

3 - METODOLOGIA

A metodologia apresentada envolve o procedimento experimental para a calibração, ajuste do sistema de controle eletrônico do motor e obtenção dos dados para as várias condições testadas, bem como os procedimentos de tratamento dos dados experimentais.

3.1. Metodologia experimental

A metodologia experimental foi realizada em duas etapas, a primeira para os testes preliminares com o motor aspirado e a segunda para a maximização do desempenho com o motor turboalimentado. Todas as provas foram realizadas no laboratório de ensaios de motores do CETEC-MG.

A primeira etapa compreende os testes com o motor aspirado nas seguintes configurações:

- Razão volumétrica de compressão de 11:1 utilizando a UCE original com E25, E94 e 50% de ambos os combustíveis (dados de referência);
- Razão volumétrica de compressão de 11:1 utilizando a UCE MoTeC M4 com E25, E94 e GNV (validação do sistema de controle proposto);
- Razão volumétrica de compressão de 12,5:1 utilizando a UCE MoTeC M4 com E25, E94 e GNV;
- Razão volumétrica de compressão de 15:1 utilizando a UCE MoTeC M4 com E94 e GNV;

A segunda etapa compreende a busca da maximização do desempenho com o motor turboalimentado na seguinte configuração:

- Razão volumétrica de compressão de 11:1 utilizando a UCE MoTeC M4 com E25, E94 e GNV (Ajuste da pressão de turboalimentação para o melhor desempenho mantendo-se o SFC da melhor configuração do motor aspirado).

A primeira etapa desta investigação teve a colaboração de AMORIM (2005) e parte dos resultados referentes aos testes com o motor aspirado consta em sua dissertação de mestrado. A Figura 3.1 mostra os pistões utilizados para possibilitar a alteração da razão volumétrica de compressão durante a primeira etapa através do aumento de massa na cabeça do pistão.



Figura 3.1 - Pistões para razão volumétrica de compressão de (a) 11:1, (b) 12,5:1, (c) 15:1.

Os dados obtidos na primeira etapa serviram de base para o desenvolvimento do motor turboalimentado. Os testes realizados em cada configuração do motor foram:

- Calibração e ajuste da UCE;
- Testes de eficiência volumétrica global;
- Medição da pressão interna do cilindro;
- Medição do torque versus o fator lambda em plena carga;
- Obtenção das curvas de desempenho em diversas cargas;
- Medição dos parâmetros de operação do turbocompressor.

A seguir são descritos nesta metodologia os critérios para escolha de vários sistemas, bem como o detalhamento da instalação, calibração e dos testes realizados.

3.1.1. Combustíveis utilizados

Este trabalho visa o desenvolvimento de um novo conceito de motor multicomcombustível com os combustíveis mais utilizados no Brasil, tendo como meta a aplicação em veículos de baixo custo. A gasolina C, álcool etílico e GNV foram os combustíveis escolhidos para os testes com o motor utilizado.

A gasolina e o álcool etílico para os testes foram fornecidos pela FIAT POWERTRAIN e o GNV foi fornecido pela IGÁS juntamente com um suporte móvel contendo 6 cilindros, com capacidade total de 132 m³.

3.1.2. Seleção e modificações no motor

A escolha do motor na fase inicial dos testes levou em consideração alguns critérios, de forma que existisse compatibilidade entre as características do motor e a tecnologia que se pretendia incorporar ao mesmo em busca de uma nova concepção de motor multicomcombustível.

Os critérios estabelecidos para o motor foram: capacidade em operar adequadamente tanto com gasolina como álcool (flex); pequeno deslocamento volumétrico, elevadas eficiências volumétrica e termodinâmica em todas as faixas de operação. O motor FIAT FIRE FLEX de 4 cilindros, 1,242 dm³, 8 válvulas, adequado para o uso contínuo com gasolina C, álcool etílico e quaisquer proporções de misturas entre os mesmos foi então escolhido. A denominação FIRE, do inglês *Fully Integrated Robotized Engine*, corresponde a uma família de motores que além de atender aos critérios citados apresentam baixas emissões de poluentes e pequenas tolerâncias dimensionais por projeto.

Nas provas realizadas previamente com o motor aspirado ocorreram alguns inconvenientes quando da utilização do GNV, como descrito por AMORIM (2005). Revisões realizadas após a finalização das provas com cada razão volumétrica de compressão apontaram desgastes ocorridos nas guias e sedes das válvulas pelo uso do GNV. A combustão de combustíveis líquidos gera uma cinza sulfatada que, quando depositada sobre as válvulas, suas sedes e guias, auxilia a lubrificação desses

componentes, evitando desgastes e corrosão. Essa fuligem não é formada na combustão do GNV, o que leva ao desgaste precoce nestes componentes, ZAREH (1998).

Portanto, após análises dos desgastes e dos materiais empregados foram realizadas algumas modificações nas guias, sedes e válvulas para as provas com o motor turboalimentado. Primeiramente, a região de assentamento das válvulas recebeu um tratamento térmico visando aumentar o grau de dureza das mesmas. As guias de válvulas também foram endurecidas e a lubricidade das mesmas foi aumentada com adição de uma liga de bronze no material empregado na sua construção. Finalmente, as sedes de válvulas foram substituídas por material de dureza maior, prática usualmente adotada em motores GNV turboalimentados na Europa. Tomou-se o cuidado de manter a geometria dos componentes substituídos de forma a possibilitar a comparação com o motor aspirado sem a introdução de novas variáveis no processo de análise.

Outra modificação necessária foi a mudança da localização do filtro de óleo para realização das provas com o turbocompressor. A posição original do filtro, acoplado próximo ao coletor de descarga, colocava-o muito próximo à turbina, cuja temperatura nesta região certamente levaria à deterioração do óleo. Portanto, o filtro de óleo foi removido e substituído por um tampão de vedação. O filtro de óleo foi então montado em um flange conectado a mangueira que leva o óleo do motor para o radiador de óleo, distante da turbina. Assim, o óleo proveniente da bomba segue da mangueira para o filtro, para o radiador, retorna ao motor, sendo então distribuído para o bloco e cabeçote.

3.1.3. Escolha da Unidade Central de Controle - UCE

Existem alguns sistemas de gerenciamento eletrônico do motor reprogramáveis no mercado que possibilitam o controle eletrônico adequado da turboalimentação. Dentre esses, os que oferecem uma grande gama de opções de controle são MoTec, Autronic e Haltech. Optou-se pela MoTeC M4, por se tratar de um sistema amplamente testado por equipes de competição ao redor do mundo, pela qualidade do suporte técnico oferecido, por possibilitar o controle de todos os parâmetros necessários para esta pesquisa e por possibilitar o controle do motor com gasolina, álcool e GNV. É o mais adequado para pesquisa, em relação aos demais, por ser mais completo, possibilitando a configuração

do sistema de acordo com os sensores e atuadores contidos no motor, aceitando a utilização de praticamente todos os tipos de sensores hoje utilizados. Este sistema permite ainda controlar todos os parâmetros necessários para a realização da calibração e ajuste das curvas dos sensores utilizados no sistema, bem como o ajuste de todos os mapas de controle, necessários ao controle adequado do motor. Este sistema de controle apresenta além da tecnologia adequada para o desenvolvimento da pesquisa, a facilidade de uso, a visualização amigável e ótima qualidade das informações de ajuda ao usuário contida no software. O software de calibração e ajuste da central pode ser facilmente obtido no sítio da empresa na Internet. As principais características são apresentadas a seguir, MOTEC (2005):

- Microprocessador de 32 Bit e 33 MHz;
- Padrão IPC-S-815-A Classe 3 Alta confiabilidade;
- Software de controle da UCE em memória tipo FLASH;
- Pode ser utilizada em motores com até 12 cilindros;
- Para motores de 2 e 4 tempos;
- Rotação máxima 15.000 rpm;
- Resolução do tempo de injeção de 10 μ s;
- Resolução do ângulo de ignição 0,25 graus;
- Controle da pressão de turboalimentação;
- Faixa de temperatura interna de trabalho de -10 a 85 °C;
- Temperatura ambiente de -10 to 70 °C;
- Tensão de operação de 6 a 22 V DC;
- Corrente máxima de operação de 0,4 A.

3.1.4. Escolha do sistema de injeção de GNV

No Brasil há vários tipos de kits de GNV no mercado que, por serem inadequados e obsoletos para a pesquisa, não foram utilizados.

Para este trabalho foi adquirido um sistema italiano eletrônico multiponto, da marca BRC de 5° geração, modelo SEQUENT, sendo controlado pela mesma UCE que comanda a alimentação da gasolina e do álcool etílico. Os componentes adquiridos

permitiram que a alimentação do GNV fosse controlada no mesmo nível conseguido para os combustíveis líquidos, sendo os eletroinjetores instalados paralelamente aos de gasolina, próximo a válvula de admissão, não possuindo nenhum tipo de constrição tipo venturi no duto de admissão para a injeção de gás. Este sistema já é integrado com o redutor de pressão da linha de gás e filtro.

O sistema de injeção de GNV da BRC vem equipado com uma UCE de controle específica que utiliza os sinais de comando dos eletroinjetores da gasolina e álcool para através de um algoritmo calcular o tempo de injeção dos eletroinjetores de GNV. Por não permitir a calibração do tempo de injeção do GNV de forma independente dos combustíveis líquidos esta UCE foi suprimida, sendo utilizada apenas a UCE MoTeC M4, a qual possibilita o controle de todos os combustíveis, tornando o sistema mais compacto, simples e eficaz.

3.1.5. Escolha do Turbocompressor e modificações implementadas

Para fins desta pesquisa, devido ao propósito da turboalimentação ser o ganho de torque mantendo-se o consumo específico invariável, necessita-se de um turbocompressor de baixa inércia e que consiga promover a turboalimentação a partir de baixas frequências de rotação do motor. Por esta aplicação não possuir caráter esportivo, mas sim a manutenção do consumo específico, as pressões de alimentação devem ser precisamente ajustadas em valores bem baixos para a gasolina e valores bem mais elevados para o GNV. Baseando-se nos mapas do compressor e da turbina, de acordo com a faixa de vazão mássica e nas razões de pressão de ambos, o turbo compressor Garret GT12 foi escolhido para este trabalho, por se adequar ao motor selecionado. O casamento, *matching*, entre o motor e o turbocompressor é realizado visando atender as demandas de vazões necessárias por parte do motor que, por sua vez, devem ser fornecidas pelo compressor. Desta forma a turbina escolhida deve ser capaz, através da expansão dos gases, de fornecer o regime de rotação necessário ao compressor para atender a demanda de vazão. A linha de operação do motor nos mapas do compressor e da turbina deve ser então analisada para possibilitar a escolha correta.

A Figura 3.2 mostra a instalação do sistema de turboalimentação, do desvio realizado através da válvula de sangria chamada de *waste gate* e do desvio realizado pela

eletroválvula de controle da pressão de turboalimentação, chamada de eletroválvula *boost drive*. Enquanto a eletroválvula *boost drive* está desativada, o conduto 1 deixa o ar comprimido comunicar-se diretamente com a válvula *waste gate* através do conduto 2, controlando a vazão de gás para a turbina e, conseqüentemente, a pressão de turboalimentação. Quando a eletroválvula *boost drive* é acionada por um sinal PWM parte do ar comprimido do conduto 1 é desviado para o conduto 3 que se comunica com a entrada do compressor. Quanto maior a largura do pulso elétrico maior será o desvio de ar da pilotagem da *waste gate*, tendendo a fechar o seu desvio e conseqüentemente aumentando a rotação da turbina, elevando assim a pressão de turboalimentação do compressor.

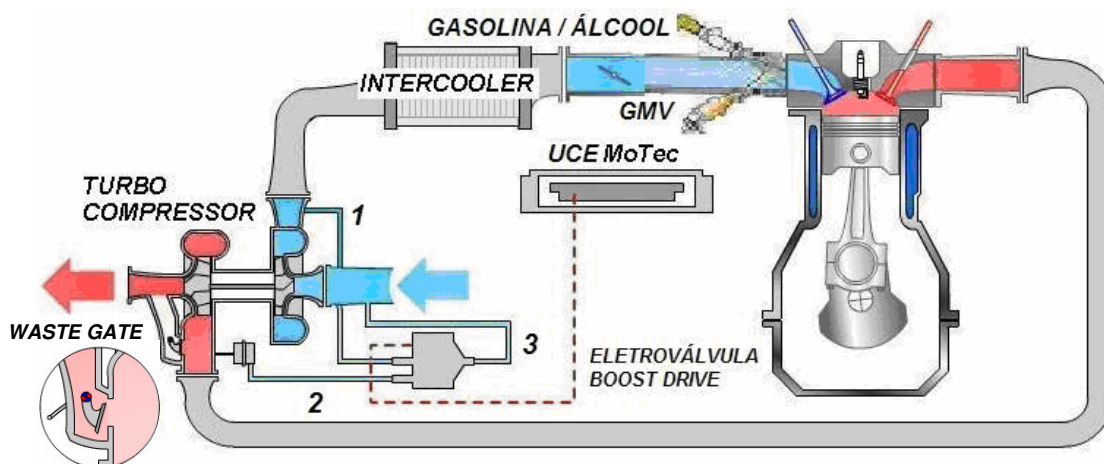


Figura 3.2 - Disposição da instalação do sistema de turboalimentação

No Brasil, o turbocompressor Garret modelo GT12 foi aplicado a motores Volkswagen com o intuito de equipar veículos com apelo esportivo. Desta forma, o controle de grande faixa da pressão de operação do compressor é realizado através da válvula *waste gate*. Somente para uma faixa estreita em regime de elevadas pressões de admissão o compressor era comandado através da eletroválvula *boost drive*. Portanto, em quase todo o regime de operação do compressor, o controle da pressão de turboalimentação é puramente pneumático e mecânico. Nesta pesquisa, devido à necessidade de controlar com precisão a maior faixa possível de operação da pressão de turboalimentação, dando sensibilidade suficiente para o controle do consumo específico de combustível, modificações foram realizadas na válvula *waste gate*, minimizando a faixa de operação do controle mecânico e maximizando a faixa de atuação do controle eletrônico. A mola

original da válvula *waste gate* foi substituída por uma mola de constante menor e a regulagem da pressão inicial foi reajustada de forma que sua força fosse apenas suficiente para retornar a portinhola da válvula, quando da atuação da eletroválvula *boost drive*, possibilitando que praticamente todo o controle da pressão de turboalimentação fosse realizado eletronicamente. Através da análise das temperaturas no circuito da admissão foi observada a necessidade da adoção de um trocador de calor para resfriamento do ar de admissão. O dispositivo tem como função abaixar a temperatura de admissão aumentando assim a massa específica e, conseqüentemente, a massa de ar admitida por ciclo. O controle da temperatura máxima de admissão também é um parâmetro importante, pois temperaturas muito elevadas de admissão induzem detonação e, conseqüentemente, perda de desempenho, além de poderem danificar seriamente o motor.

3.1.6. Preparação do experimento

3.1.6.1. Construção do coletor de descarga e alterações no motor

Para permitir o acoplamento com o turbo compressor, o coletor de descarga original foi modificado. O coletor de descarga original incorpora o catalisador, o qual é inserido o mais próximo possível da câmara de combustão, visando diminuir seu tempo de aquecimento e do sensor de oxigênio que vem inserido a montante do mesmo. Este tempo de aquecimento ou inoperância do catalisador e da sonda lambda é controlado para que seja o menor tempo possível, visando atender às exigências das regulamentações de emissões de poluentes. Contudo, para a versão turboalimentada, o catalisador foi removido do coletor de descarga e um flange para o acoplamento com o turbocompressor foi soldado ao coletor através de uma redução cônica, onde parte do corpo externo do catalisador foi conservado de forma a manter o efeito do plenum existente no coletor e minimizar a influência de novas variáveis no processo de análise. A Figura 3.3 apresenta o coletor modificado acoplado ao motor, juntamente com o turbocompressor sem os anteparos de isolamento térmico, para possibilitar a visualização.

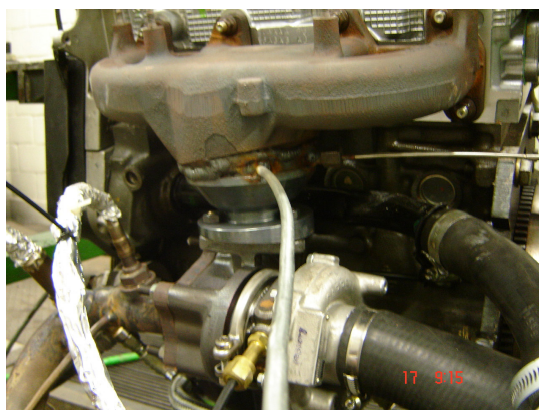


Figura 3.3 - Coletor de descarga acoplado ao motor juntamente com o turbocompressor

3.1.6.2. Alinhamento do motor no dinamômetro

O motor foi instalado na bancada dinamométrica e realizado o alinhamento relativo ao paralelismo e a concentricidade em relação ao dinamômetro. A tolerância admitida para ambos é de 0,10 mm em relação ao dinamômetro. Para a realização do alinhamento é necessário a instalação do sistema de admissão juntamente com o coletor de descarga, o turbocompressor e todo o escapamento. O escapamento não pode apresentar quaisquer interferências com os suportes de sustentação e deve estar suspenso na posição de operação.

3.1.6.3. Instalação dos demais componentes do motor

Depois de instalar o motor na bancada dinamométrica e acoplar o coletor de descarga, o turbocompressor e todo o escapamento, foi instalado também o conduto de ligação do compressor com o resfriador e deste com o coletor de admissão. O resfriador foi submerso em um tanque com água corrente dotado de um sistema de controle de temperatura. Um trocador de calor ou radiador de óleo para o arrefecimento do óleo de lubrificação também foi instalado no circuito de lubrificação logo após o filtro de óleo e retornando em seguida ao circuito de distribuição. O radiador de óleo também foi submerso em um tanque com água corrente, dotado de sistema de controle de temperatura. Somente após esta instalação preliminar foi então realizado o alinhamento do motor com o dinamômetro. Em seguida foram acoplados ao motor todos os sensores

e atuadores do sistema de controle do motor bem como a UCE MoTeC M4. Os componentes necessários para o funcionamento do sistema com GNV também foram instalados. A instalação do sistema de GNV foi realizada conectando-se a tubulação aérea de alta pressão, ligada aos cilindros de abastecimento, com o redutor de pressão. A partir deste ponto, a instalação seguiu a seguinte ordem: filtro da linha de baixa pressão, tubo distribuidor de combustível do GNV, ligado aos eletroinjetores de GNV, e conexão destes através de uma mangueira ao coletor de admissão, colocado o mais próximo possível das válvulas de admissão. A Figura 3.4 mostra a disposição geral da instalação do motor turboalimentado no dinamômetro.

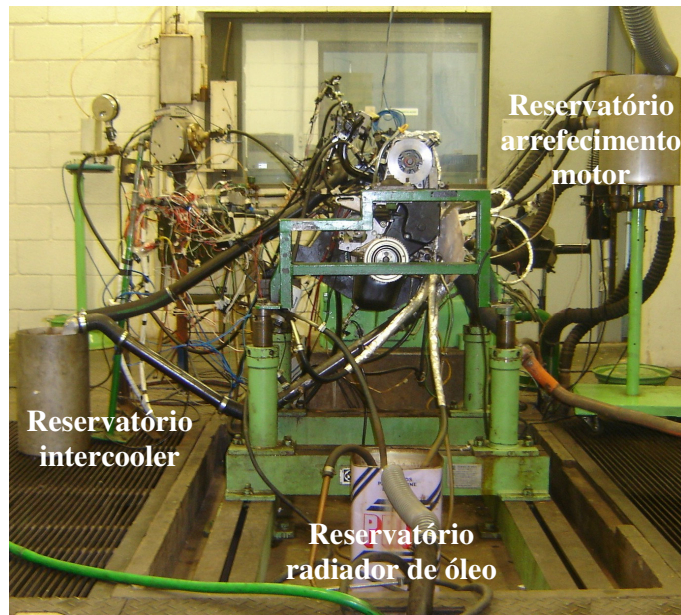


Figura 3.4 - Vista geral da instalação no dinamômetro

A Figura 3.5 (a) mostra a disposição da instalação do tubo distribuidor do GNV no coletor de admissão, bem como a posição dos eletroinjetores, das mangueiras de conexão com o coletor em relação à posição do tubo distribuidor de gasolina e álcool e seus respectivos eletroinjetores. A Figura 3.5 (b) mostra o ponto de injeção dos eletroinjetores de gasolina e álcool posicionados acima na parte interna do coletor e abaixo os pontos de injeção de GNV. A Figura 3.5 (c) apresenta o redutor de pressão utilizado.

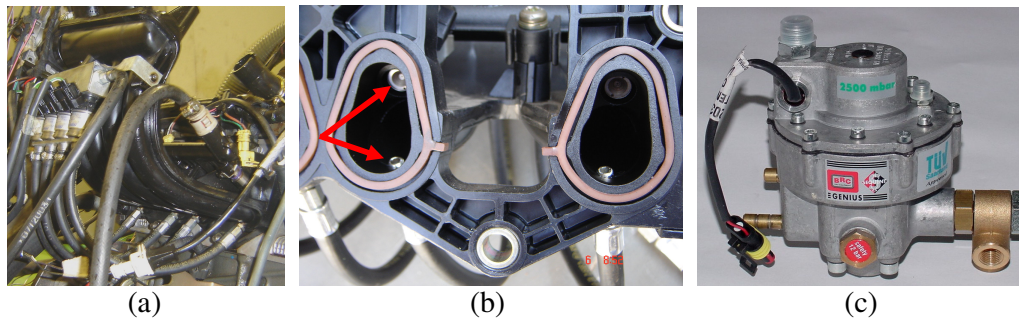


Figura 3.5 - (a) Disposição dos eletroinjetores de GNV, de gasolina e álcool, (b) Posição da injeção de GNV, gasolina e álcool, (c) Redutor de pressão do GNV

O sistema de arrefecimento do motor foi ligado a uma caixa de controle de temperatura da água que é, por sua vez, ligada a uma torre externa de refrigeração, para manter a água de entrada sempre na temperatura desejada. O sistema de bombeamento de gasolina e álcool foi conectado ao respectivo tubo distribuidor. Os cilindros de abastecimento de GNV foram conectados à linha de alta pressão e o sistema de descarga do motor foi ligado ao sistema de exaustão dos gases de descarga, o qual expelle os gases resultantes da queima para fora da sala. Por fim, o sistema de aceleração do motor via cabo foi conectado à válvula borboleta. O sistema de lubrificação do motor foi então abastecido com óleo lubrificante e o sistema de arrefecimento abastecido com água.

3.1.6.4. Preparação da instrumentação do motor e do banco dinamométrico

A instrumentação necessária para os testes é dividida em cinco grupos. O primeiro grupo é composto pela instrumentação necessária para o sistema de controle do motor através da UCE MoTeC M4. O segundo grupo é composto pela instrumentação adicional, conectada ao sistema de aquisição de dados que por sua vez está conectado a um computador específico. O terceiro grupo é composto pela instrumentação necessária ao controle realizado através da mesa de controle do dinamômetro. O quarto grupo é composto da instrumentação necessária para aquisição da pressão do cilindro juntamente com o sinal de frequência de rotação do motor. Por fim, o quinto grupo é constituído de um sistema de medição do tempo de alimentação do circuito primário da bobina de ignição, chamado de *Dwell time*, e um sistema de detecção de detonação nos cilindros.

Para realizar a instrumentação do primeiro grupo conectado a UCE MoTeC M4 foram utilizados os seguintes sensores e atuadores, conforme ilustrado na Figura 3.6: dois sensores indutivos, um para detecção da frequência de rotação, instalado na polia do virabrequim, e outro na polia do eixo comando de válvulas para a detecção do sincronismo do motor, dois sensores do tipo NTC, um para temperatura do ar no coletor de admissão denominado AT e outro para detecção da temperatura do líquido de arrefecimento do motor chamado de ET, dois sensores de pressão do tipo *strain gauge*, um para o ar no coletor de admissão e outro para o ar atmosférico, chamados MAP e BAP respectivamente, um sensor de posição da borboleta resistivo, chamado TP, e uma sonda lambda do tipo banda estreita, instalada logo após o turbocompressor, no escapamento.

As saídas INJETOR 1 a 4 foram ligadas aos quatro injetores de gasolina e álcool, respectivamente, e paralelamente aos quatro injetores de GNV, através de um relé multicontato. Desta forma, através do chaveamento do relé, conectam-se as quatro saídas aos injetores de gasolina e álcool ou aos quatro injetores de GNV. O mesmo relé foi utilizado também para chavear a alimentação 12 Volts dos eletroinjetores, seguindo a mesma ligação em paralelo. Não foram usadas as saídas INJETOR 5 a INJETOR 8, pois essas são utilizadas somente no caso de motores com mais de quatro cilindros. As saídas IGN1 e AUX2 foram utilizadas para o sistema de ignição do motor. A saída AUX1 foi utilizada para comandar a eletroválvula *boost drive* de turboalimentação do turbocompressor. A saída AUX3 não foi utilizada e a saída AUX4 foi conectada a linha de acionamento do relé de alimentação da eletrobomba de combustível. Com exceção dos sensores indutivos que não necessitam de alimentação, os demais sensores foram alimentados com uma tensão de 5V, com sinal de saída que variava de 0 a 5V. A alimentação da UCE foi realizada através de uma fonte externa de tensão ajustável para possibilitar o ajuste da tensão de alimentação e, conseqüentemente, dos mapas que dependem do valor de tensão de alimentação da bateria.

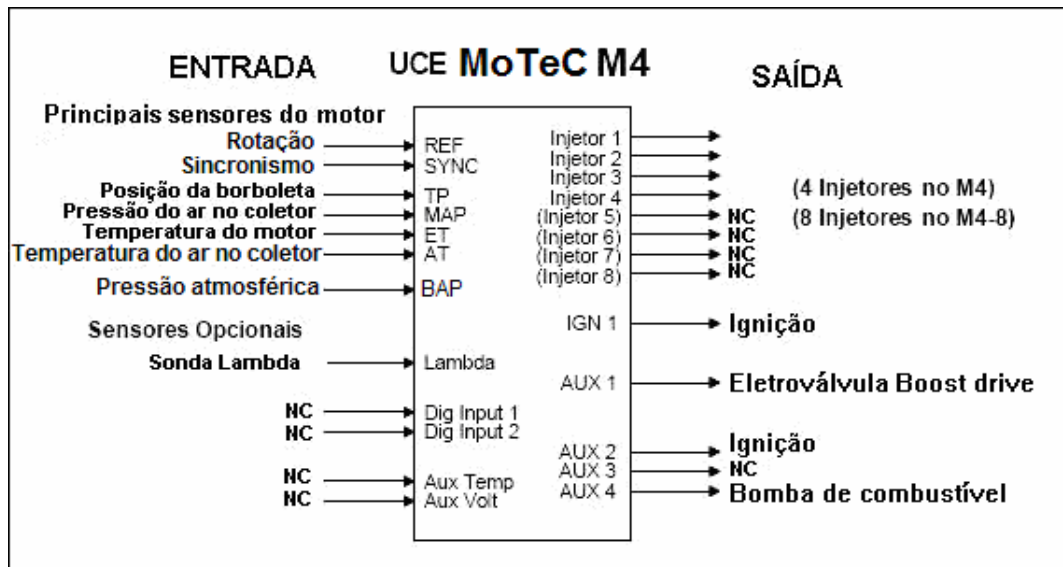


Figura 3.6 - Esquema dos sensores e atuadores necessários para a MoTeC M4

O segundo grupo, composto pelos sensores conectados ao sistema de aquisição de dados, é essencial para monitorar todas as pressões e temperaturas ao longo do motor, assim como os parâmetros vitais que propiciam o controle total do processo de calibração e ajuste do sistema de gerenciamento do motor. Desta forma, além da sonda lambda de banda estreita, uma sonda lambda linear foi instalada também logo após a turbina, conectada ao seu dispositivo mostrador e ao sistema de aquisição de dados. O dispositivo mostrador é amplamente usado durante os ajustes dos mapas de controle, possibilitando a visualização do fator lambda durante o funcionamento do motor. Para controle das condições ambientes dentro da sala dinamométrica foram instalados um sensor de pressão atmosférica, um sensor de temperatura atmosférica e um sensor de umidade relativa do ar na saída do insuflamento próximo a entrada do filtro de ar, possibilitando a aquisição das grandezas necessárias ao cálculo das correções aplicadas ao torque e à potência. Para o controle das pressões ao longo da admissão e descarga foram instalados os seguintes sensores: sensor de pressão na entrada do compressor, chamado de PEC, sensor de pressão na saída do compressor PSC, sensor de pressão na saída do resfriador PSI, sensor de pressão no coletor de admissão MAP, sensor de pressão na entrada da turbina EGP1 e sensor de pressão na saída da turbina EGP2. Para o cálculo da vazão mássica de gás injetado no motor, junto à linha de gás, instalou-se um medidor de vazão volumétrica. Na saída desse medidor foram instalados um sensor

de temperatura e um sensor de pressão, para que a vazão volumétrica medida pudesse ser transformada em mássica, através da equação do gás ideal. Para o controle das temperaturas ao longo da admissão e descarga foram instalados os seguintes sensores: um sensor de temperatura na saída do compressor TSC e um sensor de temperatura da saída do resfriador TSI. Uma célula de carga e um reservatório de combustível para o álcool e a gasolina foram instalados junto à linha de combustível para o cálculo da vazão mássica de combustível líquido. Instalou-se ainda um sensor de temperatura do líquido de arrefecimento. Um sensor ótico para captar a rotação do eixo do rotor da turbina e do compressor também foi ligado ao sistema de aquisição, possibilitando obter dados para checar os mapas do compressor e da turbina, obtidos em banco de fluxo. Por fim, a célula de carga do dinamômetro e o sinal de rotação do mesmo foram conectados ao sistema de aquisição. Os parâmetros aquisitados, bem como alguns cálculos derivados destes, podiam ser monitorados na tela do computador em tempo real, o que permitia um controle total do processo de calibração e ajuste. A Figura 3.7 apresenta a tela do software do sistema de aquisição com os parâmetros em tempo real funcionando com o motor turbo GNV em carga parcial.

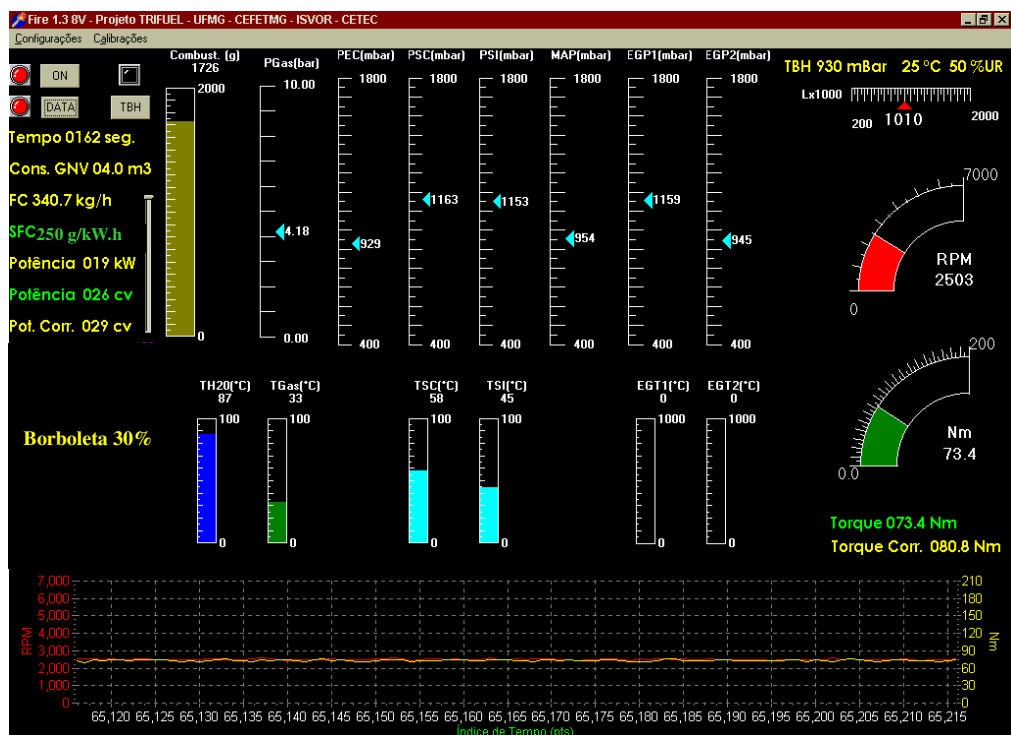


Figura 3.7 - Tela do software de aquisição

A Figura 3.8 (a) mostra as modificações realizadas na voluta do compressor para possibilitar a instalação do sensor ótico para leitura da frequência de rotação do eixo do turbocompressor. A Figura 3.8 (b) mostra o sensor ótico utilizado e a Figura 3.8 (c) o conjunto montado.

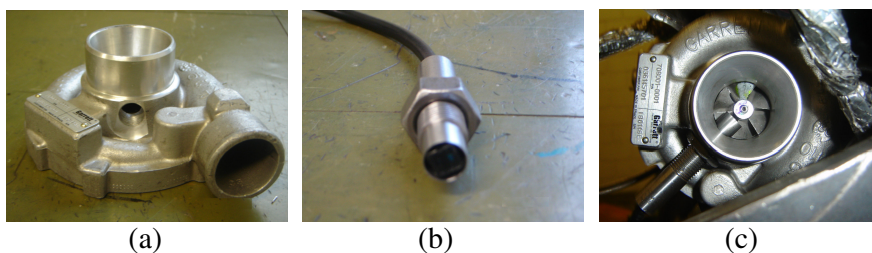


Figura 3.8 - (a) Voluta do compressor modificada para a montagem do sensor de rotação, (b) Sensor ótico de rotação, (c) Turbocompressor com sensor de rotação acoplado

O terceiro grupo abrange a instrumentação necessária ao controle realizado através da mesa de controle do dinamômetro, possuindo alguns sistemas de medição redundantes aos já citados no grupo do sistema de aquisição. Estes sistemas são basicamente: sistema de medição de rotação, através de tacômetro digital, sistema de medição de torque, através de célula de carga e sistema de medição da temperatura do líquido de arrefecimento. Foram ligados à mesa de controle também os termopares instalados na entrada e saída da turbina EGT1 e EGT2, para determinar as temperaturas da exaustão. Na mesa de controle foram lidas ainda a temperatura do óleo lubrificante, a pressão da linha de alimentação de álcool e gasolina e a pressão do óleo lubrificante.

O quarto grupo, necessário para a aquisição da pressão do cilindro juntamente com o sinal de frequência de rotação do motor, é constituído de um transdutor de pressão incorporado a uma vela de ignição específica, um amplificador de carga e um aquisitor de dados específico. Este sistema é imprescindível para a análise da combustão, através dos parâmetros obtidos da depuração do sinal de pressão dentro do cilindro. O sinal de frequência de rotação do motor é adquirido direto do sensor de rotação do sistema de gerenciamento, acoplado ao motor. A Figura 3.9 apresenta o transdutor (a), o amplificador (b) e o sistema de aquisição (c).

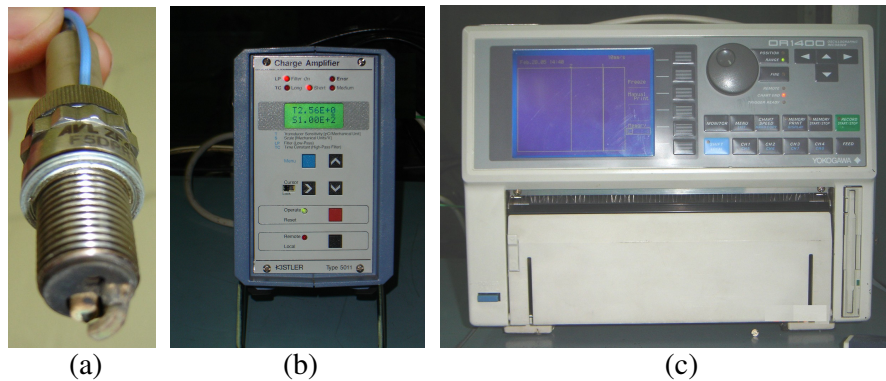


Figura 3.9 - (a) Vela de ignição com transdutor de pressão, (b) Amplificador de carga, (c) Aquisitor de dados

O quinto grupo é composto de um sistema de medição de corrente dotado de um sensor do tipo hall, instalado na saída do módulo de ignição do 1º e 4º cilindros, para monitorar o sinal elétrico de alimentação do primário da bobina, necessário para o ajuste dos tempos de permanência de alimentação. A leitura deste sinal foi realizada por um osciloscópio, conectado ao sensor. O sistema de detecção de detonação é constituído de um sensor de detonação, uma placa de som convencional de 16 bits, instalada no computador, um software acoplado a um espectograma para realizar a análise da transformada rápida de Fourier FFT em tempo real do sinal do sensor de detonação e um alto-falante de agudos para detecção auditiva de detonação pelo aplicador. O sistema para controle da temperatura de saída do resfriador é composto de um sensor PT100, posicionado na saída do resfriador, que informa a temperatura do ar comprimido a um controlador PID, que por sua vez, controla o fluxo de água para o reservatório de água do resfriador de forma a manter a temperatura programada.

A Figura 3.10 mostra a disposição dos sensores ao longo do motor, cuja legenda é apresentada nas Tabelas 3.1 (a), (b), (c), (d) e (e).

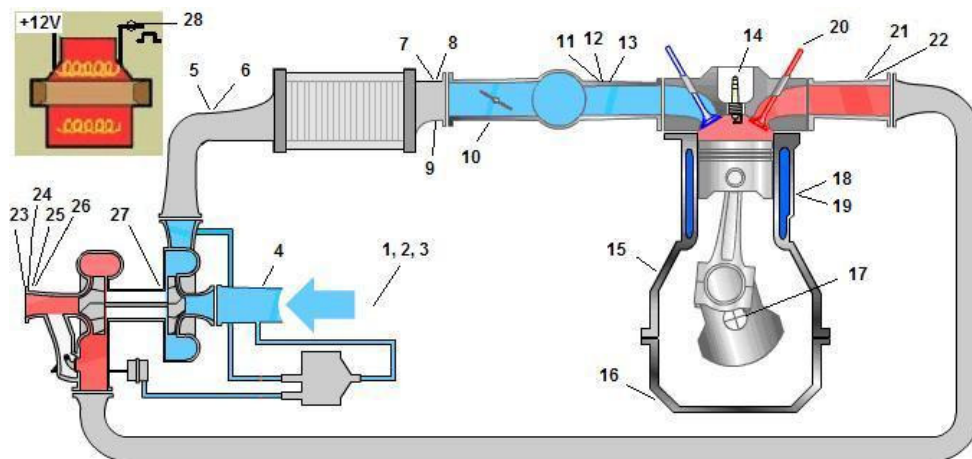


Figura 3.10 - Disposição dos sensores ao longo do motor

Tabela 3.1 (a) - Sistemas de medição do grupo 1 com as faixas de medição e incertezas

Grupo 1	Nº	Grandeza	Faixa de medição	Sensor / Tipo	Origem da incerteza	Incerteza % VFE
	17	Rotação	0 a 10.000 rpm	Indutivo 1662	Calibrado	± 0,05%
	20	Sincronismo	720°	Indutivo 1662	Calibrado	± 0,01%
	10	TP	0 a 100%	Resistivo IPF2C	Calibrado	± 0,44%
	1	BAP	10 a 115 kPa	BOSCH 0261 230 030	Calibrado	± 0,12%
	11	MAP	0 a 250 kPa	BOSCH 0281 002 510	Calibrado	± 0,05%
	18	ET	-40 a 130 °C	WTS 05	Calibrado	± 0,5%
	12	AT	-40 a 130 °C	BOSCH 0281 002 510	Calibrado	± 0,5%
	23	Fator Lambda	0,97 a 1,10	NTK OZA334 (12V)	Do manual do fabricante	± 0,7%

Tabela 3.1 (b) - Sistemas de medição do grupo 2 com as faixas de medição e incertezas

Grupo 2	Nº	Grandeza	Faixa de medição	Sensor / Tipo	Origem da incerteza	Incerteza % VFE
	1	BAP	10 a 115 kPa	BOSCH 0261 230 030	Calibrado	± 0,12%
	2	Temperatura atmosférica	0 a 150 °C	LM35	Calibrado	± 0,33%
	3	Umidade relativa	0 a 100%	HIH3605	Do fabricante	± 1,0%
	4	PEC	10 a 115 kPa	BOSCH 0261 230 030	Calibrado	± 0,12%
	5	PSC	0 a 250 kPa	BOSCH 0281 002 510	Calibrado	± 0,05%
	6	TSC	0 a 150 °C	LM35	Calibrado com PM500 e PM200	± 0,33%
	7	PSI	0 a 250 kPa	MPX 5100P	Calibrado	± 0,05%
	8	TSI	0 a 150 °C	LM35	Calibrado com PM500 e PM200	± 0,33%
	13	MAP	0 a 250 kPa	BOSCH 0281 002 510	Calibrado	± 0,05%
	19	ET	0 a 150 °C	LM35	Calibrado	± 0,33%
	21	EGP1	0 a 250 kPa	MPX 5100P	Calibrado	± 0,05%
	24	EGP2	10 a 115 kPa	BOSCH 0261 230 030	Calibrado	± 0,12%
	25	Fator Lambda	0,75 a 1,65	ETAS LA2	Do manual do fabricante	± 2,5%
	27	Rotação da turbina	0 a 180.000 rpm	Chave ótica	Calibrado	± 0,05%
		Temperatura do GNV	0 a 150 °C	LM35	Calibrado com PM500 e PM200	± 0,33%
	Pressão do GNV	0 a 700 kPa	MSP300-100P- 2N	Do fabricante	± 0,1%	
	Massa de combustível	0 a 2 kg	Célula de carga	Calibrado com Massas padrão (100, 200, 500 e 1000 kg)	± 0,08%	
	Vazão volumétrica de GNV	0,6 a 25 m³/h	INSTROMET B.V. IRM-3- G16-40-ANSI 125/150	Do fabricante	± 0,2%	

		Grandeza	Faixa de medição	Sensor / Tipo	Origem da incerteza	Incerteza % VFE
		Rotação do motor (dinamômetro)	0 a 10.000 rpm	Indutivo 1662	Do manual do fabricante	$\pm 0,13\%$
		Torque (dinamômetro)	0 a 600 N.m	Célula de carga	Calibrado com Massas padrão (0 a 30 kg)	$\pm 0,3\%$

Tabela 3.1 (c) - Sistemas de medição do grupo 3 com as faixas de medição e incertezas

	Nº	Grandeza	Faixa de medição	Sensor / Tipo	Origem da incerteza	Incerteza % VFE
Grupo 3	16	Temperatura do óleo	0 a 150 °C	PT 100	Calibrado com PM500 e PM200	$\pm 0,7\%$
	22	EGT1	0 a 1200 °C	Termopar tipo K	Calibrado com PM500 e PM200	$\pm 1,25\%$
	26	EGT2	0 a 1200 °C	Termopar tipo K	Calibrado com PM500 e PM200	$\pm 1,25\%$
		Torque (dinamômetro)	0 a 600 N.m	Célula de carga	Calibrado com Massas padrão (0 a 30 kg)	$\pm 0,3\%$
		Rotação do motor (dinamômetro)	0 a 10.000 rpm	Indutivo 1662	Do manual do fabricante	$\pm 0,13\%$
		Pressão óleo (dinamômetro)	0 a 600 kPa	Manômetro hidráulico	Do fabricante	$\pm 0,83\%$
		Pressão combustível (dinamômetro)	0 a 600 kPa	Manômetro hidráulico	Do fabricante	$\pm 0,83\%$

Tabela 3.1 (d) - Sistemas de medição do grupo 4 com as faixas de medição e incertezas

	Nº	Grandeza	Faixa de medição	Sensor / Tipo	Origem da incerteza	Incerteza % VFE
Grupo 4	14	Pressão no cilindro 1	0 a 20.000 kPa	AVL - GU13Z-24	Do fabricante	$\pm 0,3\%$
	17	Rotação do motor	0 a 10.000 rpm	Indutivo 1662	Do manual do fabricante	$\pm 0,05\%$

Tabela 3.1 (e) - Sistemas de medição do grupo 5 com as faixas de medição e incertezas

Grupo 5	Nº	Grandeza	Faixa de medição	Sensor / Tipo	Origem da incerteza	Incerteza % VFE
	9	Temperatura saída do intercooler	0 a 150 °C	PT 100	Do fabricante	± 0,7%
	15	Aceleração (detonação)	0 a 60 G	piezoelétrico	Do fabricante	± 0,38%
	28	Corrente (dweel)	0 a 70 A	Hall LA 55 P	Do fabricante	± 0,9%

Todas as incertezas citadas na Tabela 3.1 referem-se às incertezas máximas, sendo lineares todos os sensores calibrados, apresentando uma não linearidade inferior a 0,1%.

3.1.6.4.1. Determinação das incertezas combinadas

As incertezas dos sistemas de medição utilizados foram calculadas conforme a metodologia descrita por Gonçalves Jr. (2001) que atende aos requisitos do guia de incertezas (NBR 5725, 1998). A Tabela 3.2 apresenta as incertezas combinadas das grandezas envolvidas.

Tabela 3.2 - Incertezas associadas máximas

Incertezas das medições	
Rotação	± 30 rpm
Torque	± 0,9 N.m
Torque Corrigido	± 0,9 N.m
Potência	± 1,0 kW
Potência Corrigida	± 1,0 kW
Consumo (combustível líquido)	± 0,5 kg/h
Consumo (GNV)	± 0,3 kg/h
Consumo específico (combustível líquido)	± 16 g/kWh
Consumo específico (GNV)	± 14 g/kWh
Eficiência Volumétrica (GNV)	± 4,5 %
Fator de correção	± 0,00025

3.1.6.5. Preparação do sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados consiste de um computador e um software desenvolvido em plataforma DELPHI que realiza a leitura dos sinais de tensão enviados pelos sensores, através de uma placa de aquisição da marca LINX, com 16 canais AD de 12 bits.

Um arquivo era gerado a partir da ativação do sistema de aquisição, podendo-se tratar e analisar os dados armazenados após os testes realizados.

As incertezas das grandezas foram obtidas através de calibração por comparação com padrões convencionais, ou baseando-se nos certificados de calibração fornecidos pelo fabricante, ou a partir de informações dos manuais dos fabricantes. As Tabelas 3.1 (a), (b), (c), (d), (e) mostram os sistemas de medição usados, com as respectivas faixas de medição, tipos, origem das incertezas de calibração e seus valores.

3.1.6.6. Calibração do sistema de aquisição

O sistema de aquisição de dados é composto de um computador com uma placa de aquisição LINX CAD 16/32 de 12 bits e o software para a aquisição de dados. O software recebia os sinais elétricos enviados pelos sensores instalados no motor, convertendo-os através de parâmetros obtidos por regressões lineares durante a calibração, em valores numéricos que representam as grandezas medidas nas unidades apropriadas. Em seguida estes valores eram gravados em um arquivo no computador. A faixa de operação dos sinais recebidos pela placa de aquisição era de 0 a 5V.

Para se executar a calibração dos sensores acoplados ao sistema de aquisição foram utilizados outros instrumentos de medição com incertezas previamente determinadas e inferiores aos que seriam usados no sistema.

O procedimento de calibração foi o mesmo para todos os tipos de sensores, alterando somente os padrões que seriam utilizados, de acordo com a grandeza a ser medida pelo sensor. O sensor mede o padrão e gera um sinal elétrico que é enviado para o software. O software faz a leitura desse sinal e o grava em um arquivo. Executam-se várias medidas para cada sensor. Correlacionando-se o valor do padrão com a média do sinal

para as várias medições realiza-se uma regressão linear. Essa regressão é usada pelo software para a conversão dos sinais elétricos em uma grandeza física que representa o valor medido. Este procedimento foi executado para a calibração de todos os sensores de temperatura, pressão e da balança de combustível.

O padrão utilizado para a calibração da balança de combustível foram massas padrão. Para a calibração da temperatura, foi utilizado um termômetro padrão que media a temperatura da água em um recipiente fechado com temperatura estabilizada juntamente com o sensor a ser calibrado. Os sensores de pressão foram calibrados com um manômetro de mercúrio e uma bomba de sucção, através do qual uma pressão era gerada e a sua leitura era realizada com dois sensores. O certificado de calibração do medidor de vazão volumétrica foi enviado juntamente com o equipamento, não havendo necessidade de calibração.

Os sensores lidos pelo sistema de aquisição e os sensores lidos pela UCE tiveram a equação transformada para valores digitais, como é lido pela MoTeC M4. Essa transformação é feita pela equação, MoTeC (2003):

$$V_{A/D} = 2^x \times \frac{V_{\text{sin al}}}{V_{CC}} \quad (3.1)$$

na qual $V_{A/D}$ é o sinal digital lido pelos sistemas, 2^x é a resolução da placa, sendo o expoente x igual a 10 para MoTeC e 12 para o sistema de aquisição e x é o número de bits que o sistema utiliza. Desta forma, o valor de 2^{10} é igual a 1024 para a MoTeC e 2^{12} é igual a 4096 para o sistema de aquisição. $V_{\text{sin al}}$ é a tensão do sinal em Volts e V_{CC} é o valor da tensão de alimentação do sensor em Volts que é igual a 5 Volts.

3.1.7. Realização dos testes dinamométricos

Após a conclusão da etapa de preparação do motor, foram iniciados os testes em dinamômetro. Os ajustes realizados nos sistemas de controle com o motor aspirado e turboalimentado são abordadas a seguir.

Para as provas realizadas com o motor aspirado e turboalimentado a pressão da linha de combustível para a gasolina e para o álcool foi mantida constante em 3,5 bar através de

um sistema de envio sem retorno de combustível ao tanque. Os eletroinjetores originais utilizados nas provas com o motor aspirado foram mantidos para as provas com o motor turboalimentado por fornecer vazões suficientes de acordo com a demanda de vazão requerida pelo motor turboalimentado.

Em se tratando do sistema de alimentação de GNV, a pressão estática da linha após o redutor de pressão é originalmente calibrada para 250 kPa, sendo esta a pressão utilizada para as provas realizadas com o motor aspirado. Para as provas com o motor turboalimentado a pressão estática após o redutor foi ajustada para 500 kPa de forma a atender a demanda de vazão de combustível para o motor, evitando assim, a substituição dos eletroinjetores de GNV. Uma estimativa inicial para o ganho de vazão de combustível em função da pressão de alimentação pode ser realizada levando-se em consideração que ao aumentar a pressão de combustível se aumenta a sua vazão pela raiz quadrada da razão entre a nova pressão e a pressão padrão, RACEPRO-1Fi (2006). Desta forma o dobro da pressão gera em torno de 41% a mais de vazão.

Os testes para o motor turboalimentado foram realizados em três etapas distintas como mostra a Figura 3.11. Todas as etapas foram realizadas utilizando-se a razão volumétrica de compressão original do motor de 11:1 e com a UCE MoTeC M4. A primeira etapa foi realizada com gasolina C. A segunda foi realizada com álcool etílico e a terceira foi realizada com o combustível GNV.

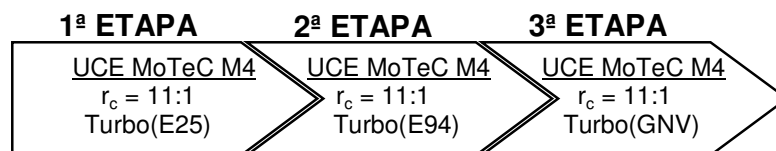


Figura 3.11 - As três etapas dos testes realizados

As etapas dos testes compreendem a realização de toda a configuração do software da UCE, da metodologia de ajuste dos mapas de controle, das provas de desempenho segundo a norma NBR-1585, das provas de eficiência volumétrica global segundo a norma 7-A3511 FIAT AUTO (2004) e das provas de aquisição do sinal de pressão do primeiro cilindro. Conforme mencionado previamente, nos testes realizados com o motor aspirado, primeiramente o referido motor foi amaciado de acordo com a norma 7-A6000 FIAT AUTO (2004) visando promover o assentamento entre os componentes

internos. Os valores do fator lambda em cada regime de rotação e carga adquiridos previamente nas provas com o motor aspirado e UCE original IAW 4AF.FF, operando com gasolina e álcool etílico, forneceram dados importantes para o desenvolvimento de toda a pesquisa. Através destes valores foi possível conhecer não apenas os valores do fator lambda no sistema original, mas também os pontos de operação onde a UCE operava com a malha aberta, bem como as temperaturas dos gases de descarga nas condições limites da malha fechada. Embora durante o desenvolvimento deste trabalho não foram medidos os parâmetros de emissões de poluentes emitidos pelo motor e sabendo-se que as calibrações e ajustes da UCE original atendem a norma de emissões NBR-6601, buscou-se, sempre que possível, obter-se valores de fator lambda próximos ao da UCE original. Contudo, o valor do fator lambda definido durante o ajuste dos mapas de controle leva em consideração outros aspectos importantes que determinam a necessidade de se abrir a malha, tais como a temperatura dos gases de descarga e a identificação do regime de plena carga. Para os ajustes do motor turboalimentado, temperaturas dos gases de descarga mais elevadas são naturalmente esperadas.

3.1.7.1. Testes realizados com o motor turboalimentado

Primeiramente, a UCE MoTeC M4 foi configurada de acordo com os sensores e atuadores presentes no sistema de controle. Todo o processo de calibração e ajuste dos mapas de controle específicos foi realizado antes da realização dos testes de desempenho, eficiência volumétrica e de levantamento das pressões internas dos cilindros. A configuração inicial e a metodologia de calibração e ajuste usada em todas as etapas dos testes são apresentadas a seguir, antes da descrição de cada um dos testes. A metodologia de calibração e ajuste é baseada na metodologia elaborada por Baeta *et al.* (2004b).

3.1.7.1.1. Configuração da UCE MoTeC M4

O primeiro passo do processo de calibração e ajuste é configurar o software de acordo com o motor utilizado e seus componentes do sistema de controle, tais como o número de cilindros, as características do sistema de injeção de combustível, as características

do sistema de ignição, dentre outros. Os parâmetros presentes na tela de configuração principal do software são mostrados na Tabela 3.3

Tabela 3.3 - Configuração Principal da MoTeC M4

Main Setup		
Parâmetro	Valor	Definição
Injector Pulse width (IJPU)	15 ms 30 ms 13 ms	Tempo máximo do pulso de injeção
Injector Current (IJCU)	0 4	Modo referente ao pico máximo de corrente dos injetores relacionado ao seu valor de resistência elétrica a temperatura ambiente
Injector operation (IJOP)	1	Tipo de operação dos injetores
Injector battery comp (IJBC)	-1	Curva de compensação do tempo de alimentação dos injetores
Efficiency calc method (EFF)	1	Método de cálculo da eficiência (EFF) - Índice da Tabela de combustível
Load calc method (LOAD)	1	Método de cálculo da carga (LOAD) - Índice da Tabela do avanço de ignição
Load sites selection (LDS)	-1	Seleciona a faixa da eficiência e da carga
Number of cylinders (CYLS)	4	Número de cilindros considerando o tipo de sincronismo.
Ref sensor type (RFSN)	2	Tipo de sensor de referência
Sync sensor type (SYSN)	2	Tipo do sensor de sincronismo
Ref / Sync mode (REF)	74	Relação da falha de dentes na polia/ciclo
Crank ref teeth (CR T)	60	Numero de dentes incluindo a falha
Crank index position (CRIP)	95°	Posição da falha na polia
Ignition type (IGN)	1	Disparo na descida
Number of coils (COIL)	2	Número de bobinas de ignição
Ignition dwell time (DELL)	-0.1	Tempo de alimentação do primário da bobina
Ignition delay time (DLY)	50 us	Atraso entre o comando e o tempo real de disparo.

O valor do tempo máximo de injeção para cada combustível deve ser verificado separadamente, dependendo da vazão máxima do injetor e do combustível utilizado, pois cada combustível possui uma razão estequiométrica ar-combustível. A definição do tempo máximo do injetor permite que o mapa do tempo de injeção seja ajustado, ponto a ponto, como um valor percentual deste valor máximo previamente determinado. A vantagem desse procedimento é que se durante os ajustes no mapa de controle de injeção for superado o limite do tempo máximo previamente determinado, é possível

modificá-lo alterando percentualmente todos os ajustes previamente realizados, de forma a manter os tempos de injeção calibrados anteriormente. Caso o valor máximo percentual utilizado no mapa do tempo de injeção esteja abaixo de 60%, o valor do tempo máximo de injeção deve ser diminuído para aumentar os valores percentuais no mapa, garantindo assim uma boa resolução. De forma similar se o valor máximo percentual utilizado no mapa do tempo de injeção estiver acima de 99%, logo o valor do tempo máximo de injeção deve ser aumentado fazendo com que os valores percentuais no mapa diminuam. Esta lógica permite ainda a compensação devido a mudanças na vazão do injetor, ocasionadas pela substituição do mesmo ou devido a uma alteração na pressão da linha de alimentação do combustível. A variável responsável pelo tempo máximo de injeção do combustível foi configurada em 15ms para a gasolina C, em 30ms para o álcool etílico e em 13ms para os eletroinjetores de GNV.

O pico de corrente máximo de operação dos eletroinjetores é definido com base na sua resistência elétrica na temperatura ambiente. Desta forma para os eletroinjetores de gasolina e álcool com resistência elétrica de 16 Ω foi utilizado o modo 0, já para os eletroinjetores de GNV com resistência de 2,2 Ω foi utilizado o modo 4.

O tipo de operação dos eletroinjetores tanto para a gasolina e o álcool quanto para o GNV foi definido como seqüencial e sincronizado. Desta forma, injeta-se combustível apenas no cilindro que está em tempo de admissão.

O ajuste da compensação do tempo morto dos eletroinjetores em função da tensão da bateria foi realizada para todos os combustíveis utilizados. Este parâmetro é influenciado diretamente pelas características de cada tipo de eletroinjetor que determinam, dentre outros fatores, o atraso dos mesmos como função da diferença de potencial elétrico. O valor -1 foi configurado para possibilitar a utilização de um mapa de ajuste específico para cada combustível, cujo procedimento será descrito posteriormente na seção metodologia de calibração e ajuste dos mapas de controle.

O software utilizado oferece uma gama de métodos de cálculo para a determinação dos parâmetros de eficiência volumétrica no ponto de operação e para determinação da carga do motor. Primeiramente é importante ressaltar que o parâmetro eficiência volumétrica é utilizado no eixo das ordenadas nos mapas relativos ao tempo de injeção

de combustível e do controle da pressão da turboalimentação. Já o parâmetro de carga é utilizado no eixo das ordenadas nos mapas relativos ao avanço de ignição e controle da malha fechada do fator lambda. Por se tratar de um motor turboalimentado com controle eletrônico da pressão de turboalimentação, inicialmente cogitou-se em utilizar a configuração do método de cálculo para eficiência e para carga em função da pressão do coletor de admissão e da pressão barométrica. O cálculo dos parâmetros de eficiência e carga, escolhidos inicialmente, é realizado pela expressão, MoTeC (2003).

$$EFF = LOAd = 100\% \times \frac{MAP}{BAP} \cdot \quad (3.2)$$

Entretanto para se controlar com precisão o momento de abertura e fechamento da malha para controle do fator lambda, torna-se necessário que o método de cálculo da carga possua alta sensibilidade em relação à variação da posição da borboleta. Sabendo-se da não linearidade do sensor de pressão MAP e, conseqüentemente, da eficiência volumétrica em relação à abertura da válvula borboleta, a configuração do método de cálculo para a eficiência e para a carga foi o modo 1, ou seja, em função do percentual de abertura da válvula borboleta. A Figura 3.12 mostra a porcentagem de abertura da válvula borboleta a partir da qual a eficiência volumétrica é máxima para cada rotação para o motor aspirado.

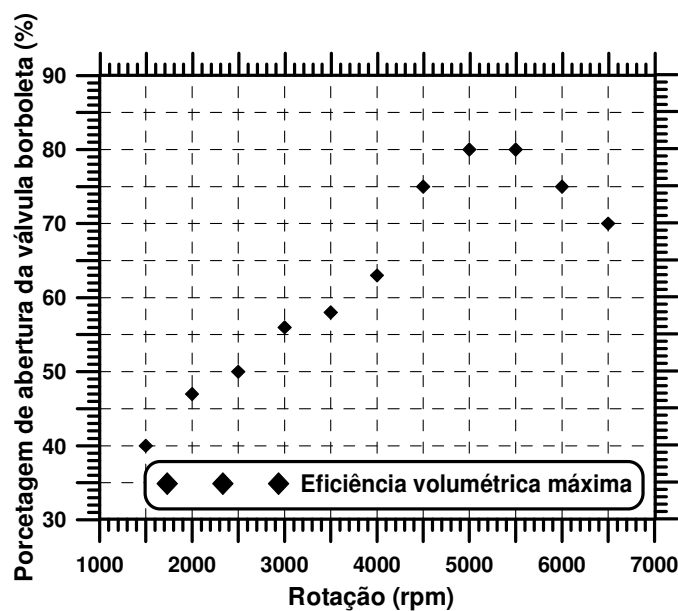


Figura 3.12 - Eficiência volumétrica máxima versus abertura da válvula borboleta

A faixa da eficiência e da carga foi configurada como -1; ou seja; isso permite que o aplicador determine a faixa de operação dos mapas e os intervalos entre pontos. Para este trabalho, os intervalos foram determinados tendo como critério possibilitar uma maior resolução nos regimes de eficiência e carga onde as curvas de desempenho seriam obtidas e nos regimes de abertura e fechamento do controle da malha do fator lambda.

O parâmetro que indica o número de cilindros do motor foi configurado para 4, por se tratar de um motor de 4 cilindros.

Os parâmetros que configuram o tipo de sensor de referência e de sincronismo foram configurados com o valor de número 2, que estabelece que os sensores de rotação e referência e de sincronismo utilizados são sensores magnéticos indutivos.

O parâmetro da posição da falha na polia é usado para definir a posição angular da falha dos dois dentes da polia em relação ao centro do sensor de rotação quando o primeiro pistão encontra-se no PMS. O seu procedimento de calibração será descrito posteriormente na seção metodologia de calibração e ajuste dos mapas de controle.

O tipo de disparo para o acionamento da ignição foi configurado neste sistema baseado na referência da descida do sinal elétrico do sensor de rotações.

O parâmetro que indica o número de bobinas diretamente controladas pela UCE foi configurado para o valor 2 por se tratar de duas bobinas de ignição estáticas que funcionam segundo o princípio de centelha perdida. Este método se baseia em disparar a centelha nos dois cilindros que se aproximam do PMS. Um dos cilindros se encontra em fase final de compressão e irá realizar a combustão, o outro está em final de descarga e a centelha será perdida. O circuito secundário está em série devido ao cabeçote que liga a massa de uma vela a outra. Desta forma o cilindro que está em final de compressão e possui maior dielétrico absorve a maior parte da energia, podendo a tensão chegar a cerca de 30.000 Volts. Já no cilindro em fase final de descarga a tensão é cerca de 400 Volts devido ao baixo dielétrico.

O parâmetro que controla o tempo de alimentação do primário da bobina é configurado como -0,1, indicando que o tempo de alimentação do primário da bobina pode ser calibrado, ao invés de usar uma onda quadrada padrão. O procedimento de calibração

desse tempo será descrito posteriormente na seção metodologia de calibração e ajuste dos mapas de controle.

Por fim, o tempo de atraso entre o comando e o tempo real de disparo foi configurado levando em consideração a característica da velocidade de processamento do sistema, sendo estabelecido o valor de 50 us.

Depois de acertada a Tabela de configuração principal, o próximo passo é a definição da ordem de funcionamento dos cilindros, chamado no software da UCE de *FIRING ORDER*. Nesse caso foi mantida a ordem de ignição original 1-3-4-2.

Em seguida foi realizada a configuração dos sensores usados na UCE, a qual é mostrada na Tabela 3.4. Esta configuração determina o tipo do sensor, a necessidade da calibração por parte do usuário e a utilização ou não de outros canais disponíveis.

Tabela 3.4 - Configuração dos sensores usados na MoTeC M4

Configuração do sensor	Valor	Tipo
Throttle position (TP)	3	Válvula borboleta linear
Manifold Pressure (MAP)	-1	Pressão no coletor de admissão - Definido pelo usuário
Air Temp (AT)	1	Temperatura do ar na admissão – sensor NTC (Coeficiente de temperatura negativo)
Engine Temp (ET)	1	Temperatura do líquido de arrefecimento – sensor NTC
Aux Temp (Aux T)	0	Desabilitado
Aux Voltage	-4	Strain gage
Lambda Sensor (LA)	1	Narrow band

A sonda lambda de banda estreita *narrow band* possibilita sua utilização através do controle em malha fechada, visando uma mistura estequiométrica, ou da malha aberta, onde o controle não é executado. Portanto, o valor 1 é utilizado para habilitar o reconhecimento do sistema da presença do referido sensor. O funcionamento em malha fechada consiste em reconhecer a porcentagem de oxigênio na descarga e conseqüentemente o estado da mistura e possibilitar que o sistema realize um auto ajuste do tempo de injeção, de acordo com a faixa percentual de ajuste pré-estabelecida no software. Dentre várias configurações que tem que ser feitas para a operação correta da

sonda tais como o valor do filtro longo, a temperatura do motor abaixo da qual o sinal da sonda é desprezado, o valor da temperatura do motor na qual o controle total da mistura pela sonda é habilitado, a temperatura acima da qual a diagnose do funcionamento da sonda é habilitada, a faixa de ajuste percentual da mistura é sem dúvida um dos mais relevantes. Para este trabalho esta faixa estabelecida através dos parâmetros *Rich Trim Limit*, limite de enriquecimento, e *Lean Trim Limit*, limite de empobrecimento da mistura, foram configuradas para 10% e -10% respectivamente, para que o alcance do controle da sonda fosse suficiente. Todas as outras opções são configuradas para valores típicos recomendados.

O controle da máxima rotação de operação do motor e a forma de controle devem também ser estabelecidos no software. Primeiramente, o valor da máxima rotação deve ser configurado.

O sistema controla a rotação a partir de um determinado valor em função da aceleração do motor, de forma que a rotação máxima estabelecida não seja superada. Para isto, a tolerância acima da qual todos os cilindros devem ser desalimentados deve ser também configurado.

A modalidade do controle de rotação deve ser também estabelecida, podendo o sistema ser configurado para cortar apenas a ignição quando se aproxima do limite de rotação, ou apenas a injeção de combustível, ou os dois juntos, ou um e depois o outro. Para este trabalho foi estabelecido o modo 3, que configura o sistema para o corte simultâneo da injeção de combustível e da ignição. Para veículos com catalisador deve-se atentar para o fato que não se deve cortar a ignição e manter o combustível porque o catalisador seria destruído.

Por último, a UCE deve ser configurada para detectar erro quando um determinado valor de rotação acima do limite máximo for atingido. Para este motor foi configurado o valor de 500 rpm acima do valor máximo de rotação. A configuração desses parâmetros pode ser vista na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Configuração do controle da rotação

Limite de Rotação	Valor	Tipo
RPM limit	7000	Limite de rotação
RPM Limit Ctrl Range	200	Tolerância de 200 rpm acima do limite
RPM Limite Type	3	Corte simultâneo da ignição e do combustível acima do Ctrl Range
RPM Limit Diag	500	Rotação acima do limite para o diagnóstico de erro

Configura-se também a leitura do sinal do sensor de abertura da válvula de borboleta, mostrando à UCE a sua posição totalmente fechada e totalmente aberta. Como o funcionamento do sensor é linear, a calibração da posição da válvula borboleta é feita automaticamente pela UCE.

Deve-se ainda configurar a forma de controle do ângulo de avanço de injeção de combustível, a forma de controle da pressão de turboalimentação, o valor máximo da pressão de turboalimentação permitida e o tipo de controle do avanço de ignição. A Tabela 3.6 mostra estes parâmetros.

Tabela 3.6 - Configuração dos controles dos mapas

Sensor setup	Valor	Tipo
Injection Timing Table	0	Dependente apenas da rotação do motor
Injection Timing Position	0	Referência do ângulo
Ignition Percent/Degrees	1	Ângulo de ignição em graus
Boost Table Type	6	Dependente da eficiência volumétrica e da rotação do motor
Over Boost Cut	200	Pressão de turboalimentação na qual a injeção e ignição serão cortadas

O ângulo de avanço da injeção de combustível pode ser configurado em função apenas da rotação ou em função da rotação e da eficiência volumétrica. Neste trabalho o avanço de injeção de combustível foi configurado no modo 0, que determina o controle apenas em função da rotação.

A referência do ângulo de injeção pode ser relativa ao início ou final da injeção. Geralmente toma-se como referência o final, uma vez que o término da injeção deve

ocorrer antes do fechamento mecânico da válvula de admissão, sendo por este motivo configurado o modo 0.

Para facilitar a compreensão dos valores utilizados de avanço de ignição, o controle do ângulo em graus no mapa de avanço foi adotado.

O mapa de controle da pressão de turboalimentação foi configurado em função da rotação e da eficiência volumétrica.

A pressão máxima de operação de turboalimentação acima da qual a injeção de combustível e a ignição serão cortadas simultaneamente foi configurada para 200 kPa. Este valor deve ser estabelecido visando salvaguardar o motor em caso de funcionamento inadequado.

A forma de controle da eletroválvula de turboalimentação também deve ser configurada no software, fornecendo as características da referida eletroválvula para o sistema. A Tabela 3.7 mostra a configuração realizada.

Tabela 3.7 - Configuração do controle da eletroválvula de turboalimentação

Controle da eletroválvula	Valor	Tipo
Type	3	Controle através de <i>duty cycle</i>
Frequency	33	Frequência dependente do tipo
Minimum duty cycle	5	Mínimo valor de <i>duty cycle</i>
Maximum duty cycle	95	Máximo valor de <i>duty cycle</i>

O software oferece a possibilidade de controle da eletroválvula de turboalimentação através de um comando proporcional derivativo PD ou do percentual de tempo de alimentação da eletroválvula em relação ao período completo chamado de *duty cycle*. De acordo com a eletroválvula escolhida foi configurado um controle em *duty cycle*, para uma frequência de operação de 33 Hz onde o valor mínimo de *duty cycle* estabelecido foi de 5% e o máximo de 95%.

Embora o ajuste preciso dos parâmetros relativos a partida a frio devam ser realizados, somente após o término dos ajustes com o motor a temperatura de regime, devem-se estimar valores iniciais para possibilitar a partida do motor. Para tal, podem-se utilizar

os valores típicos sugeridos pelo próprio software. A Tabela 3.8 apresenta os parâmetros para a partida a frio e fase de aquecimento do motor.

Tabela 3.8 - Configuração da partida a frio

Partida a frio	Valor	Tipo
Cold Warm up Enrich	50	Combustível adicional durante a fase de aquecimento
Post Start Enrich	120	Combustível adicional após a partida
Cranking Enrich	120	Combustível adicional na partida
Post Start Decay	20	Tempo após o qual o <i>Post Start Enrich</i> é desabilitado
Cold Accel Enrich	20	Combustível adicional durante a aceleração com motor frio

Toda a configuração necessária para informar ao software as características do motor, os componentes utilizados e a estratégia de controle a ser adotada está concluída e dar-se-á início a metodologia de calibração e ajuste dos mapas de controle.

3.1.7.1.2. Metodologia de calibração e ajuste dos mapas de controle

Os ajustes realizados nos mapas para aplicação com cada combustível são realizados através de etapas que envolvem o ajuste de vários parâmetros. Esta metodologia foi usada nas fases que envolveram a calibração e o ajuste da UCE. Durante a etapa de configuração do software foi definida a faixa de medição da rotação de 1500 a 6500 rpm, com intervalos que variam de 500 em 500 rpm. Os valores de carga e eficiência volumétrica foram definidos conforme os critérios descritos na seção configuração da UCE MoTeC M4, sendo os valores de carga estabelecidos em 0%, 10%, 20%, 25%, 30%, 40%, 44%, 50%, 60%, 72%, 80% 90% e 100%. As etapas do processo de calibração e ajuste do sistema de controle do motor são apresentadas no fluxograma da Figura 3.13. É importante lembrar que o funcionamento da sonda lambda em malha fechada só deve ser habilitado após a etapa 9, para não interferir em nenhum procedimento de ajuste anterior.

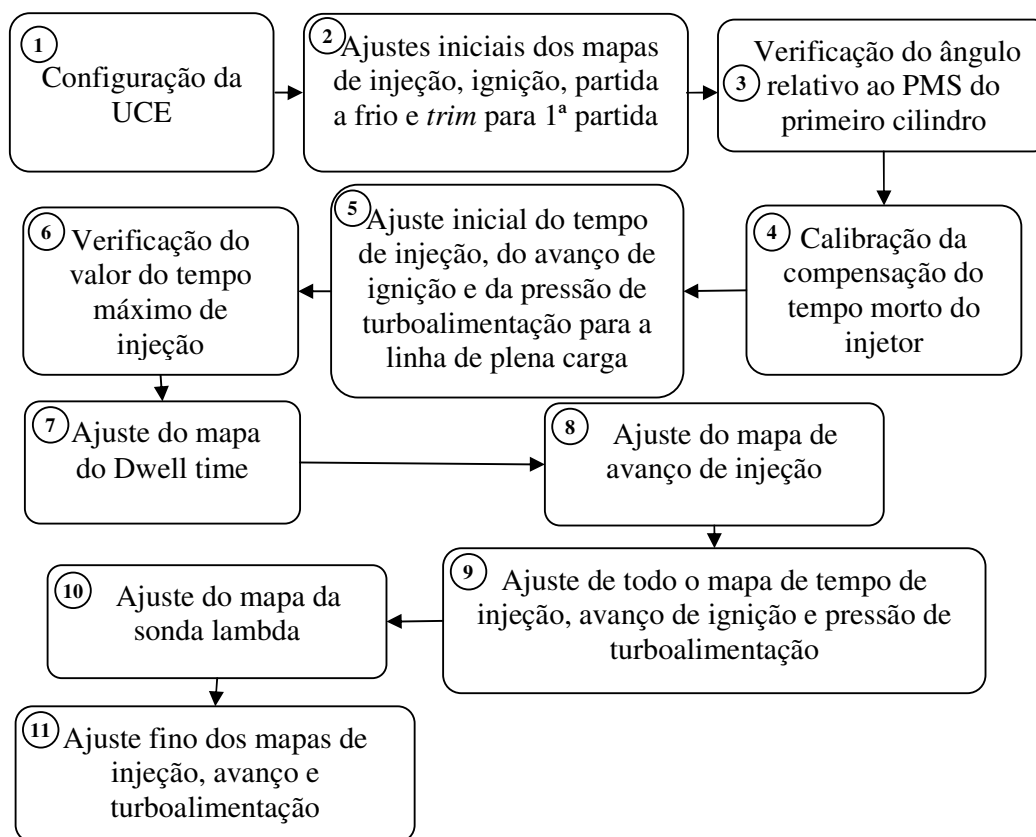


Figura 3.13 - Etapas da calibração da UCE

1- Primeiramente é necessário realizar a configuração da UCE de acordo com as características do motor e dos componentes do sistema de controle. 2- Logo após deve-se realizar a calibração por comparação de todos os sensores. Em seguida, antes de ligar o motor estima-se o valor do tempo máximo da injeção de combustível e os valores percentuais no mapa do tempo de injeção, que indicam a quantidade de combustível injetada e da mesma forma, prever os valores de avanço de ignição e os valores do *Dwell time*. Nesta hora, calibrações de motores similares podem ser utilizadas para facilitar o processo. A experiência do aplicador para estimar estes valores também é uma ferramenta poderosa. Contudo, o objetivo nesta etapa é utilizar valores conservadores para o avanço de ignição e misturas, mais ricas, para evitar danos ao motor. Os valores de *Dwell time* devem ser suficientes para realizar a combustão da mistura dentro do cilindro, evitando que a combustão se propague para a descarga e danifique as válvulas de descarga e o catalisador. Para realização da primeira partida deve-se ainda estimar os valores iniciais para os parâmetros de partida a frio. A grande

maioria dos softwares oferece valores típicos para iniciar o processo de calibração, uma vez que o ajuste preciso da partida a frio só deve ser realizado após os ajustes do motor à temperatura de regime. Durante a tentativa de funcionar o motor, na primeira vez deve-se utilizar o recurso de aplicação de correções em todo o mapa de injeção e de ignição, uma vez que o motor está em uma condição não estabilizada. Para tal, o software utilizado oferece esta possibilidade através dos valores de *trim* para o avanço e para a injeção de combustível. Nesta etapa a experiência do aplicador também é fundamental, onde a dificuldade de giro do motor pode estar associada a valores excessivos de avanço de ignição, assim como o cheiro de combustível e a presença deste no escapamento demonstram a utilização de combustível em excesso. O motor apresenta uma aceleração característica quando se encontra na eminência do funcionamento, sinalizando que os ajustes estão próximos do ideal.

3- Após o primeiro funcionamento do motor deve-se realizar a verificação do ângulo compreendido entre a posição do 1º dente da roda fônica com a linha de centro do sensor de rotação, quando o pistão do primeiro cilindro encontra-se no PMS. O objetivo desta verificação é informar à UCE a correta posição dos pistões dentro dos cilindros, possibilitando que os valores de avanço de ignição e de avanço de injeção sejam corretamente apresentados na tela do software. Embora o primeiro ajuste deste ângulo seja primeiramente realizado com o motor estático, torna-se necessário a sua verificação na tela do software com o motor em funcionamento visando compensar o atraso devido ao processamento dos sinais na UCE. Este ajuste visa diminuir os erros provenientes do tempo de interpretação dos sinais. O procedimento consiste em comandar um valor de avanço de ignição através do software e verificar se o valor coincide com o valor lido por um sistema de medição externo. Com o uso de um goniômetro e uma lâmpada estroboscópica conectada ao cabo da vela do 1º cilindro, pode-se verificar com quantos graus de avanço antes do PMS o motor se encontra e comparar com o valor ajustado pelo software, possibilitando acertar o valor do ângulo de referência.

4- O ajuste da compensação do tempo morto do injetor consiste em corrigir o tempo de injeção em função da variação da tensão da bateria. A metodologia empregada prevê ajustar esta compensação em uma região de funcionamento do motor onde exista grande sensibilidade dos parâmetros de desempenho em função da variação da relação de

mistura. Para tal foi determinado que o ajuste fosse realizado na condição de torque máximo, ou seja, a 2500 rpm em plena carga. Utilizando uma fonte de alimentação ajustável no lugar da bateria torna-se possível variar a tensão de alimentação de acordo com a resolução do software. Para tal, varia-se a tensão de alimentação de um em um Volt e faz-se a alteração da compensação do tempo de injeção em μs , visando manter invariável o valor do fator lambda em toda a faixa de operação da UCE. A compensação foi ajustada na faixa de 9 a 15 Volts. Para os valores abaixo de 9 Volts foi realizada uma extrapolação linear até 5 Volts. Embora a UCE permita o funcionamento com até 6 Volts, a intensidade de corrente elétrica nesta condição aumenta sobremaneira e portanto decidiu-se por não levar o sistema a essas condições extremas de funcionamento.

5- Em seguida, faz-se o ajuste inicial da primeira linha dos mapas de controle do tempo de injeção, de avanço de ignição e da pressão de turboalimentação. Para a realização dos ajustes deve-se operar com os valores de carga e rotação do dinamômetro de forma a coincidir exatamente com os valores nominais do mapa de controle, evitando-se assim a necessidade de interpolação pelo software. O procedimento para este ajuste consiste em realizar primeiramente um ajuste grosseiro do valor percentual do tempo de injeção visando uma mistura mais rica que a necessária para a pressão de turboalimentação que se deseja operar. Em seguida um ajuste conservador do avanço de ignição deve ser realizado, também tendo em vista o valor de turboalimentação pretendido. Só então se deve aumentar a pressão de turboalimentação incrementando o valor do *duty cycle* da eletroválvula de turboalimentação. Durante este processo o valor do fator lambda, o sinal audível de detonação e a temperatura da descarga são primordiais para se evitar danificar o motor. Somente após este primeiro ajuste grosseiro pode-se realizar o ajuste fino do tempo de injeção, do avanço de ignição e da pressão de turboalimentação visando o MBT. Contudo nesta etapa do ajuste fino visando o MBT, existem algumas variáveis de restrição que devem ser observadas. Como os ajustes realizados visam atingir o máximo torque em cada ponto de operação mantendo-se o consumo específico de combustível obtido com o motor aspirado, esse consumo torna-se a primeira variável de restrição deste processo de ajuste. A presença de detonação durante o processo de ajuste também limita o avanço de ignição, que nestes casos foram mantidos em 0,5 graus abaixo do LDI, sendo esta outra variável de restrição durante o processo. Avanços

de ignição fora do MBT afetam diretamente o trabalho indicado e conseqüentemente a eficiência térmica do motor naquela condição de operação. Outra variável que restringe o aumento de torque é a temperatura medida na descarga, a qual pode ser controlada através do enriquecimento da mistura o que penaliza, algumas vezes, o consumo específico, assim limitando a turboalimentação. Desta forma buscou-se, sempre que possível, trabalhar com o fator lambda que produz o menor consumo específico possível.

6- Na seção 3.1.7.1.1 foi descrito o ajuste do parâmetro do tempo máximo de injeção, de forma a manter a faixa de valor máximo percentual do mapa de injeção compreendido em uma faixa que propicie ao software a melhor resolução. Contudo é importante ressaltar que se deve também manter uma margem para que o injetor possa variar a vazão em função do controle da UCE quando a sonda opera em malha fechada. Sendo assim o valor máximo também não deve ultrapassar 90%, de forma a possibilitar uma margem de $\pm 10\%$ para correções através da sonda, conforme calibrado. Em caso de se utilizar estratégias de auto-adaptação de mistura em função de envelhecimento do motor ou devido à tolerância de fabricação de componentes, o valor máximo deve ser ainda menor, mantendo-se no patamar de 80%.

7- Utilizando-se um sensor hall para detecção de corrente conectado ao circuito primário da bobina do primeiro e quarto cilindros e um osciloscópio para leitura do sinal foi realizado o ajuste do mapa de *Dwell time*. O sinal do *Dwell time* é mostrado na Figura 3.14. Para ajustar a intensidade de corrente deve-se aumentar o tempo do *Dwell time* de forma a atingir o valor de pico de corrente para garantir a máxima energia disponível no processo de indução do circuito secundário e conseqüentemente na combustão. Devido às variações de operação de um ciclo para outro, normais em um motor de combustão interna, o valor do *Dwell time* foi ajustado com um fator de segurança de 0,3 ms. Se o tempo for insuficiente, percebe-se o funcionamento do motor com falhas de combustão e com elevação acentuada da temperatura na descarga. Porém, se o tempo for elevado, a energia acumulada na bobina pode superaquecê-la, danificando-a. Portanto é importante notar que durante este processo de ajuste deve ser controlada a intensidade de corrente no primário da bobina juntamente com a temperatura do gás no coletor de descarga.

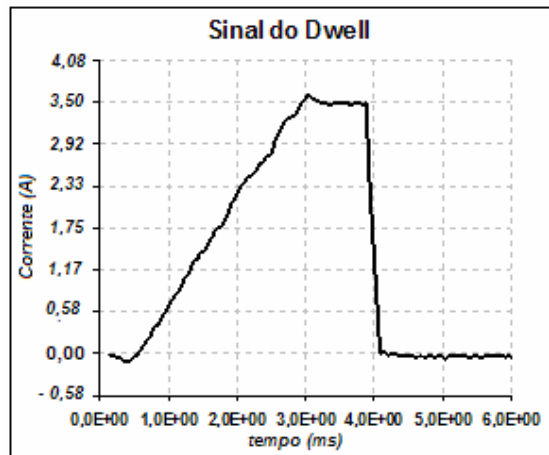


Figura 3.14 - Sinal do *Dwell time* obtido com osciloscópio

8- O ajuste do avanço de injeção de combustível, ou ângulo de injeção, foi realizado nesta metodologia baseando-se no consumo específico de combustível. Contudo, o cálculo do consumo específico durante os ajustes é um fator complicador, devido à necessidade de tratamento dos dados aquisitados para possibilitar a eliminação de ruídos. Sendo o consumo específico de combustível a razão entre a vazão mássica de combustível e a potência produzida pelo motor, mantendo-se invariável o tempo de injeção e variando-se apenas o avanço de injeção, o ângulo que produz o maior torque é o de menor consumo específico. Para validar o ajuste realizado, o tratamento dos dados aquisitados e o cálculo do valor do consumo específico foram realizados a cada 10 pontos ajustados, comparando-se com o ajuste realizado através do torque.

9- Para o ajuste final de todos os pontos do mapa de tempo de injeção de combustível, do mapa de avanço de ignição e do mapa de controle da pressão de turboalimentação, o procedimento utilizado é o mesmo usado para o ajuste inicial. Deve-se lembrar que os pontos próximos ao ponto calibrado influenciam o mesmo, então, quando se faz o ajuste de um ponto é aconselhável que se alterem os valores dos pontos vizinhos para valores razoáveis e coerentes, para que qualquer alteração posterior nesses pontos vizinhos não cause erros grosseiros na calibração.

Durante o ajuste do tempo de injeção de combustível deve-se levar em consideração a temperatura dos gases de descarga. Se esta temperatura estiver muito elevada, pode ocorrer danos no motor. Portanto um compromisso entre o valor da pressão de

turboalimentação adotada e do enriquecimento da mistura deve ser encontrado de forma a alcançar o consumo específico desejado. Outros fatores que devem ser levados em consideração são as emissões de poluentes pela descarga, o consumo de combustível e os demais parâmetros de desempenho do motor.

10- Durante o ajuste do mapa do tempo de injeção de combustível, a sonda lambda é automaticamente desabilitada, mesmo estando instalada e configurada para atuar naquele ponto onde se deseja um fator lambda estequiométrico. O seu funcionamento volta ao normal quando se retorna à Tabela de avanço de ignição. Quando o valor do fator lambda requerido for estequiométrico, a sonda pode ser usada normalmente durante a calibração do avanço de ignição, pois ela ajuda a manter a estabilidade da mistura. Porém, deve-se ter o cuidado de desabilitá-la quando o ajuste envolver situações extremas para que não haja problema de alterar a mistura acidentalmente e elevar a temperatura dos gases de exaustão. Neste trabalho, o fechamento da malha de controle da sonda lambda foi utilizado em todo o mapa de controle para o GNV e até 72% de abertura da válvula borboleta para os combustíveis líquidos. Em se tratando dos combustíveis líquidos, acima deste valor de abertura da borboleta a malha foi aberta para possibilitar o enriquecimento da mistura e a maximização do torque. Contudo para aberturas da válvula borboleta menores que 72% a malha foi aberta apenas em caso de elevadas temperaturas dos gases de exaustão.

11- Por fim, é realizada a conferência do ajuste final de todos os pontos do mapa de tempo de injeção de combustível, do mapa de avanço de ignição e do mapa de controle da pressão de turboalimentação, com intuito de avaliar o impacto do controle do fator lambda em malha fechada.

É recomendado que os ajustes sejam feitos por coluna (% carga) ou por linha (rpm), mas deve-se manter um padrão. Neste trabalho, os ajustes dos mapas do tempo de injeção e do avanço de ignição foram realizados por coluna, exceto a linha de plena carga, na etapa do ajuste inicial.

3.1.7.1.3. Calibração e ajuste dos mapas de controle

As calibrações e ajustes do motor turboalimentado funcionando com gasolina C, álcool etílico e GNV foram executados conforme a metodologia previamente descrita na seção 3.1.7.1.2.

Para que haja progressividade na aceleração do motor as calibrações geralmente são realizadas segundo alguns critérios definidos, onde acima de cerca de 70% de abertura da válvula borboleta considera-se estabelecida a intenção de desempenho por parte do usuário. Desta forma para a gasolina C e para o álcool etílico, acima de 72% de carga o controle em malha fechada da sonda foi aberto, para possibilitar o enriquecimento necessário da mistura e o ganho de torque desejado através do crescimento da eficiência volumétrica, pelo resfriamento do ar e aumento da velocidade de chama. Abaixo desse valor de carga, a malha foi fechada e a mistura enriquecida apenas quando a temperatura de exaustão superava o limite pré-estabelecido para cada combustível, no intuito de diminuir a temperatura da câmara de combustão.

Com o GNV, devido à grande variação de pressão nos cilindros de armazenamento do gás, de 25000 a 1000 kPa, ocasionado pelo consumo durante o funcionamento, há a tendência para grande variação no valor da vazão mássica de combustível e, conseqüentemente, do fator lambda. Em alguns sistemas com controle específicos para combustíveis gasosos, o valor de pressão e temperatura do combustível são monitorados com intuito de corrigir o tempo de injeção. Contudo, neste trabalho o controle em malha fechada para a sonda lambda foi utilizado para todo o mapa para o funcionamento com GNV, de forma a manter o valor do fator lambda igual a 1,00. Além disso, outro motivo para fechar a malha é que o GNV não apresenta ganho significativo de torque em função do enriquecimento da mistura e nem mesmo redução da temperatura de exaustão.

Por fim, através do sistema de aquisição, as curvas de torque, consumo específico e o fator lambda do motor funcionando com os três combustíveis foram obtidos para plena carga, 71,5%, 43,5% e 25% de abertura da válvula borboleta. Ao mesmo tempo eram adquiridos os valores dos demais sensores ligados ao sistema de aquisição, conforme descritos na seção 3.1.6.4.

3.1.7.1.4. Testes de eficiência volumétrica global

Os testes para determinação da eficiência volumétrica global foram realizados no motor turboalimentado funcionando com gasolina C, álcool etílico e GNV, conforme a norma 7-A3511 FIAT AUTO (2004). A expressão utilizada para o cálculo da eficiência é apresentada na seção 1.2.1.5. Para realização deste teste, o tempo de aquisição para cada ponto foi o dobro do tempo utilizado no teste de desempenho, visando reduzir a incerteza para o cálculo do consumo de combustível. O teste foi realizado em plena carga e o intervalo entre os valores de rotação foi o dobro dos testes de desempenho, ou seja, de 500 em 500 rpm. A faixa de rotação foi compreendida entre 1500 e 6500 rpm. Os valores do fator lambda foram mantidos na faixa de 0,95 para os testes com todos os combustíveis, visando manter o erro de medição na faixa de 2 a 3%. Valores do fator lambda abaixo de 0,90 geram erros na faixa de 5 a 7%, conforme manual do fabricante.

3.1.7.1.5. Testes de aquisição da pressão dentro dos cilindros

Os testes de aquisição de pressão dentro do cilindro foram realizados no motor turboalimentado funcionando com gasolina C, álcool etílico e GNV, em regime de plena carga. Os intervalos de rotação foram de 500 em 500 rpm e a faixa de medição estabelecida foi de 1500 a 6500 rpm. O procedimento experimental consistiu em primeiramente instalar a vela de ignição com o transdutor de pressão piezocapacitivo calibrado para uma faixa de medição de 0 a 20.000 kPa. Este sensor tem como característica uma velocidade de resposta rápida. Em seguida o condicionador de sinal do tipo integrador de carga foi ajustado para a configuração desejada. O aquisitor de dados foi ajustado para uma frequência que possibilitasse obter de 369 a 1600 amostras por ciclo do motor, operando de 6500 rpm a 1500 rpm, com uma resolução angular do virabrequim variando de 1,95° a 0,45°, respectivamente.

O sinal de rotação foi obtido juntamente com a pressão do cilindro com uma frequência média de 10 amostras por sinal do dente da roda fônica. Após a aquisição o software de depuração dos dados de pressão no cilindro realiza uma interpolação por *Spline*, FORSYTHE *et al.* (1977), para aumentar a resolução em 10 vezes.

A filtragem de ruídos foi reduzida a um mínimo necessário sem cortar as frequências de detonação (20-40 kHz). Primeiramente foi obtido o sinal de zero do sensor e a pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa local. Em seguida foi armazenado o sinal de pressão e rotação para o motor rodando somente com o motor de partida. O próximo passo foi adquirir o sinal de pressão e rotação com o motor funcionando e estabilizado, sem queima no primeiro cilindro. Só então, após checar os sinais obtidos anteriormente, foram obtidos os sinais com o cilindro com queima para toda a faixa de medição citada. O tempo de aquisição estipulado foi aquele para a aquisição de no mínimo 10 ciclos de pressão na menor frequência de rotação do motor.

3.2. Metodologia de tratamento dos dados experimentais

A metodologia para tratamento dos dados experimentais visa possibilitar não apenas tratar os dados obtidos, mas também depurar e extrair dados complementares, de forma a obter o máximo de informações. O critério estabelecido para o tratamento dos dados visa eliminar dados advindos de ruídos e outras interferências, promovendo uma filtragem dos mesmos.

A norma NBR 1585 (1996) não diferencia a correção aplicada a motores naturalmente aspirados de motores sobrealimentados. Porém, sabe-se que a regulagem da válvula de sangria *waste gate* aplicada a alguns motores turboalimentados dosa o desvio dos gases de escapamento para a turbina, em função da pressão na admissão. Logo se entende que não seria correto aplicar um fator de correção em motores turboalimentados, uma vez que a pressão máxima de turboalimentação não varia em função da altitude. Por outro lado, a temperatura atmosférica também influencia nos resultados e deveria ser corrigida também para os motores turboalimentados. Contudo, para possibilitar a comparação entre os resultados obtidos com o motor aspirado e os resultados obtidos com o motor turbo, corrigiram-se os resultados de torque e potência do motor aspirado, para as condições ambiente dos testes realizados com o motor turboalimentado de forma a permitir uma comparação dos resultados obtidos. As expressões contidas na norma NBR 5484 (1985) para o cálculo do fator de correção e da pressão seca foram apresentadas na seção 1.2.1.7 através das equações 1.19 e 1.20, respectivamente. Para se corrigir as condições do ambiente dos testes realizados com o motor aspirado, para as

condições dos testes realizados com o motor turboalimentado, a equação 1.19 foi utilizada da seguinte forma:

$$\alpha_{c_{\text{aspirado}}/\text{turbo}} = \frac{\alpha_{c_{\text{aspirado}}}}{\alpha_{c_{\text{turbo}}}} = \left(\frac{P_{s_{\text{turbo}}}}{P_{s_{\text{aspirado}}}} \right)^{1,2} \times \left(\frac{T_{ar_{\text{aspirado}}}}{T_{ar_{\text{turbo}}}} \right)^{0,6} \quad (3.3)$$

Onde $\alpha_{c_{\text{aspirado}}/\text{turbo}}$ representa o fator de correção aplicado para corrigir as condições atmosféricas dos testes com o motor aspirado para as condições dos testes com o motor turboalimentado. As variáveis $P_{s_{\text{aspirado}}}$, $T_{ar_{\text{aspirado}}}$, $P_{s_{\text{turbo}}}$, $T_{ar_{\text{turbo}}}$ representam as pressões secas e temperaturas atmosféricas das condições de teste do motor aspirado e turboalimentado, respectivamente.

3.2.1. Metodologia de tratamento dos dados de desempenho

A aquisição dos dados de desempenho foi realizada em conformidade com a norma NBR-1585 (1996). O número mínimo de pontos foi de 900 durante a aquisição de dados de desempenho para a faixa mais elevada de frequência de rotação. A frequência de aquisição foi de 10 Hz, sendo o tempo mínimo de aquisição estabelecido pelo consumo de pelo menos 200 gramas de gasolina C ou álcool etílico. Para o GNV o tempo de aquisição levou em consideração um consumo mínimo de 0,1 m³ para cada aquisição.

O número mínimo de 900 dados por aquisição visou obter um tamanho de amostra representativo, calculando-se em seguida a média dos dados aquisitados e o desvio padrão da amostra. Uma quantidade elevada de pontos possibilita diminuir o grau de incerteza de medição. Porém, antes dos cálculos estatísticos foi utilizada a metodologia de filtragem dos picos através da visualização da distribuição dos pontos em um gráfico para cada grandeza medida em função do tempo. Desta forma eliminaram-se os pontos de pico discrepantes do restante da amostra provenientes de ruídos no processo de medição.

Para calcular o consumo de combustível foi realizada uma regressão linear baseada na massa de combustível remanescente dentro da balança.

Baseado no tratamento dos dados de desempenho descritos tornou-se possível a construção dos gráficos de desempenho, a análise dos resultados obtidos e estabelecer as comparações necessárias para se chegar as conclusões.

3.2.2. Metodologia de depuração dos dados de pressão no cilindro

Para realizar a depuração do sinal de pressão do cilindro foi desenvolvido um programa em plataforma DELPHI com linguagem orientada a objetos, específico para tratar os dados e calcular os parâmetros desejados. O software lê o arquivo gerado pelo sistema de aquisição de dados que contém os sinais de tempo, pulsos do sinal de rotação e pressão no cilindro. Após a leitura dos dados o software converte a coluna de dados de tensão (Volts) para unidades de pressão em Pascal, de acordo com o ganho do sistema de aquisição e corrige a tendência. O próximo passo é converter o sinal analógico do sensor de rotação em um sinal digital de 0 a 5 volts, detectando o ponto de passagem por zero do sinal. Em seguida, o software localiza os pulsos mais largos, referentes à falta de dois dentes na roda fônica. A partir da referência estabelecida pelo pulso mais largo, o software começa a contagem dos pulsos ($6^\circ/\text{dente}$) e identifica o décimo sétimo pulso que corresponde ao PMS do primeiro cilindro. Para diferenciar o tempo de admissão do tempo de expansão, o software se baseia na curva de pressão versus tempo. Em seguida o software calcula a posição angular entre 0 e 720 graus baseado nos pulsos da roda fônica e na posição do PMS do primeiro cilindro. Neste software, o início da contagem dos graus se dá a partir do PMS de admissão, de forma a não partir o primeiro terço da curva de pressão. A Figura 3.15 apresenta o sinal analógico da frequência de rotação, a conversão digital e a identificação do décimo sétimo pulso correspondente ao PMS e a curva de pressão em função do tempo na tela do software para a rotação de 2500 rpm. Esta curva foi obtida para o motor aspirado a álcool com razão volumétrica de compressão de 11:1.

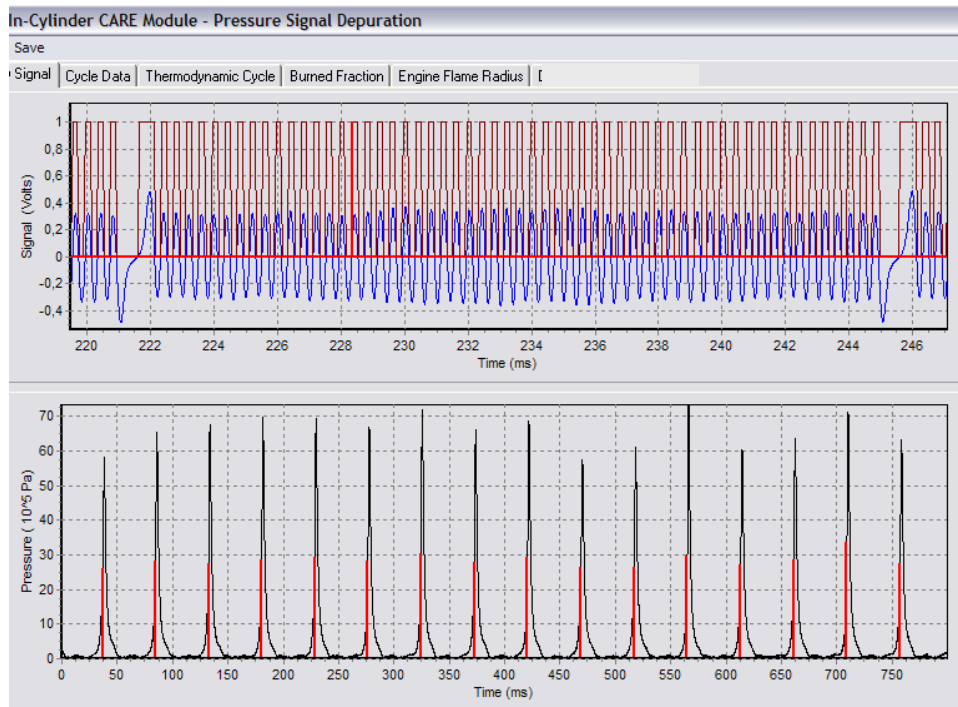


Figura 3.15 - Sinais de rotação e pressão em função do tempo na tela do software

Em seguida o software determina a curva mais representativa de pressão versus ângulo do virabrequim. O critério para obter esta curva é através da média das pressões máximas de todas as curvas. Desta forma a curva cuja pressão máxima é a mais próxima da média de todas as pressões máximas medidas é adotada como a curva representativa, HEYWOOD *et al.* (1979). Este critério é importante porque as inclinações das curvas de pressão não podem ser modificadas através da média de todos os pontos, uma vez que todo o comportamento da combustão é proveniente da análise do perfil da curva de pressão.

O software então cria uma Tabela contendo os seguintes dados: índice, tempo, ângulo do virabrequim (teta em graus), teta em radianos, velocidade angular em radianos por segundo, frequência em rpm, pressão em Pascal, derivada da pressão em relação à teta e derivada da pressão em relação ao tempo. Estas derivadas de teta e da pressão são calculadas numericamente usando *Spline*, FORSYTHE *et al.* (1977). A velocidade angular permite verificar a magnitude da variação da rotação ao longo de um único ciclo. O próximo passo é calcular para cada teta o valor do volume interno delimitado

pelo pistão, cilindro e cabeçote e a sua derivada, usando as expressões, BARROS (2003):

$$V = V_c + \frac{\pi D^2}{4} R_p \left[1 + \frac{L_p}{R_p} - \cos \theta - \sqrt{\left(\frac{L_p}{R_p}\right)^2 - \sin^2 \theta} \right] \quad (3.4)$$

$$\frac{dV}{d\theta} = \frac{\pi D^2}{4} \frac{dS_p}{d\theta} = \frac{\pi D^2}{4} R_p \left\{ \sin \theta + \frac{\sin(2\theta)}{2\sqrt{\left(\frac{L_p}{R_p}\right)^2 - \sin^2 \theta}} \right\} \quad (3.5)$$

Nas equações 3.4 e 3.5, V é o volume interno, V_c é o volume morto da câmara de combustão, D é o diâmetro do cilindro, R_p é o braço do virabrequim, L_p é a distância entre centros da biela, S_p é o deslocamento do pistão e θ é o ângulo do virabrequim.

Logo após o software constrói o diagrama indicador $\ln(\text{Pressão})$ versus $\ln(\text{Volume})$. A fase de aspiração fica sem muita definição devido a grande faixa de medição do sensor.

Em seguida a taxa aparente de liberação de calor versus teta é determinada através da seguinte equação, cuja dedução se encontra no ANEXO D:

$$\frac{\delta Q_f}{d\theta} = \frac{1}{(\gamma-1)} \left(V \frac{dP}{d\theta} + P \frac{dV}{d\theta} \right) + P \frac{dV}{d\theta} \quad (3.6)$$

Onde γ é a razão de calores específicos do gás e $\frac{\delta Q_f}{d\theta}$ é a taxa aparente de liberação de calor ao longo do ângulo do virabrequim. A Figura 3.16 apresenta a taxa de calor liberada versus teta em plena carga para o motor aspirado, em diferentes regimes de rotação, com a razão volumétrica de compressão de 11:1 utilizando álcool etílico hidratado.

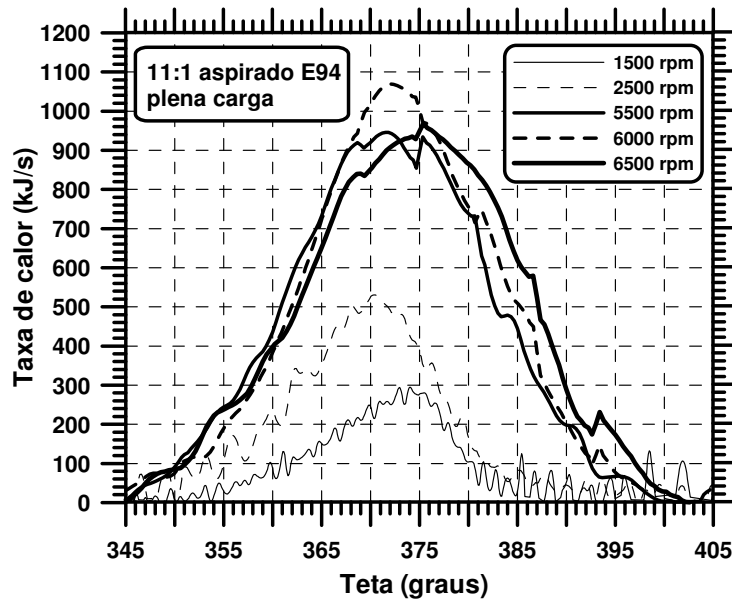


Figura 3.16 - Taxa de calor versus ângulo do virabrequim

3.2.2.1. Metodologia de obtenção da fração queimada dentro do cilindro

A Fração Queimada da mistura versus teta é determinada pela seguinte seqüência: Calcula-se a taxa de variação da fração queimada em função de teta, estabelecendo a faixa de integração entre o ângulo da ignição e o de fim da queima através da equação, BARROS (2003):

$$\left. \frac{dX_b}{d\theta} \right|_{\theta} = \frac{\left. \frac{\delta Q_f}{d\theta} \right|_{\theta}}{\int_{\theta_{ig}}^{\theta_b} \frac{\delta Q_f}{d\theta}} \quad (3.7)$$

Onde X_b é a fração queimada. A Figura 3.17 apresenta a evolução da fração queimada em função do ângulo do virabrequim em plena carga para o motor aspirado, em alguns regimes de rotação, com a razão volumétrica de compressão de 15:1 utilizando GNV.

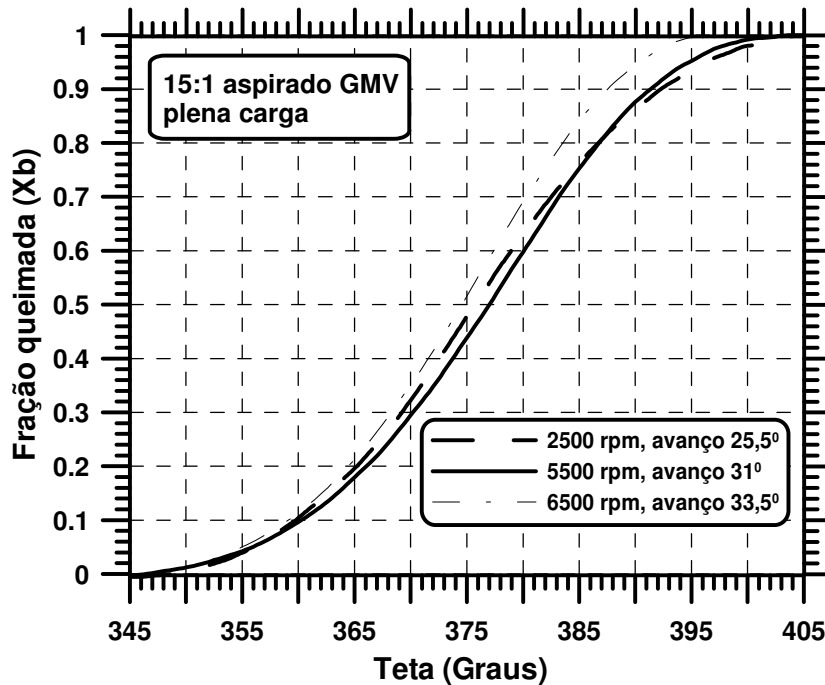


Figura 3.17 - Fração queimada versus ângulo do virabrequim

3.2.2.2. Metodologia de obtenção da velocidade de propagação da chama

A velocidade de propagação da chama é determinada pelo seguinte processo. Primeiramente calcula-se o volume da fração queimada versus o tempo, através da equação:

$$V_b = X_b V \quad \text{onde, } V = f(\theta) \quad (3.8)$$

Onde V_b é o volume queimado. A equação 3.8 foi utilizada por não se ter medido a temperatura do gás dentro do cilindro. O cálculo teórico desta temperatura apresenta grande dependência das condições do gás no instante de ignição, que também não são conhecidas. Um outro modelo de relação entre a fração queimada e o volume, pode ser obtido através da correlação descrita por Rabezzana *et al.* OBERT (1971). A Figura 3.18 apresenta o volume queimado dividido pelo volume morto da câmara de combustão em função do ângulo do virabrequim em plena carga para o motor aspirado, em alguns regimes de rotação, com a razão volumétrica de compressão de 15:1 utilizando álcool etílico hidratado.

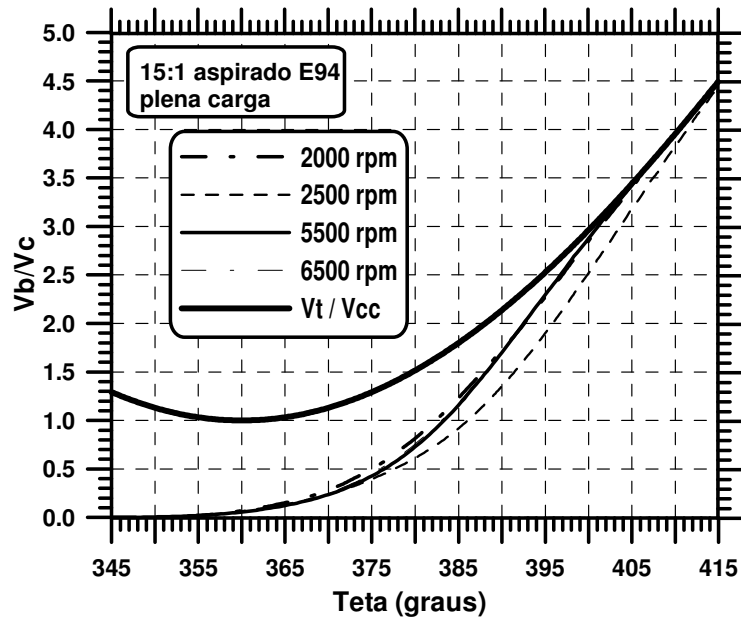


Figura 3.18 - Volume queimado/volume da câmara de combustão versus ângulo do virabrequim

O raio da chama r_b é determinado através da interpolação da Tabela de volume da fração queimada V_b e do ângulo do virabrequim. Estes dados são provenientes de modelos tridimensionais geométricos de uma frente de chama esférica partindo da vela de ignição e interagindo com as paredes da câmara de combustão. Este modelo permite calcular qualquer interação entre a frente de chama com qualquer raio e o cilindro em qualquer posição do pistão e somente é válido para a geometria da câmara modelada. Por fim, a velocidade de propagação de queima V_{ch} é a derivada numérica do raio de chama em função do tempo, portanto, é importante conservar a base de tempo (coluna de tempo) durante todo o processo de depuração. A Figura 3.19 apresenta o modelo da câmara de combustão do motor FIRE 1,242 dm³ 8V turbo multicom bustível levantado por DE PAULA (2006).

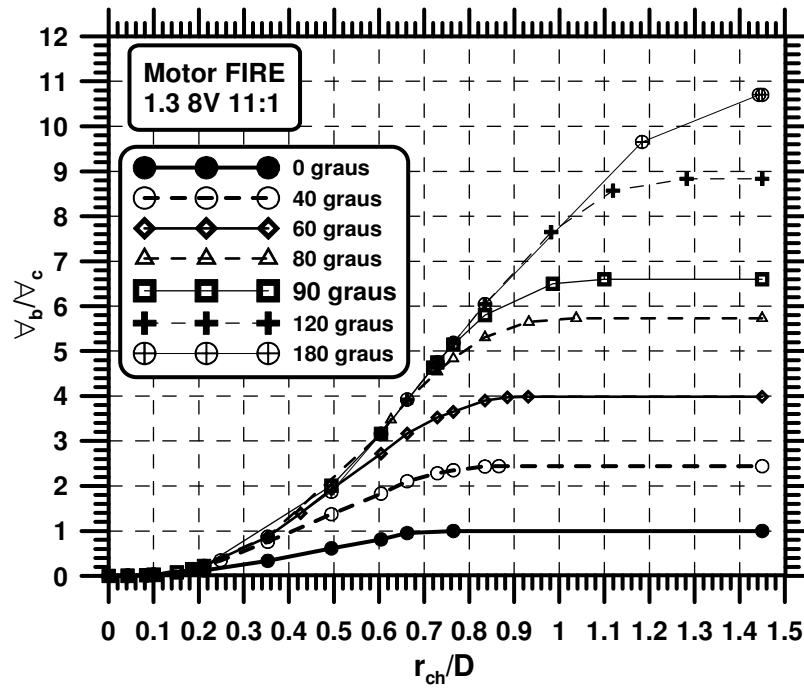


Figura 3.19 - Volume queimado em função do raio de chama

V_b/V_c é a razão entre o volume queimado e o volume morto da câmara de combustão e r_{ch}/D é a razão entre o raio de chama e o diâmetro do cilindro.

A Figura 3.20 apresenta o raio de chama dividido pelo diâmetro do pistão em função do ângulo do virabrequim em plena carga para o motor aspirado, em alguns regimes de rotação, com a razão volumétrica de compressão de 11:1 utilizando álcool etílico hidratado.

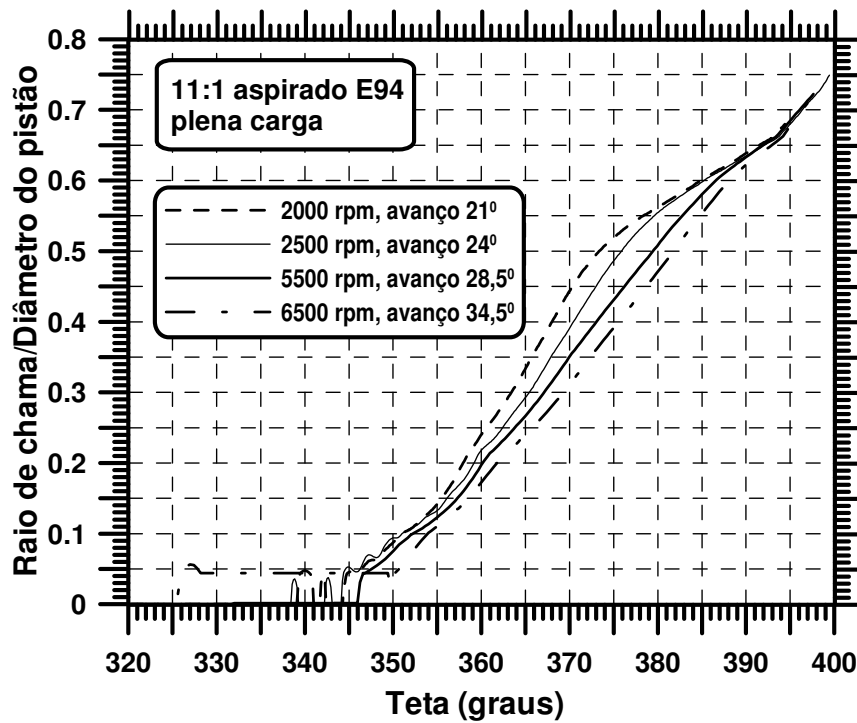


Figura 3.20 - Raio de chama/diâmetro do pistão versus ângulo do virabrequim

3.2.2.3. Metodologia de obtenção do fator de turbulência

O fator de turbulência na queima f_t é então determinado através de uma equação sendo conhecidas a velocidade de queima laminar da mistura V_ℓ em função do fator lambda, a pressão e temperatura média da mistura não queimada e o combustível utilizado. A expressão para o cálculo do fator de turbulência é dada por, HEYWOOD (1988):

$$f_t = \frac{V_{ch}}{V_\ell} \quad (3.9)$$

O software determina a temperatura média do gás queimado através da seguinte equação, cuja dedução se encontra no ANEXO D.

$$\frac{dT}{d\theta} = T \left[\frac{1}{P} \frac{dP}{d\theta} + \frac{1}{V} \frac{dV}{d\theta} \right] \quad (3.10)$$

A temperatura da fração não queimada é determinada através da relação entre as pressões e temperaturas durante um processo isentrópico apresentada pela equação:

$$\frac{T_2}{T_0} = \left(\frac{P_2}{P_0} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \quad (3.11)$$

Onde T_2 e P_2 são a temperatura e a pressão da fração não queimada dentro do cilindro e T_0 e P_0 são a temperatura e pressão atmosférica, respectivamente. A Figura 3.21 apresenta a temperatura da fração queimada e da fração não queimada em função do ângulo do virabrequim em plena carga para o motor aspirado, em alguns regimes de rotação, com a razão volumétrica de compressão de 11:1 utilizando álcool etílico hidratado.

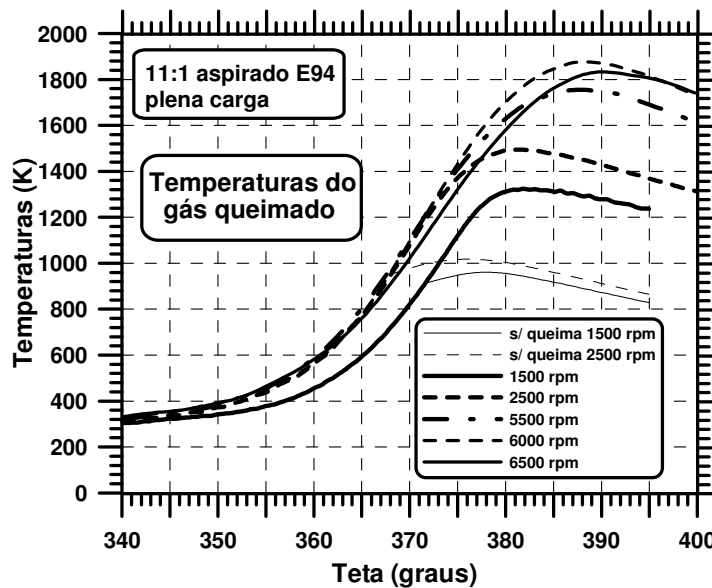


Figura 3.21 - Temperaturas versus ângulo do virabrequim

Sabendo-se que não existem dados confiáveis sobre a combustão do etanol e de suas misturas com gasolina, a linha da gasolina C foi calculada por média ponderada de composição do metanol com o isoctano. A Figura 3.22 mostra a velocidade laminar padrão de chama em função da razão de equivalência ϕ , definida pelo quociente entre a razão combustível/ar e a razão estequiométrica, BARROS (2003).

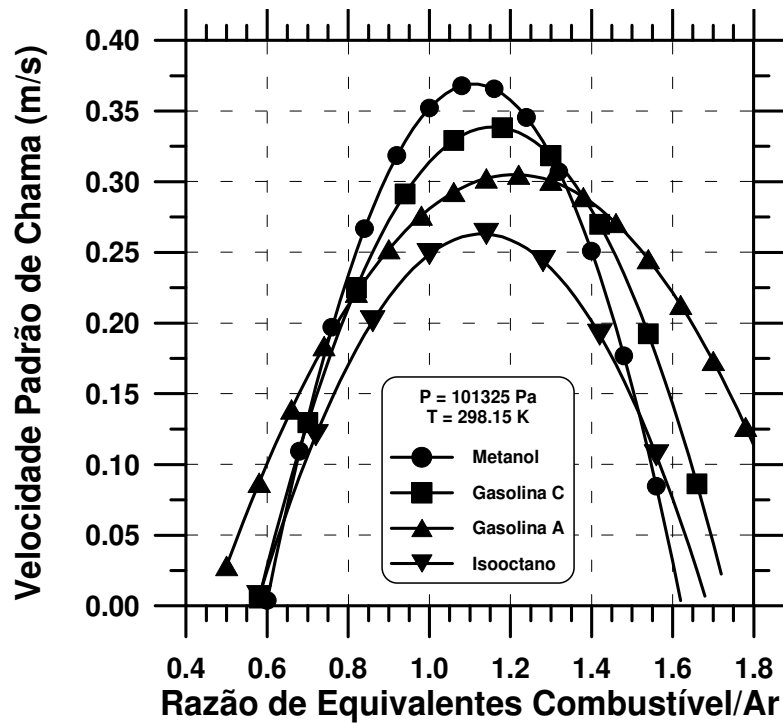


Figura 3.22 - Velocidade padrão de chama versus razão combustível/ar

Por fim o software realiza uma análise espectral do sinal de pressão no cilindro versus tempo e do sinal de rotação versus tempo para levantar as frequências mais importantes no funcionamento do motor.

3.2.2.4. Correlações para obtenção da pressão média motorizada

A literatura apresenta algumas correlações para obtenção da pressão média motorizada (\bar{P}_{MM}) em motores aspirados pequenos que dependem basicamente da velocidade de rotação do motor. A grande maioria das correlações existentes não levam em consideração o trabalho de bombeamento. Na realidade em motores aspirados o trabalho de bombeamento não é tão relevante e por isso essas correlações funcionam bem. Portanto, neste trabalho foi utilizada a correlação de BARNES-MOSS (1975) para comparação com os resultados experimentais obtidos das provas com o motor aspirado:

$$\frac{\bar{P}_{MM}}{1 \times 10^5} = 0,97 + 0,15 \left(\frac{N}{1000} \right) + 0,05 \left(\frac{N}{1000} \right)^2 \quad (3.12)$$

onde, \bar{P}_{MM} representa a pressão média motorizada e N é a rotação do motor.

Para as versões do motor turboalimentado, CHEN *et al.* (1965) apresenta uma correlação para determinação da pressão média motorizada. Neste caso as perdas por atrito não são apenas dependentes da velocidade do motor, mas também do pico de pressão no cilindro, devido a sua influência nas cargas atribuídas aos mancais e demais componentes, WATSON; JANOTA (1982). Contudo, esta correlação também não leva em consideração o trabalho de bombeamento que é relevante em motores turboalimentados. FARINHA *et al.* (1990) apresentam uma correlação que também leva em consideração o pico máximo de pressão. Entretanto, também não leva em consideração o trabalho de bombeamento.

$$\bar{P}_{MM} = -0,956 + 0,054P_{\max} + 9,540 \times 10^{-4}N - 3,415 \times 10^{-5}P_{\max}N - 5,457 \times 10^{-2}N^2 + 5,57 \times 10^{-9}P_{\max}N^2 \quad (3.13)$$

Contudo, várias correlações foram testadas, não sendo encontrada uma que se aproxime especificamente dos dados experimentais de pressão média motorizada medida com o motor turboalimentado e que levasse em consideração o trabalho de bombeamento. Neste trabalho foi utilizada a correlação de Barnes-Moss para comparação com todos os dados experimentais de \bar{P}_{MM} também para o motor turboalimentado.

3.3. Considerações finais

A metodologia experimental empregada neste trabalho para a calibração e ajuste do sistema de controle do motor permite total controle dos parâmetros necessários para maximizar o desempenho do motor sem produzir variação na eficiência energética global. A metodologia de tratamento dos dados de desempenho permite obter os dados tratados possibilitando a comparação e análise dos ganhos obtidos. A depuração do sinal de pressão no cilindro permite obter os dados referentes ao andamento da combustão de forma a possibilitar a análise das características da geometria da câmara de combustão, da fluidodinâmica nos cilindros e da qualidade das calibrações e ajustes realizados no sistema de controle eletrônico do motor. A metodologia de depuração do sinal de

pressão nos cilindros possibilita ainda obter além da fração queimada experimental, parâmetros como a velocidade de propagação de queima e o índice de turbulência experimentais. Estes parâmetros, advindos da pressão medida no cilindro são importantes para o desenvolvimento de motores de combustão interna, pois possibilitam o entendimento e correlação entre as grandezas, permitindo ainda a construção de modelos físicos e a simulação do desempenho de motores.