54 octanas MON. Quando os efeitos combinados da temperatura do ar e umidade são considerados, é geralmente possível usar uma octanagem no verão, e usar uma outra octanagem mais baixa no inverno. A número de octanagem motor (MON) tem uma temperatura de carga mais alta, e aumentando a temperatura de carga aumenta a tendência à detonação, então combustíveis com baixa sensibilidade são menos afetados pela temperatura do ar.

Altitude: o efeito de aumento de altitude pode ser não-linear, com um estudo reportando a diminuição do requisito de octanagem de 1,4 RON / 300m a partir do nível do mar para 1800m e 2,5 RON / 300m a partir de 1800 m para 3600 m [Owen e Coley,1995].

Outros estudos reportaram que o requisito de octanagem diminui entre 1,0 – 1,9 RON / 300m sem especificação de altitude [SAE Handbook,1994].

Os sistemas de gerenciamento dos motores podem acomodar este ajuste, e em alguns recentes estudos, o requisito do número de octanagem foi reduzido de 0,2 a 0,5 octanas IAD por 300 m aumentados na altitude.

Maiores reduções no número de requerimento de octanagem (NRO) em motores antigos eram devidos aos seguintes fatores:

- a redução da densidade do ar provocava baixa temperatura de combustão e pressão.
- o combustível é dosado de acordo com o volume de ar, conseqüentemente como a densidade diminuía, a estequiometria movia para rica, com um mais baixo número de requisito de octanagem.
- a depressão no coletor de admissão controlava o avanço de ignição, com isso uma redução na depressão no coletor resultava em menos avanço de ignição.

Umidade: um aumento na umidade absoluta de 1,0 g água / kg de ar seco baixava o requisito de octanagem de um motor em 0,25 – 0,32 MON [Owen e Coley,1995].

2.6 Análise de Erros

Em resultados finais de trabalhos experimentais, existem erros provenientes de fatores que influenciam na precisão da medida, tais como: incertezas do instrumento de medição, metodologia empregada, e erros aleatórios.

O emprego de um método estatístico em um estudo científico aplica-se quando a variabilidade, complexidade e parcial desconhecimento das origens do fenômeno comprometem a confiabilidade dos resultados. Os resultados obtidos pelas técnicas estatísticas permitem alcançar uma série de comportamentos gerais frente a casos acidentais ou isolados com os quais se fabrica um modelo.

Na prática, o que em termos gerais se determina é o erro aparente, ou seja, a diferença entre o valor objetivo na medida e o valor mais provável da grandeza física considerada, pois a determinação do erro de uma medida em relação ao verdadeiro valor da grandeza é impraticável.

Uma grandeza física experimental deve ser determinada a partir de medição, e o resultado é sempre uma aproximação para o valor verdadeiro da grandeza. Segundo Vuolo, 1998, os objetivos da teoria de erros consistem em determinar o melhor valor possível para a grandeza a partir de medições e determinar o quanto em valor pode ser diferente do verdadeiro.

Quando o resultado procurado é dependente de medidas individuais, o método mais usado na bibliografia especializada é o de Kline e McClintock,1953, dado pela equação 2.2 [Zaro e Borchardt 1982]:

$$U_n = \pm \sqrt{\left(\Delta u_1 \frac{\partial f}{\partial u_1}\right)^2 + \left(\Delta u_2 \frac{\partial f}{\partial u_2}\right)^2 + \dots + \left(\Delta u_n \frac{\partial f}{\partial u_n}\right)^2} \quad (2)$$

Δu_n = Incerteza de medição para um nível de confiança de 95% (3σ).

f = Função de n variáveis independentes.

U_n = Incerteza combinada para um nível de confiança de 95% (3σ).

Neste trabalho os sensores utilizados para determinar a pressão absoluta no coletor de admissão (sensor MAP) e a intensidade de detonação (sensor de detonação) possuem as seguintes características apresentadas na tabela (2.4).

Tabela (2.4). Incertezas de medições devido à utilização dos sensores.

Sensor	Faixa de Voltagem (V)	Resolução	ESC.	Erro
Pressão	0 - 4,5 V	$\pm 0,0045$ V ($\pm 0,1\%$)	$\pm 0,0011$ V	$\pm 0,00463$ V.
Detonação	4 - 8 V	$\pm 0,0040$ V ($\pm 0,1\%$)	$\pm 0,00098$ V	$\pm 0,00412$ V.

ESC. = Erro devido à sensibilidade do condicionador, calculados pela equação (4).

Erro = Erro de Medida , ou seja, a soma da resolução do sensor mais o valor do erro da sensibilidade do condicionador (ESC.).

Isto significa uma incerteza de medição de aproximadamente $\pm 0,00412$ V para a intensidade de detonação medida em volts no em um fundo de escala de 4 V, e uma incerteza de $\pm 0,00463$ V ($\pm 0,1$ kPa) para um fundo de escala de 4,5V (100 kPa).

Isto garantirá nível de confiança de 95% (3σ) na precisão do resultado obtido a partir dos sinais.

3 EXPERIMENTO

O presente capítulo além de apresentar os componentes e os principais circuitos e sensores que compõem o aparato experimental, apresenta na análise de erros as informações sobre a exatidão e incertezas dos valores medidos pelos sensores, e descreve quais foram os procedimentos experimentais utilizados durante a realização dos ensaios.

3.1 Aparato Experimental

A figura (3.1) representa esquematicamente o aparato instrumental utilizado para a execução do experimento.

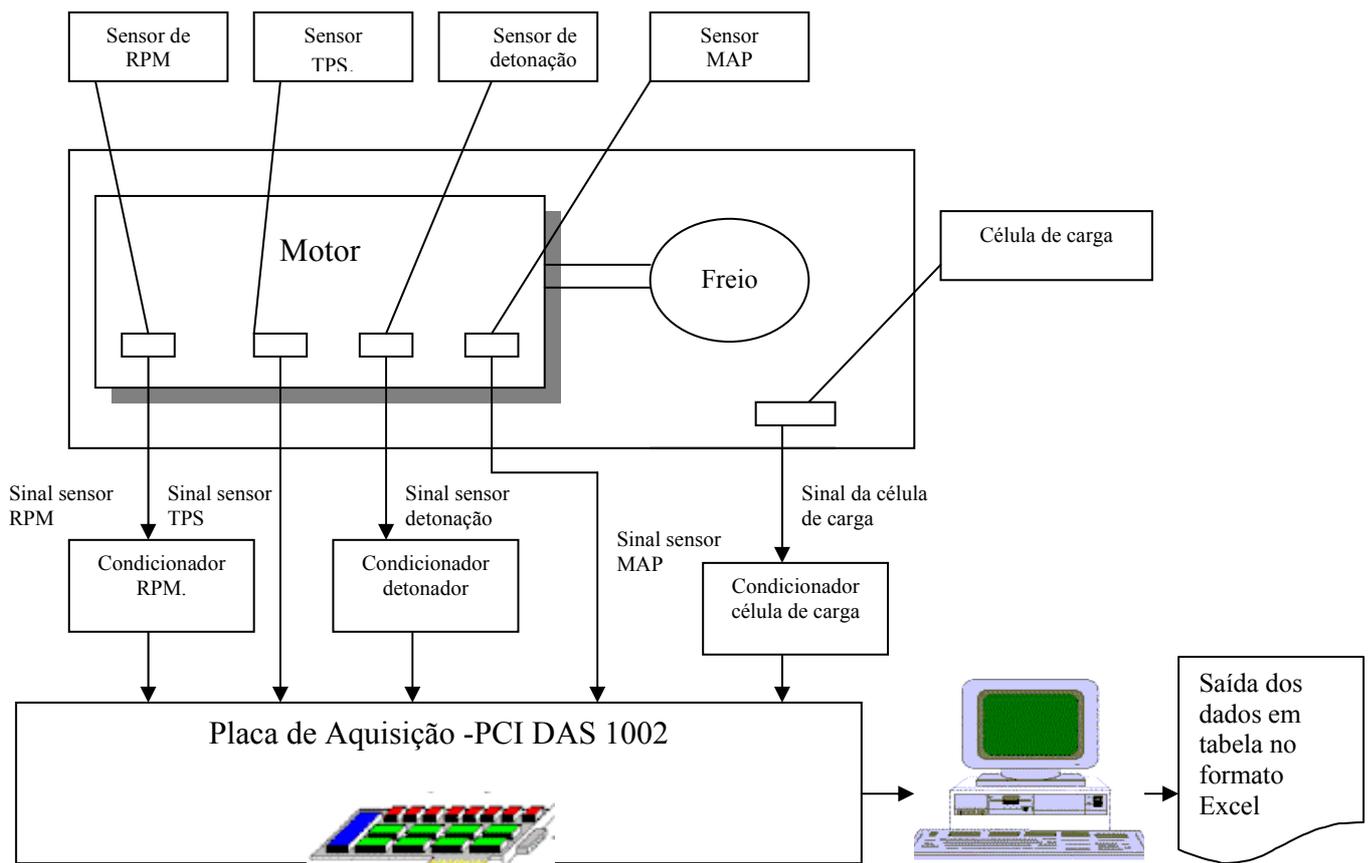


Figura (3.1). Representação esquemática do experimento.

3.1.1 Computadores

Foram utilizados dois computadores na realização deste trabalho, o primeiro possuía barramento PCI onde foi conectada a placa de aquisição da *Computer Boards* e instalados os *softwares* Vee-Pro 6.0 o qual foi utilizado para gerenciar o funcionamento da placa e exportar para o Excel os dados adquiridos a partir dos sensores. No segundo computador foi instalado o *software* da injeção eletrônica programável, *Electromotive II*, que permitiu monitorar em tempo real os parâmetros de funcionamento do motor e transferir os programas de mapeamento para o módulo da injeção.

3.1.2 Placa de Aquisição

A placa de aquisição utilizada foi uma placa da *Computer Boards* modelo PCI DAS 1002, que permite ser configurada para 8 entradas diferenciais ou 16 em modo comum. A velocidade de aquisição desta placa é de até 250 kHz divididos pelos canais utilizados.

Os conversores analógicos / digitais (A/D) usados nos microcomputadores, conforme mostrado na figura (3.2), possuem uma sensibilidade (S), que é função do número de bits (n) do conversor; assim, um conversor de 8 bits possui uma sensibilidade $S = 1 / 2^n = 1 / 2^8 = 1/256$, ou seja, a escala estará dividida em 256 partes. Caso o fundo de escala seja de 10V, ter-se-á: 10V/256 partes $\approx 0,04V$ (menor quantidade que pode ser medida). Quando o ruído acoplado ao sinal medido interfere significativamente, de tal modo que mesmo uma filtragem adequada não consiga eliminá-lo totalmente, a exatidão da medida fica mais complexa de ser analisada, mas quando o ruído é praticamente eliminado, o erro da medida praticamente depende da sensibilidade do instrumento [Zaro e Borchardt 1982].

Como já visto anteriormente a sensibilidade (S) será calculada pela fórmula (3):

$$S = 1/2^n \quad (3)$$

S = Sensibilidade.

n = O número de bits do conversor.

Neste trabalho o erro devido ao condicionador em qualquer medida será igual à resolução da leitura, ou seja o produto da tensão de fundo de escala pela sensibilidade do conversor analógico / digital utilizado, equação (4). No nosso caso, utilizamos um conversor de 12 bits , onde então: $S = 1/2^n = 1 / 2^{12} = 1 / 4096$.

Erro devido à sensibilidade do condicionador (ESC.) = Fundo de Escala x Sensibilidade (4)

ESC. para o sinal do sensor de Detonação = $4V \times 1 / 4096 = \pm 0,00098V$.

ESC. para o sinal do sensor de MAP = $4,5 V \times 1 / 4096 = \pm 0,0011 mV$.

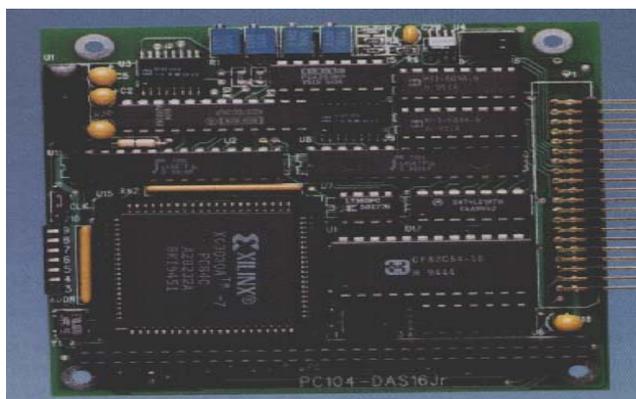


Figura (3.2). Conversor A/D da Computer Boards. Fonte: [Labmot, 2003].

3.1.3 Motor

O motor utilizado no experimento foi da marca FIAT de 1000 centímetros cúbicos de cilindradas, quatro cilindros e duas válvulas por cilindro, conforme pode ser visto na figura (3.3). Este motor equipa veículos nacionais de série, e foi preparado para provocar o efeito de detonação, com mais facilidade, durante o funcionamento em baixas rotações. A injeção eletrônica convencional deste motor foi trocada por uma Electromotive TEC II programável, que permitiu programar o mapa de injeção e de avanço de ignição em função da carga, rotação, temperaturas, relação ar / combustível e pressões.

Tabela (3.1). Dados do motor utilizado. Fonte: [Fiat Palio, 1999].

Dados do Motor: Fiat Palio 1.0		
Ø cilindro	76	mm
Curso	54,8	mm
Cilindrada	994	cm ³
Cilindrada Unitária	248,5	cm ³
Taxa de compressão	9,35 ± 0,15: 1	
Potência Máxima a 6000 r.p.m.	61 CV	44,9 kW
Torque máximo a 3000 r.p.m.	8,1 kgf.m	79,4 N.m
Regime lenta	850 ± 50	r.p.m.



Figura (3.3). Fotografia do motor FIAT PALIO utilizado no experimento.

3.1.4 Procedimento para Preparação do motor.

Este motor teve o cabeçote de válvulas rebaixado para proporcionar uma redução do volume da câmara de combustão e conseqüentemente proporcionar um aumento da taxa de compressão, o que irá favorecer o aparecimento do fenômeno de detonação.

Para aumentar a taxa de compressão do motor foi realizado o procedimento abaixo descrito:

- depois de desmontado a tampa de válvulas (cabeçote) figura (3.4), utilizou-se uma folha de papel comum recortada nas dimensões de $9,8 \pm 0,1$ cm x $10,9 \pm 0,1$ cm a qual resultava em uma área de $106,38 \pm 0,01$ cm². Este retângulo de papel teve sua massa medida em uma balança com exatidão de $\pm 0,001$ g, cuja massa obtida foi de $0,826 \pm 0,001$ g. Depois de conhecida a área e o respectivo tamanho do retângulo de papel este foi colocado sobre o cabeçote de maneira que o contorno do perfil da câmara de combustão, úmido de óleo, fosse transferido para o papel. Após realização da transferência, devido ao contato com as arestas de borda da câmara, recortou-se o papel guiado pelo perfil transferido a fim de obtê-lo diretamente no papel. Feito isto, realizou-se a medição da massa do novo perfil que resultou em $0,279 \pm 0,001$ g e por comparação massa x área, utilizando-se regra de três, obteve-se a área de entrada da câmara de combustão sobre a superfície do cabeçote de válvulas igual a $35,875 \pm 0,01$ cm².



Figura (3.4). Cabeçote de válvulas rebaixado.

- conhecida à área da base da câmara, foi então medido o volume da câmara de combustão utilizando-se, conforme mostrado na figura (3.5), pipeta graduada com exatidão de $\pm 0,1$ cm³, lâmina de vidro e óleo de baixa viscosidade para enchimento da cavidade, tomando-se cuidado durante o enchimento da mesma para que não ficasse óleo retido sob a lâmina de vidro e nem bolhas de ar misturadas no óleo. Realizado este procedimento obteve-se o volume de $19,4 \pm 0,1$ cm³ para a cavidade da câmara situada no cabeçote.



Figura (3.5). Medição do volume da câmara de combustão.

- mediu-se o volume do recuo de válvulas no êmbolo, figura (3.6), utilizando-se o mesmo método de medição da câmara. Obteve-se para o mesmo, o volume de $6,4 \pm 0,1$ cm³.



Figura (3.6). Medição do volume do recuo de válvulas.

- depois de conhecido o volume da câmara no cabeçote de válvulas, utilizou-se a área de entrada da câmara de combustão de $35,875 \pm 0,01 \text{ cm}^2$ e calculou-se a altura a ser rebaixada para elevar a taxa de compressão para próximo de 12,5: 1. Rebaixou-se então, o plano de superfície do cabeçote em $0,242 \pm 0,002 \text{ cm}$, o que resultou em uma diminuição de $8,7 \pm 0,1 \text{ cm}^3$ no volume da câmara ficando esta após o rebaixamento em $10,72 \pm 0,1 \text{ cm}^3$, o que resultou, conforme mostrado na tabela (3.2), em um aumento na taxa de compressão original do motor de $9,35 \pm 0,15: 1$ para $12,72 \pm 0,15: 1$ o que favoreceu a ocorrência de detonação no motor durante a realização dos ensaios.

Tabela (3.2). Taxa de Compressão do motor antes e após a transformação.

Características volumétricas	Atual	Originais
Volume da câmara do cabeçote (cm^3)	10,72	19,40
Volume da cabeça do êmbolo (cm^3)	6,40	6,40
Ø êmbolo (cm)	7,60	7,60
Área do êmbolo (cm^2)	45,36	45,36
Curso (cm)	5,48	5,48
Elevação do êmbolo (em relação ao bloco) (cm)	0,10	0,10
Volume da elevação (cm^3)	4,45	4,45
Junta + Torque (cm)	0,17	0,17
Volume da Junta + Torque (cm^3)	7,71	7,71
Volume total da Câmara de Combustão (cm^3)	20,38	29,06
Volume no PMI	259,19	267,87
TX. Compressão	12,72: 1	9,35: 1

3.1.5 Circuito Condicionador do Detonador.

O sensor de detonação é um sensor que capta as detonações, e gera sinais elétricos que são tratados pela placa condicionadora que condiciona este sinal e coloca na saída um nível de tensão que varia entre 4 e 8 V. A sensibilidade (S) do sensor é de 0,98 mV. A frequência dos sinais captados pelo sensor de detonação está entre 4 e 8 kHz, frequência que foi utilizada para construir um filtro Butterworth passa baixa, de quarta ordem. Os sinais do condicionador são lidos por uma placa de aquisição da *Computer Boards* que salva estes dados adquiridos em forma tabela no Excel.

A figura (3.7) mostra uma simulação do sinal do circuito do condicionador do detonador. A forma de sinal representada na cor azul é a simulação da detonação. Este sinal está ligado na entrada do circuito. O sinal representado pela cor preta é o pulso emitido pelo integrador e o que está na cor vermelha é à saída do circuito.

Comparando os três sinais, observa-se que, enquanto ocorre o fenômeno da detonação, no instante t_1 , o nível da tensão na saída se eleva, mantendo-se assim até que o integrado emita um pulso. Quando isto acontece, instante t_2 , o nível de tensão na saída cai, mantendo-se assim até o próximo evento, que pode ser uma detonação. Isso elevaria novamente o nível do sinal da saída. Se não ocorrer a detonação, os pulsos do integrador fazem a tensão na saída decair ainda mais.

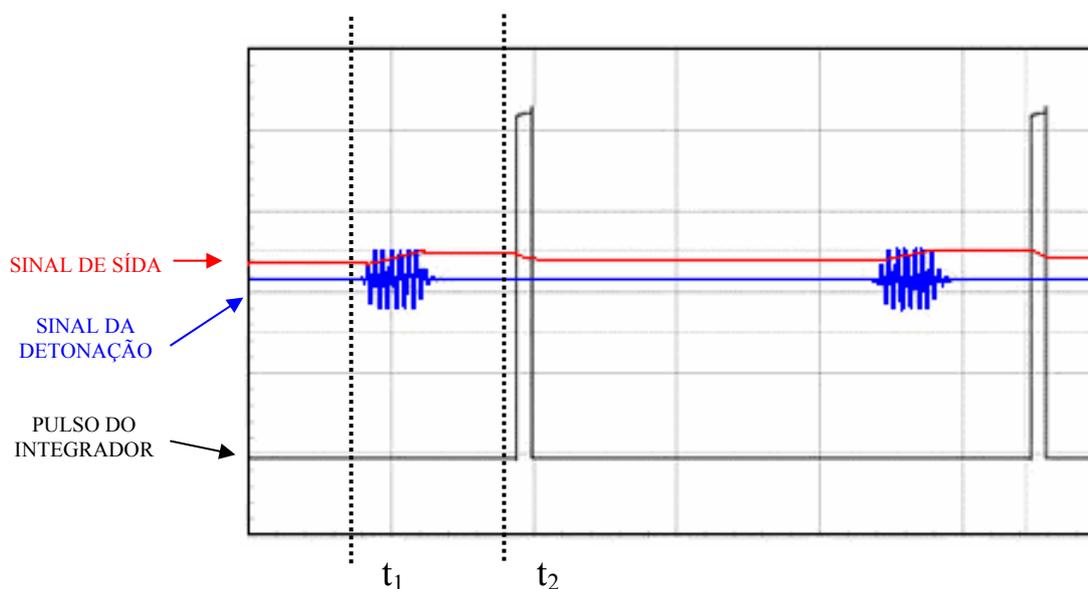


Figura (3.7). Simulação do sinal do condicionador de detonação.

3.1.6 Circuito de Carga e Controle de Velocidade.

Para o sensor de rotação, também foi necessária a construção de um circuito condicionador, que lê os sinais emitidos pelo sensor indutivo, o qual está acoplado sobre uma roda dentada. O filtro implementado é um passa baixa de quarta ordem do tipo Butterworth. A frequência de corte foi calculada para 60 Hz, e a amplitude do sinal na saída do circuito condicionador está entre 4 e 8V com resolução de 0,028%, obtendo-se $\pm 0,084$ r.p.m para a rotação de 3000 r.p.m.

Para se controlar e manter a velocidade do motor constante durante os ensaios, construiu-se um circuito de controle de velocidade que funciona basicamente a partir do recebimento dos pulsos de entrada provenientes do sensor de rotação, figura (3.8). Estes pulsos, ao serem recebidos pelo circuito, são transformados em um valor de corrente que irá circular pelas bobinas do freio eletromagnético, figura (3.9), fornecendo desta maneira uma variação do torque de frenagem à medida que percebe-se uma variação na rotação. Esta última, obrigatoriamente, tenderá a aumentar, à medida que o motor for acelerado devido à abertura da borboleta de aceleração .

Graças a este circuito foi possível variar a pressão no coletor de admissão (MAP) em uma ampla faixa, mantendo-se sempre a rotação constante em 1500 r.p.m.



Figura (3.8). Sensor de Rotação.



Figura (3.9). Freio Eletromagnético.

A célula de carga, que foi acoplada ao freio eletromagnético para determinar o torque de frenagem, também teve seu sinal tratado. Esta foi alimentada com 8V e fornece 2mV por Volt. Este foi o único circuito onde foi necessário implementar ganho nos amplificadores operacionais, devido à baixa amplitude do sinal emitido pela célula de carga, que é de 18mV.

O filtro implementado foi um passa baixa Butterworth de segunda ordem, com frequência de corte calculada para 60Hz.

Neste circuito a célula de carga funcionou satisfatoriamente apresentando em cada instante do ensaio os valores de torque de frenagem aplicados pelo freio eletromagnético. A figura (3.10), mostra a célula de carga utilizada no ensaio. Esta célula é projetada para medir valores de até 50 kgf.m (490,5 N.m), já o torque produzido pelo motor está em torno de 8 kgf.m (78,48 N.m).

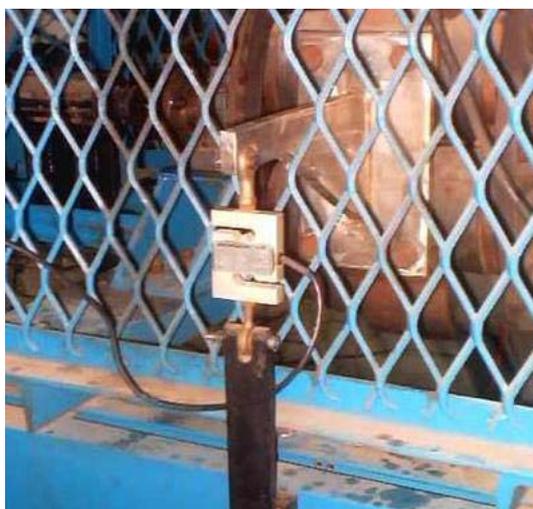


Figura (3.10). Fotografia da célula de carga.

A carga no motor foi simulada com o auxílio de um freio eletromagnético, acoplado ao motor. A corrente do freio foi regulada ligando-se uma carga resistiva em série com a alimentação do freio (resistência elétrica de uma estufa). À medida que se controlava a tensão sobre a resistência através do circuito de controle do freio, esta controlava a corrente que circulava no freio fazendo com que esta se auto-ajustasse mantendo-se assim, a rotação do motor, constante em 1500 r.p.m. Embora os valores medidos pela célula de carga não tenham sido utilizados na determinação dos resultados finais deste trabalho, serviram de informação e orientação durante a realização dos ensaios pois informava a cada instante os valores de torque frenante aplicado pelo freio eletromagnético.

3.1.7 Sensores TPS e MAP.

Os sinais adquiridos pelos sensores de MAP e TPS têm sensibilidade (S) de 1,1 mV, e não precisaram ser tratados, pois emitem sinais com amplitude que varia de 0 a 4,5V com resolução de $\pm 0,045$ mV, e são adquiridos diretamente pela placa de aquisição, que está configurada para ler sinais de até ± 10 V.

3.2 Procedimento Experimental.

O motor foi ligado e deixado em funcionamento por aproximadamente 15 minutos até que as temperaturas do líquido do sistema de arrefecimento e do ar de admissão atingissem os valores predeterminados para o ensaio, que são 85°C e 34°C respectivamente. Neste período, o motor trabalha com um programa de aquecimento transferido pela injeção eletrônica programável Electromotive, cujo diferencial para o programa utilizado durante os ensaios foi o ângulo de avanço de ignição que neste programa de aquecimento era de 13 graus, enquanto que durante os ensaios o programa de mapeamento do motor teve o ângulo fixado em 26 graus. O circuito de controle de velocidade que utilizou o freio eletromagnético, foi regulado para manter a rotação constante em 1500 r.p.m., mesmo com a variação de posição da abertura da borboleta aceleradora.

Após o motor ter atingido as condições ideais para realização dos ensaios, o mesmo teve seu circuito de alimentação drenado e então foi alimentado com cada um dos combustíveis preparados para o teste.

Os ensaios consistiram em ir variando a posição da borboleta aceleradora o que proporcionou, para uma rotação constante de 1500 r.p.m mantida pelo circuito de controle de velocidade, um aumento gradativo da pressão absoluta no coletor de admissão, este aumento da abertura da borboleta aceleradora foi realizado gradativamente até que a mesma estivesse 100% aberta, à medida que se começava a ouvir a detonação, com sua batida característica, se registrava o valor de MAP que foi monitorado durante todo o ensaio no software de gerenciamento da Eletromotive. Quando se observava que havia passado pela região de maior intensidade de detonação para o combustível testado se reduzia à abertura da borboleta aceleradora a fim de reduzir a intensidade da detonação. Durante o ensaio evitou-se permanecer por muito tempo na zona de maior intensidade de detonação devido à severidade da mesma, o que poderia danificar o motor caso ele permanecesse por mais tempo nesta condição de trabalho. Isto pode ser evidenciado claramente nos gráficos que serão apresentados no capítulo de resultados deste trabalho.

3.3 Características dos Combustíveis Utilizados

Para realização dos ensaios foram preparadas amostras de cinco combustíveis diferentes, utilizando misturas de Alquilado (98 RON, 92 MON) e Hexeno (76,4 RON, 63,4 MON) em

diferentes frações, sendo que as amostras foram aferidas utilizando os motores CFR da refinaria Alberto Pasqualini / Petrobrás, conforme mostrado na figura (3.11).



Figura (3.11) Fotografia do motor CFR. Fonte: [Labmot, 2003].

As características de octanagem dos combustíveis e as frações de cada uma das misturas verificadas são apresentadas na tabela (3.3) :

Tabela (3.3). Característica dos combustíveis utilizados. Fonte: [Labmot, 2003].

	Alquilado	Hexeno	RON	MON	IAD
Amostra 1	100%	0%	98,0	92,0	95,0
Amostra 2	75%	25%	92,6	84,9	88,7
Amostra 3	50%	50%	87,2	77,7	82,5
Amostra 4	25%	75%	81,8	70,6	76,2
Amostra 5	0%	100%	76,4	63,4	69,9

4 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada durante a realização de ensaios utilizando o módulo experimental para que se possa a partir dos dados adquiridos com a utilização do aparato experimental calcular-se os valores de octanagem dos combustíveis ensaiados. A figura (4.1) representa a curva de ajuste inicialmente proposta, onde encontram-se duas faixas distintas de ruídos adquiridos pelo sensor de detonação, uma primeira região linear que representa o ruído normal de funcionamento do motor provocado pelas partes móveis durante funcionamento e outra região distinta com crescimento exponencial que representa a região de ocorrência da detonação.

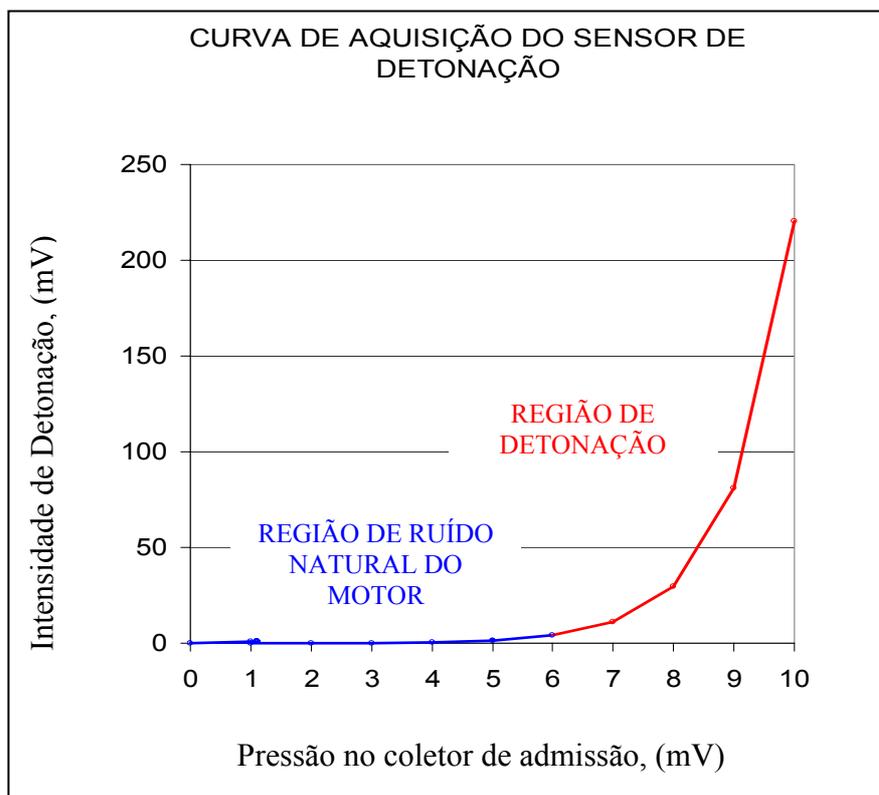


Figura (4.1). Curva de dados experimentais proposta .

Depois de realizados os ensaios, os pontos referentes aos dados de intensidade de detonação medidos em função da pressão absoluta de ar no coletor de admissão (MAP) confirmavam a hipótese demonstrada na curva da figura (4.1).

Dando continuidade ao desenvolvimento da metodologia necessitava-se encontrar uma equação geral para realizar o ajuste dos dados experimentais e que representasse com determinada exatidão e confiança o experimento realizado. Após terem sido testadas uma série

de equações matemáticas combinando termos lineares e exponenciais chegou-se então a equação geral (5) que permitiu realizar-se o ajuste matemático de maneira satisfatória e cujos resultados podem ser vistos no decorrer deste capítulo.

Equação Geral :

$$Y(X) = a \cdot X + b + c \cdot \text{Exp} \left(\frac{e \cdot X}{A \cdot \text{ALQ} + B + C \cdot \text{ALQ} \cdot (1 - \text{ALQ})} \right) \quad (5)$$

Y = Intensidade de Detonação Calculada (V).

X = MAP Medido no ensaio (V).

A,B,C são coeficiente de ajuste da equação.

a e b são parâmetros lineares relacionados ao ruído original do motor .

c e e são parâmetros de Weibull relativos à intensidade de detonação, devendo obrigatoriamente ser >0.

ALQ fração de alquilado variável (0 a 1).

(1-ALQ) percentual do combustível de menor octanagem presente na mistura ensaiada, no nosso caso foi o hexeno.

Para ajustarem-se os dados experimentais à equação geral utilizou-se o “*Método dos Mínimos Quadrados*”. Para tal ajuste realizou-se a aproximação por iteração de parâmetros, sendo utilizado o recurso de *solver* da planilha de cálculo Excel.

A equação geral (5) foi utilizada também no cálculo utilizando o *solver* do Excel para obterem-se os valores de parâmetros para melhor convergência da soma do quadrado das diferenças e também para aproximação da melhor fração de alquilado a qual é utilizada no cálculo para determinação final da octanagem do combustível ensaiado.

Para determinação da octanagem dos combustíveis ensaiados deve-se primeiramente realizar o ajuste do módulo experimental conforme os procedimentos experimentais mencionados no capítulo 3.3. Depois de adquiridos os dados e armazenados no Excel, deve-se copiar as colunas referentes aos valores de MAP e Intensidade de detonação em Volts adquiridos, e transferir para a tabela de cálculo (4.1).

Tabela (4.1). Tabela de cálculo para determinação da octanagem dos combustíveis.

Dado de Aquisição – N°	MAP V	MAP (kPa)	Intensidade de Detonação (V)	% Alquilado	Intensidade de Detonação Calculado	Diferença ID medido - ID calculado	$F = \text{MAP} / (A * \text{ALQ} + B + C * \text{ALQ} * (1 - \text{ALQ}))$	A * MAP + b	c * exp (e * F)
1	2,05	45,65	0,69	0,54	0,66	0,03	6,48	0,54	0,120
2	2,05	45,65	0,69	0,54	0,66	0,02	6,48	0,54	0,120
3	2,05	45,56	0,69	0,54	0,66	0,03	6,47	0,54	0,119
4	2,05	45,55	0,69	0,54	0,66	0,02	6,47	0,54	0,119
5	2,05	45,56	0,68	0,54	0,66	0,02	6,47	0,54	0,119
6	2,05	45,57	0,68	0,54	0,66	0,02	6,47	0,54	0,119
7	2,05	45,61	0,68	0,54	0,66	0,02	6,48	0,54	0,120
n	2,05	45,64	0,69	0,54	0,66	0,02	6,48	0,54	0,120
-	2,05	45,62	0,68	0,54	0,66	0,02	6,48	0,54	0,120
-	2,05	45,66	0,68	0,54	0,66	0,02	6,48	0,54	0,121
3600	2,05	45,65	0,68	0,54	0,66	0,02	6,48	0,54	0,120
A								0,186	
B								0,233	
C								-0,074	
a								-0,1556	
b								0,863	
c								1,94E-04	
e								0,996	
%ALQ /100								0,54	
Soma do quadrado das diferenças n.1 a 3600								30	

Depois de colados os dados de aquisição na tabela de cálculo (4.1), analisa-se o gráfico de ajuste de curva figura (4.2) pra observar a localização da curva dos valores de intensidade de detonação calculados (IDcalc.) com relação à dos valores de intensidade de detonação medidos (IDmed.). Quando ambas as curvas representando a mesma grandeza estiverem distantes uma da outra, conforme visto na figura (4.2), o valor da soma do quadrado das diferenças neste momento certamente terá um valor > 100.

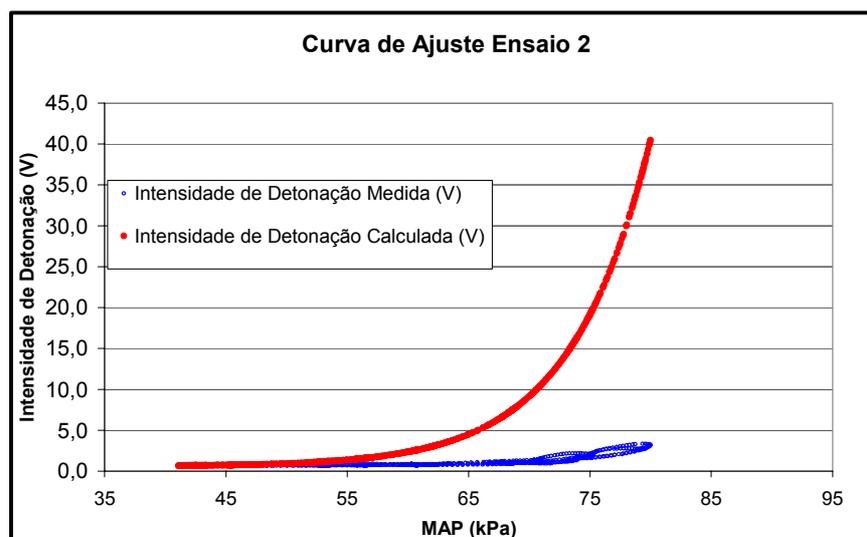


Figura (4.2). Gráfico de ajuste primeira aproximação.

Deve-se então começar o procedimento de ajuste: primeiramente, variar na coluna em vermelho da tabela de cálculo (4.1), o valor referente à fração de alquilado na faixa de 0 a 1 até obter-se o menor valor de convergência para a soma do quadrado das diferenças.

Esta primeira etapa deverá fazer com que a curva de IDcalc. se sobreponha aos pontos de IDmed. demonstrando uma melhor aproximação de ajuste entre os valores, conforme figura (4.3).

Para refinar-se o ajuste, finalmente realiza-se o processo de iteração com os 3600 pontos adquiridos, utilizando-se para este cálculo o recurso de *solver* do Excel, fazendo com que a partir dos parâmetros iniciais lineares (a , b) e exponenciais (c , e) realize-se um ajuste fino entre os valores de intensidade de detonação medidos e calculados esta última etapa melhora ainda mais o resultado da soma dos quadrados das diferenças fazendo com que este valor fique abaixo de 100 pontos quando se utiliza a equação geral do módulo.

Os parâmetros iniciais, (**a,b,c e e**) a serem utilizados para determinação do melhor ajuste e conseqüentemente da octanagem do combustível ensaiado, bem como as constantes de ajuste: A,B e C aplicadas a equação geral (5) encontram-se na tabela (4.2), e são os parâmetros iniciais que deverão ser informados na janela do *solver* figura (4.4) (células variáveis), para serem utilizados nos processos de iterações solicitados nas opções de *solver*, figura (4.5), onde, nesta janela, existe um campo a ser preenchido com o número de iterações a serem realizadas em busca do melhor valor de convergência para a soma do quadrado da diferenças IDmed. – IDcalc.

Tabela (4.2). Parâmetros iniciais de referência aplicados à equação geral (5).

A	0,186
B	0,233
C	-0,074
a	-0,1556
b	0,863
c	1,94E-04
e	0,996

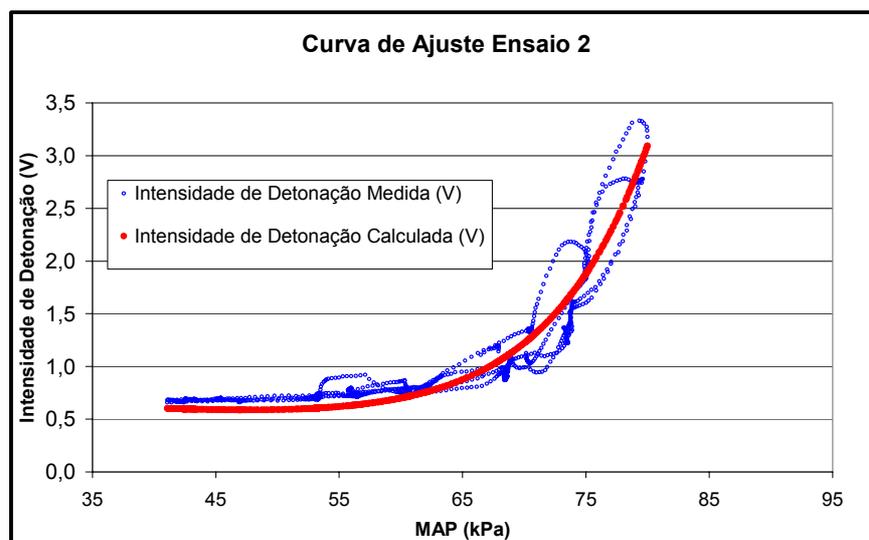


Figura (4.3). Gráfico de ajuste de curva.

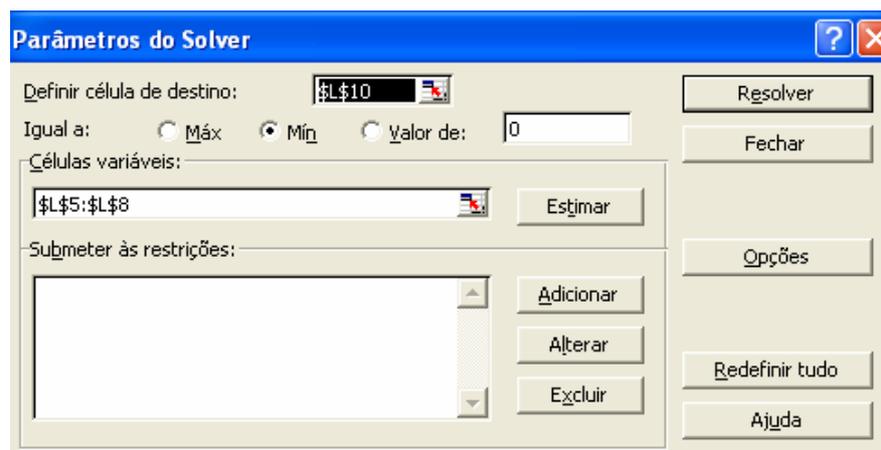


Figura (4.4). Janela de seleção de parâmetros do Solver. Fonte: [Microsoft Excel, 2002].

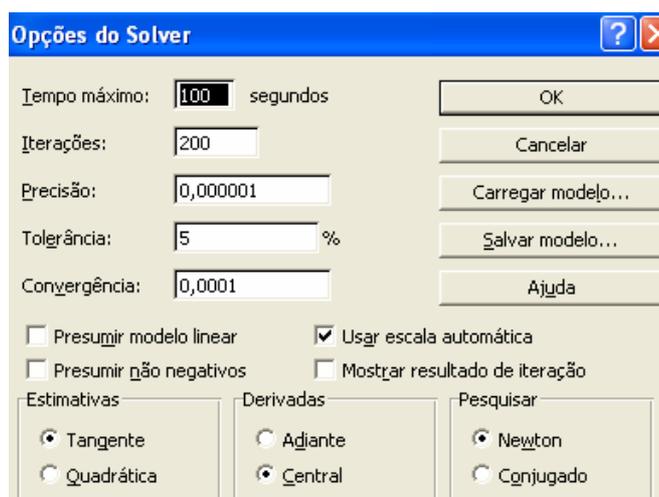


Figura (4.5). Janela de opções de Solver. Fonte: [Microsoft Excel, 2002].

Depois de realizado o ajuste entre os valores medidos e calculados e com isto obtido o menor valor para a soma do quadrado das diferenças, toma-se então o valor da fração de alquilado (ALQ) que melhor se ajustou à função geral (5) e com este valor encontrado, utilizando-se os valores de octanagem segundo os métodos MON, RON e IAD para as frações de mistura de Alcoilado + Hexeno apresentados na tabela (3.3), interpola-se e calcula-se o valor da octanagem do combustível ensaiado utilizando-se para isto as equações (6),(7) e (8).

$$\text{RON} = 0,16 * \text{RON } 100\% \text{ Hexeno} + 0,84 * \text{RON } 100\% \text{ Alquilado} \quad (6)$$

$$\text{MON} = 0,16 * \text{MON } 100\% \text{ Hexeno} + 0,84 * \text{MON } 100\% \text{ Alquilado} \quad (7)$$

$$\text{IAD} = (\text{RON} + \text{MON})/2 \quad (8)$$

Supondo-se que seja encontrado para o ajuste da equação geral um valor de ALQ (Alquilado) igual a 84% então o equivalente em Hexeno na mistura será 16%.

A octanagem para este combustível será então calculada, conforme solução a seguir exemplificada, utilizando-se para o cálculo as equações (6), (7) e (8).

A tabela (3.3) apresenta os valores de octanagem MON, RON e IAD para os combustíveis de referência, Alquilado e hexeno, que serão utilizados nas fórmulas.

Solução:

$$\text{RON} = 0,16 * 76,4 + 0,84 * 98 = 94,5$$

$$\text{MON} = 0,16 * 63,4 + 0,84 * 92 = 87,4$$

$$\text{IAD} = (94,54 + 87,42)/2 = 91$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.

Neste capítulo, comentar-se-ão os resultados obtidos nos ensaios realizados para cinco diferentes combustíveis preparados especialmente para os mesmos e com octanagens conhecidas conforme tabela (3.3).

Todos os ensaios foram realizados segundo a metodologia apresentada no Capítulo Quatro deste trabalho. Foram adquiridos para cada um dos combustíveis ensaiados 3600 dados de intensidade de detonação medidos correspondentes a uma taxa de aquisição de 20 Hz durante 3 minutos.

5.1 Ajuste dos parâmetros da equação geral (5).

A tabela (5.1) apresenta os valores dos parâmetros da equação geral (5) ajustados para cada um dos combustíveis ensaiados, também são apresentados na tabela os mínimos para os valores de convergência da soma do quadrado das diferenças.

Tabela (5.1). Valores dos parâmetros finais ajustados à equação geral (5) nos cinco ensaios.

Parâmetros	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5
A	0,186	0,186	0,186	0,186	0,186
B	0,233	0,233	0,233	0,233	0,233
C	-0,074	-0,074	-0,074	-0,074	-0,074
a	0,175	-0,156	-0,156	-0,860	-1,831
b	0,231	0,863	0,863	1,759	2,434
c	2,75E-08	1,94E-04	1,94E-04	1,91E-03	1,85E-02
e	1,190	0,996	0,996	0,925	0,830
%ALQ / 100	1,002	0,803	0,542	0,280	0,082
Soma do quadrado das diferenças	50	57	30	60	55

5.2 Cálculo das Incertezas de medição.

Depois de realizados os ajustes para os dados adquiridos em cada um dos cinco ensaios, se determinou à mínima soma do quadrado das diferenças entre os valores de IDmed. e IDcalc., conforme visto na tabela (5.1), com estes valores e utilizando-se as equações (9) e (10) pode-se calcular a incerteza de medição (σ) para cada ensaio.

$$\sigma^2 = \frac{\sum (ID_{med} - ID_{calc})^2}{n} \quad (9)$$

$$\sigma = (\sigma^2)^{1/2} \quad (10)$$

n – Número de aquisições realizadas no ensaio,

σ^2 - Variância,

σ – Desvio Padrão ou Incerteza de Medição,

ID_{med.} – Intensidade de Detonação Medida,

ID_{calc.} - Intensidade de Detonação Calculada.

A tabela (5.2) apresenta os valores das incertezas de medições calculadas para cada ensaio utilizando-se as equações (9) e (10), estas incertezas são garantidas com intervalo de confiança de 68,27% ou seja um σ . Para ampliarmos o intervalo de confiança para 95,45% devemos multiplicar os valores de incerteza da tabela por 2, ou seja, 2σ .

Tabela (5.2). Valores de incerteza calculados para cada um dos ensaios.

Ensaio	Incerteza (σ) em mV.
1	$\pm 0,118$
2	$\pm 0,126$
3	$\pm 0,091$
4	$\pm 0,129$
5	$\pm 0,124$

5.3 Gráficos de ajuste da ID_{med.} x ID_{calc.}

Nos gráficos de ajuste das figuras (5.1), (5.2), (5.3), (5.4) e (5.5) apresentados a seguir podem ser observadas duas regiões distintas: a primeira com caráter linear que representa o ruído original de funcionamento do motor e a segunda região exponencial onde ocorre o fenômeno de detonação. Observa-se nos gráficos que na região exponencial a dispersão dos valores de ID_{med.} é maior que na região linear. Isto se deu devido à histerese de resposta dos capacitores contidos no circuito condicionador do detonador. Nos gráficos também estão identificados os pontos onde a partir do qual percebesse o som metálico característico da detonação e o ponto onde ocorreu a maior ID_{med.} quando a borboleta aceleradora estava totalmente aberta.

A tabela (5.3) apresenta para cada um dos ensaios, os valores de pressão MAP onde a detonação começou a ser ouvida e também o valor de pressão MAP em que ocorreu a maior intensidade de detonação medida.

Tabela (5.3). Valores de pressão MAP referência em cada ensaio.

Ensaio	Pressão onde começa a detonação audível (kPa).	Pressão MAP máxima IDmed.(kPa).
1	80	90
2	69	80
3	58	69
4	52	59
5	44	54

A figura (5.1) apresenta o ajuste realizado para o primeiro ensaio no qual utilizou-se um combustível com 100% de alquilado com octanagem igual a 95 IAD, ou seja, este combustível é o que possui o maior índice antidetonação, devendo ser o que suporta a maior pressão no coletor de admissão até que comece a ocorrer a detonação.

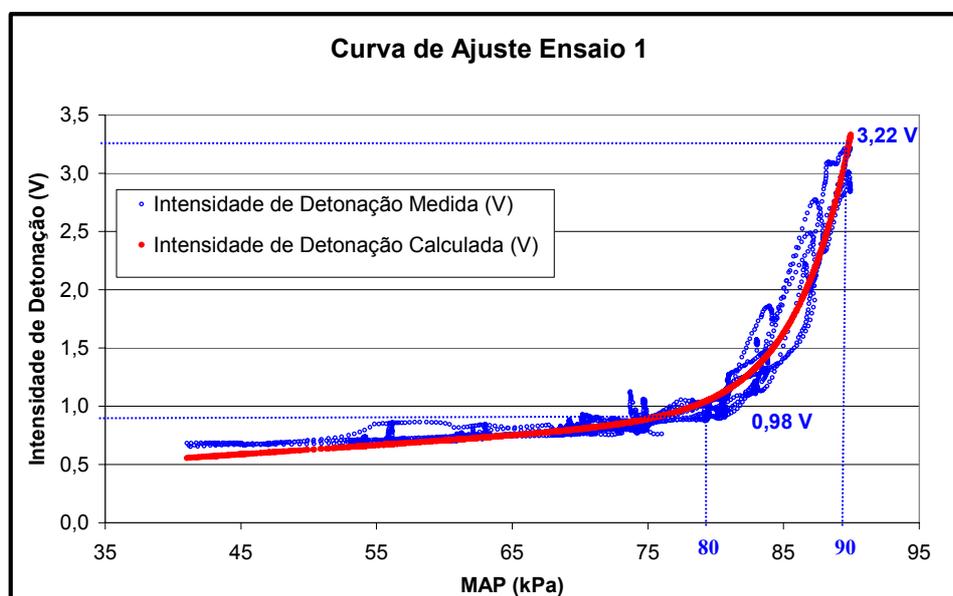


Figura (5.1). Gráfico de ajuste de função – Ensaio 1.

A figura (5.2) apresenta o gráfico de ajuste relativo ao segundo ensaio no qual utilizou-se um combustível com 75% de alquilado e 25% de hexeno com octanagem 88,7 IAD.

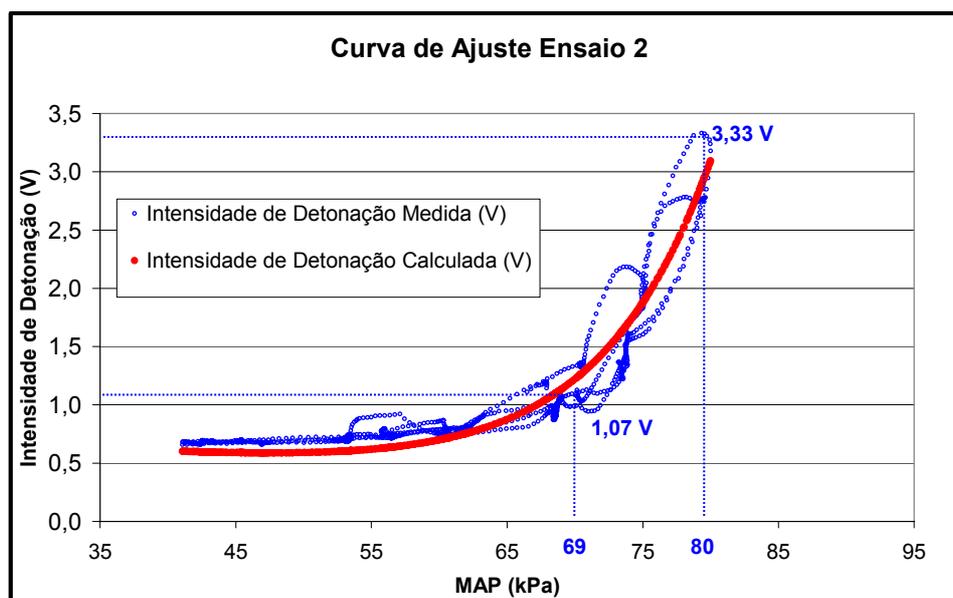


Figura (5.2). Gráfico de ajuste de função – Ensaio 2.

A figura (5.3) apresenta o gráfico de ajuste relativo ao terceiro ensaio no qual utilizou-se um combustível com 50% de alquilado e 50% de hexeno com octanagem igual a 82,5 IAD.

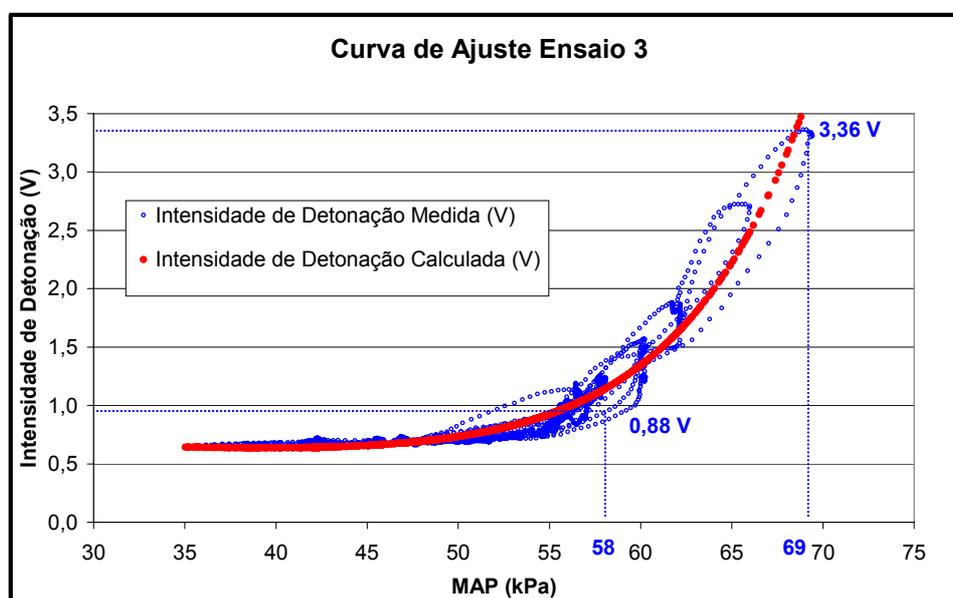


Figura (5.3). Gráfico de ajuste de função – Ensaio 3.

A figura (5.4) apresenta o gráfico de ajuste relativo ao quarto ensaio no qual utilizou-se um combustível com 25% de alcoilado e 75% de hexeno com octanagem de 76,2 IAD.

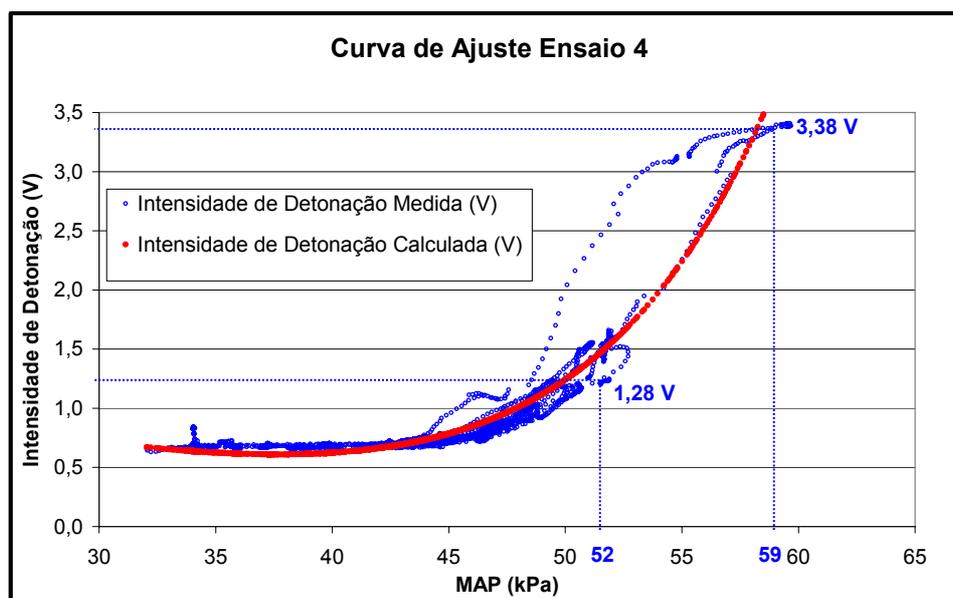


Figura (5.4). Gráfico de ajuste de função – Ensaio 4.

A figura (5.5) apresenta o gráfico de ajuste relativo ao quinto ensaio no qual utilizou-se um combustível com 100% de hexeno com octanagem 69,9 IAD., ou seja, este combustível é o que possui o menor índice antidetonação, devendo ser o que suporta a menor pressão no coletor de admissão (MAP) até que comece a ocorrer à detonação.

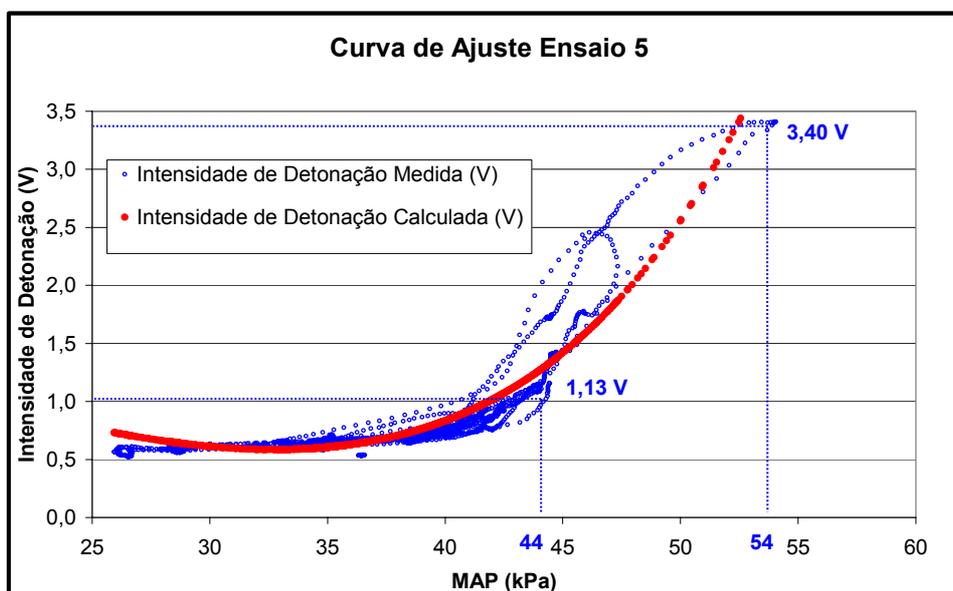


Figura (5.5). Gráfico de ajuste de função – Ensaio 5.

Os gráficos das figuras (5.6), (5.7), (5.8), (5.9) e (5.10) apresentam a correlação linear existente entre os valores de intensidades de detonação medidos (IDmed.) e calculados (IDcalc.).

A figura (5.6) apresenta o gráfico de correlação linear para o primeiro ensaio, o fator de correlação R^2 ficou em 0,947.

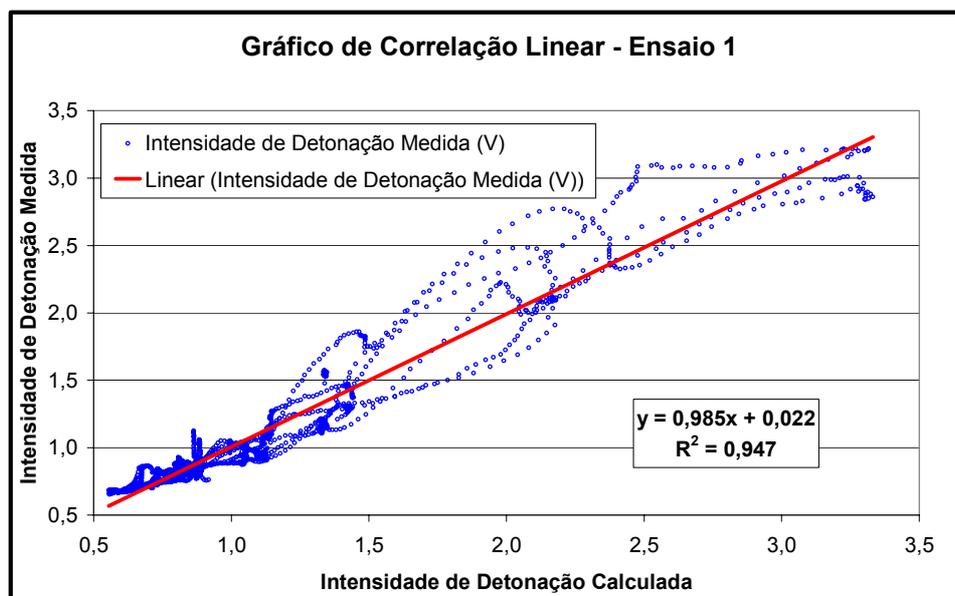


Figura (5.6). Gráfica de correlação linear - Ensaio 1.

A figura (5.7) apresenta o gráfico de correlação linear para o segundo ensaio, o fator de correlação R^2 ficou em 0,913.

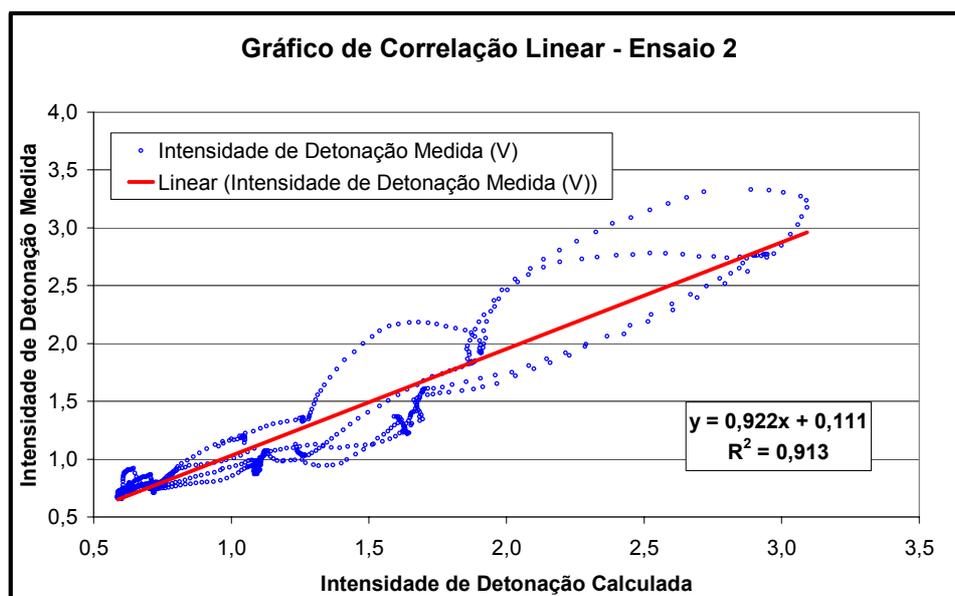


Figura (5.7). Gráfica de correlação linear - Ensaio 2.

A figura (5.8) apresenta o gráfico de correlação linear para o terceiro ensaio, o fator de correlação R^2 ficou em 0,930.

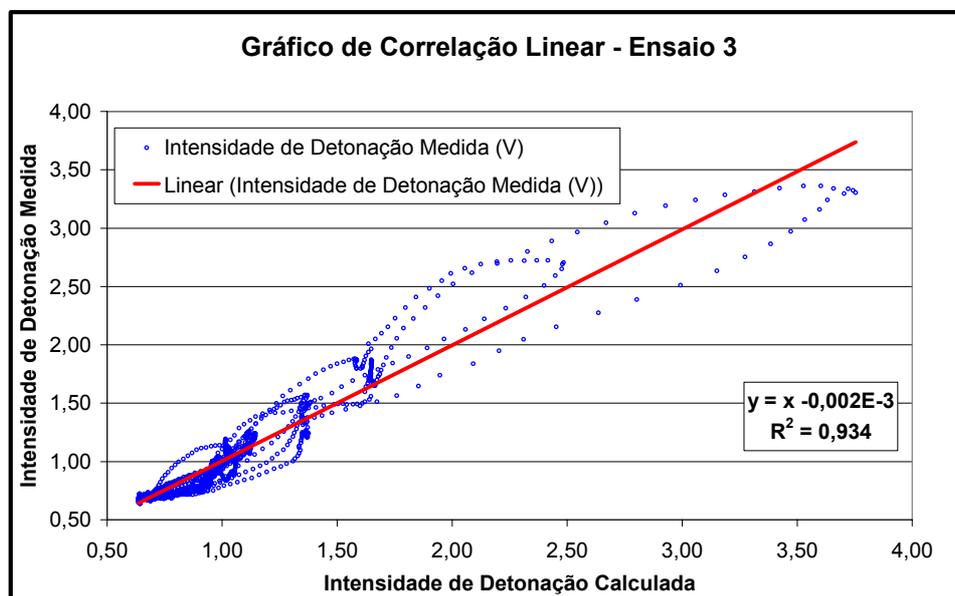


Figura (5.8). Gráfica de correlação linear - Ensaio 3.

A figura (5.9) apresenta o gráfico de correlação linear para o quarto ensaio, o fator de correlação R^2 ficou em 0,910.

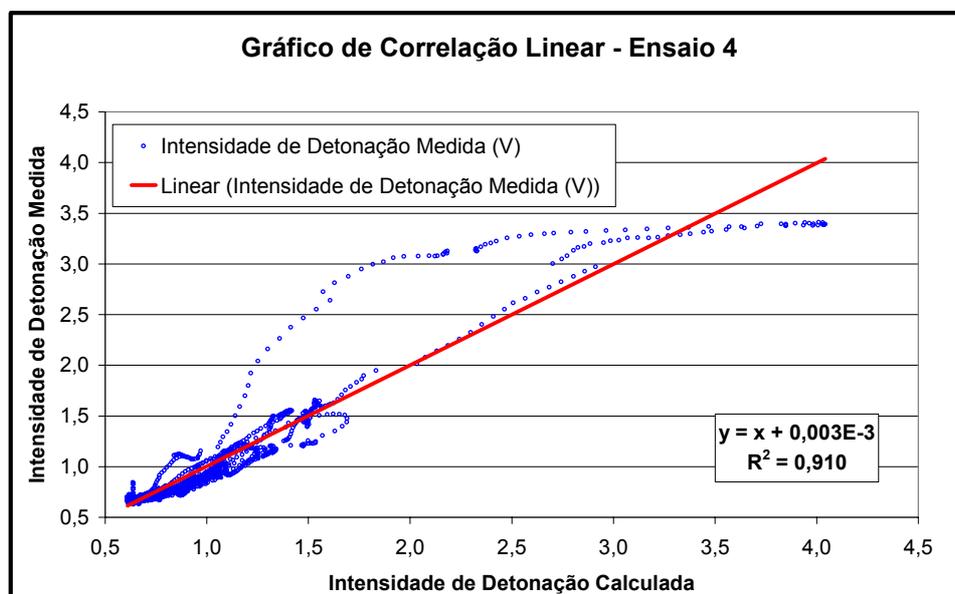


Figura (5.9). Gráfica de correlação linear - Ensaio 4.

A figura (5.10) apresenta o gráfico de correlação linear para o quinto ensaio, o fator de correlação R^2 ficou em 0,877.

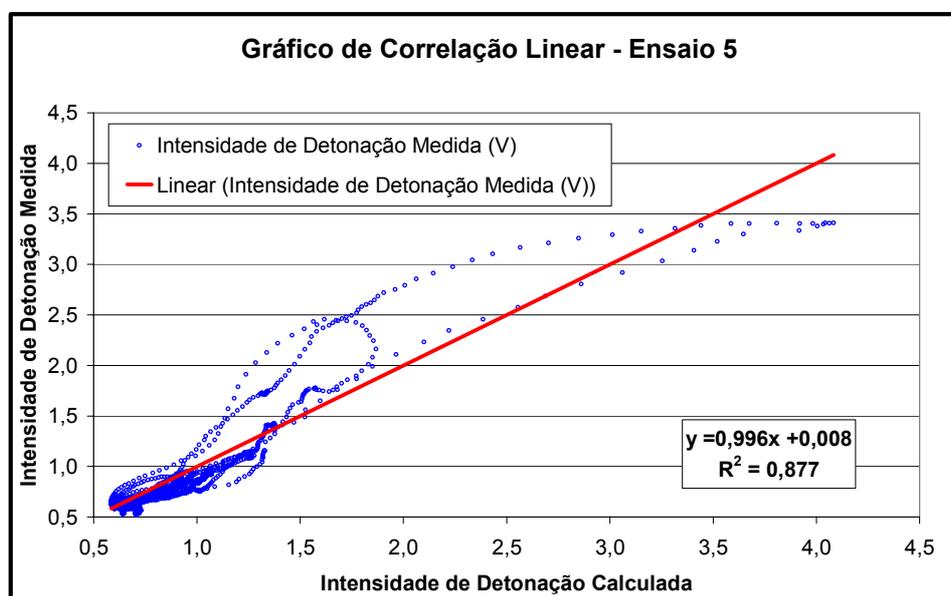


Figura (5.10). Gráfica de correlação linear - Ensaio 5.

A tabela (5.4) apresenta os valores de octanagem calculados a partir dos valores de intensidade de detonação medidos no módulo experimental para cada um dos cinco ensaios, comparados aos valores de octanagem esperados para os cinco combustíveis que foram medidos nos motores CFR.

Tabela (5.4). Valores de octanagens calculados para os cinco ensaios realizados.

	Combustíveis		Valores de Octanagem		
	Alquilado	Hexeno	RON	MON	IAD
Medido	100%	0%	92	92	95
Esperado	100%	0%	92	92	95
Diferença em octanas			0	0	0
Medido	80%	20%	93,7	86,4	90,1
Esperado	75%	25%	92,6	84,9	88,7
Diferença em octanas			1,1	1,5	1,4
Medido	54%	46%	88,1	78,9	83,5
Esperado	50%	50%	87,2	77,7	82,5
Diferença em octanas			0,9	1,2	1,0
Medido	28%	72%	82,4	71,4	76,9
Esperado	25%	75%	81,8	70,6	76,2
Diferença em octanas			0,6	0,8	0,7
Medido	0%	100%	76,4	63,4	69,9
Esperado	0%	100%	76,4	63,4	69,9
Diferença em octanas			0	0	0

5.4 Resultados Finais

Finalizando a análise de resultados é importante apresentar-se a correlação encontrada entre os valores obtidos de octanagem utilizando o método proposto neste trabalho e o método tradicional que utiliza motores CFR.

Na tabela (5.5) encontram-se todos os valores de octanagem esperados para os combustíveis ensaiados e os valores encontrados nos ensaios, aplicando o “*Método dos Mínimos Quadrados*” aos valores de octanagem pode-se determinar o nível de exatidão do módulo experimental para a faixa de octanagem testada .

Tabela (5.5). Comparação entre os valores de octanagem medidos e esperados.

ALQUILADO	HEXENO	IAD	IAD	Diferença	Diferença ²
100%	0%	95	95	0,0	0,00
75%	25%	88,7	90,1	1,4	1,96
50%	50%	82,5	83,5	1,0	1,00
25%	75%	76,2	76,9	0,7	0,49
0%	100%	69,9	69,9	0,0	0,00
Soma do quadrado					3,45
Variância					0,69

A fórmula (11) permite calcular a incerteza de medição (σ) para o módulo experimental a partir dos dados apresentados na tabela 5.5.

$$\sigma^2 = \frac{\sum (ID_{prev.} - ID_{med})^2}{n_e} \quad (11)$$

n_e – Tamanho da amostra,

σ^2 - Variância,

σ – Desvio Padrão ou Incerteza de Medição,

IDmed. - Intensidade de Detonação Medida,

IDprev. - Intensidade de Detonação Prevista.

Cálculo da incerteza de medição para o módulo experimental baseado nos resultados obtidos para os cinco combustíveis ensaiados comparados aos valores obtidos no motor CFR.

$$\sigma^2 = \frac{\sum (ID_{prev.} - ID_{med})^2}{n_e} = 3,45 / 5 = 0,69 \quad \sigma = (0,69)^{1/2} = 0,83 \text{ V}$$

A tabela (5.6) mostra os valores de incerteza e os intervalos de confiança para os valores de octanagem medidos no módulo experimental para combustíveis que possuem valores de octanagem entre 69,9 IAD e 95 IAD garantindo com 68,27% de confiança que os valores encontrados possuem uma incerteza de $\pm 0,83$ octanas .

Esta incerteza aumentará para 1,66 octanas quando o nível de confiança for de 95,45% e 2,49 octanas quando o nível estabelecido for de 99,73%.

Tabela (5.6). Incerteza para os valores de octanagem medidos no módulo.

Confiança	Incerteza	\pm
68,27%	$\sigma \pm$	0,83
95,45%	$2\sigma \pm$	1,66
99,73%	$3\sigma \pm$	2,49

A figura (5.11) apresenta o gráfico de correlação linear existente entre os valores de octanagem medidos nos cinco combustíveis ensaiados utilizando os motores CFR e utilizando o módulo experimental.

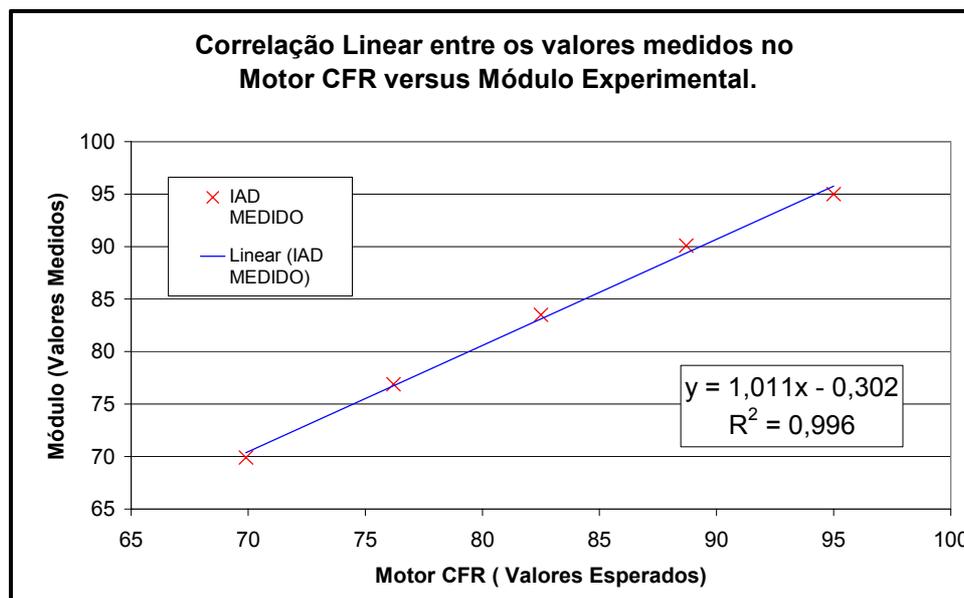


Figura (5.11). Gráfico de correlação linear CFR versus Módulo Experimental.

Finalmente para poder-se comparar a exatidão dos valores de octanagem obtidos com o módulo experimental com os do motor CFR é importante ter-se a informação de que o motor CFR garante para faixa de octanagem ensaiada, analisando-se o índice antidetonação IAD, uma exatidão de medida de $\pm 0,10$ octanas com um intervalo de confiança de 95,45%, enquanto que o módulo experimental apresentado neste trabalho para mesma faixa de confiança apresentou uma exatidão de $\pm 1,66$ octanas de IAD.

6 CONCLUSÃO E SUGESTÕES.

No trabalho apresentado tratou-se de uma nova metodologia para determinação da octanagem de combustíveis, onde para realização dos ensaios utilizou-se um módulo experimental composto de um motor automotivo de 1,0 litros da marca Fiat, acoplado a um freio eletromagnético e de circuitos eletrônicos que controlaram o funcionamento do motor durante a realização dos ensaios e monitoraram os sinais dos sensores instalados no mesmo. À medida que ocorreu o fenômeno de detonação foi possível medir-se e registrar-se os valores da intensidade da mesma e os valores da pressão absoluta no coletor de admissão no momento de sua ocorrência. Com os dados adquiridos, conseguiu-se calcular e determinar a octanagem dos combustíveis ensaiados utilizando o método proposto e comparar estes valores aos dos valores medidos previamente no motor CFR.

Depois de realizados os ensaios, conclui-se que a metodologia utilizada para determinação da octanagem dos combustíveis atendeu satisfatoriamente o propósito com aceitável exatidão, quando comparada ao método tradicional que utiliza motores CFR.

A nova metodologia garante para a faixa de octanagem IAD de 69,9 a 95 octanas, em um intervalo de confiança de 95,45%, uma precisão de $\pm 1,66$ octanas, enquanto que utilizando-se o motor CFR para a mesma faixa de octanagem, obtém-se uma precisão de $\pm 0,1$ octanas com o mesmo intervalo de confiança.

Embora a exatidão dos resultados tenha ficado aquém do esperado, quando comparados aos resultados do motor CFR, considera-se a precisão obtida satisfatória para o método, o que permite utilizá-lo para uma série de aplicações, como por exemplo: na verificação da qualidade da gasolina comercializada nas bombas, onde o nível de exatidão garantido pode ser aceitável, em uma primeira análise. Outro aspecto positivo é o custo de construção deste módulo que viabiliza consideravelmente a utilização do mesmo quando comparado ao custo do motor CFR, principalmente nas situações em que o nível de precisão garantido pelo módulo seja razoável.

Fica como sugestão de continuidade deste trabalho realizar-se melhorias, no circuito condicionador de sinais do sensor de detonação, onde podemos melhorar a velocidade de resposta do mesmo o que permitirá reduzir a histerese e conseqüentemente a dispersão dos pontos, de intensidade de detonação adquiridos, o que irá melhorar ainda mais a exatidão dos resultados medidos pelo módulo experimental.

Outra sugestão seria a de testar o módulo com os combustíveis de referência utilizados pelos motores CFR, que são misturas de heptano e isoctano, misturas estas padronizadas conforme normas ASTM D2699 e D2700, isto nos permitirá testar o módulo para uma faixa mais ampla de octanagem, visto que o Heptano e o Isoctano possuem valores 0 e 100 de octanagem respectivamente.

7 BIBLIOGRAFIA

ASTM D2699., 1998. **“Standard Test Method for Research Octane Number of Spark-Ignition Engine Fuel”**. West Conshohocken: ASTM.

ASTM D2700., 1998. **“Standard Test Method for Motor Octane Number of Spark-Ignition Engine Fuel”**. West Conshohocken: ASTM.

ASTM D5845., 2001. **“Standard Test Method for Determination of MTBE, ETBE, TAME, DIPE, Methanol, Ethanol and tert-Butanol in Gasoline by Infrared Spectroscopy”**. West Conshohocken: ASTM.

ASTM D4814., 1994. **“Standard Specification for Automotive Spark-Ignition Engine Fuel”**. West Conshohocken: ASTM, 1994.

Bierman; Covington, 1988. Objeção à detonação. Cap.2, p.28-29. In: Taylor, Charles F. **“Análise dos Motores de Combustão Interna”**. São Paulo: Edgar Blücher, v.2,1988.

Caris, D.; Nelson, E., 1958. **“A New Look at High Compression Engines”**. Warrendale: SAE.

Chevron Research and Technology., 1990. **“Technical Publication: Motor Gasolines”**. [s.l.].

Envenenado.,2003. Disponível em: **“<http://www.envenenado.com.br>”**, acesso em 20/08/2003.

Fiat Palio, 1999. **“Manual do Proprietário”**. 3. ed. Betim.

Gasoline FAQ.,2003. Disponível em: **“<http://www.faqs.org>”**, acesso em 17/05/2003.

Geocities.,2003. Disponível em: **“<http://www.geocities.com>”**, acesso em 25/08/2003.

Graham, E., 1927. “Measurement of the Knock Characteristics of Gasoline in terms of a Standard Fuel”. **Ind. Eng. Chem.**, London, v.19 p.145-146.

Hastings Manufacturing, 2003. Disponível em: **“<http://www.hastingsmfg.com>”**, acesso em 10/07/2003.

Heywood, John B., 1988. **“Internal Combustion Engine Fundamentals”**. New York: McGraw-Hill, 1988.

Injetronic., 2003. Disponível em: **“<http://www.injetronic.com.br>”**, acesso em 25/08/2003.

IPUC.,2003. Disponível em: **“<http://www.ipuc.pucmg.br>”**, acesso em 05/09/2003.

Labmot., 2003. **“Laboratório de Motores da Refinaria Alberto Pasqualini - REFAP-Petrobrás”**.

Kirk, Othmer., 1993. **“Encyclopedia of Chemical Technology”**. [s.l.]: M.Howe-Grant.

- Kott, D.; Simanaitis, D., 1989. "Octane Enhancers". **Road and Track**, p.82-88, Apr.
- Microsoft Excel., 2002. "**Planilha eletrônica de cálculo**". Quito: Microsoft Corporation
- Midgley, Jr. T., 1988. "História da pesquisa da detonação". cap.2, p.32-33. In: Taylor, Charles F. **Análise dos Motores de Combustão Interna**. São Paulo: Edgar Blücher, v.2, 1988.
- NGK., 2003. Disponível em: "<http://www.ngkntk.com.br>", acesso em 25/08/2003.
- Oficina Brasil., 2003. Disponível em: "<http://www.oficinabrasil.com.br>" , acessado em 30/08/2003.
- Owen, K.; Coley, T., 1995. "**Automotive Fuels Reference Book**". Warrendale: SAE.
- Ricardo, H.R., 1922. "**Recent Reaserch Work on the Internal Combustion Engine**". Warrendale: SAE.
- SAE Handbook., 1994. "**Automotive Gasoline: Recommended Practice**".
- Taylor, Charles F., 1988. "**Análise dos Motores de Combustão Interna**". São Paulo: Edgar Blücher, v.2.
- Vee Pro 6.0., 2002: "**Software for measurement, control, analysis, test-system and data-acquisition applications**". PALO ALTO: Agilent Technologies.
- Vuolo, José Henrique., 1992. "**Fundamentos da Teoria de Erros**". 2. ed. São Paulo: Edgar Blücher.
- Westbrook, C.K., 1992. "The Chemistry Behind Engine Knock". **Chemistry & Industry** London. p.562-566. Apr.
- Zaro, M.A.; Borchardt, I.G., 1982. "**Instrumentação: Guia de Aula Prática**". Porto Alegre: UFRGS.