

4 - RESULTADOS E ANÁLISES

Nos resultados são apresentados os parâmetros de calibração e ajuste, os parâmetros de operação e desempenho e, por fim, a análise dos parâmetros de combustão do motor multicomcombustível. Os resultados foram obtidos para o motor funcionando com gasolina C, álcool etílico hidratado e GNV, na versão aspirada e turboalimentada. Os melhores resultados adquiridos das três razões volumétricas de compressão no motor aspirado, para cada um dos três combustíveis, são comparados com os valores obtidos na versão turboalimentada, visando quantificar os ganhos com a turboalimentação do motor. Estes resultados são apresentados através dos mapas do sistema de controle do motor para cada combustível, das curvas de torque, de potência, do consumo específico de combustível e dos dados da combustão advindos da depuração do sinal de pressão do cilindro. Para possibilitar a comparação entre os desempenhos do motor aspirado e turboalimentado, os resultados de torque e potência obtidos com o motor aspirado foram corrigidos para as condições do ambiente dos testes realizados com o motor turboalimentado, conforme descrito na seção 3.2.

Em todas as análises realizadas na comparação dos resultados, foram levadas em consideração as incertezas máximas envolvidas para cada grandeza. Contudo, não foram exibidos barras de incertezas nos gráficos, porque na maioria dos casos seriam encobertas pelos próprios símbolos dos pontos experimentais. Neste trabalho foram obtidos resultados com o motor turboalimentado operando em plena carga e em cargas parciais para as seguintes posições de válvula borboleta: 100%, 71,5%, 43,5% e 25% de abertura. Esses valores de abertura da válvula borboleta foram os mesmos praticados com o motor aspirado, a fim de possibilitar a comparação entre os resultados.

4.1. Parâmetros de calibração e ajuste do motor

Os parâmetros de calibração e ajuste do motor controlam diretamente o seu desempenho e ajudam a definir os critérios para a determinação da melhor estratégia de calibração e ajuste.

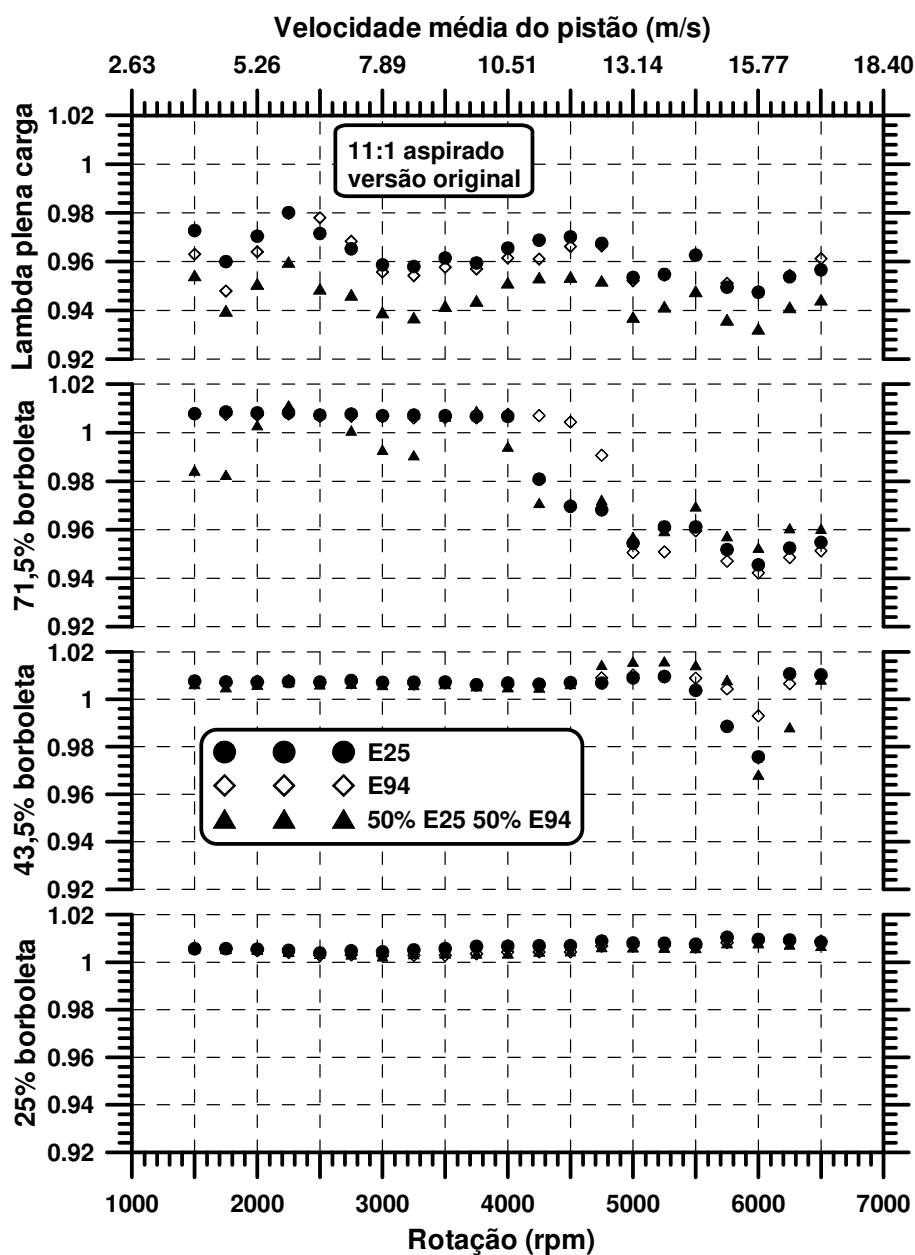


Figura 4.1 – Fator lambda em função das posições de abertura da válvula borboleta e da rotação para o motor aspirado original

A Figura 4.1 apresenta os fatores lambda obtidos a partir da calibração do motor original aspirado, funcionando com a UCE IAW 4AF.FF, operando com álcool etílico hidratado, gasolina C e com uma mistura de 50% em volume de ambos os combustíveis, para as cargas analisadas. Através deste mapa é possível identificar onde a malha de controle é aberta e a mistura enriquecida para diferentes aberturas da borboleta. O fator

lambda é determinado tendo como base critérios como os índices de emissões, o desempenho, o consumo de combustível e as temperaturas dos gases queimados. Como regra geral, aberturas da válvula borboleta superiores a 70% são interpretadas como demanda de torque máximo do motor por parte do condutor. Para atender a esta demanda de máximo torque a sonda lambda passa a operar em malha aberta e a mistura é enriquecida de forma a aumentar a eficiência volumétrica e evitar a detonação, através do resfriamento do ar de admissão, bem como acelerar a combustão. Para valores de abertura da borboleta menores que 70%, a estratégia de controle deve priorizar a redução de consumo de combustível e emissões, operando com o controle da malha fechado para manter a mistura na razão estequiométrica. Porém, dependendo da temperatura obtida nos gases queimados, pode-se ter que operar em malha aberta para enriquecer a mistura, como é mostrado a 71,5% de abertura da borboleta em regimes de rotação acima de 4000 rpm e a 43,5% de abertura da borboleta entre 5250 rpm e 6250 rpm. A 25% de abertura, nota-se a operação em malha fechada com todos os combustíveis para que as temperaturas dos gases queimados não excedam os limites de temperatura estabelecidos. Pode-se constatar que em plena carga os valores de fator lambda obtidos para a gasolina e para o álcool são próximos, sendo que em alguns pontos o álcool apresenta valores de lambda menores que o da gasolina. O álcool etílico hidratado possui razão ar-combustível estequiométrica menor que a razão ar-combustível estequiométrica da gasolina C, maior calor latente e incorporando ainda 6% de água. Contudo, constata-se que a mistura de 50% em volume de álcool e gasolina C apresenta valores de fator lambda menores que o álcool e que a gasolina C em plena carga. Pode-se observar que para a abertura de 71,5% da borboleta a malha é mantida fechada até 4500 rpm com o álcool e até 4000 rpm com a gasolina C, o que está em acordo com a expectativa gerada devido ao maior poder de resfriamento dos gases por parte do álcool etílico hidratado. Os avanços de ignição mais elevados para o álcool colaboram também para a redução da temperatura dos gases de descarga em relação à gasolina C.

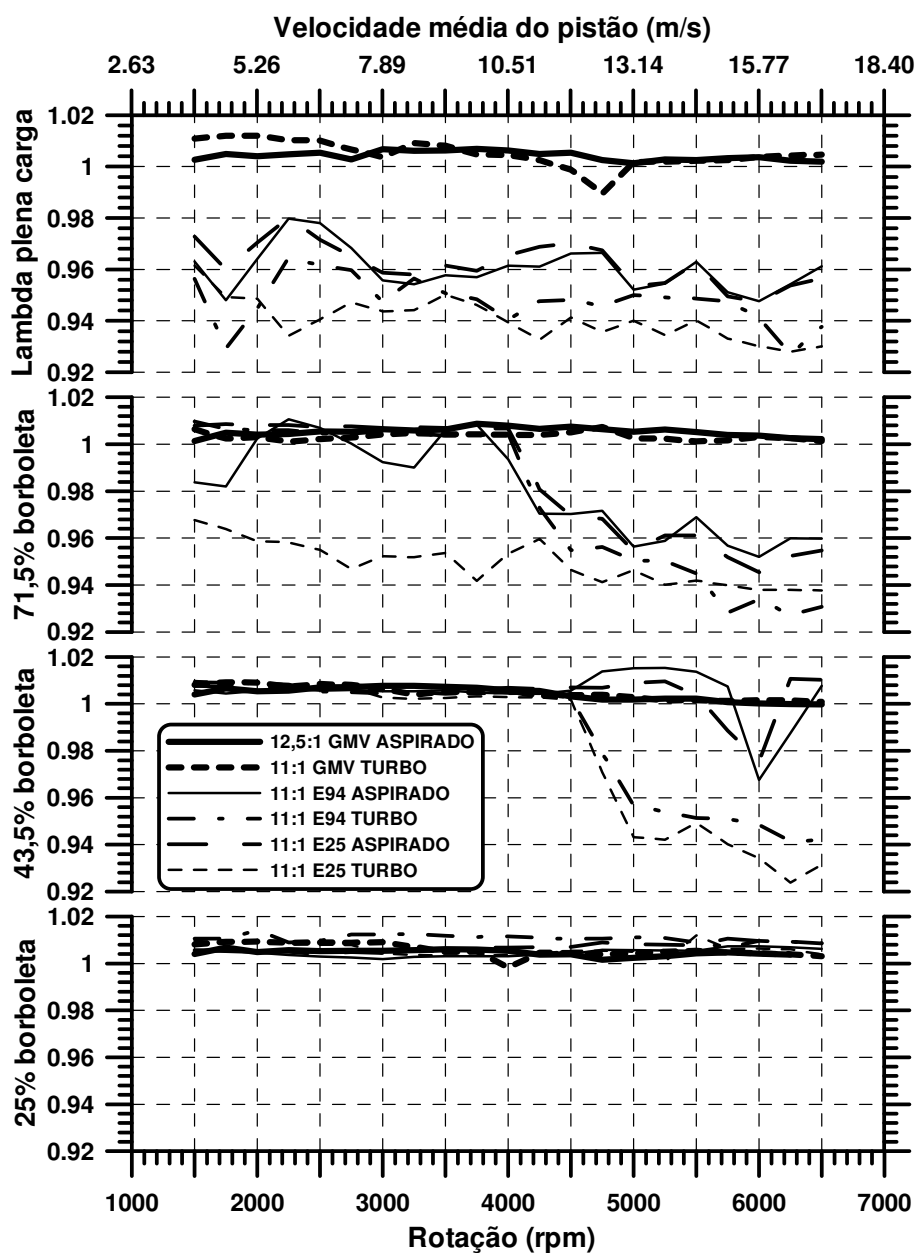


Figura 4.2 – Fator lambda para cada combustível, obtidos com a melhor configuração do motor aspirado e com o motor turboalimentado

A Figura 4.2 apresenta os fatores lambda obtidos para a melhor configuração do motor aspirado e para o motor turboalimentado funcionando com os três combustíveis e utilizando a razão volumétrica de compressão de 11:1. Para o motor aspirado a GNV, a razão volumétrica de compressão que apresentou melhor desempenho foi a de 12,5:1, sendo esta a utilizada para a comparação com a versão turboalimentada. Para facilitar o

entendimento da Figura 4.2, a Figura 4.13, a qual apresenta os valores de temperatura dos gases queimados, deve ser considerada simultaneamente. Com o GNV, tanto no motor aspirado quanto no motor turboalimentado, a malha é mantida fechada em todos os regimes de carga. O GNV, por ser injetado na forma gasosa, não sofre mudança de fase, não gerando o efeito de resfriamento dos combustíveis líquidos. Também, sendo injetado como gás, ocupa um volume significativo, reduzindo a admissão de ar. Por fim, ao contrário da gasolina e álcool, a velocidade máxima de chama ocorre por volta da razão estequiométrica. Em resumo, não há vantagem para o desempenho quando se opera com misturas ricas utilizando o GNV. Ao contrário, tanto para o álcool quanto para a gasolina, nota-se a operação do motor com misturas ricas em plena carga.

Embora na determinação do fator lambda no motor turboalimentado busque-se a manutenção da eficiência global do motor, a necessidade de se controlar as temperaturas dos gases queimados impõe restrições ao processo de calibração e ajuste. A 71,5% de abertura da borboleta, observa-se que o motor turboalimentado a gasolina permanece com a malha aberta em todos os regimes de rotação, para possibilitar o controle das temperaturas dos gases queimados. O motor turboalimentado a álcool neste regime de carga opera em malha aberta a partir de 4000 rpm com valores de lambda similares à versão aspirada. A 43,5% de abertura, o motor turboalimentado a gasolina e a álcool operam com misturas ricas a partir de 4500 rpm, sendo que o enriquecimento com a gasolina é um pouco maior em função das maiores temperaturas dos gases queimados oriundas, aparentemente, dos menores avanços de ignição praticados. Em regime de operação com 25% de abertura, todas as versões do motor operam em malha fechada visando mistura estequiométrica.

Como as pressões na exaustão do motor turboalimentado antes da turbina são maiores que nas versões aspiradas, as temperaturas também o são. O impacto da temperatura na calibração do fator lambda torna-se evidente com o aumento da velocidade do motor para as posições intermediárias da borboleta. O comportamento diferenciado do GNV em relação ao álcool e gasolina sugere que a resistência à auto-ignição é um fator relevante na determinação de lambda, sugestão suportada pela Figura 4.8, que mostra se o motor está operando em MBT ou LDI, pois quanto mais atrasada a ignição maior a temperatura. Dessa forma, a qualidade do combustível influencia o consumo não

somente através da razão volumétrica de compressão, mas também pela necessidade ou não de se ajustar o lambda para controlar a temperatura de exaustão.

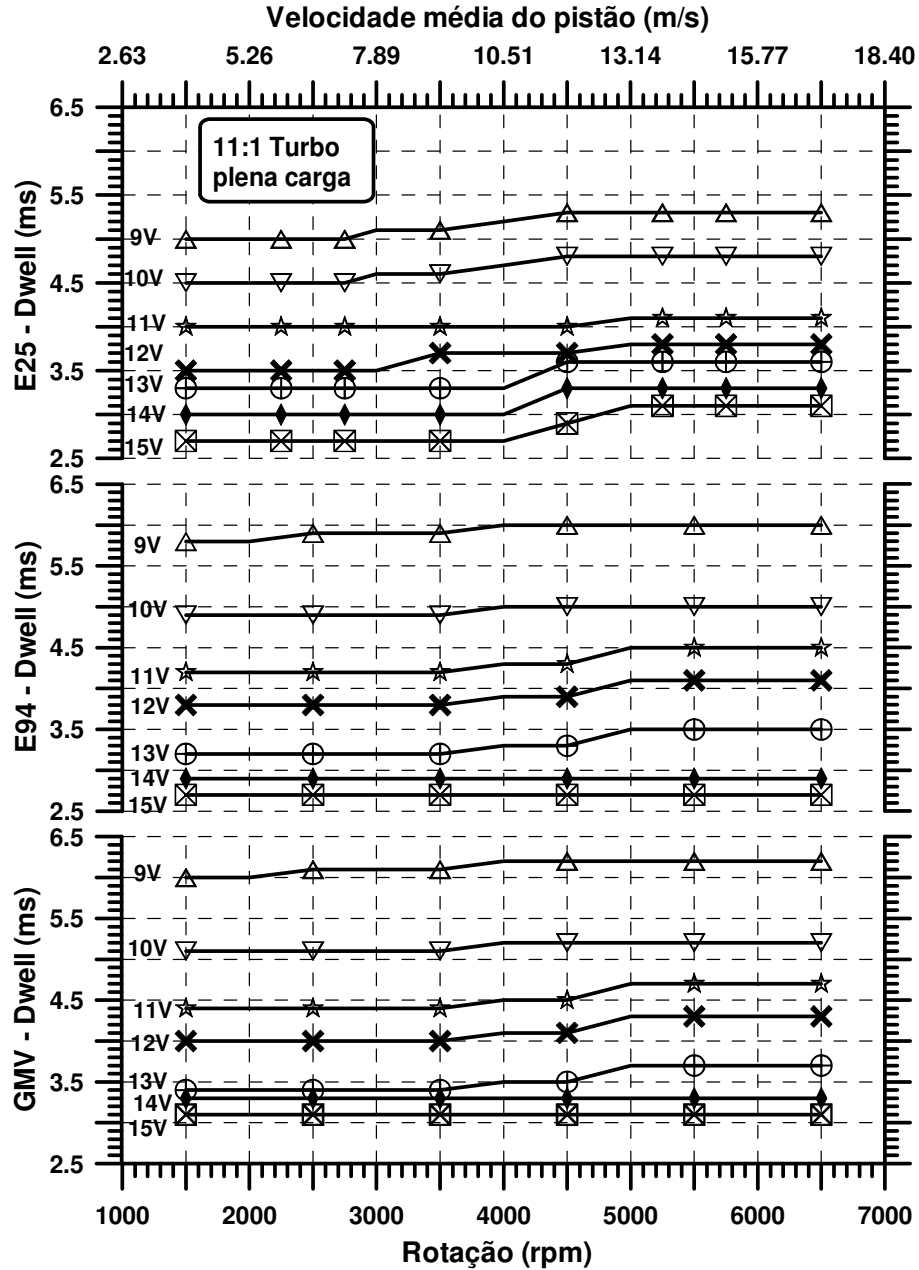


Figura 4.3 – Tempo de alimentação do circuito primário da bobina *Dwell Time* para o motor turboalimentado

A Figura 4.3 apresenta os tempos de alimentação do primário da bobina, o *Dwell Time* para o motor turboalimentado funcionando com gasolina C, álcool etílico hidratado e

GNV. O ajuste deste parâmetro é fundamental para garantir a energia necessária no sistema para o sucesso da ignição e depende das características do sistema de ignição bem como dos valores do dielétrico entre os eletrodos da vela durante a ignição. Valores de *Dwell Time* abaixo do tempo de saturação da corrente dificultam e atrasam a combustão, podendo gerar falha de ignição, resultando em perda de desempenho, aumento de consumo e emissões e até mesmo aquecimento demasiado dos gases de exaustão. Valores de *Dwell Time* acima do tempo de saturação geram superaquecimento da bobina de ignição, podendo danificá-la sem qualquer benefício para operação do motor. Os resultados obtidos apontam valores de *Dwell time* maiores com o álcool que com a gasolina C e valores ainda maiores com o GNV. As propriedades de cada combustível e sua proporção de mistura com o ar afetam o *Dwell time*; contudo as diferenças são também um efeito do aumento da massa específica do ar a qual depende da pressão de turboalimentação.

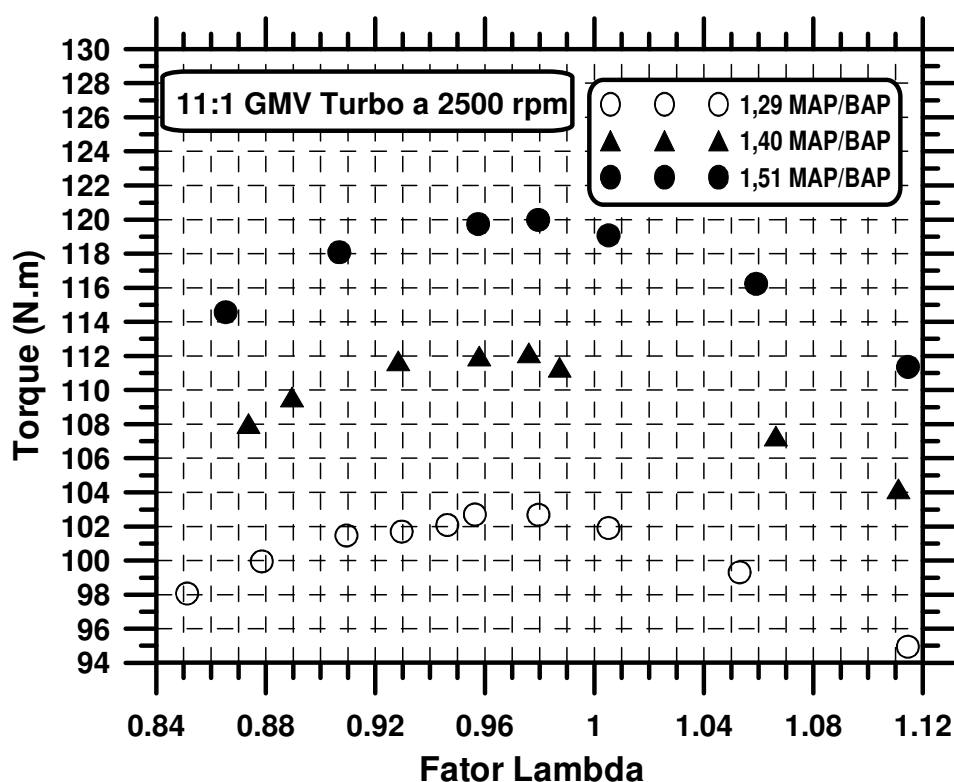


Figura 4.4 – Efeito do fator lambda no torque máximo

A Figura 4.4 apresenta a influência da razão de mistura ar-combustível no torque, em plena carga, com diferentes pressões de turboalimentação e utilizando GNV. Através deste teste é possível determinar a razão ar-combustível que maximiza o torque. A rotação de 2500 rpm foi escolhida por ser a rotação de máximo torque para este motor, apresentando assim, maior sensibilidade à variação do torque em função da alteração da razão de mistura. Os resultados mostram que para o GNV, independentemente da pressão de turboalimentação, o máximo torque é atingido com o fator lambda de 0,98. À medida que o GNV é consumido, a pressão dos cilindros de abastecimento diminui e conseqüentemente a massa específica do gás armazenado, tornando-se necessário aumentar o tempo de injeção de forma a manter a vazão mássica do combustível inalterada. Uma das técnicas para realizar esta compensação é operar com a sonda lambda em malha fechada durante todos os regimes de operação do motor. Como se pode observar, o torque operando com lambda igual a 1 é quase o máximo, o que justifica a adoção desta técnica. Este controle em malha fechada para o GNV é uma decisão estratégica, uma vez que a correção do tempo de injeção através da sonda em todo o mapa permite eliminar os sensores de temperatura e pressão na linha de alimentação de GNV, com a conseqüente redução dos custos do sistema de alimentação para este combustível.

Analogamente, para a gasolina e para o álcool, os mesmos testes foram realizados para definição do lambda ótimo, obtendo-se os valores de 0,88 e 0,92, respectivamente. Para os combustíveis líquidos é importante lembrar que a razão ar – combustível é usualmente definida não apenas em função do torque, mas também pelo controle das temperaturas dos gases de exaustão. Adicionalmente, neste trabalho, essa razão também é definida de forma a manter a eficiência global do motor.

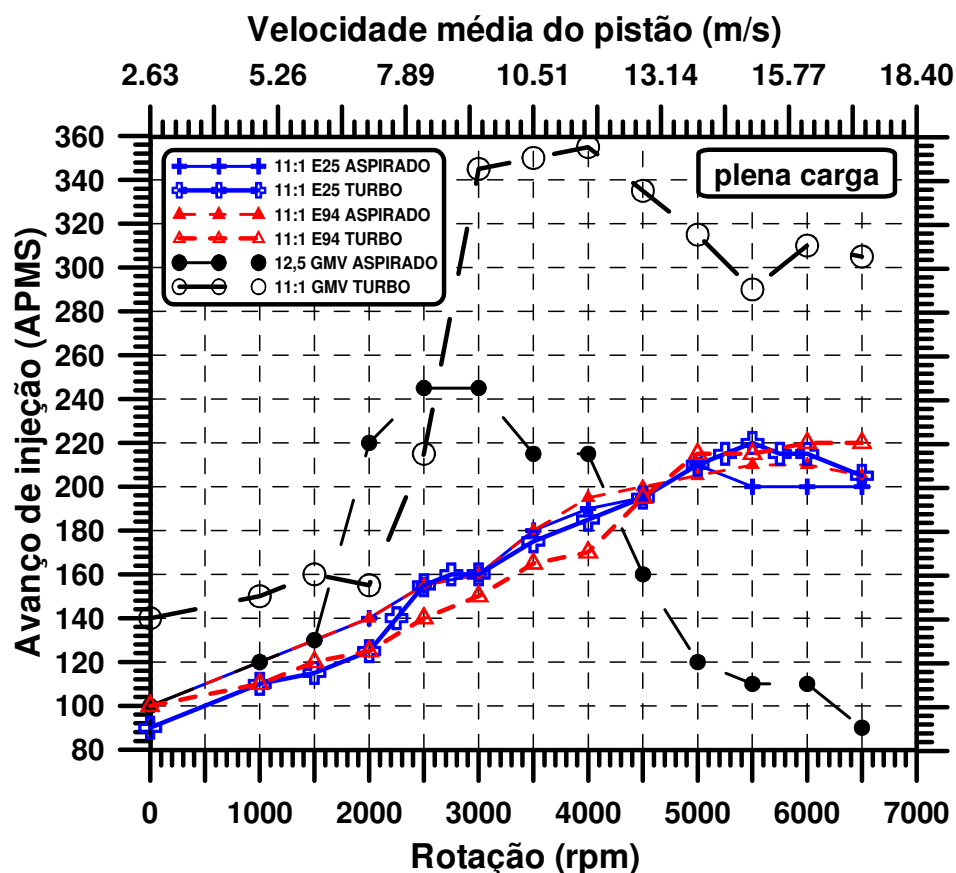


Figura 4.5 – Avanço de injeção em função da rotação para as versões aspiradas e turboalimentadas

A Figura 4.5 apresenta o avanço de injeção de combustível em função da velocidade de rotação do motor em regime de plena carga, sendo os pontos experimentais ligados por retas, uma vez que os valores entre os mesmos são obtidos por interpolação linear. A necessidade de se avançar o momento da injeção de combustível em motores de injeção indireta decorre do tempo necessário para a formação da mistura. A formação da mistura é afetada pelas ondas de pressão na admissão, advindas do efeito de pulsação no coletor, pela inércia dos gases e pelo eventual fluxo reverso na admissão, o *back-flow*, que ocorre em alguns regimes de funcionamento. O ajuste do avanço de injeção é realizado em função do consumo específico, ou seja, mantendo-se invariável o tempo de injeção e ajustando o ângulo de avanço de injeção de forma a obter o menor consumo específico, o que se traduz na eficiência global ótima para aquela condição de operação. Os avanços de injeção para os combustíveis líquidos apresentam um aumento quase

linear em função da rotação, tanto para o motor aspirado quanto para o motor turboalimentado. Pode-se observar ainda na Figura 4.5 que para o motor turboalimentado a gasolina os avanços de injeção são menores que para versão aspirada até a rotação de 2500 rpm. A partir daí os avanços de injeção são praticamente os mesmos até 5000 rpm, quando os valores da versão turboalimentada superam os valores da versão aspirada. Para o álcool o comportamento é similar, porém os valores de avanço de injeção passam a ser maiores para a versão turboalimentada a partir de 4750 rpm. Para o GNV a curva de avanço de injeção apresenta um comportamento diferente, mas com o mesmo formato caracterizado pelos ensaios tanto na versão aspirada quanto turboalimentada. Embora, pelo momento apenas no campo da especulação, acredita-se ser esse comportamento resultado da interferência da injeção do gás na dinâmica do ar no coletor de admissão, uma vez que o mesmo ocupa um volume significativo. Experimentos dedicados são necessários para esclarecer esse ponto. O deslocamento da curva encontrado para a versão turboalimentada em relação à versão aspirada pode ser associado ao aumento da pressão do regulador de pressão de forma a atender a demanda de vazão do motor turboalimentado.

A Figura 4.6 separa as regiões onde a operação do motor se dá com malha aberta, acima da linha, da região onde opera com malha fechada, abaixo da linha, sendo essa separação determinada pela temperatura de exaustão. Como pode ser observado, o motor turboalimentado a GNV opera em malha fechada em todos os regimes de carga e apresenta temperaturas tão baixas quanto o motor turboalimentado operando com álcool. Por sua vez, o álcool opera com a malha aberta e misturas mais ricas a partir de 4000 rpm a 71,5% de abertura da borboleta. Tanto para o motor aspirado quanto para o turboalimentado funcionando com álcool ou gasolina, a malha é aberta a partir de 4000 rpm a 71,5%, o que demonstra que para a mesma condição de operação da malha a gasolina apresenta as maiores temperaturas dos gases na exaustão. A maior temperatura com a gasolina está ligada não somente às suas propriedades, mas também ao avanço de ignição decorrente. A ausência do catalisador, removido do coletor de descarga, para o motor turboalimentado justifica as menores temperaturas obtidas para o álcool e para gasolina em comparação com as temperaturas obtidas com o motor aspirado, que continha o catalisador incorporado ao coletor. Porém, a partir de 4000 rpm observam-se valores de temperaturas maiores no motor turboalimentado, tanto para o álcool quanto

para a gasolina, havendo, portanto, maior rejeição de calor. Nota-se ainda, que para o motor turboalimentado funcionando com álcool ou gasolina é necessário manter a malha aberta para cargas acima de 30% a partir de 5000 rpm, de forma a permitir o controle das temperaturas dos gases queimados. Para as mesmas condições de operação com o motor aspirado, a malha foi aberta apenas para cargas acima de 60%. Isto ocorre por causa das maiores eficiências volumétricas do motor turboalimentado resultante das maiores pressões de turboalimentação.

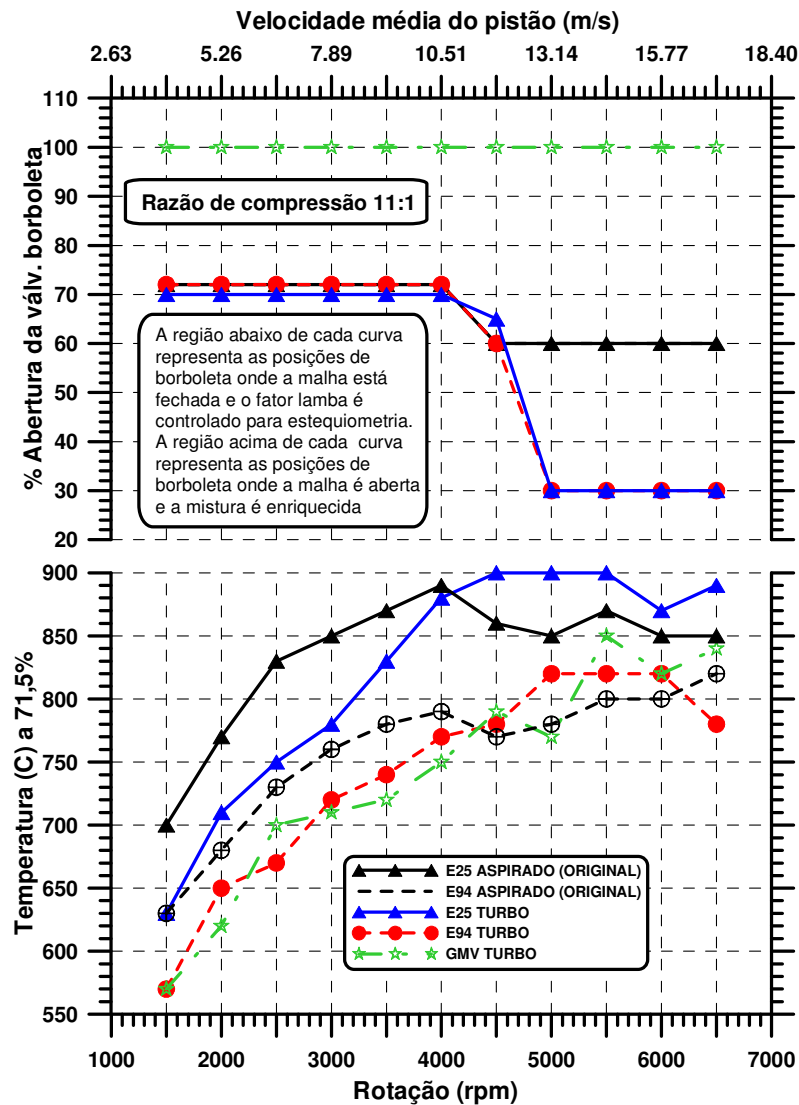


Figura 4.6 – Temperatura de exaustão em função da velocidade do motor e modo de atuação da malha

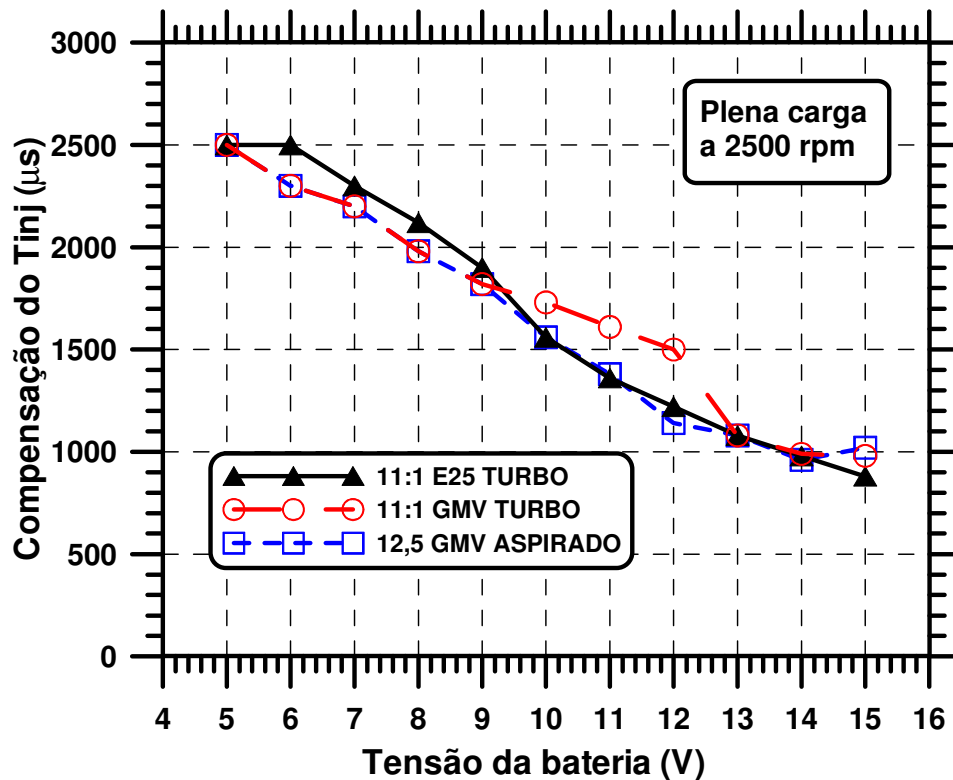


Figura 4.7 – Compensação do tempo de injeção em função da tensão da bateria

A Figura 4.7 apresenta a calibração do tempo de injeção em função da diferença de potencial disponível no sistema. A calibração deste parâmetro é fundamental para que as variações da tensão elétrica de alimentação, advindas da inserção de cargas elétricas no sistema, não influenciem a vazão mássica de combustível injetada. Como regra geral, quanto menor a tensão elétrica mais demorada a resposta dos injetores ao comando de abertura quando alimentados. O ajuste é realizado com o motor a plena carga variando-se a tensão de alimentação para a UCE através de uma fonte de tensão ajustável e ajustando-se a compensação do tempo de injeção de forma a manter o mesmo fator lambda para toda faixa de operação de tensão. Os resultados obtidos apresentam uma compensação similar para os combustíveis líquidos e gasosos.

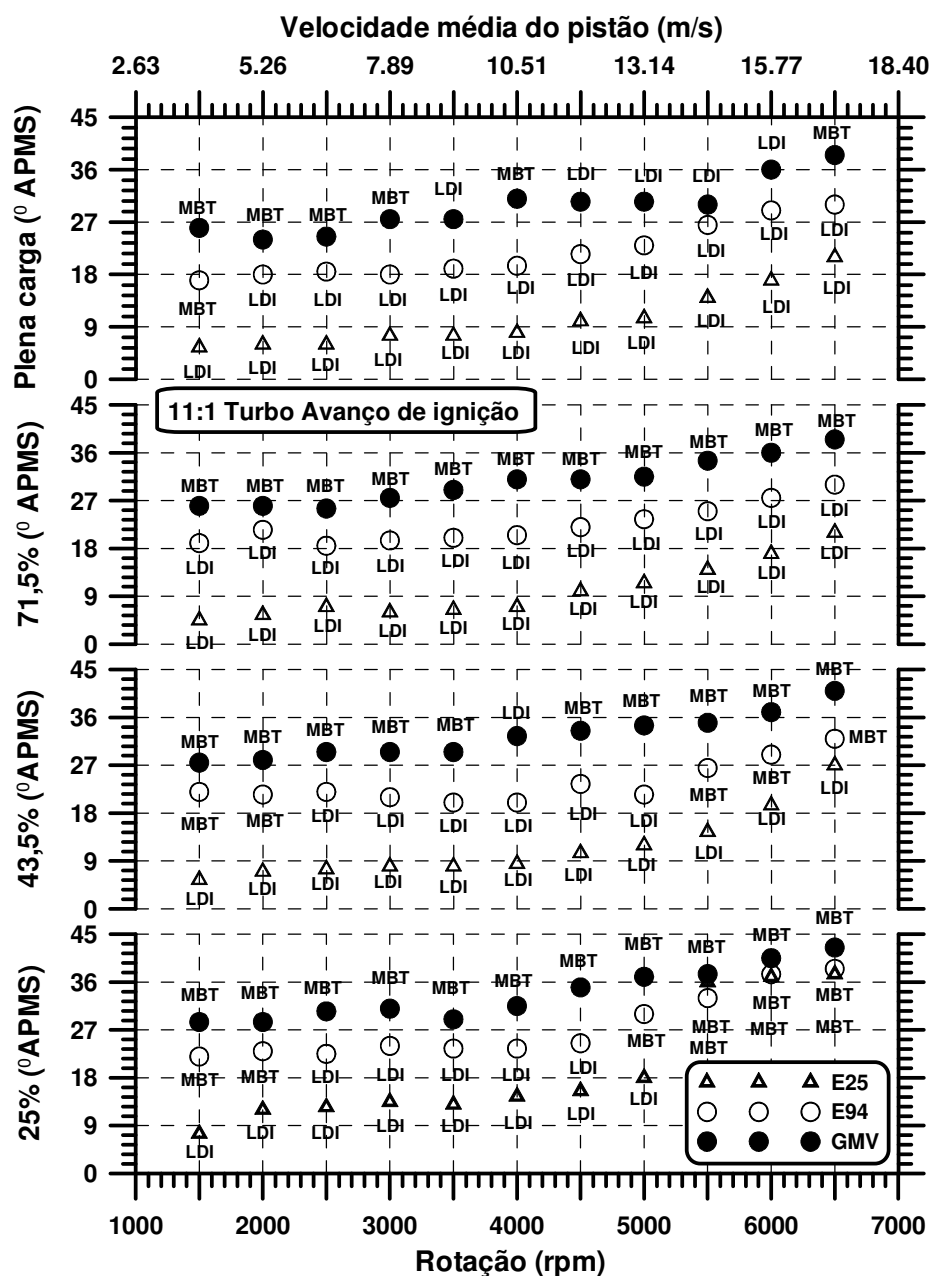


Figura 4.8 – Avanço de ignição e se limitado (LDI) ou não (MBT) pela detonação em função da rotação e da abertura da válvula borboleta

A Figura 4.8 apresenta os avanços de ignição ajustados em função do regime de rotação e abertura da borboleta para o motor turboalimentado com os três combustíveis testados. Os valores dos avanços de ignição foram ajustados através do MBT ou LDI. O MBT define a máxima eficiência térmica para aquela condição de operação, HEYWOOD

(1988). Caso o avanço de ignição seja limitado pelo LDI, atrasado em relação ao MBT, não se consegue maximizar o rendimento térmico naquela condição de operação porque a combustão mais tardia reduz a razão efetiva de expansão após a liberação de energia, limitando a eficiência térmica. A determinação do avanço de ignição é importante para a análise das velocidades de propagação da chama e para o controle da temperatura dos gases queimados. Com o GNV a razão volumétrica de compressão de 11:1 e os valores de pressão de turboalimentação praticados foram adequados para todos os regimes de carga, pois foi atingido o MBT para a grande maioria dos regimes de operação do motor, maximizando-se a eficiência térmica. Com o álcool, até 43,5% de abertura da borboleta, o MBT foi atingido para cerca de metade dos pontos de operação, sendo que para os valores superiores os avanços de ignição foram limitados em quase sua totalidade por detonação. Portanto, uma redução da razão volumétrica de compressão ou dos valores de pressão de turboalimentação melhorariam a eficiência térmica do motor. Com a gasolina os avanços de ignição foram limitados por detonação praticamente em todo o mapa operacional, o que indica que a redução da razão volumétrica de compressão aumentaria sobremaneira a eficiência térmica do motor, principalmente para cargas elevadas, reduzindo-se a temperatura dos gases de exaustão. Em geral espera-se que as condições LDI sejam atingidas apenas em altas cargas. Esse comportamento contrário ao esperado poderia ser explicado pelo aumento da temperatura da mistura resultante de uma maior retenção de gases queimados no cilindro em função da restrição da turbina. Uma outra possível causa seria o aumento da temperatura do ar de admissão provocado pela turboalimentação. Ao se comprimir o ar de admissão, a sua temperatura também aumenta, sendo assim, esse aumento de temperatura induz a detonação.

4.2. Parâmetros de operação do motor

A seguir são analisados os parâmetros de operação que tem influência no desempenho do motor.

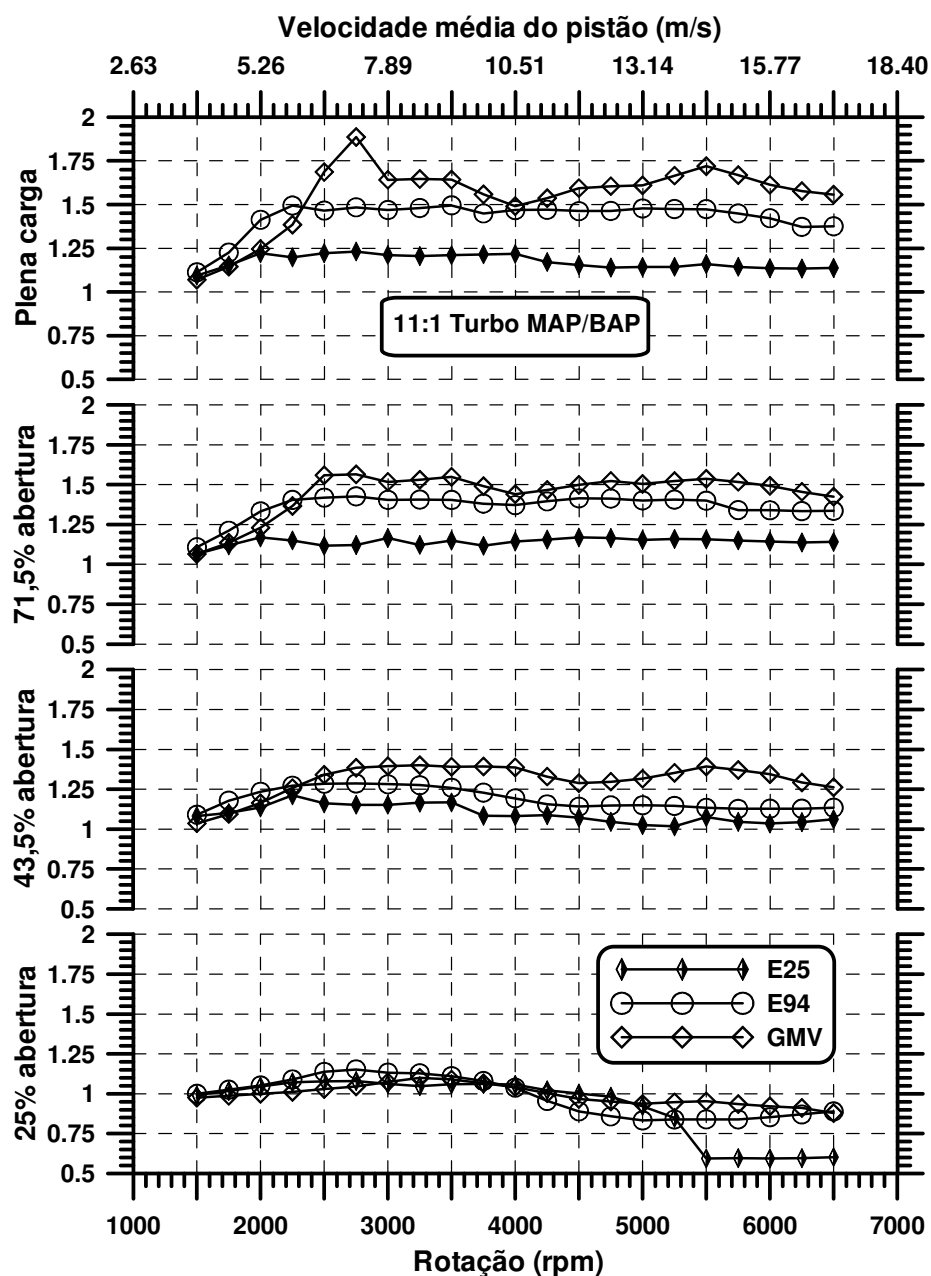


Figura 4.9 – Razões de turboalimentação em função da rotação e da abertura da válvula borboleta para os três combustíveis

A Figura 4.9 apresenta as razões de turboalimentação do motor ajustadas em cada regime de carga e rotação, operando com cada combustível. Os valores obtidos possibilitam analisar a influência das razões de turboalimentação no ganho de eficiência volumétrica para cada combustível utilizado. O valor de pressão é ajustado em função

do consumo específico de combustível, levando em consideração a progressividade de aceleração do motor em função da abertura da válvula borboleta. De forma geral, nota-se que as pressões praticadas são maiores com o GNV, seguidas pelo álcool etílico hidratado e finalmente pela gasolina C. Os valores de turboalimentação menores para a gasolina C estão diretamente ligados à menor octanagem deste combustível e às maiores temperaturas dos gases queimados. Apenas com 25% de abertura e rotações menores que 5000 rpm, a gasolina alcançou razões de turboalimentação similares ao GNV e ao álcool etílico. Acima desta rotação as pressões foram diminuídas, a ponto de se eliminar a turboalimentação do motor, para evitar que a temperatura dos gases queimados atingisse valores muito elevados. Este efeito é notado com intensidade bem menor para o motor operando com 43,5% de abertura devido à menor restrição da válvula borboleta, não produzindo efeito a partir de 71,5% de abertura. Em regimes de rotação entre 1500 rpm e 2250 rpm, as pressões ajustadas para o álcool superaram as pressões de turboalimentação ajustadas com o GNV a partir de 43,5% de abertura. Esse comportamento é mais um efeito do processo de turboalimentação que uma deficiência do GNV para operar em altas pressões. Em baixas rotações, a disponibilidade da energia na exaustão é baixa. Com o GNV operando em MBT, essa energia é ainda menor, uma vez que maiores frações são transformadas em trabalho e rejeitadas para o sistema de arrefecimento. Por outro lado, para uma mesma pressão de turboalimentação, a quantidade de ar admitida é menor porque o GNV ocupa uma parte substancial do volume. Esses efeitos combinados resultam na menor pressão.

Conclui-se assim que o GNV suporta maiores pressões de turboalimentação ligadas a sua maior resistência à detonação. Isso possibilita atingirem-se eficiências energéticas globais maiores que os demais combustíveis em condições de cargas elevadas.

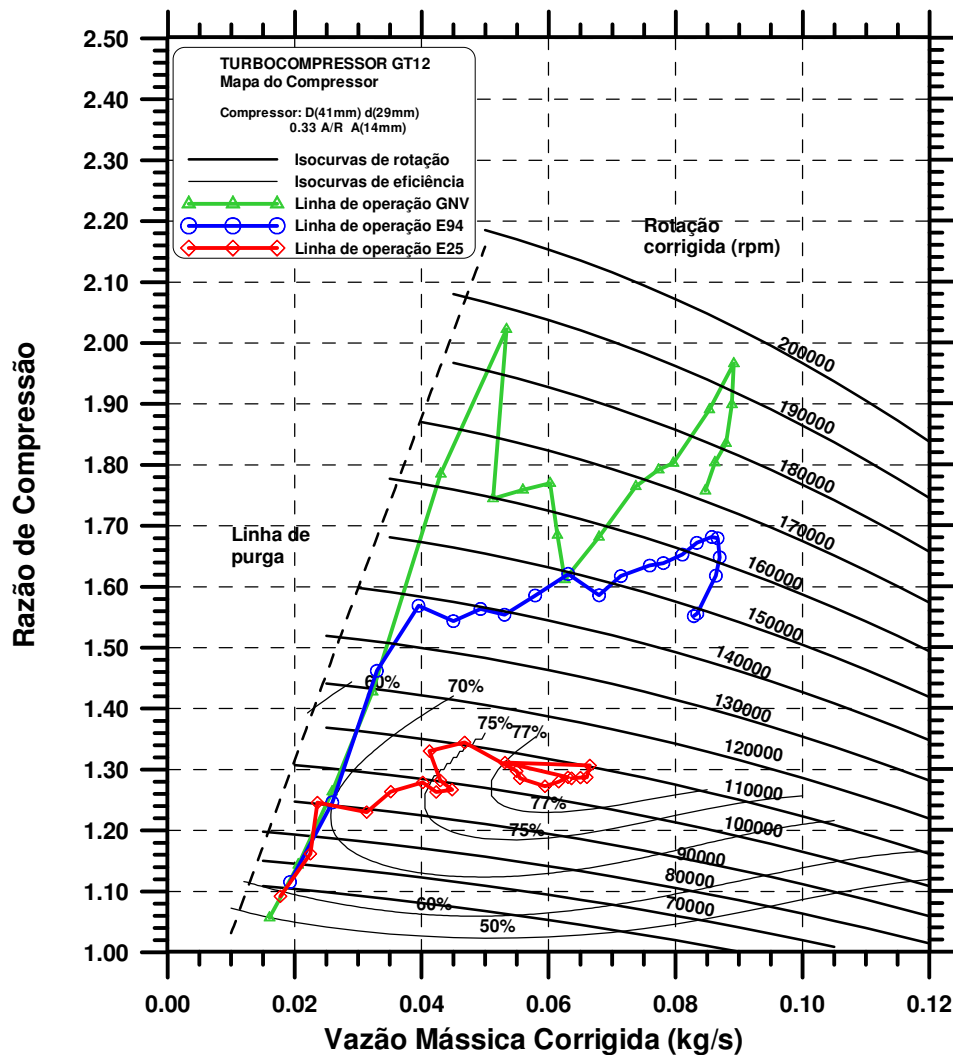


Figura 4.10 – Mapa do compressor com as linhas de operação do motor em plena carga

As Figuras 4.10 e 4.11 apresentam os mapas do compressor e da turbina utilizados contendo as linhas de operação do motor funcionando com os três combustíveis em plena carga. Os mapas foram obtidos experimentalmente em banco de fluxo por RODRIGUES FILHO (2003). Através da Figura 4.10 observa-se que as linhas de operação do motor estão contidas dentro da faixa operacional do compressor com boa margem de segurança. As linhas de operação apresentam um formato característico, onde a taxa de crescimento é limitada pela atuação da válvula *waste-gate*. As razões de pressão alcançadas para o motor funcionando com álcool e com GNV favorecem a operação em zonas de maior eficiência do compressor quando comparadas ao funcionamento com gasolina.

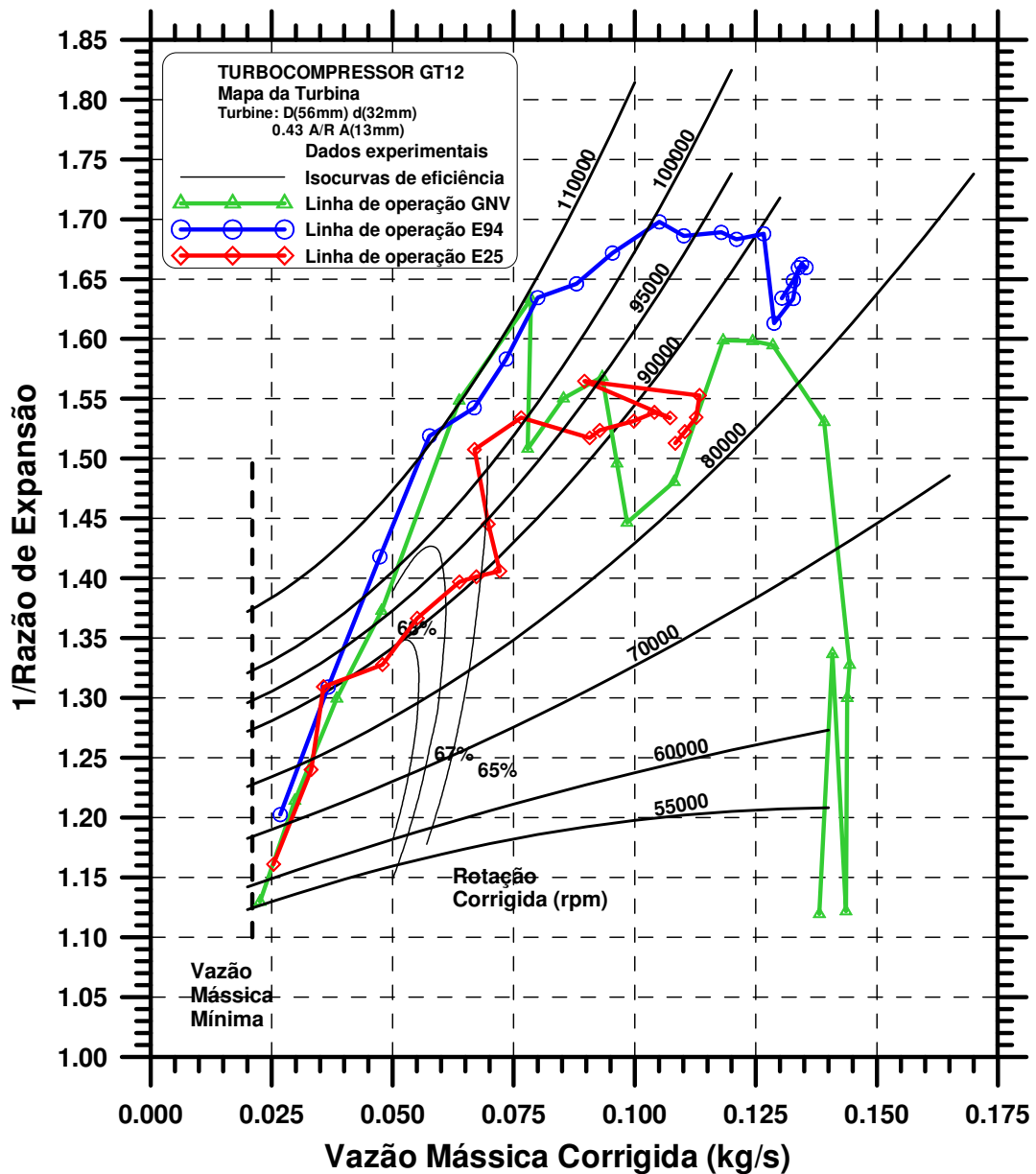
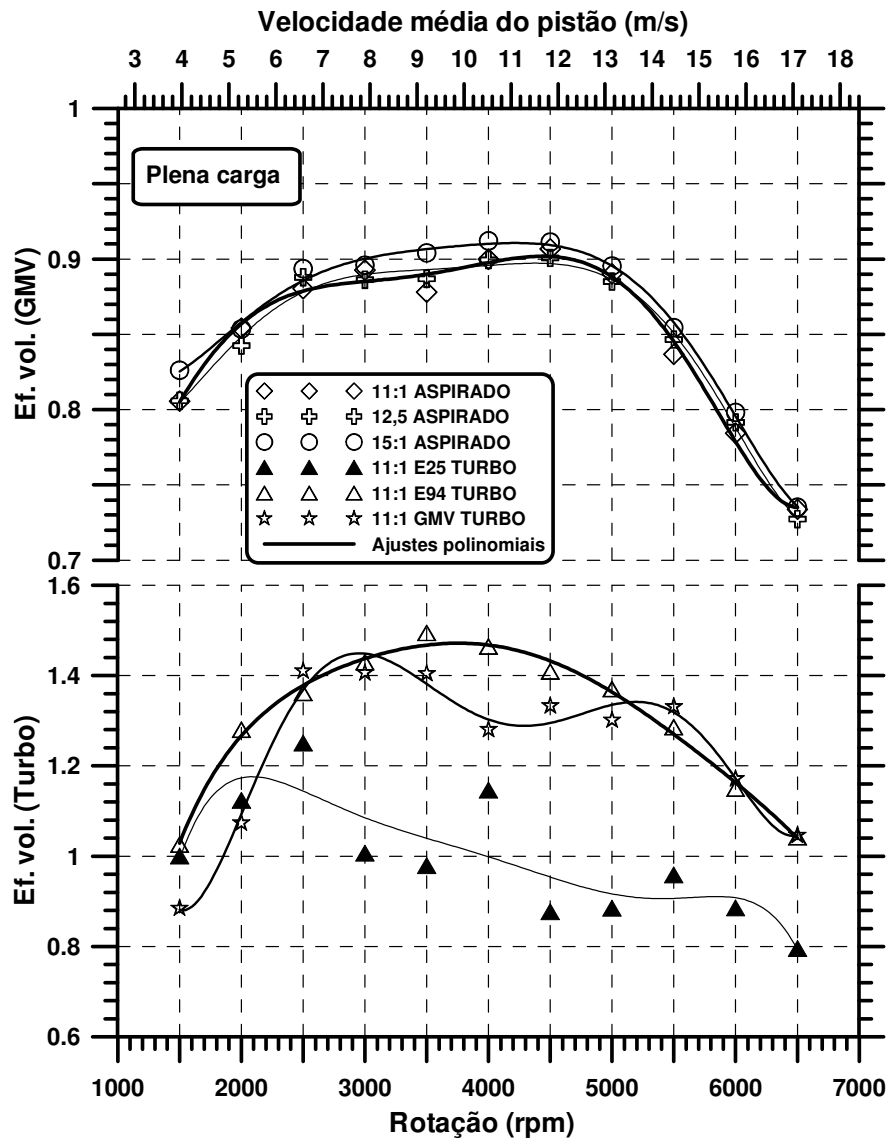


Figura 4.11 – Mapa da turbina com as linhas de operação do motor em plena carga

A Figura 4.11 mostra que as linhas de operação do motor também estão contidas dentro da faixa operacional da turbina com boa margem de segurança. Analisando as figuras 4.10 e 4.11 pode-se afirmar que, para todas as faixas de operação do motor com cada combustível, o compressor e a turbina estão bem dimensionados, permitindo assim um aproveitamento adequado da energia dos gases de descarga. Desta forma, a aplicação

deste turbocompressor ao motor é considerada adequada de acordo com as características desejadas. A sensibilidade do controle eletrônico da razão de turboalimentação foi essencial para otimizar a faixa operacional do conjunto.



4.12 – Eficiência volumétrica em função da rotação para as configurações aspirada e turboalimentada com os três combustíveis

A Figura 4.12 apresenta as eficiências volumétricas medidas para os motores aspirados e turboalimentados em plena carga, com razão volumétrica de compressão de 11:1 e

utilizando os três combustíveis testados. O álcool etílico apresenta os maiores valores de eficiência volumétrica tanto na configuração aspirada quanto na configuração turboalimentada, apesar das pressões de turboalimentação serem inferiores às pressões praticadas com o GNV. O efeito do maior poder de resfriamento do ar por parte do álcool etílico em contraste com o grande volume ocupado pelo GNV no coletor quando injetado explicam este resultado. Contudo, os ganhos de eficiência volumétrica em relação à versão aspirada foram em geral maiores para o GNV devido à maior pressão na admissão. A gasolina, por sua vez, apresenta os menores ganhos de eficiência volumétrica com a turboalimentação devido aos valores bem mais baixos de pressão de turboalimentação praticados. Comparando a gasolina com o álcool na versão aspirada, nota-se que as grandes diferenças de eficiência volumétrica, a favor do último, ocorrem nas rotações mais baixas, sugerindo que em altas rotações, ou não há tempo suficiente para uma evaporação substancial enquanto a válvula de admissão está aberta e/ou que a deposição de combustível nos componentes é maior. Essa última alternativa, a qual resultaria em uma evaporação conduzida mais pelo calor oriundo do motor que do ar, não é a mais provável porque maiores velocidades do ar têm mais facilidade para sustentar as gotas do combustível e o aquecimento do combustível pelos componentes aumentaria a tendência à detonação.

A Figura 4.13 apresenta algumas variáveis de controle juntamente com algumas variáveis de desempenho para o motor turboalimentado em plena carga, operando com os três combustíveis. O álcool etílico hidratado apresenta menores pressões de turboalimentação em quase todos os regimes de operação quando comparados ao GNV. Entretanto, o álcool atinge maior eficiência volumétrica e conseqüentemente maior torque e maior razão de expansão na turbina com as menores temperaturas dos gases queimados, porém com um maior consumo específico. O maior consumo específico está principalmente associado ao menor calor de combustão e também ao fato do álcool operar com o λ por volta de 0,95 e o GNV com 1. O GNV supera o torque alcançado com o álcool apenas na rotação de 2750 rpm, onde o aumento da pressão de turboalimentação para o GNV chega a ser 27% maior que o praticado para o álcool. As temperaturas dos gases queimados para o GNV são praticamente as mesmas do álcool para rotações de até 2500 rpm e passa a ser intermediária ao álcool e a gasolina até 5500 rpm, a partir da qual a temperatura dos gases queimados iguala-se à encontrada para a

gasolina. Deve-se considerar o efeito do avanço de ignição elevado para o GNV, que possibilita atingir o MBT em quase todos os regimes de operação e, conseqüentemente, o melhor rendimento térmico. A gasolina C apresenta as menores pressões de turboalimentação que levam à menor eficiência volumétrica e aos menores valores de torque. Contudo, a gasolina apresenta as maiores temperaturas dos gases queimados e uma eficiência energética global mais baixa que o álcool e o GNV para quase toda faixa de rotação em plena carga. Desta análise é possível perceber que em regime de plena carga o álcool é um combustível adequado para a turboalimentação do ponto de vista de elevado torque e de baixas temperaturas na exaustão, apresentando valores de eficiência energética global bem próximos ao GNV, porém com o maior consumo específico. O GNV torna-se uma opção interessante do ponto de vista do melhor aproveitamento da energia disponível por suportar elevadas pressões de turboalimentação com valores de torque bem próximos ao álcool, temperaturas dos gases queimados entre a gasolina e o álcool, consumo específico bem mais baixo que os demais combustíveis e a maior eficiência energética global.

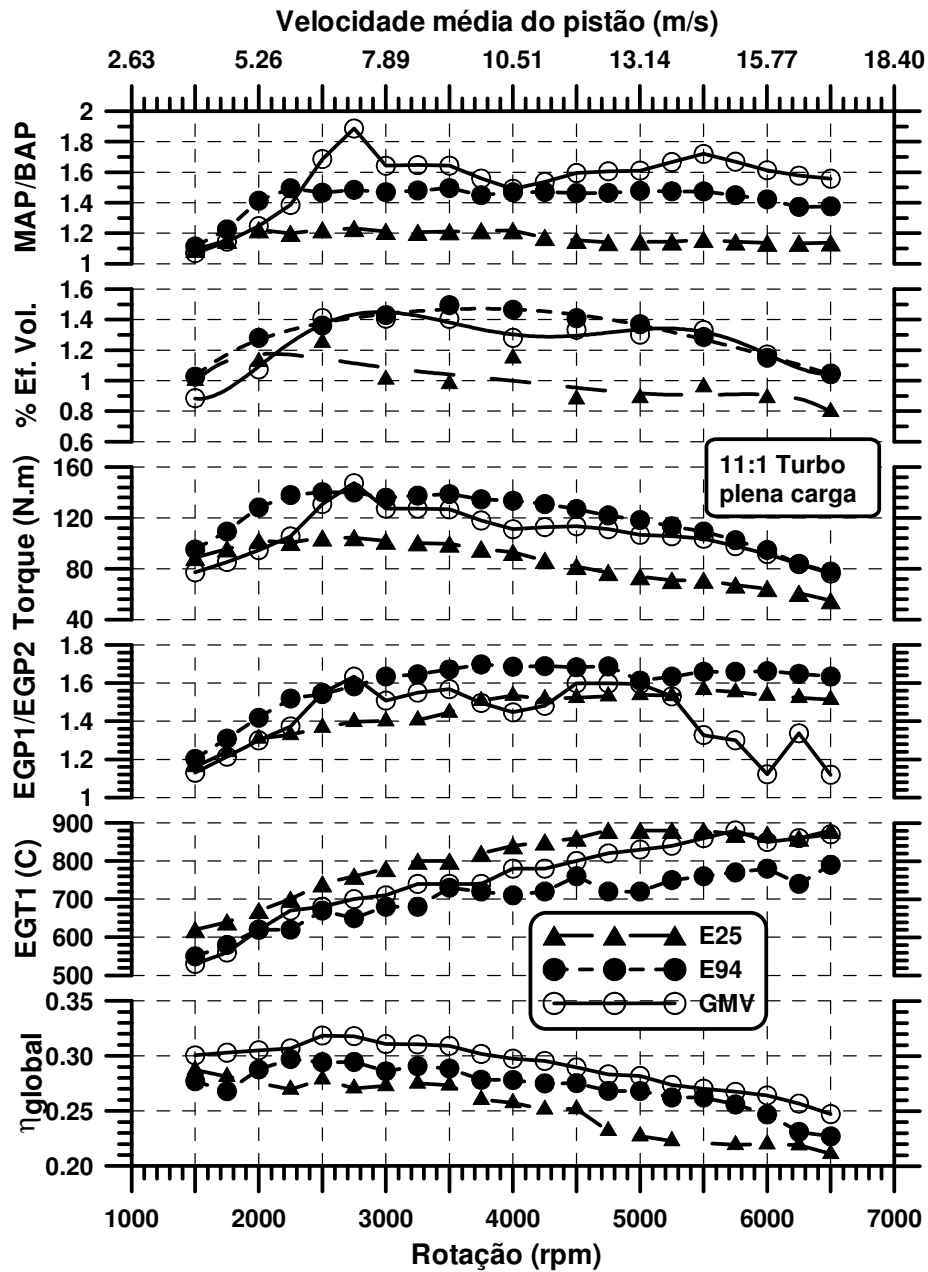


Figura 4.13 – Comparação entre as variáveis de controle e as variáveis de desempenho

A Figura 4.14 apresenta os valores das pressões ao longo do circuito de admissão e do circuito de exaustão, em função da rotação e da abertura da válvula borboleta, para o motor turboalimentado a álcool. A expansão dos gases na turbina aumenta com a carga aplicada e com a rotação. Somente para 25% de abertura da borboleta esse aumento não ocorre em rotações mais elevadas por causa do estrangulamento na admissão. Nota-se

também que a queda de pressão da saída do compressor PSC para a saída do resfriador PSI tende a diminuir em função da diminuição da carga aplicada. Comparando-se a pressão da saída do resfriador com a pressão no coletor de admissão MAP, o efeito é inverso, ou seja, na medida em que a carga aplicada diminui, com o fechamento da borboleta, a queda de pressão da entrada do resfriador PSI em relação ao MAP aumenta sobremaneira. Neste caso, a pressão na saída do resfriador PSI chega a ser 87% maior que MAP para abertura de 25% a 6500 rpm. Neste regime de carga, a pressão de MAP atinge valores abaixo da pressão atmosférica para rotações acima de 4100 rpm. Isto ocorre porque na medida em que se eleva a velocidade do ar na admissão, a posição quase fechada da borboleta ocasiona maiores reduções de pressão, que chega a anular o efeito da turboalimentação em rotações elevadas.

A gasolina e o GNV apresentam um comportamento similar com pressões maiores de turboalimentação para o GNV e menores para a gasolina.

Para todos os combustíveis a pressão na saída do escapamento EGPI supera o valor de MAP, mesmo a plena carga. Nesta condição, a razão EGPI/MAP aumenta na medida em que a rotação aumenta e a partir de 2250 rpm aumenta em maiores proporções. Isto ocorre devido à adoção de um turbocompressor pequeno, que visa obter o efeito da turboalimentação desde baixas rotações do motor. Contudo, a diminuição da faixa de inoperância da turbina *turbolag* através da utilização de um turbocompressor pequeno, ocasiona o estrangulamento da descarga em regimes de rotação mais elevada. Isto aumenta o trabalho de bombeamento nesta condição e a retenção de maior quantidade de gases queimados no cilindro. Esta permanência de gases queimados residuais no cilindro é um dos fatores responsável por uma combustão mais lenta na versão turboalimentada.

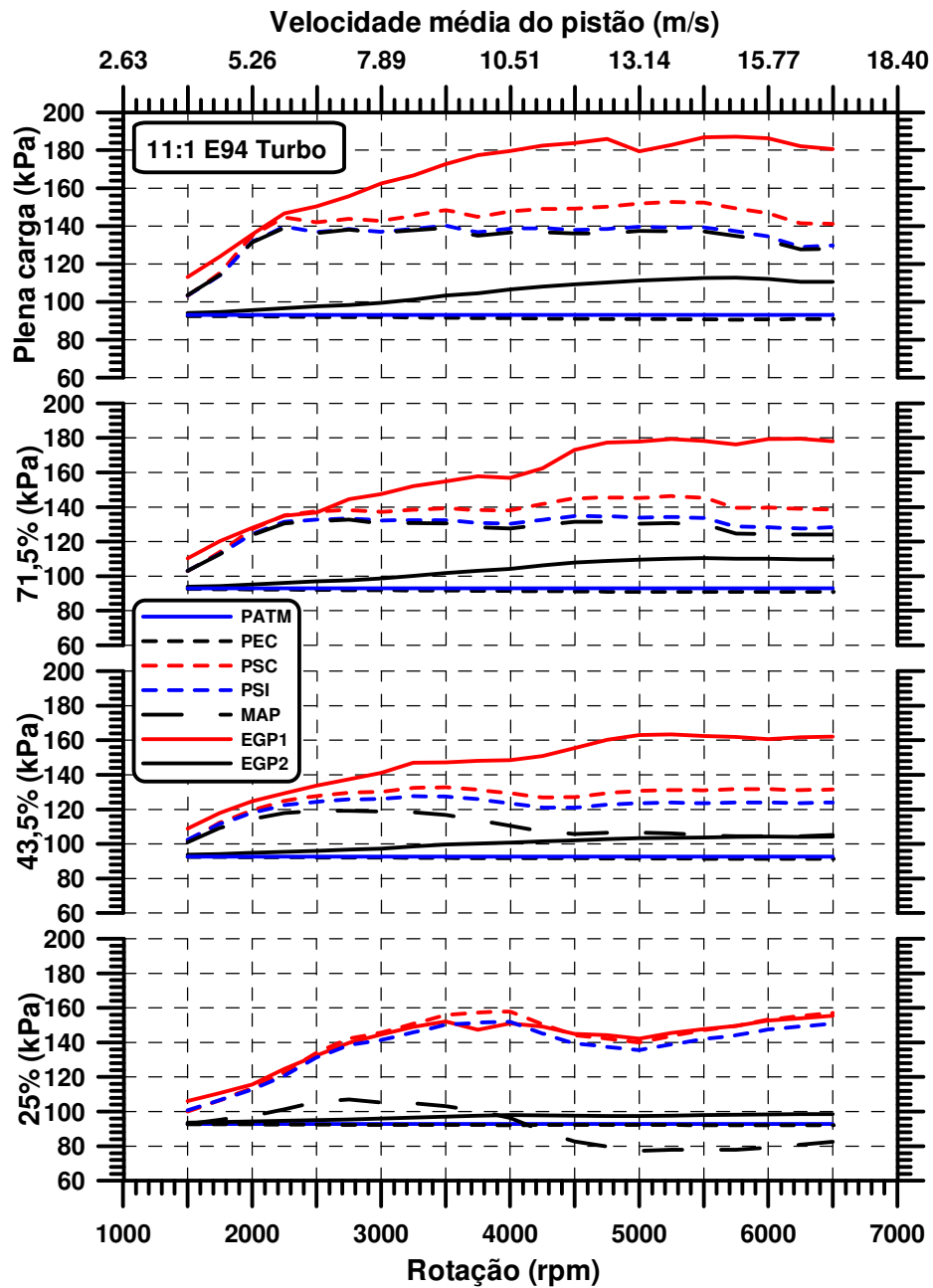


Figura 4.14 – Pressões na admissão e exaustão no motor sobrealimentado operando com o álcool

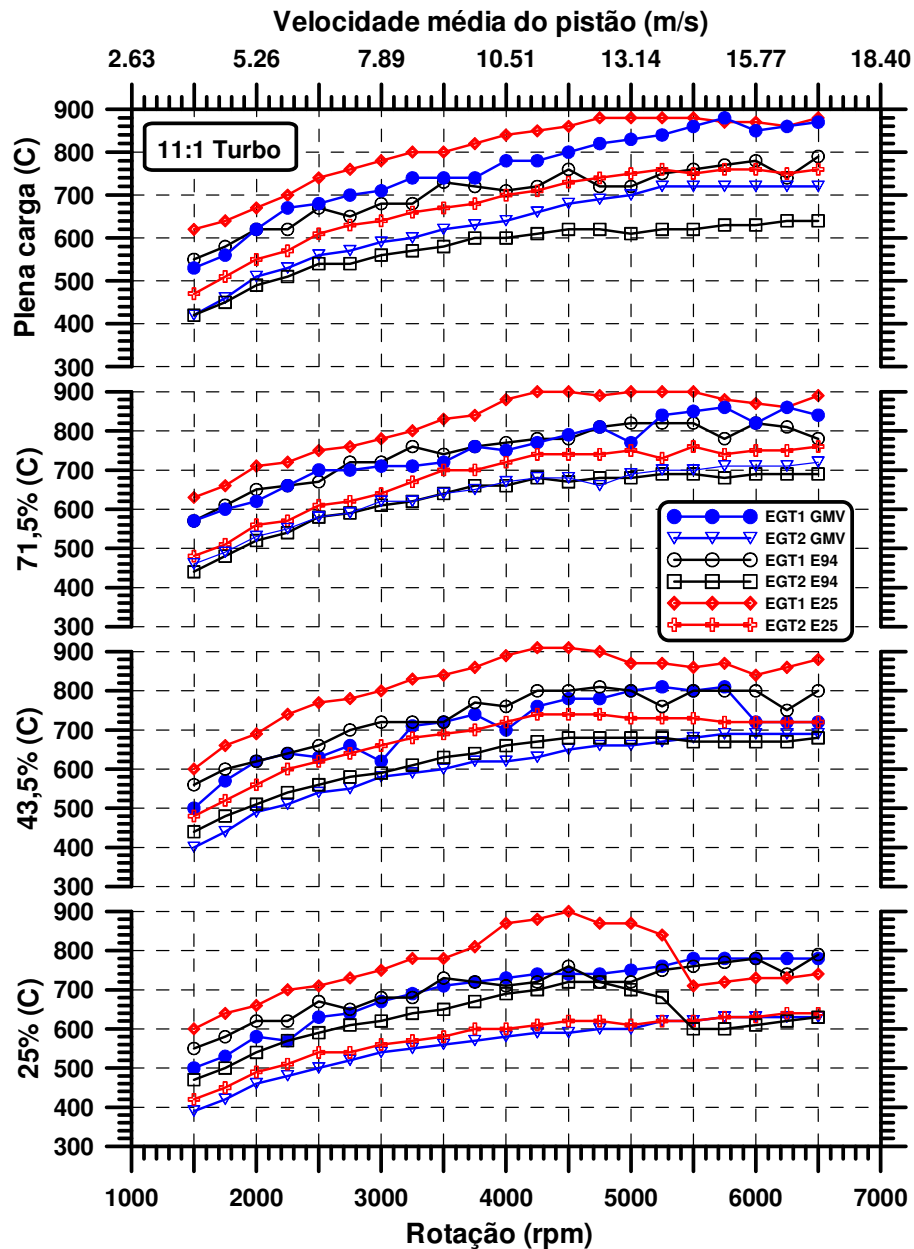


Figura 4.15 – Temperaturas na exaustão no motor turboalimentado

A Figura 4.15 apresenta as temperaturas dos gases queimados no motor turboalimentado antes e depois da turbina, com os três combustíveis testados, para os regimes de carga e rotação apresentados. A temperatura dos gases queimados é parâmetro essencial para a calibração do sistema de controle do motor por estar intimamente ligada à resistência mecânica dos componentes internos e à composição dos gases queimados. Em regime de plena carga, o motor operando com gasolina apresenta as maiores temperaturas dos

gases queimados, antes e depois da turbina, em função da baixa eficiência térmica resultante dos pequenos ângulos de avanço de ignição. O motor operando com GNV apresenta temperaturas de exaustão intermediárias, obtendo-se com álcool as menores temperaturas de exaustão. Para 71,5% de abertura de borboleta as temperaturas mais altas são encontradas ainda com o motor a gasolina, porém, o motor operando com GNV apresenta basicamente as mesmas temperaturas encontradas com álcool. Isto é explicado pelo empobrecimento da mistura ar-combustível para o álcool que passa a trabalhar com λ operando em malha fechada até 4000 rpm. Em rotações mais elevadas o motor a álcool passa a ter menores temperaturas devido ao enriquecimento da mistura. Para 43,5% tem-se o mesmo perfil encontrado com 71,5%, porém com uma tendência do motor operando com GNV atingir temperaturas mais baixas que com o álcool. Isto se deve à maior eficiência térmica do motor operando com GNV neste regime de carga. A 25% de abertura de borboleta o motor funcionando com gasolina apresenta as maiores temperaturas na entrada da turbina, porém as temperaturas na saída da turbina são tão baixas quanto as encontradas com o motor a GNV. O motor operando com GNV apresenta temperaturas basicamente iguais às do motor operando com álcool na entrada da turbina e temperaturas mais baixas que a do álcool na saída da turbina. Isto indica maior disponibilidade de energia na turbina com gasolina, seguida pelo motor com gás e menor no motor com álcool neste regime de carga.

As Figuras 4.16 a 4.18 apresentam as temperaturas na admissão em função da carga e da rotação para o motor turboalimentado funcionando com álcool etílico, gasolina C e GNV, respectivamente. Estas informações são importantes para a análise da necessidade ou não da adoção de um trocador de calor na admissão. O resfriador gera uma queda de temperatura de aproximadamente 20°C, que varia em função dos regimes de carga e das pressões de turboalimentação. Para o motor operando com álcool, as temperaturas na saída do compressor chegam a superar 80°C em plena carga e atingem este valor com apenas 25% de abertura da borboleta. Na Figura 4.17 pode-se observar que para o motor operando com gasolina, apesar de apresentar as menores temperaturas do ar em plena carga na saída do compressor TSC, devida às baixas pressões de turboalimentação, as temperaturas na descarga atingem valores da ordem de 900°C. Em regime de 25% de abertura da borboleta TSC chega a atingir valores superiores a 80°C para o motor a gasolina. O motor operando com GNV atinge as maiores pressões de turboalimentação

e, conseqüentemente, maiores valores de TSC, que chegam a 100°C em regime de plena carga. Em cargas parciais TSC supera em alguns casos os 80°C. Dada que a condição de ajuste da ignição, principalmente com gasolina e álcool, ser tipicamente LDI ao invés de MBT, a utilização do resfriador é justificada. Contudo, esses mesmos resultados mostram ser o grau de resfriamento ainda insuficiente.

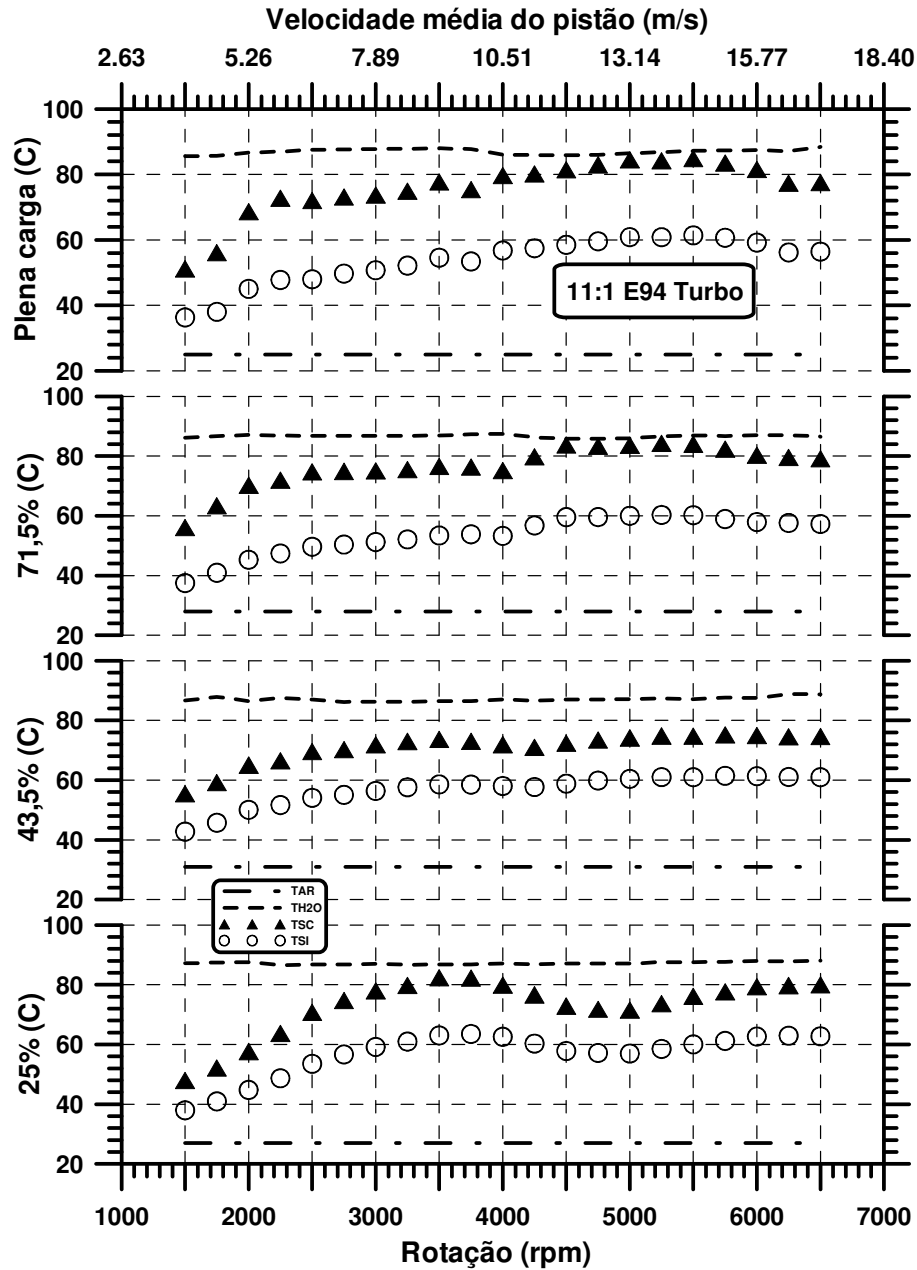


Figura 4.16 – Temperaturas na admissão para o motor turboalimentado a álcool

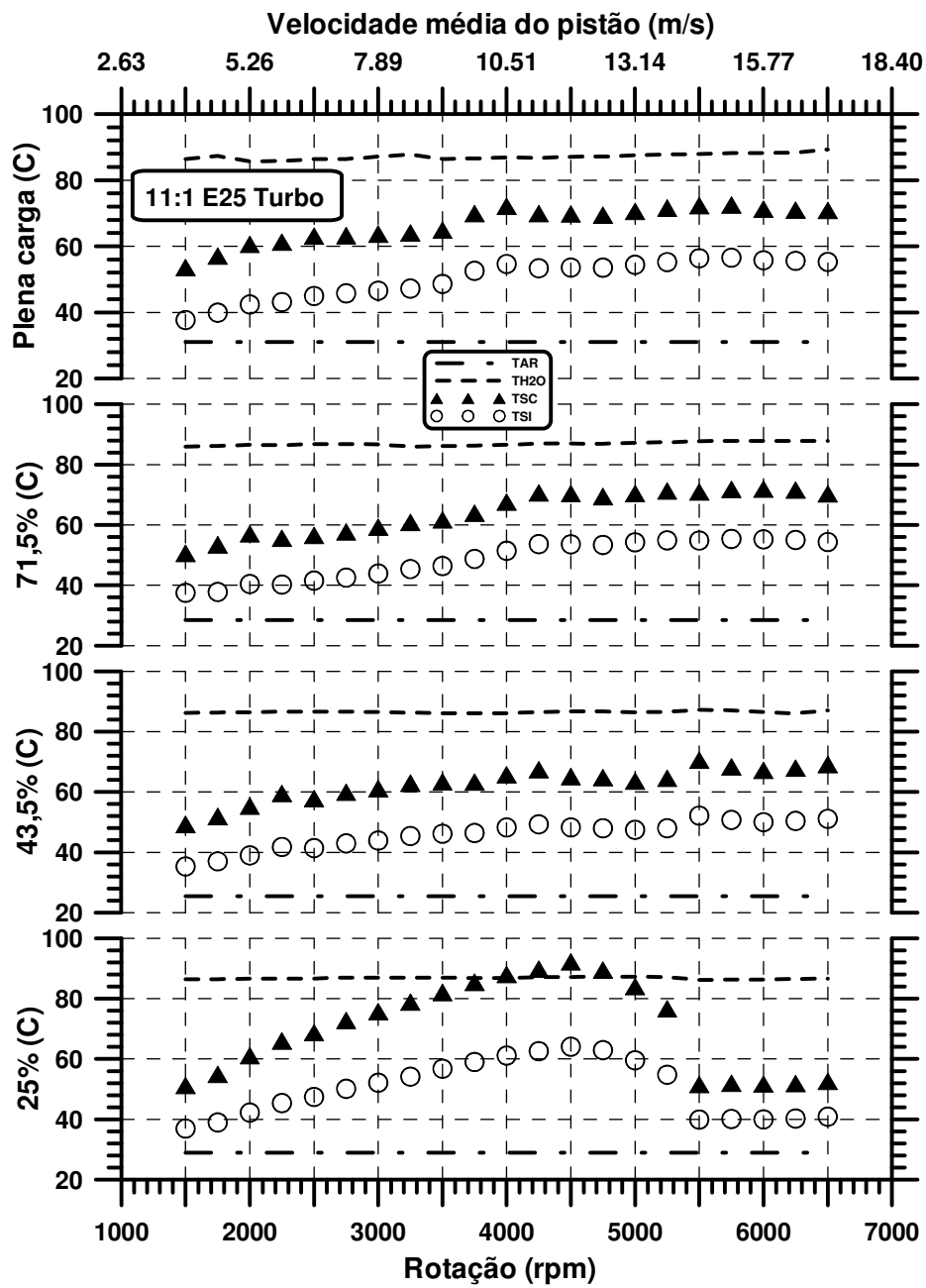


Figura 4.17 – Temperaturas na admissão para o motor turboalimentado a gasolina

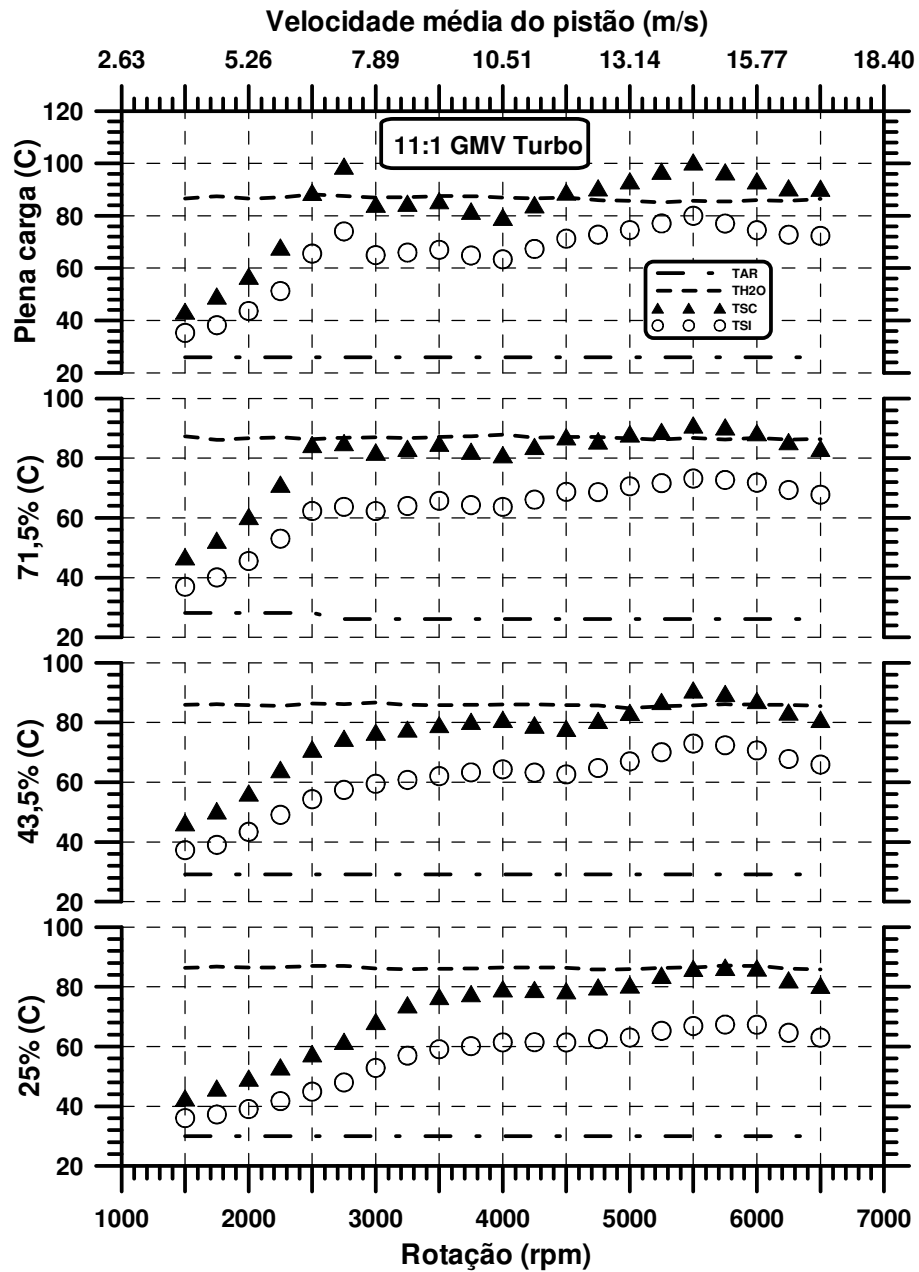


Figura 4.18 – Temperaturas na admissão para o motor turboalimentado a GNV

4.3. Parâmetros de desempenho

Os parâmetros de desempenho analisados e apresentados neste trabalho são o torque, a potência, o consumo específico, a pressão média efetiva e a eficiência global do motor em função da rotação do motor e da velocidade média do pistão. Os valores da pressão

média efetiva em função da velocidade do pistão são dados relevantes na análise comparativa entre motores de tamanho e características diferentes.

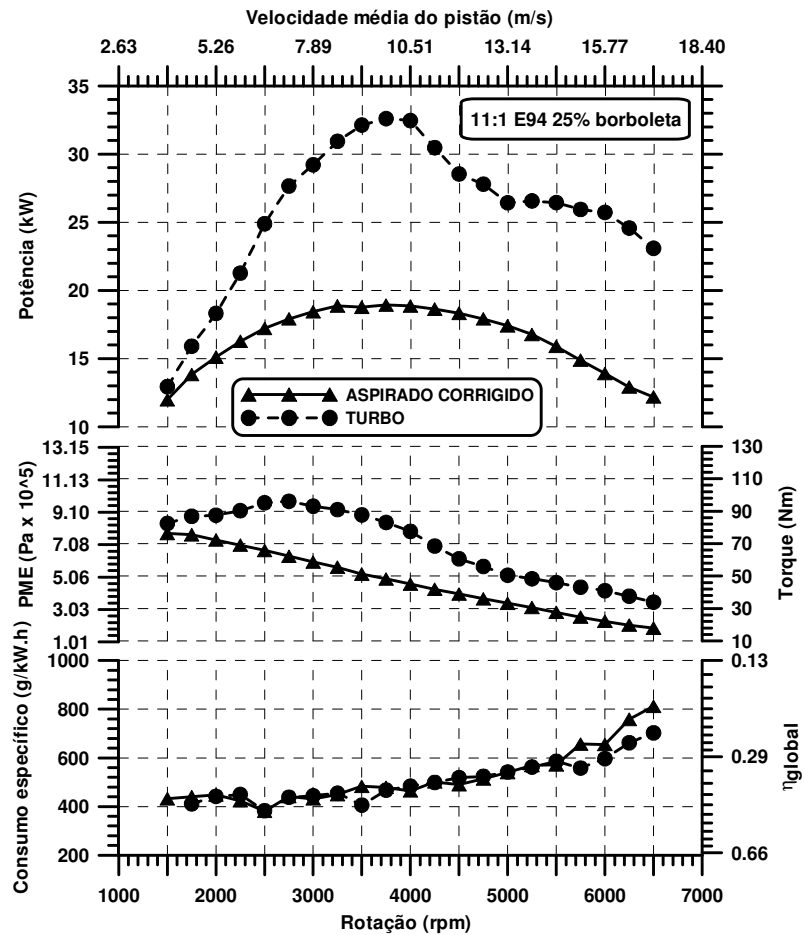


Figura 4.19 – Desempenho do motor a álcool turboalimentado e aspirado a 25% de abertura da válvula borboleta

A Figura 4.19 compara os desempenhos dos motores a álcool turboalimentado e aspirado, ambos operando a 25% de abertura da borboleta. Nota-se um ganho substancial de torque e potência para o motor turboalimentado, sem perda de eficiência energética global e, portanto, do consumo específico para todos os regimes de operação. O ganho de torque e potência atinge 72,5% a 3750 rpm. Observa-se ainda um ganho de eficiência energética global na versão turboalimentada a partir de 5000 rpm decorrente do ganho de eficiência volumétrica, esse advindo do controle eletrônico da pressão de turboalimentação associado à melhor eficiência térmica por ter se atingido o MBT nesta faixa de operação, conforme Figura 4.8.

A Figura 4.20 compara os desempenhos dos motores a álcool turboalimentado e aspirado, ambos a 43,5% de abertura da borboleta. Observa-se um ganho de torque e potência para o motor turboalimentado, sem perda significativa da eficiência energética global do motor para grande parte dos regimes de operação. Os ganhos de torque e potência são um pouco menores que os obtidos com 25% de abertura da borboleta, atingindo o valor máximo de 67,2% a 5750 rpm. Os ganhos percentuais menores para este regime são decorrentes das maiores pressões de turboalimentação, com maior ocorrência de pontos de operação em LDI e conseqüente diminuição da eficiência térmica em proporção maior que o ganho obtido através da eficiência volumétrica, conforme Figura 4.8.

A Figura 4.21 compara os desempenhos dos motores a álcool turboalimentado e aspirado, ambos operando com 71,5% de abertura da borboleta. Observa-se um ganho de torque e potência para o motor turboalimentado, sem perda significativa da eficiência energética global original do motor para todos os regimes de operação. Os ganhos de torque e potência são menores que com abertura de borboleta de 43,5%, atingindo valores máximos de 32,6% a 4750 rpm. Os ganhos percentuais menores para este regime de carga em relação a cargas mais baixas têm sua origem nas mesmas causas apontadas para a abertura de 43,5%.

A Figura 4.22 compara os desempenhos dos motores a álcool turboalimentado e aspirado, ambos em plena carga. Nota-se um ganho de torque e potência para o motor turboalimentado, com eficiência energética global original do motor ligeiramente diminuída. Os ganhos de torque e potência são pouco maiores que com abertura de 71,5% da borboleta, atingindo 33,5% a 5500 rpm. Os ganhos percentuais ligeiramente maiores foram obtidos com enriquecimento da mistura e conseqüente perda de eficiência energética global.

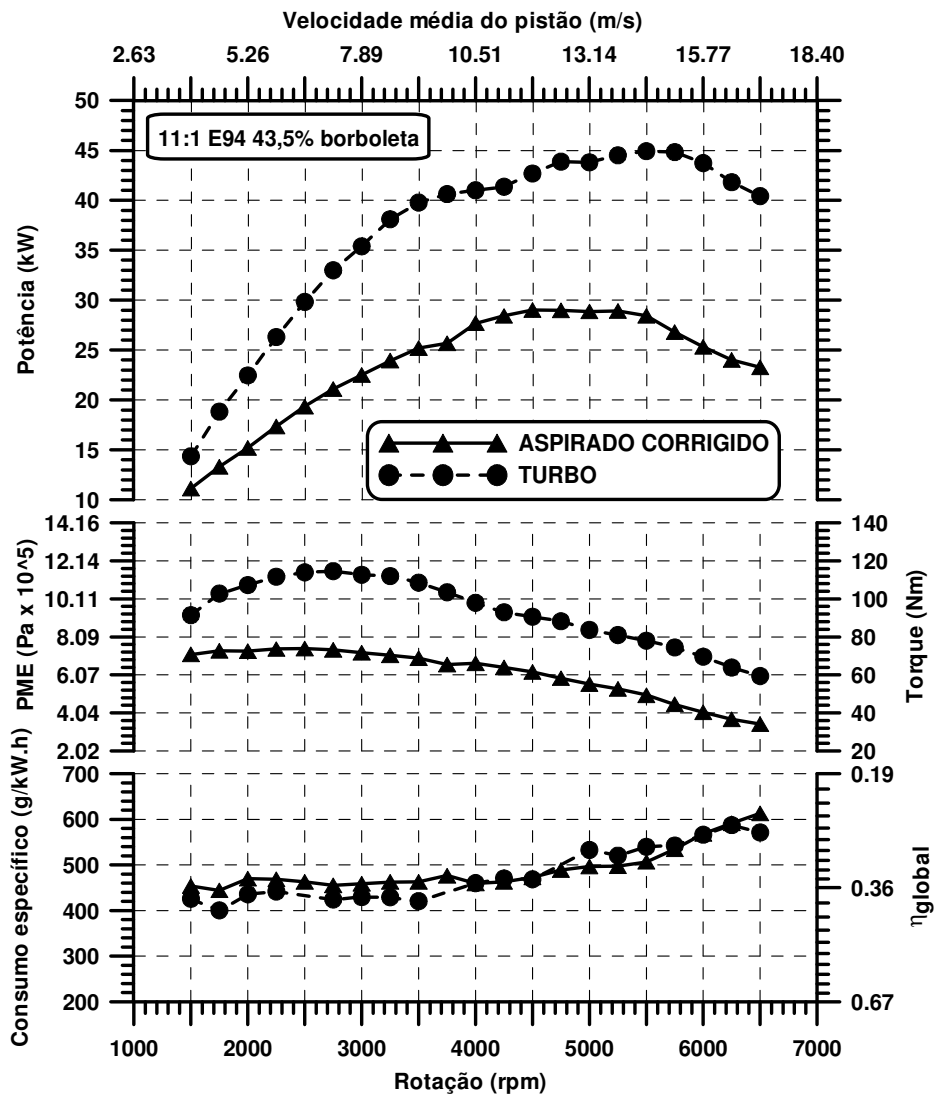


Figura 4.20 – Desempenho do motor a álcool turboalimentado e aspirado a 43,5% de abertura da válvula borboleta

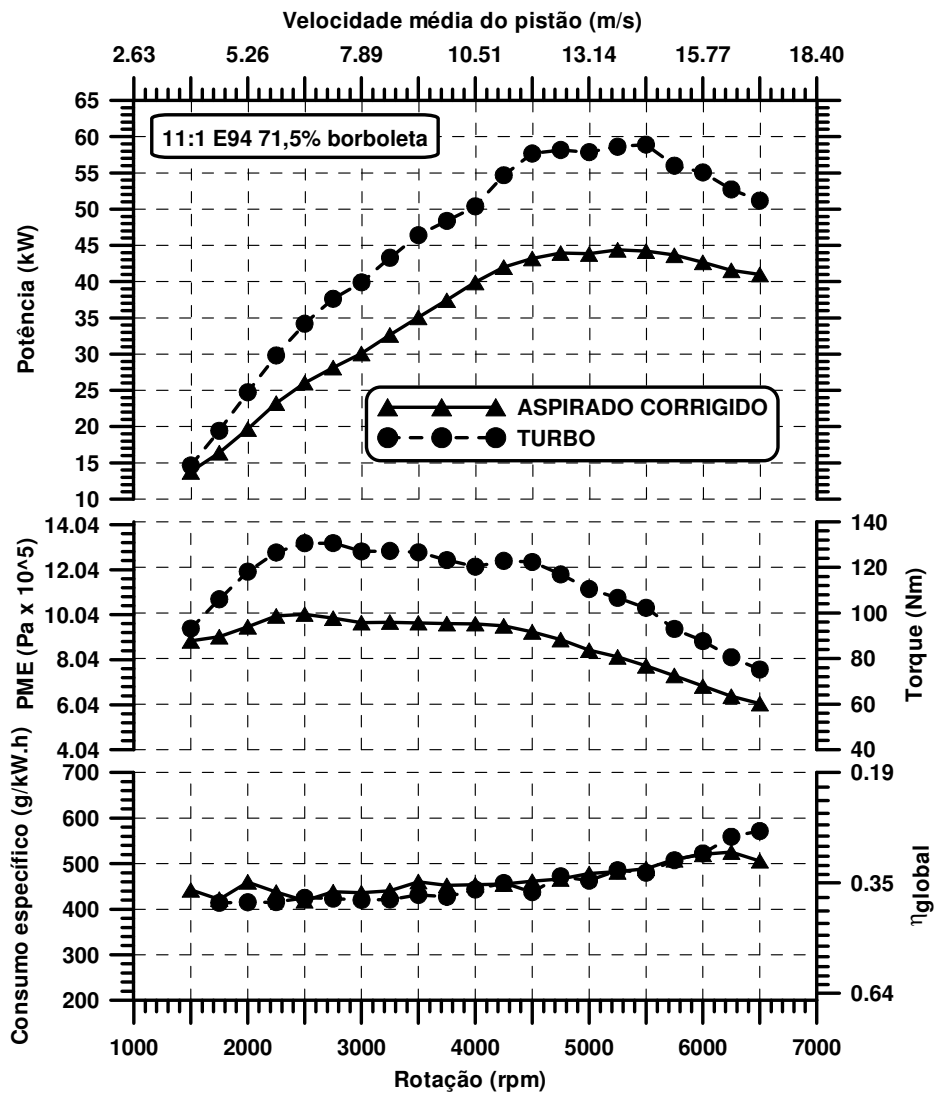


Figura 4.21 – Desempenho do motor a álcool turboalimentado e aspirado a 71,5% de abertura da válvula borboleta

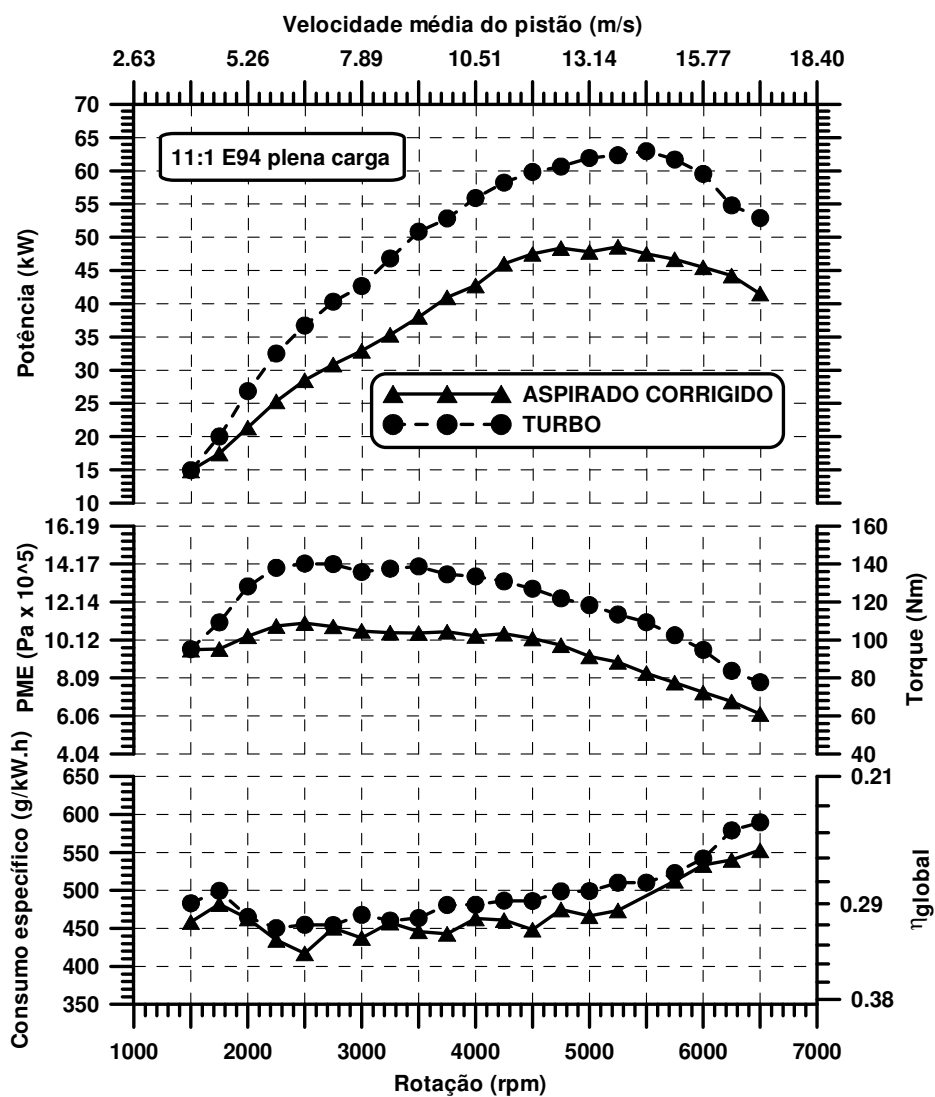


Figura 4.22 – Desempenho do motor a álcool turboalimentado e aspirado a plena carga

De forma geral, nota-se um ganho de torque e potência para o motor turboalimentado para todos os regimes de carga, sem perdas significativas de eficiência energética global e, portanto, do consumo específico na maior parte do mapa operacional do motor. A perda de eficiência em plena carga não é significativa para o usuário comum, pois só é atingida em situações de emergência ou com uma condução do veículo mais esportiva. Observa-se ainda que o ganho de torque e potência crescem na medida em que a carga do motor é reduzida, onde o principal responsável é o crescimento da eficiência térmica com a diminuição da carga por se atingir uma maior quantidade de pontos em MBT,

somado ao maior ganho de eficiência volumétrica em cargas parciais em relação ao motor aspirado.

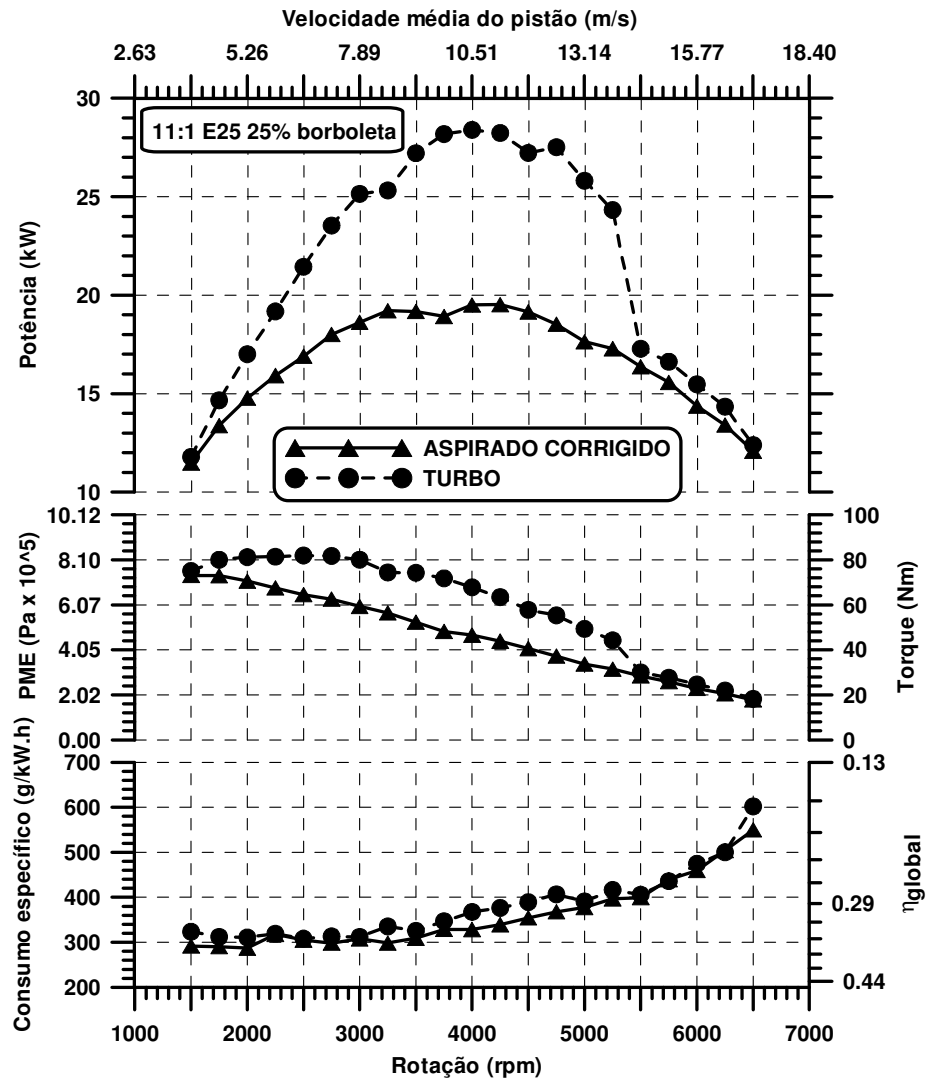


Figura 4.23 – Desempenho do motor a gasolina turboalimentado e aspirado a 25% de abertura da válvula borboleta

A Figura 4.23 apresenta os dados de desempenho a 25% de abertura da borboleta com gasolina C, onde se nota claramente um ganho significativo de torque e potência até 5500 rpm, sem prejuízo na eficiência energética global e no consumo específico do motor. Para rotações mais elevadas, o desempenho praticamente se manteve inalterado para ambas as configurações devido à diminuição drástica das pressões de turboalimentação. O ganho de torque e potência para o motor turboalimentado chega a 46% a 4000 rpm. Uma menor razão volumétrica de compressão para a gasolina C, com

pressões de turboalimentação maiores, propiciaria ganhos de desempenho maiores, permitindo utilizar ângulos de avanço de ignição mais elevados. Contudo, uma razão volumétrica de compressão muito baixa impacta fortemente na diminuição da eficiência térmica e, conseqüentemente, na eficiência energética global.

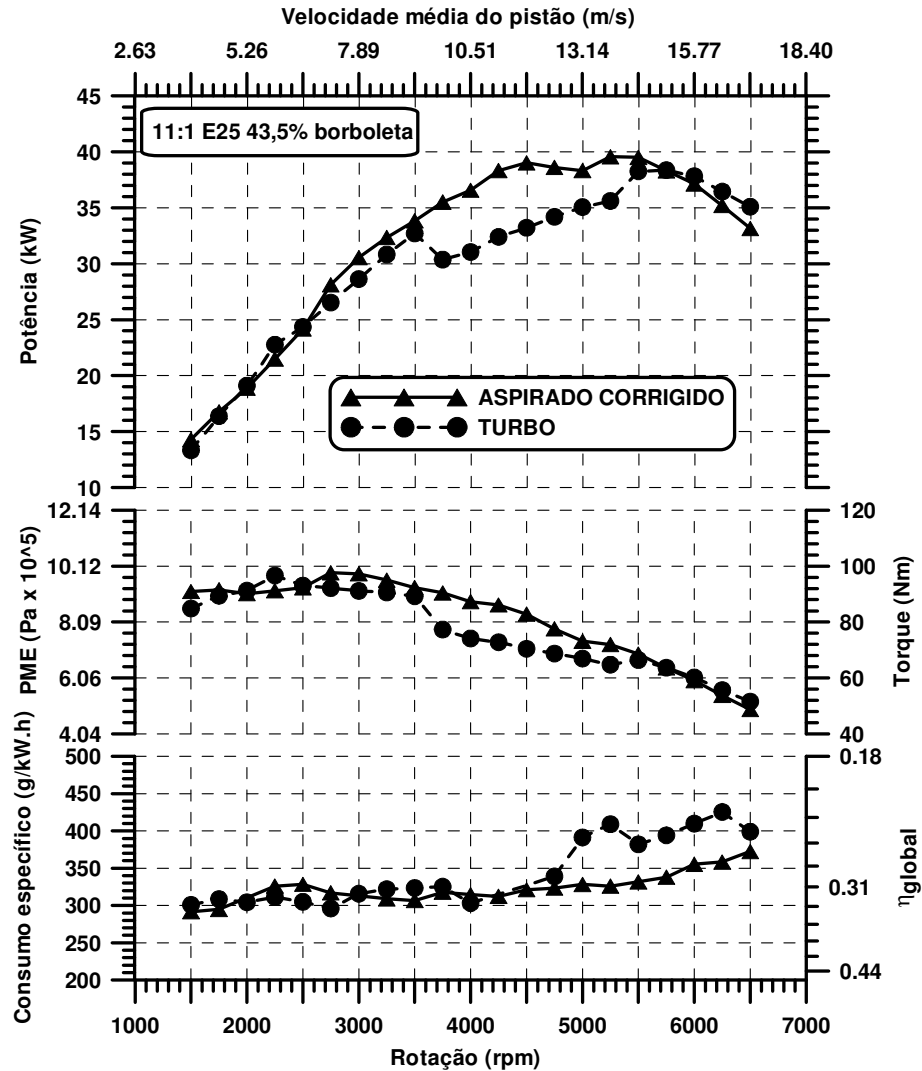


Figura 4.24 – Desempenho do motor a gasolina turboalimentado e aspirado a 43,5% de abertura da válvula borboleta

A Figura 4.24 mostra o desempenho a 43,5% de abertura da borboleta do motor operando com gasolina C. Nota-se que o motor turboalimentado apresenta uma perda de torque e potência entre 3500 e 5500 rpm, quando comparado com o motor aspirado, que chega a 14,9% a 4500 rpm. Esta redução no torque é explicada pela redução da razão de

turboalimentação nesta faixa de operação como pode ser observado na figura 4.9 devido às elevadas temperaturas atingidas na descarga. Estas temperaturas podem ser notadas na figura 4.15. A eficiência energética global e o consumo específico de combustível no motor se mantêm inalterados até 4500 rpm, sendo menores para a configuração turboalimentada em rotações mais elevadas, onde a malha foi aberta e a mistura enriquecida para conter o aumento da temperatura dos gases queimados.

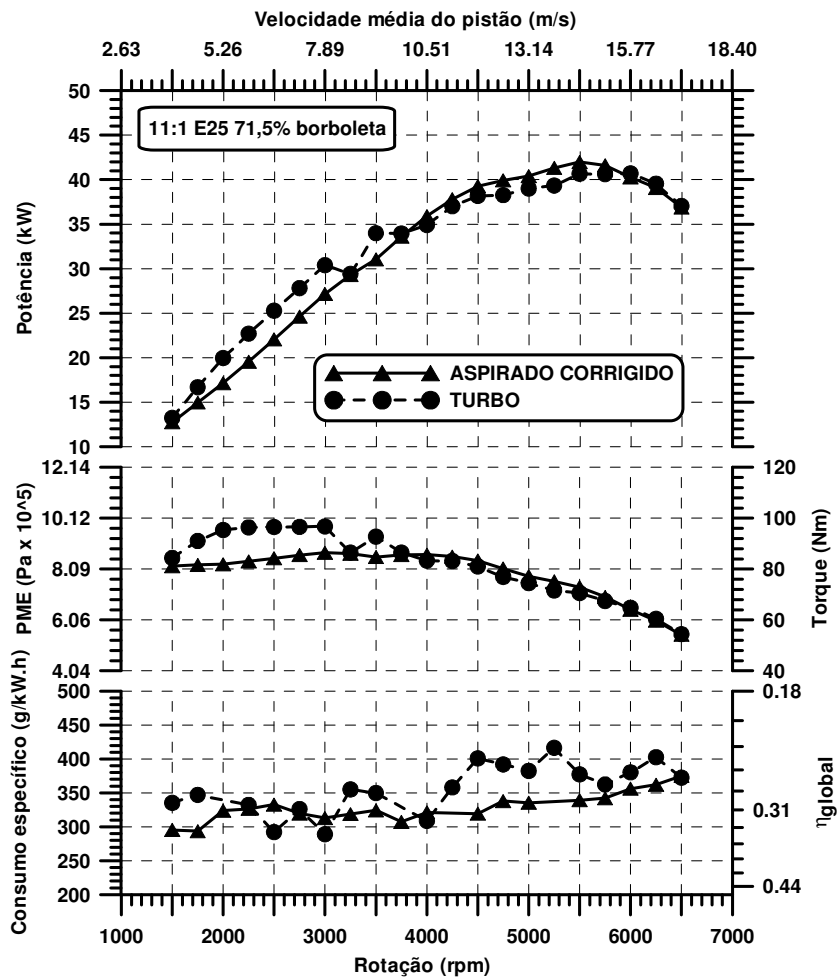


Figura 4.25 – Desempenho do motor a gasolina turboalimentado e aspirado a 71,5% de abertura da válvula borboleta

A Figura 4.25 mostra o desempenho para 71,5% de abertura da borboleta, indicando que o motor turboalimentado apresenta ganhos de torque e potência pouco expressivos entre 1500 e 3000 rpm, apresentando, porém, flutuações no consumo específico. Os máximos ganhos atingem 11,8% a 3000 rpm. Para rotações mais elevadas a configuração

turboalimentada não apresenta ganho de torque e potência e sim perda na eficiência global e no consumo específico, devido aos baixos valores de avanço de ignição, utilizando-se praticamente as mesmas pressões na admissão.

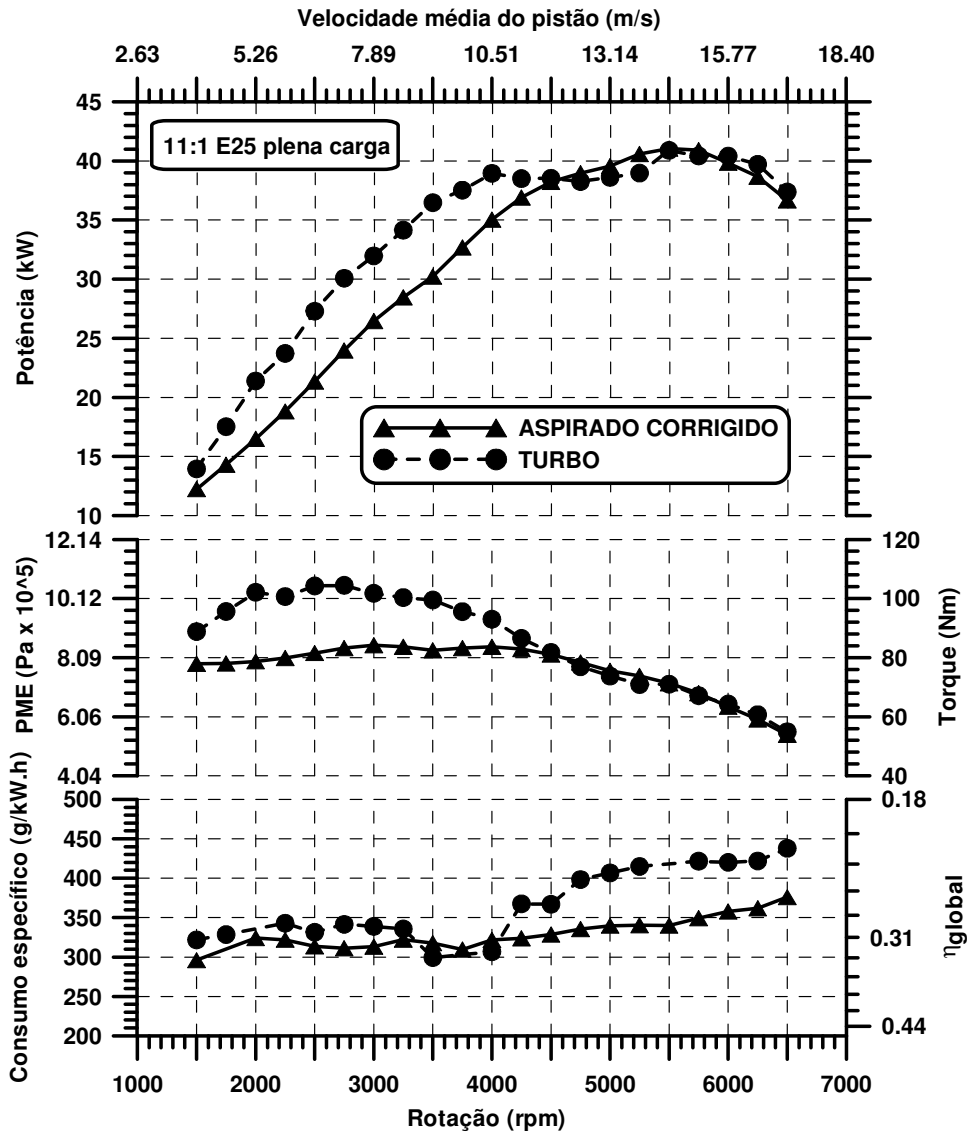


Figura 4.26 – Desempenho do motor a gasolina turboalimentado e aspirado a plena carga

A Figura 4.26 apresenta o desempenho da gasolina em plena carga, mostrando os ganhos de torque e potência para o motor turboalimentado até 4000 rpm. Estes ganhos são da ordem de 21% a 3500 rpm, praticamente com a mesma eficiência energética global e mesmo consumo específico. Para rotações mais elevadas, a configuração

turboalimentada não apresenta ganho de torque e potência e sim perda na eficiência global. Como previsto, devido à razão volumétrica de compressão de 11:1 para este motor ser uma razão elevada para a gasolina C, a versão turboalimentada não apresentou ganhos expressivos em cargas elevadas, quando comparada com a versão aspirada. Em alguns casos, há perdas de desempenho na configuração turboalimentada a gasolina, devido aos baixos avanços de ignição praticados, sendo estes limitados em sua totalidade pelo surgimento de detonação, não sendo alcançado o MBT. Portanto, a perda de eficiência global para esta versão turboalimentada pode ser explicada pelo MBT não ter sido atingido em nenhum regime de operação.

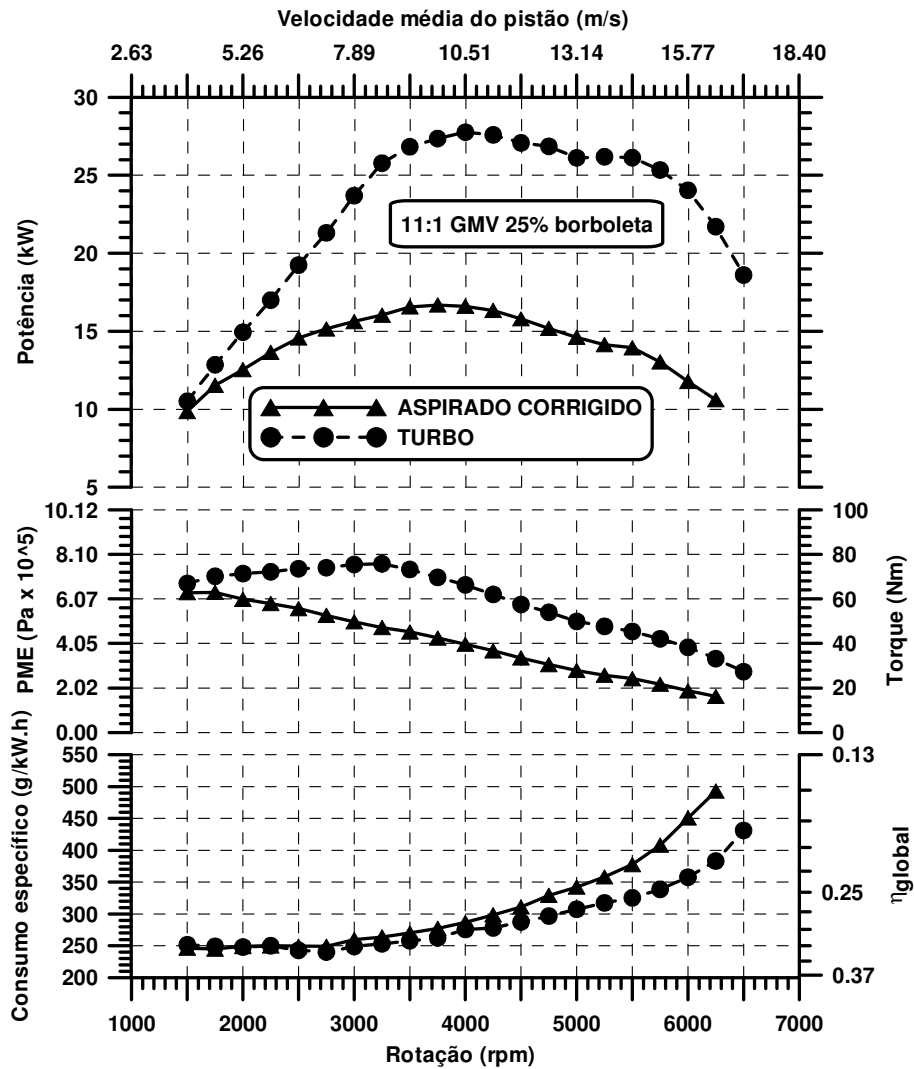


Figura 4.27 – Desempenho do motor a GNV turboalimentado e aspirado a 25% de abertura da válvula borboleta

As Figuras 4.27 a 4.30 apresentam os resultados obtidos para os testes realizados com o GNV. Para todos os regimes de carga nota-se o ganho de torque e potência para o motor turboalimentado, mantendo-se a eficiência global do motor e o consumo específico. Observa-se ainda que o ganho de torque e potência aumentam na medida em que a carga do motor é reduzida, da mesma forma observada para o álcool. Para 25% de abertura da borboleta nota-se também que a partir de 4500 rpm existe um ganho na eficiência global e no consumo específico para o motor turboalimentado. O ganho de torque e potência atingido com 25% de abertura da borboleta chega a 87,8% a 5500 rpm, havendo ainda ganho de eficiência energética global neste regime de rotação. Para 43,5% de abertura da borboleta ocorre também um ganho de eficiência a partir de 5250 rpm, mas em menor proporção. O ganho de torque e potência para 43,5% de abertura chega a 54,8% a 5500 rpm. Para 71,5% de abertura da borboleta os ganhos com torque e potência totalizam 43,2% a 5500 rpm. Em regime de plena carga os ganhos de torque e potência chegam a 42,1% a 5500 rpm. Estes ganhos na eficiência energética global para o GNV podem ser também aumentados se a razão volumétrica de compressão do motor for ligeiramente reduzida. No caso em estudo, a turboalimentação foi realizada com a razão volumétrica de compressão original do motor, ou seja, de 11:1. Neste caso, razões volumétricas de compressão entre 9,5:1 e 10,5:1 poderiam ser utilizadas para aumentar os ganhos de consumo específico e eficiência energética global em cargas mais altas, possibilitando o uso de maiores pressões de turboalimentação e avanços de ignição mais elevados, maximizando os ajustes em MBT.

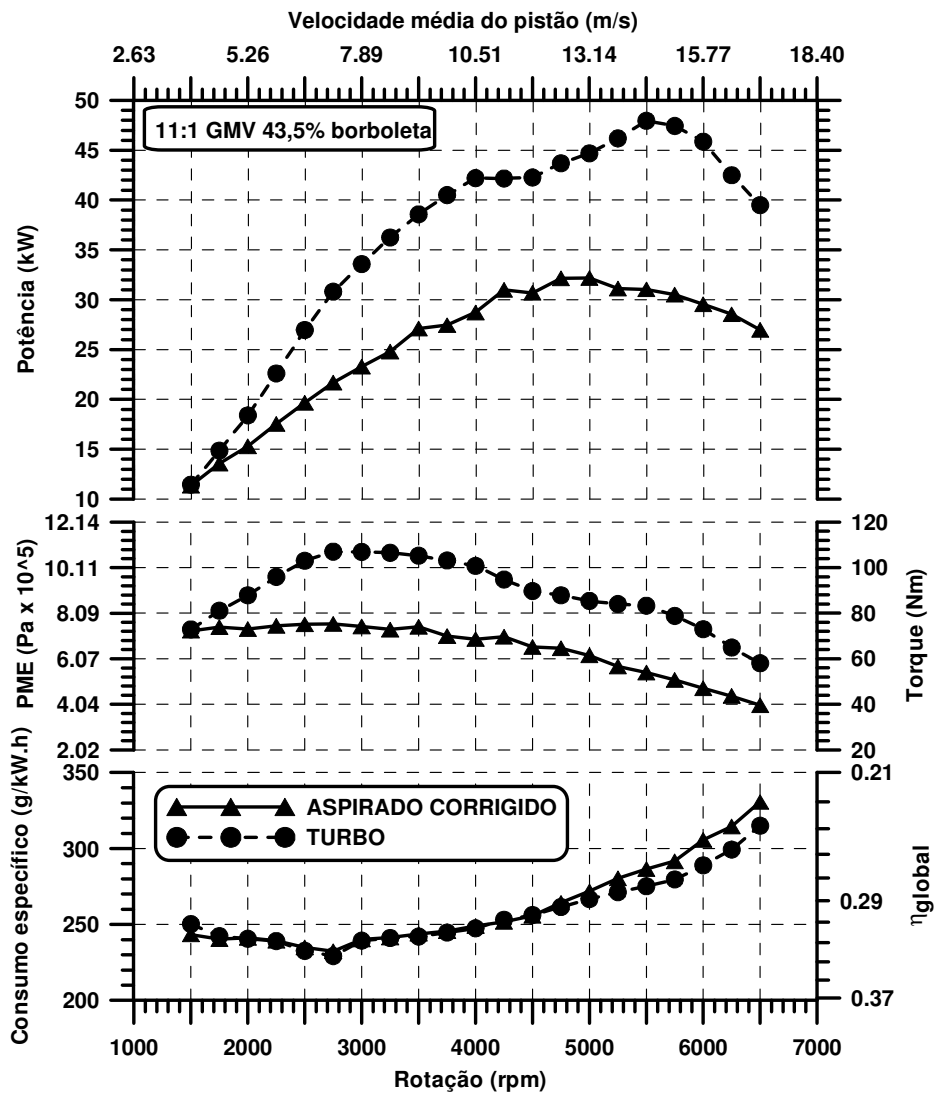


Figura 4.28 – Desempenho do motor a GNV turboalimentado e aspirado a 43,5% de abertura da válvula borboleta

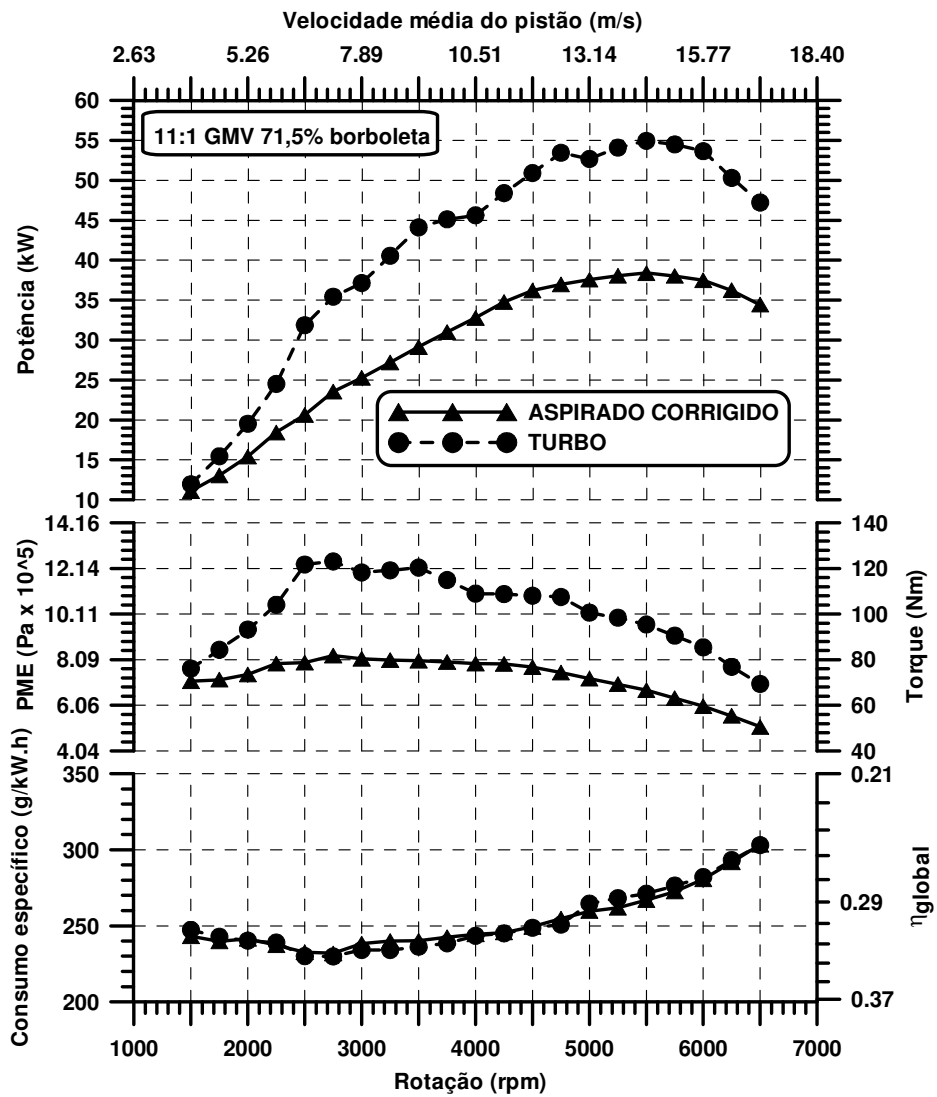


Figura 4.29 – Desempenho do motor a GNV turboalimentado e aspirado a 71,5% de abertura da válvula borboleta

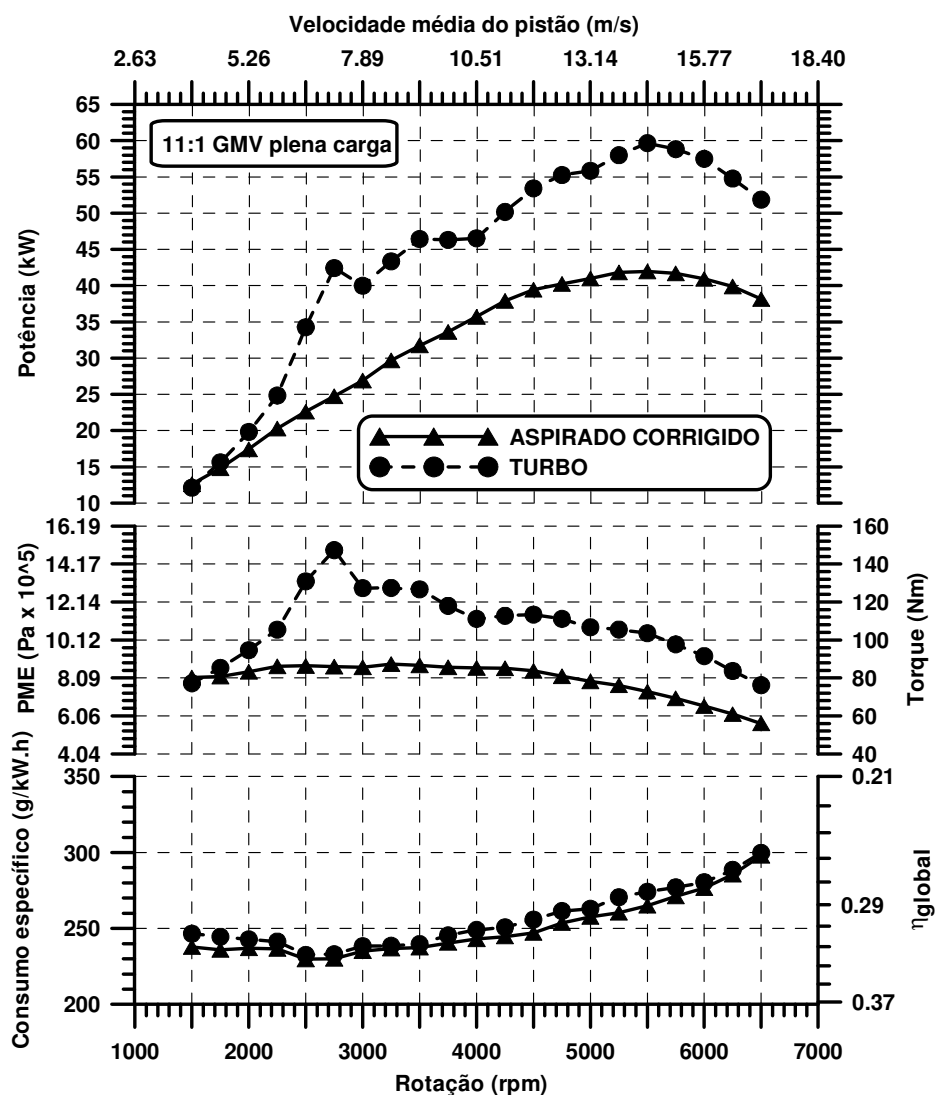


Figura 4.30 – Desempenho do motor a GNV turboalimentado e aspirado a plena carga

Os resultados mostram que os ganhos obtidos em desempenho com o motor turboalimentado, quando comparados com os resultados do motor aspirado são mais expressivos para o GNV e para o álcool. Para a gasolina, devido à razão volumétrica de compressão utilizada ser já elevada para este combustível, apenas a 25% da abertura da borboleta ocorre um ganho expressivo. Desta forma a gasolina é o combustível limitante para os ganhos operacionais de um motor multicomcombustível turboalimentado.

O GNV apresenta os maiores ganhos percentuais com a turboalimentação. Isto ocorre porque, por se tratar de um combustível de elevada resistência à detonação, aceita elevadas pressões de turboalimentação, atingindo MBT na maioria dos regimes de

operação. Esses ganhos também são expressivos porque a turboalimentação elimina a perda de eficiência volumétrica resultante do volume ocupado pelo gás quando injetado no coletor de admissão.

Para o álcool, os ganhos também são bem expressivos uma vez que a resistência à ignição por compressão deste combustível é elevada, o que propicia trabalhar com pressões de turboalimentação mais altas sem reduzir os avanços de ignição e atingindo o MBT. Este fato, aliado ao seu alto calor latente, propicia ainda uma elevada eficiência volumétrica através da redução da temperatura do ar admitido, o que se traduz em ganho de potência.

A seguir são apresentados os resultados do motor turboalimentado operando com os três combustíveis. Estes resultados visam possibilitar a comparação do desempenho alcançado com cada combustível quando da turboalimentação para todos os regimes de operação do motor.

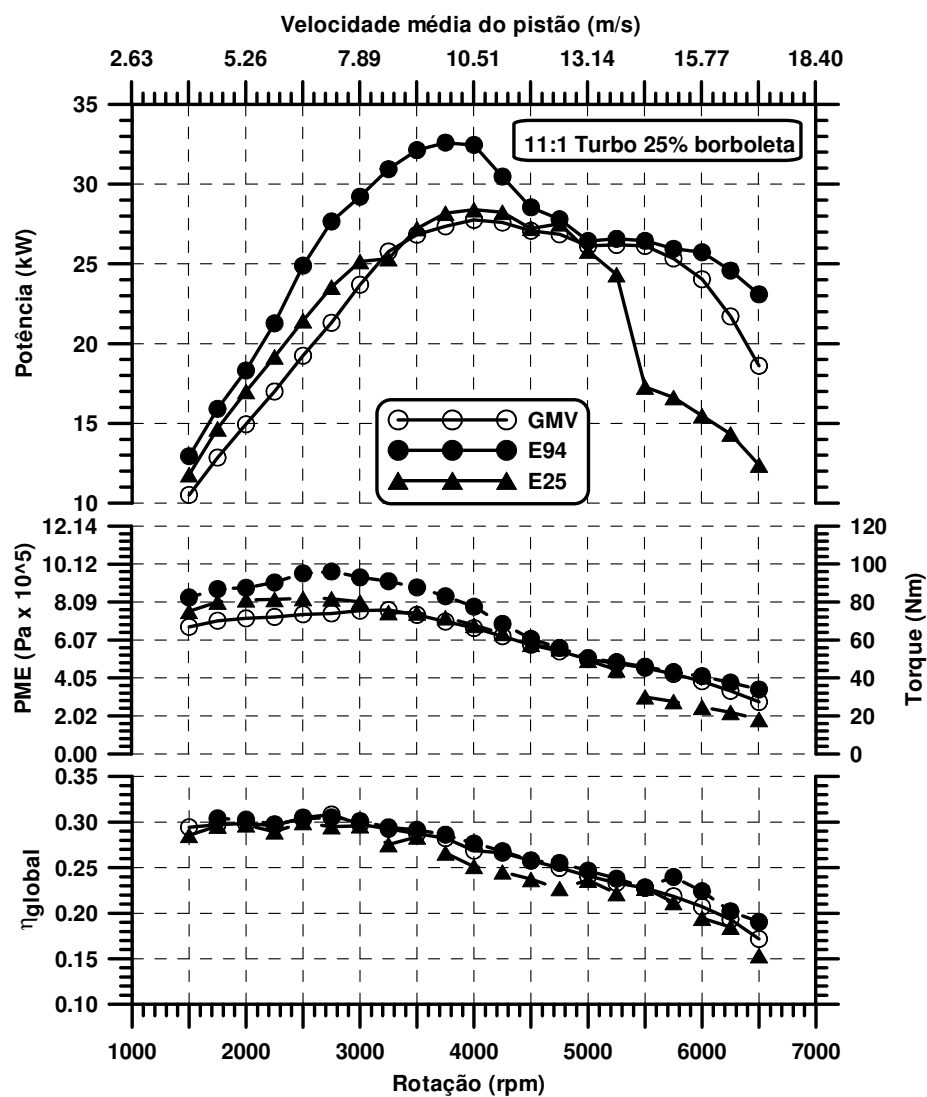


Figura 4.31 – Desempenho do motor turboalimentado para os três combustíveis a 25% de abertura da válvula borboleta

A Figura 4.31 apresenta os resultados de desempenho do motor turboalimentado para os 3 combustíveis a 25% de abertura da borboleta. Para este regime de carga o álcool apresenta os maiores valores de torque e potência, porém, com o maior consumo específico de combustível. Como a relação ar-combustível estequiométrica do álcool é bem menor que a da gasolina e o seu calor latente é bem maior, há um maior resfriamento do ar, o que aumenta a eficiência volumétrica e a resistência à detonação. A gasolina apresenta valores de torque e potência ligeiramente superiores aos encontrados com GNV até 3000 rpm. Estes ganhos existem porque os valores de

pressão de turboalimentação são praticamente os mesmos para a gasolina e para o GNV, como podem ser vistos na Figura 4.9. Para a faixa de operação de 3000 a 5000 rpm, os valores de torque e potência são os mesmos para o álcool e para o GNV, estando os valores de pressão de turboalimentação próximos. A partir desta rotação, os valores de pressão são diminuídos sobremaneira para a gasolina justificando a superioridade do GNV, a partir deste regime, em relação à gasolina C. O GNV atinge os menores consumos específicos, seguido pela gasolina e por último pelo álcool. A 25% de abertura da borboleta o motor com álcool apresenta eficiência energética global ligeiramente equivalente ao GNV, esses seguidos pela eficiência global um pouco menor da gasolina devido a sua menor eficiência térmica.

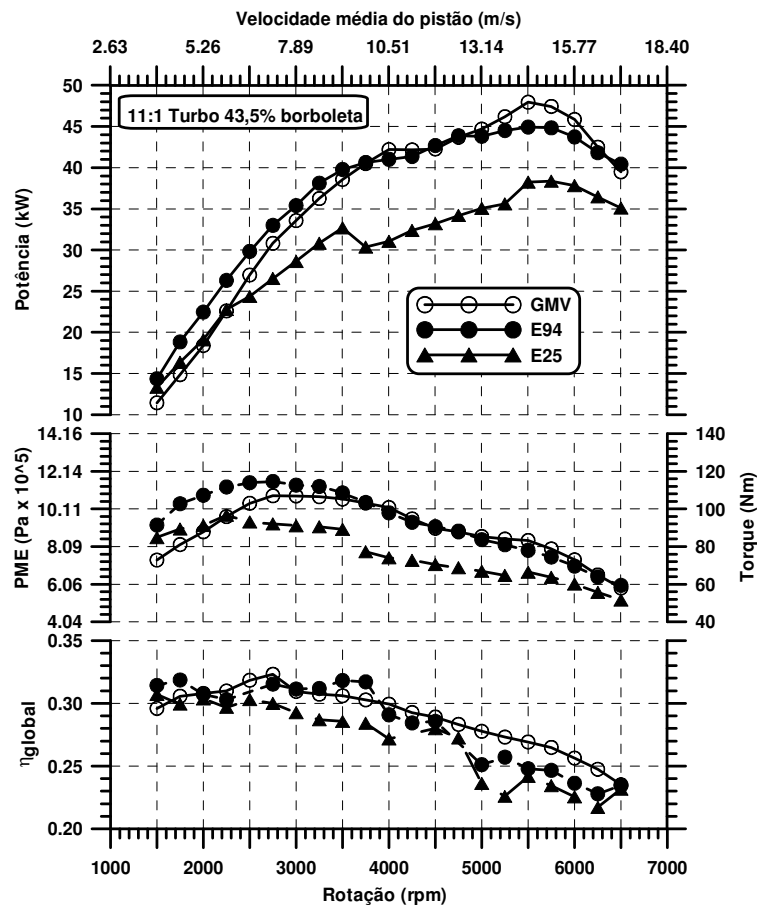


Figura 4.32 – Desempenho do motor turboalimentado para os três combustíveis a 43,5% de abertura da válvula borboleta

A Figura 4.32 apresenta o desempenho do motor turboalimentado para os três combustíveis com o motor operando a 43,5% de abertura da borboleta. Os valores de torque e potência para o álcool são levemente superiores ao GNV até cerca de 3500 rpm. A partir desta rotação, o GNV apresenta os mesmos valores do álcool, ultrapassando-o apenas para rotações superiores a 5000 rpm. A gasolina apresenta nessa abertura torque e potência bem abaixo dos demais combustíveis a partir de 2250 rpm, resultado da diferença das pressões de turboalimentação e dos menores avanços de ignição, limitados em sua totalidade pelo LDI. Nota-se que a eficiência global do motor a GNV já começa a superar a eficiência encontrada com álcool a partir de 4000 rpm. Para rotações mais baixas, a eficiência encontrada para o álcool ainda supera o GNV em algumas rotações. A eficiência encontrada com o motor a gasolina é a menor de todos, com resultados relativos piores que a 25% de abertura da borboleta.

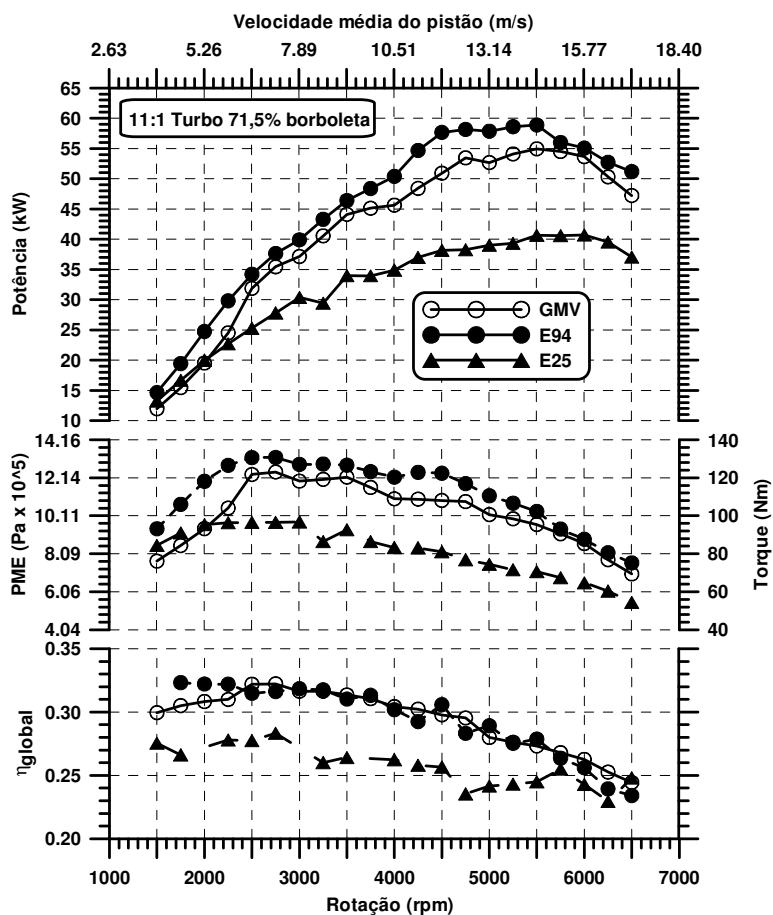


Figura 4.33 – Desempenho do motor turboalimentado para os três combustíveis a 71,5% de abertura da válvula borboleta

As Figuras 4.33 e 4.34 apresentam o desempenho do motor turboalimentado para os três combustíveis com o motor operando a 71,5% de abertura da borboleta e plena carga, respectivamente. Os valores de torque e potência para o álcool são levemente superiores em toda faixa de rotação do motor para ambas as cargas. A gasolina se distancia dos demais combustíveis, apresentando valores de torque e potência bem mais baixos a partir de 2250 rpm, devido também as menores pressões de turboalimentação a partir deste regime de rotação. Apenas em plena carga a 2250 rpm, o motor operando com GNV supera ligeiramente o motor a álcool, devido à pressão de turboalimentação bem mais alta para o gás metano como pode ser vista na Figura 4.9. A eficiência energética global do álcool e do GNV são ainda praticamente as mesmas a 71,5% de abertura da borboleta, porém em plena carga o motor operando com GNV passa a ter os maiores valores de eficiência global que podem ser atribuídos à maior eficiência térmica do motor por causa do maior número de pontos calibrados em MBT. O motor a gasolina apresenta a menor eficiência global, cujo motivo é o mesmo apresentado anteriormente para 43,5% de abertura.

Os resultados apresentados para o motor turboalimentado, operando com cada combustível para as mesmas aberturas de borboleta, mostram as diferenças de desempenho em cada regime de operação para o motor com razão volumétrica de compressão de 11:1 e valores de pressão de turboalimentação definidos em função do consumo específico. Os resultados apresentados mostram que os comportamentos do motor funcionando com álcool ou GNV são similares em torque e potência, porém a gasolina apresenta valores de desempenho bem abaixo dos demais. A eficiência térmica, que foi gravemente afetada na versão do motor turboalimentado a gasolina, é função da razão volumétrica de compressão adotada, da razão entre os calores específicos e das pressões de turboalimentação praticadas. Desta forma, o casamento da razão volumétrica de compressão com os valores de pressão de turboalimentação é a chave para se atingir o MBT e maximizar a eficiência térmica. Contudo, fica claro que é possível utilizar uma razão volumétrica de compressão um pouco menor, visando melhorar a eficiência térmica do motor a gasolina de forma a minimizar as diferenças de desempenho encontradas para este combustível em relação aos demais. A maior eficiência do GNV em plena carga é um indicativo do impacto da redução da tendência à detonação na eficiência do motor. Dadas as altas temperaturas na admissão após o

resfriador, fica claro que um aumento na eficácia do mesmo seria uma possibilidade para melhorar o desempenho do GNV, do álcool e principalmente da gasolina.

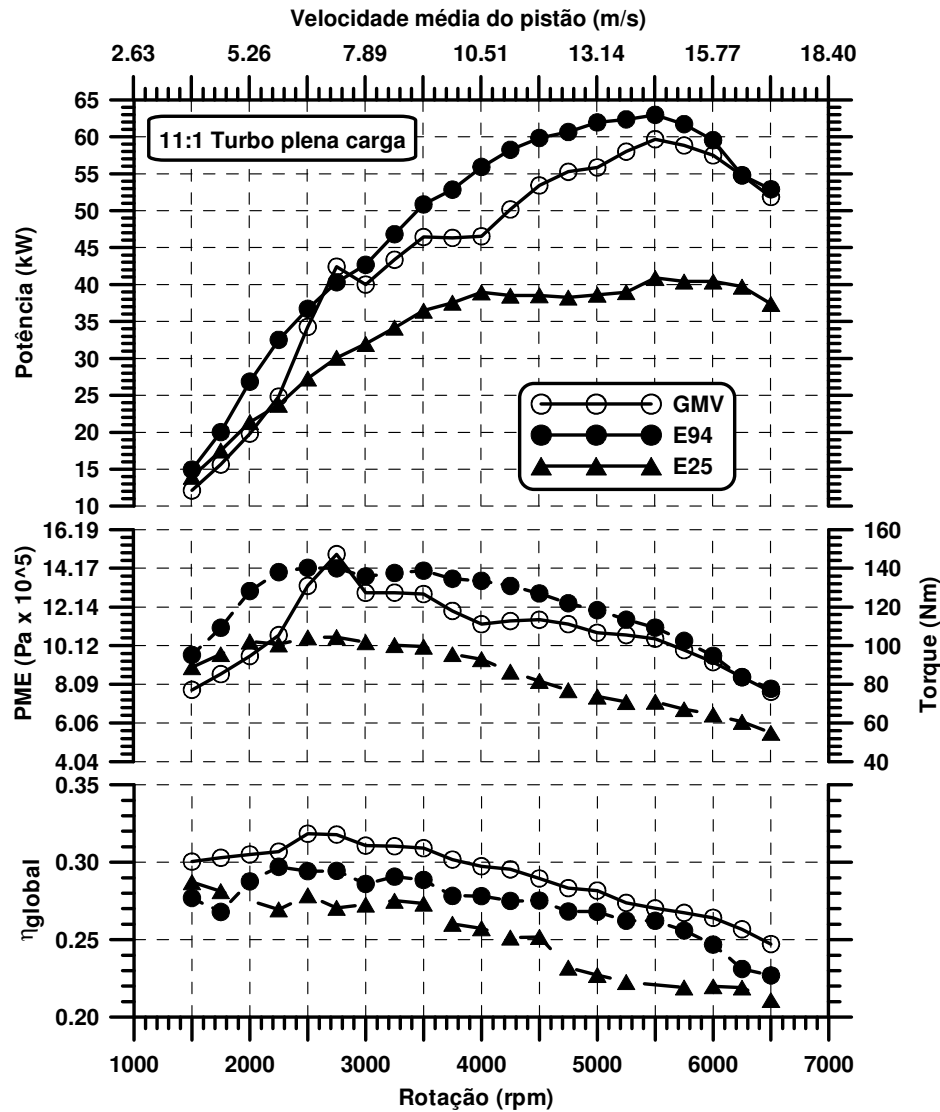


Figura 4.34 – Desempenho do motor turboalimentado para os três combustíveis a plena carga

As Figuras 4.35 a 4.37 apresentam os mapas de desempenho do motor turboalimentado funcionando com cada combustível. Estes mapas têm por finalidade possibilitar a visualização do desempenho encontrado com cada combustível em todas as cargas, mostrando a progressividade do motor e sua resposta às solicitações de aceleração. Analisando os resultados, observa-se um crescimento similar do torque e da potência

para o álcool e o GNV em função da carga. A gasolina apresenta uma resposta menor do crescimento do torque e da potência em função da solicitação de carga. O GNV apresenta as menores variações do consumo específico em função da carga aplicada, mantendo sua eficiência energética global praticamente constante para cada regime de rotação do motor. Apenas com 25% de abertura da borboleta, a eficiência energética global é reduzida em função dos valores mais baixos de pressão de turboalimentação, devido ao pequeno ângulo de abertura da válvula borboleta.

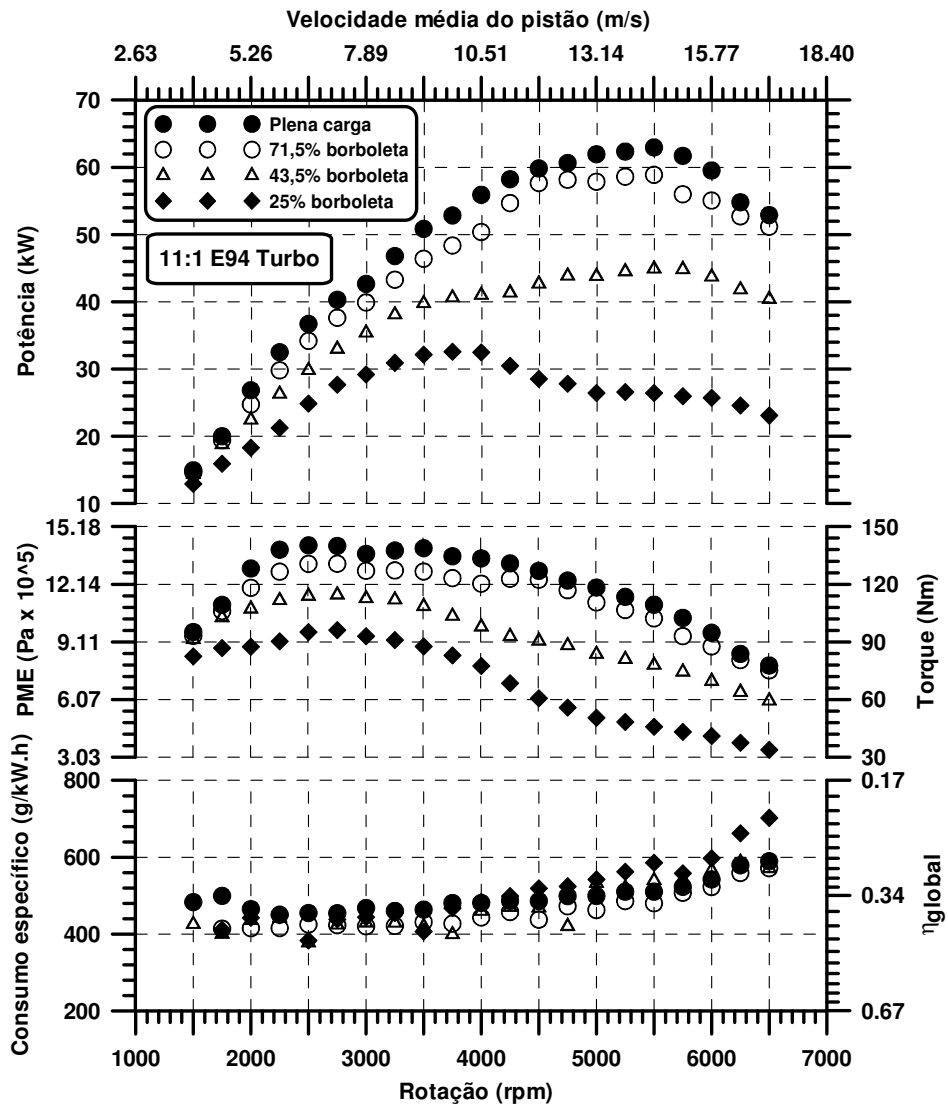


Figura 4.35 – Mapa de desempenho do motor turboalimentado a álcool

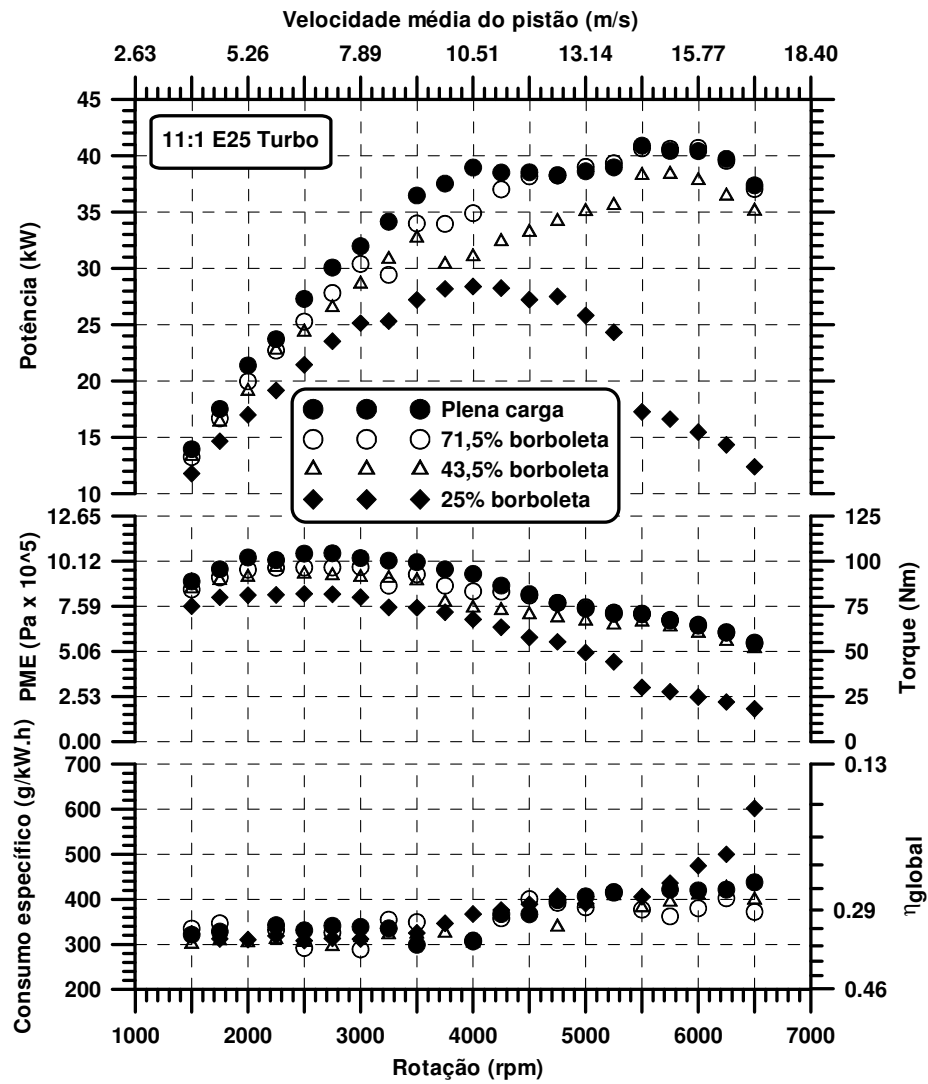


Figura 4.36 – Mapa de desempenho do motor turboalimentado a gasolina

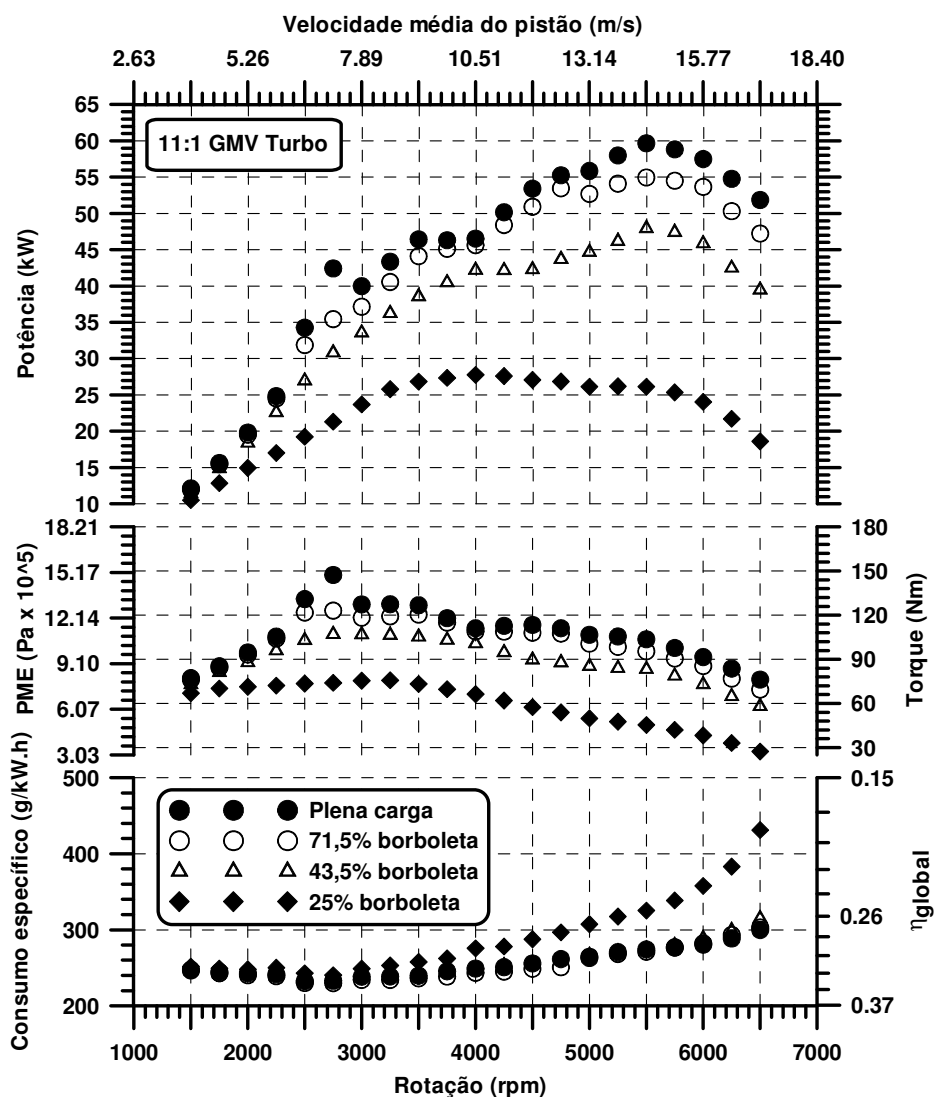


Figura 4.37 – Mapa de desempenho do motor turboalimentado a GNV

Finalmente, os resultados de desempenho demonstram que a alternativa adotada para buscar o máximo aproveitamento da energia fornecida de cada combustível, através da turboalimentação em motores multicomcombustíveis, é viável. Por se tratar de um motor de baixa cilindrada, este desenvolvimento constitui uma opção de *downsizing* para motores maiores, onde os valores de torque e potência são mantidos em relação ao motor maior e o ganho de eficiência e, conseqüentemente, no consumo de combustível são obtidos pela redução de atrito. Analisando os resultados obtidos com o GNV turboalimentado, fica claro que o uso apropriado deste combustível em aplicações automotivas requer o

uso de sistemas de turboalimentação, gerando ganhos expressivos na eficiência volumétrica.

4.4. Parâmetros de combustão

A partir dos dados de pressão medidos no cilindro para diferentes condições de funcionamento do motor, são determinados os principais parâmetros da combustão para o motor aspirado e turboalimentado funcionando com os combustíveis analisados. A análise da combustão é importante no aprofundamento do diagnóstico do desempenho do motor, possibilitando o entendimento de como a geometria da câmara e os seus processos internos afetam a combustão e o desempenho.

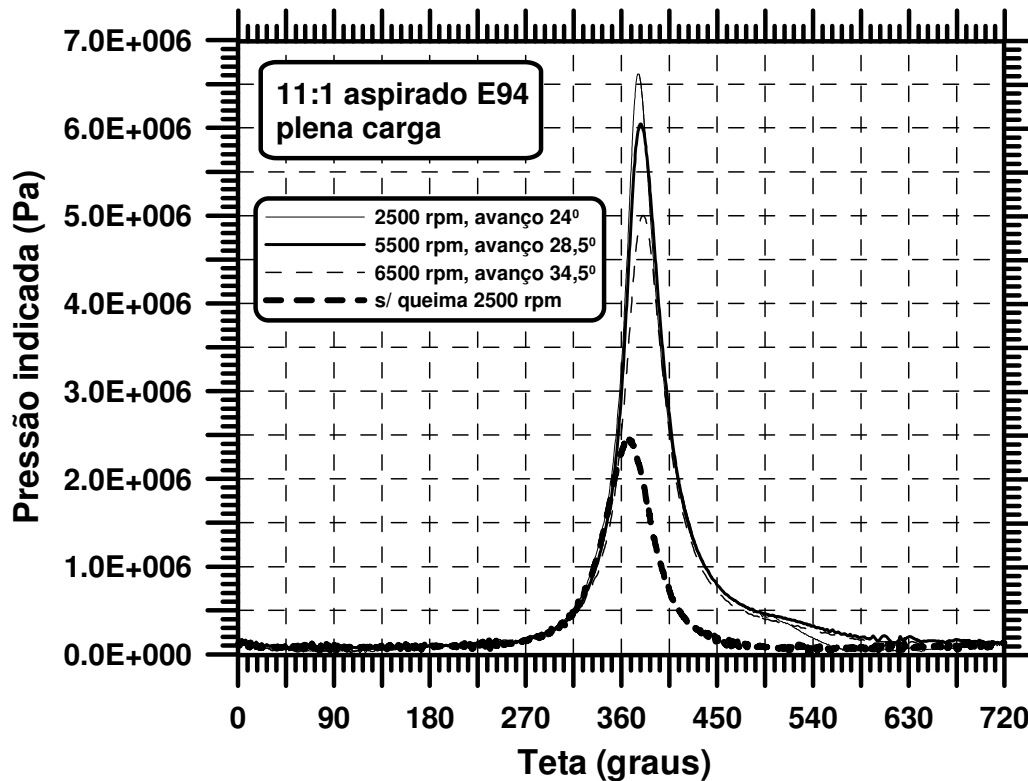


Figura 4.38 – Pressão indicada no ciclo para o motor aspirado a álcool em plena carga

A Figura 4.38 apresenta as pressões medidas no cilindro durante um ciclo para o motor aspirado a álcool etílico hidratado, operando com a razão volumétrica de compressão de 11:1 e em diferentes rotações.

A simetria encontrada na medição de pressão do cilindro sem queima a 2500 rpm demonstra a ausência do *blow down*, que compreende o tempo em que os gases queimados deixam o cilindro antes do pistão atingir o PMI.

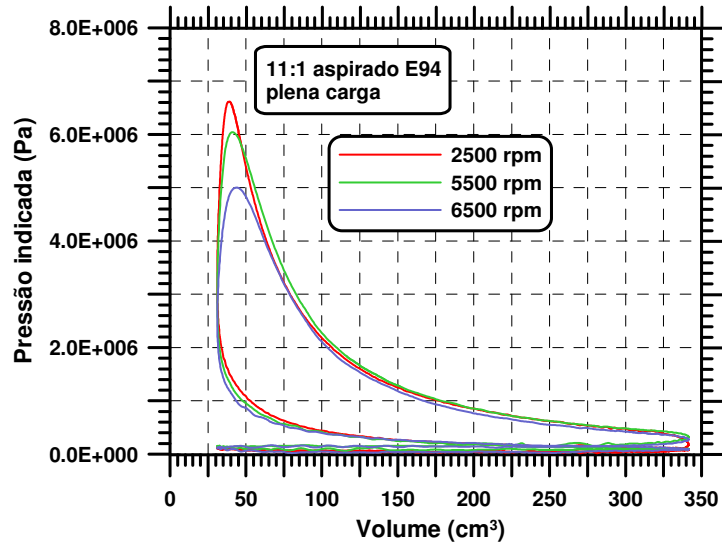
Os sinais de pressão medidos não apresentam quaisquer influências de defasagem devido a ação de choques térmicos no cristal piezelétrico por não apresentarem instabilidade de zero *off set*, DUBENDORFER *et al.* (1985). Os sinais de pressão medidos também não sofreram defasagem devido ao canal de comunicação com o transdutor, sendo a frequência máxima de combustão de 54 Hz. A resposta dinâmica de sensores piezelétricos com diferentes canais de comunicação não apresenta defasagem do sinal para frequências inferiores a 200 Hz, VIANNA *et al.* (1995).

O comportamento das pressões ao longo da combustão apresenta um *blow down* suave para todos os regimes de rotação, o que demonstra também um ótimo diagrama de válvulas ao longo da faixa de operação do motor.

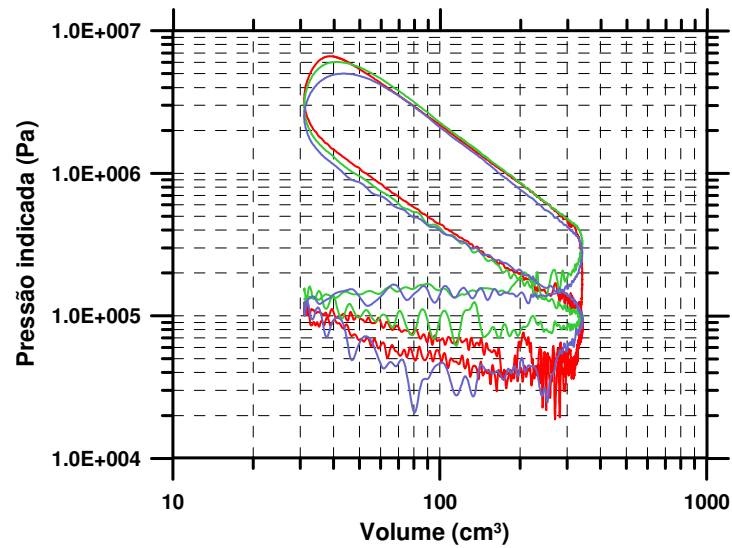
O pico maior de pressão ocorre a 2500 rpm e coincide com a rotação de torque máximo do motor. Os ângulos de avanço de ignição, ajustados em MBT para todos os regimes de rotação contribuem para que o aumento da rotação não atrase substancialmente o ângulo correspondente à pressão máxima, propiciando a otimização da eficiência térmica. O pico de pressão do motor com queima a 2500 rpm é 164% maior que a máxima pressão do cilindro sem queima no mesmo regime de rotação, o que ilustra o efeito da combustão na pressão com avanço de ignição em MBT.

As Figuras 4.39 (a) e (b) apresentam o diagrama P x V para este motor. Os diagramas P x V apresentados possibilitam a análise termodinâmica do ciclo do motor em diferentes rotações. As curvas apresentam o formato esperado, onde a Figura 4.39 (b), em escala logarítmica, permite visualizar facilmente a duração da combustão compreendida entre a parte superior das duas retas, essas relativas à compressão e à expansão. Através da escala logarítmica torna-se possível visualizar o trabalho de bombeamento. As retas obtidas através da escala logarítmica durante a compressão e expansão demonstram que não ocorreram vazamentos durante estes tempos, LANCASTER (1975). Considerando que a ignição está ajustada para MBT em todos os casos, o aumento do atraso da pressão máxima em relação ao PMS com o RPM, indica que a taxa de combustão não

aumenta na mesma proporção que a velocidade do motor. Esse fenômeno é ainda mais significativo considerando que a transferência de calor total por ciclo se reduz, o que permite o adiantamento do MBT.



(a)



(b)

Figura 4.39 – Diagrama P x V para o motor aspirado a álcool com razão volumétrica de compressão de 11:1 a plena carga. (a) escala linear, (b) escala logarítmica

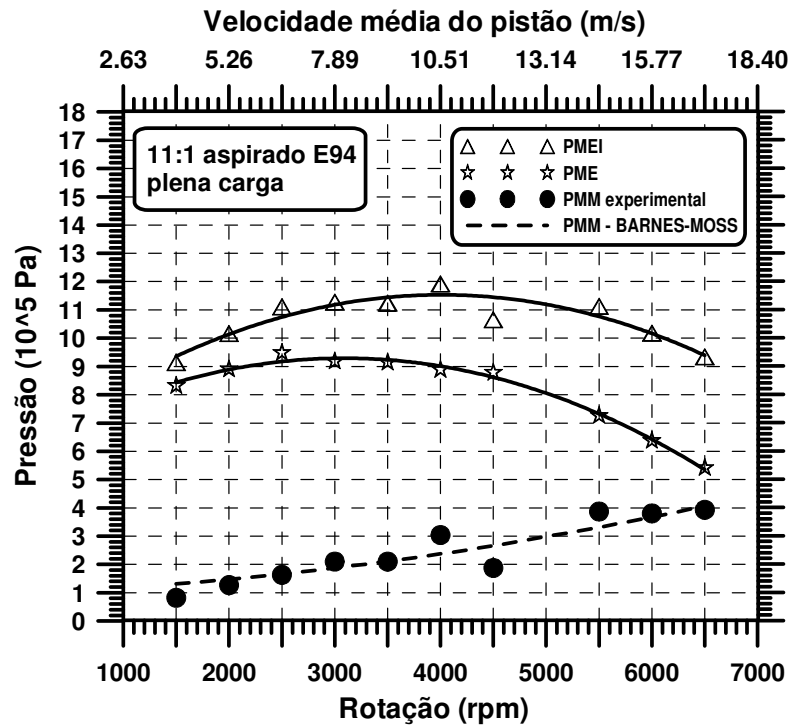


Figura 4.40 – Pressões médias do motor aspirado a álcool com razão volumétrica de compressão de 11:1 a plena carga

A Figura 4.40 apresenta a pressão média efetiva indicada $PMEI$, a pressão média efetiva no eixo PME , a pressão média motorizada experimental e a pressão média motorizada obtida através da correlação de Barnes-Moss. As pressões médias apresentadas constituem um parâmetro fundamental na análise do atrito do motor. A \bar{P}_{MM} é resultante da diferença entre a $PMEI$ e a PME . A correlação de Barnes-Moss representa uma excelente aproximação dos resultados experimentais. Esta correlação mostra-se eficiente na determinação da pressão média motorizada em motores aspirados com relação volumétrica de compressão não muito elevada e com trabalho de bombeamento pouco significativo, sendo o regime de rotação o parâmetro principal na geração do atrito.

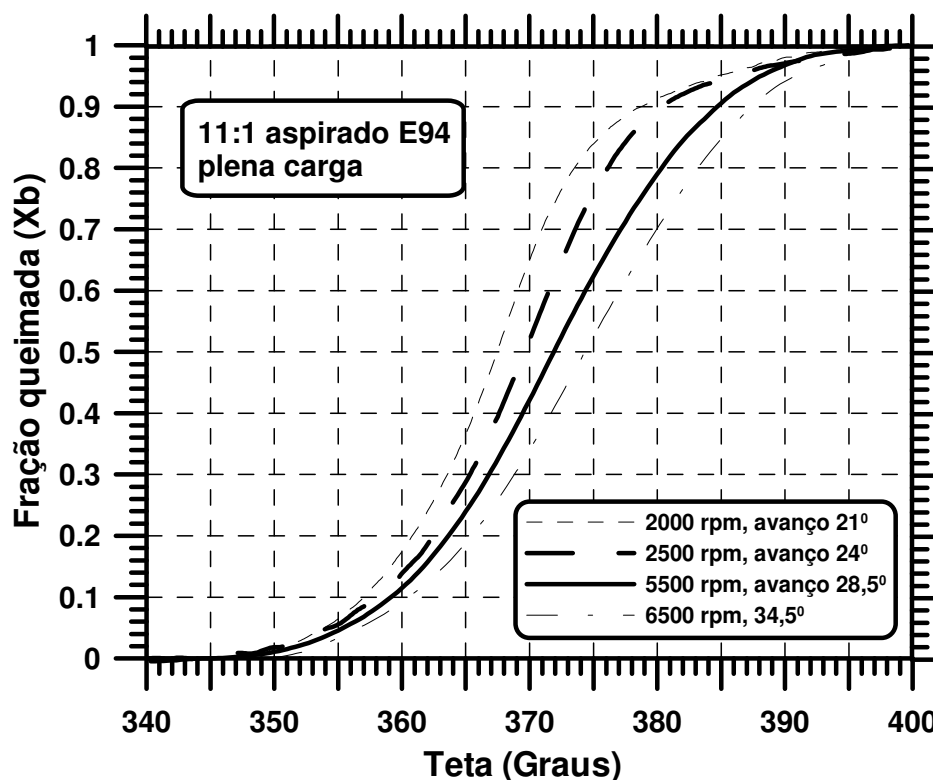


Figura 4.41 – Fração queimada do motor aspirado a álcool com razão volumétrica de compressão de 11:1 em plena carga

A Figura 4.41 apresenta a evolução da fração queimada do motor. A inclinação das curvas, a qual varia inversamente com a rotação, representa a taxa de queima angular em função da posição do virabrequim. A velocidade da propagação da chama é a soma da velocidade da chama em relação à mistura não queimada mais a velocidade de expansão da frente devido ao aquecimento do gás e ao aumento do volume do cilindro. A velocidade da propagação da chama é uma função direta da velocidade da chama. Sendo assim, para velocidades de propagação constante a duração da combustão em ângulo é diretamente proporcional à velocidade do motor. Os resultados tratados obtidos mostram que a expressão de Wiebe representa bem os resultados experimentais. Neste caso, as velocidades de propagação aumentam na medida em que a velocidade do motor aumenta e os avanços de ignição também, compensando quase totalmente a redução do tempo disponível para a queima quando do aumento da velocidade do motor. O maior atraso da combustão ocorre nos primeiros momentos da queima, quando o efeito da turbulência ainda não está bem estabelecido. O aumento angular de queima em função

da rotação é pequeno, o que demonstra que os efeitos combinados da geometria da câmara de combustão e da turbulência interna são adequados para esse motor.

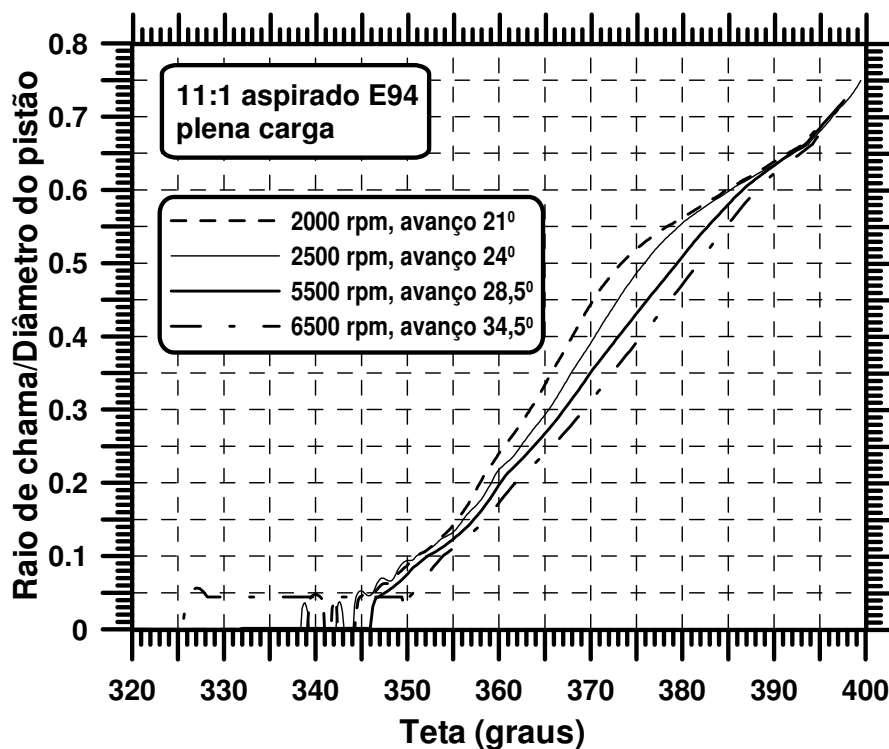


Figura 4.42 – Raio de chama adimensional do motor aspirado a álcool com razão volumétrica de compressão de 11:1 em plena carga

A Figura 4.42 apresenta o raio de chama adimensional do motor para diferentes regimes de rotação do motor. Nota-se que durante a ignição há a indicação de oscilações no raio de chama. Essas oscilações se explicam pelo fato de variações de raio, quando o volume da chama é pequeno, produzirem variações diminutas na pressão; a incerteza das medições passa a ser mais significativa que o efeito da própria combustão. Dessa forma, os valores de raio para o início da combustão não devem ser considerados. As mudanças de inclinação ao longo de cada uma das curvas indicam mudanças na geometria da frente de chama, devido ao contato com as paredes.

Os resultados obtidos com o álcool com a razão volumétrica de compressão de 11:1 demonstram que a geometria da câmara de combustão e a fluidodinâmica do gás dentro do cilindro estão corretamente dimensionadas para este motor.

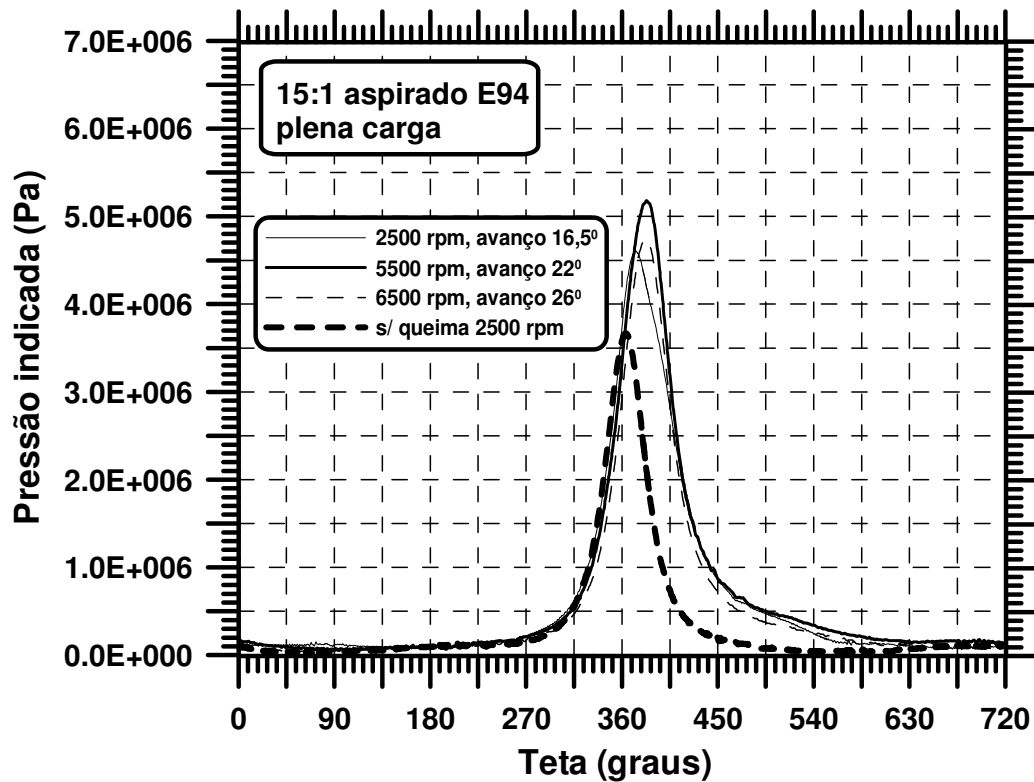


Figura 4.43 – Pressão indicada no ciclo do motor aspirado a álcool com razão volumétrica de compressão de 15:1 a plena carga

A Figura 4.43 apresenta as pressões medidas durante um ciclo em um cilindro para o motor aspirado a álcool etílico hidratado, operando com a razão volumétrica de compressão de 15:1 em diferentes rotações.

O comportamento das pressões ao longo da combustão apresenta também um *blow down* suave para todos os regimes de rotação com esta relação volumétrica de compressão.

O pico de pressão do motor com queima a 2500 rpm é 24% maior que a máxima pressão do cilindro sem queima no mesmo regime de rotação, o que indica uma combustão atrasada para esta razão volumétrica em relação a 11:1. O avanço de ignição foi reduzido de 24° para 16,5°. Os ângulos de avanço de ignição foram ajustados em LDI para todos os regimes de rotação, não se atingindo, portanto a eficiência térmica ótima em nenhum regime para esta razão volumétrica de compressão.

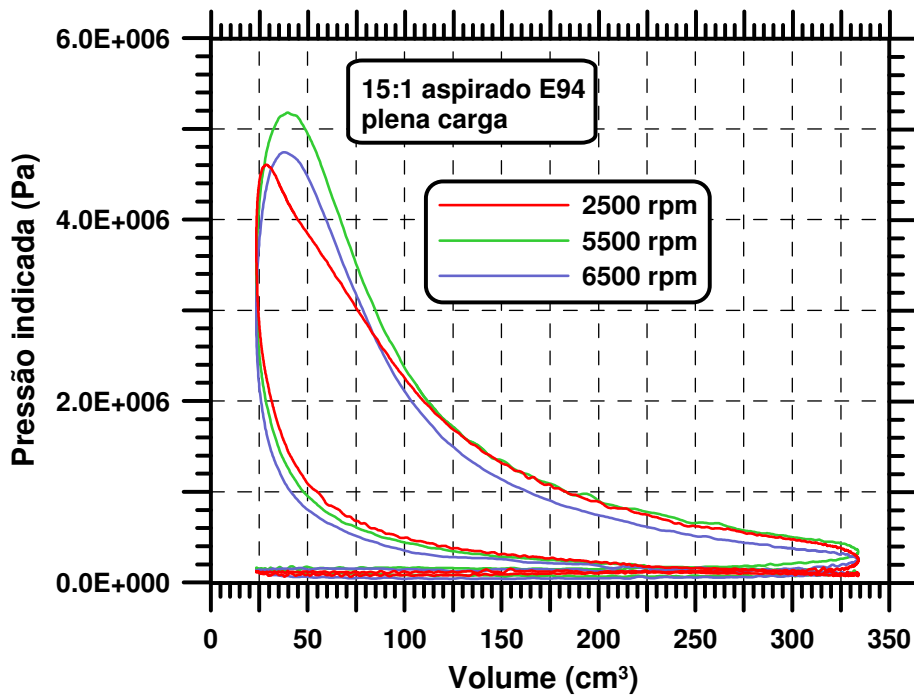


Figura 4.44 – Diagrama P x V para o motor aspirado a álcool com razão volumétrica de compressão de 15:1 em plena carga

A Figura 4.44 apresenta o diagrama P x V para este motor. As curvas a 5500 e 6500 RPM apresentam o formato esperado, contudo, a 2500 RPM há uma aparente queima em “dois estágios”. Embora não tenha sido feito um estudo detalhado das possíveis causas, acredita-se ser esse efeito resultado da forma da câmara de combustão incomum, necessária para se obter a razão volumétrica de compressão desejada.

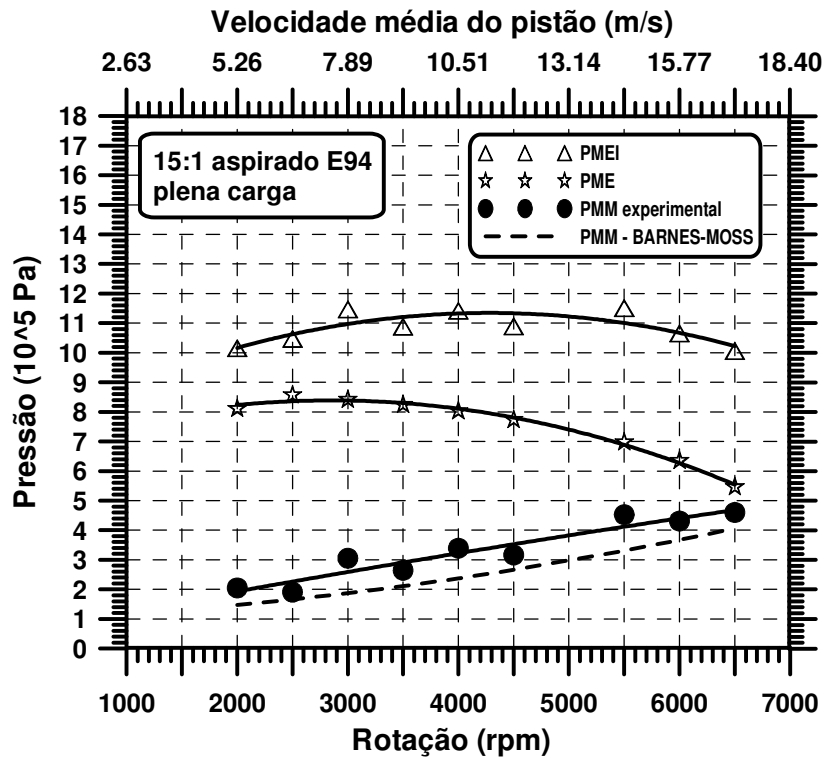


Figura 4.45 – Pressões médias do motor aspirado a álcool com razão volumétrica de compressão de 15:1 a plena carga

A Figura 4.45 apresenta as pressões médias desse motor. Observa-se neste caso que a curva de pressão motorizada experimental apresenta valores em média 30% mais elevados que os obtidos através da correlação de Barnes-Moss. Esse efeito é creditado a maior relação volumétrica de compressão utilizada que aumenta as pressões de pico, aumentando as reações na saia do pistão e mancais para manter o equilíbrio dinâmico. As maiores pressões também aumentam a pressão dos anéis contra o cilindro. O aumento de massa na cabeça do pistão, para se obter a razão volumétrica de compressão, também aumenta as forças de reação na saia e mancais. CHEN *et al.* (1965) e FARINHA *et al.* (1990) apresentam correlações que levam em consideração a pressão máxima de queima, porém, não apresentaram uma boa aproximação em relação aos resultados experimentais.

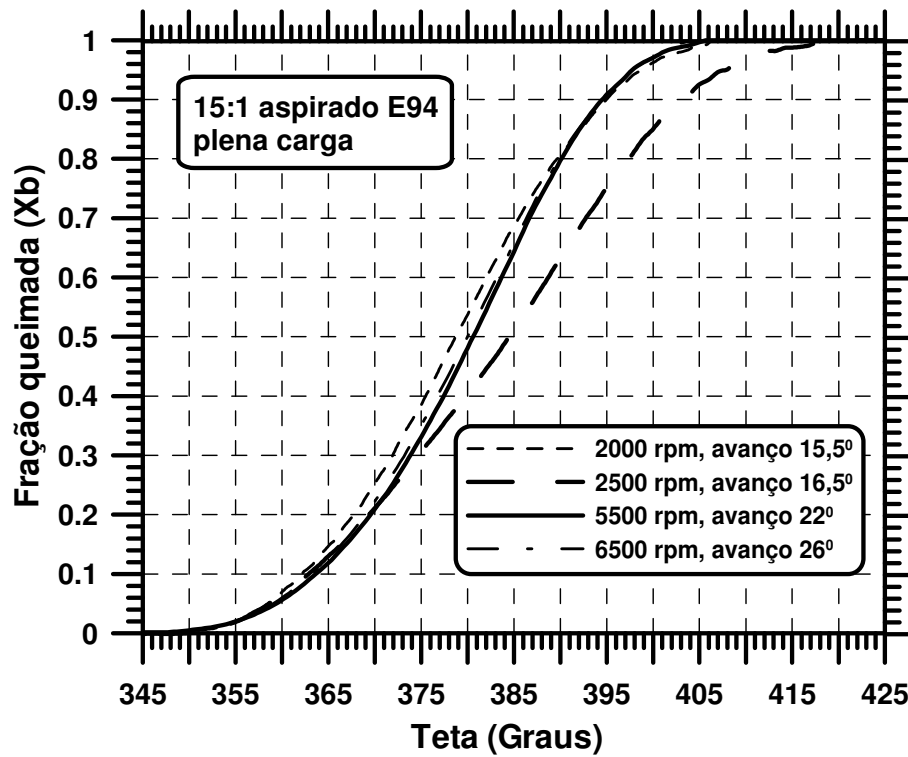


Figura 4.46 – Fração queimada do motor aspirado a álcool com razão volumétrica de compressão de 15:1 em plena carga

A Figura 4.46 apresenta a evolução da fração queimada do motor. A queima comporta-se de forma diferente ao exibido pelo mesmo combustível com razão volumétrica de compressão mais baixa, apresentando menor sensibilidade da inclinação às variações do regime de rotação. É interessante notar o comportamento anômalo da combustão a 2500 rpm, o qual não é detectado a 2000 rpm.

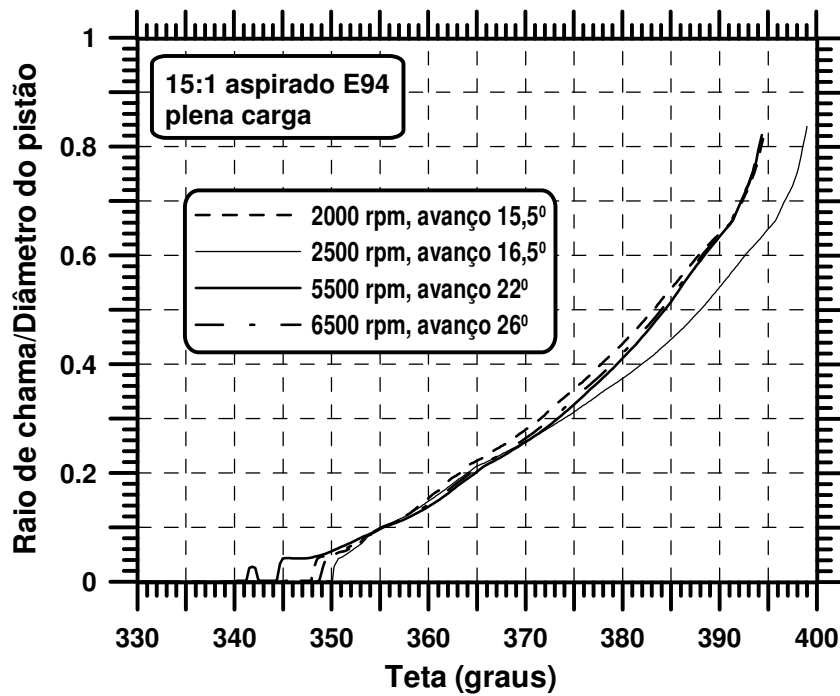


Figura 4.47 – Raio de chama adimensional do motor aspirado a álcool com razão volumétrica de compressão de 15:1 em plena carga

A Figura 4.47 apresenta o raio de chama adimensional do motor para diferentes regimes rotação do motor. Com a razão volumétrica de compressão de 15:1, conseguida através do acréscimo de massa na cabeça do pistão, os resultados mostram que existe um aumento da pressão média motorizada e que a combustão não sofre alterações significativas em função do acréscimo da rotação. Isto pode ser visto através do comportamento da fração queimada e do raio de chama.

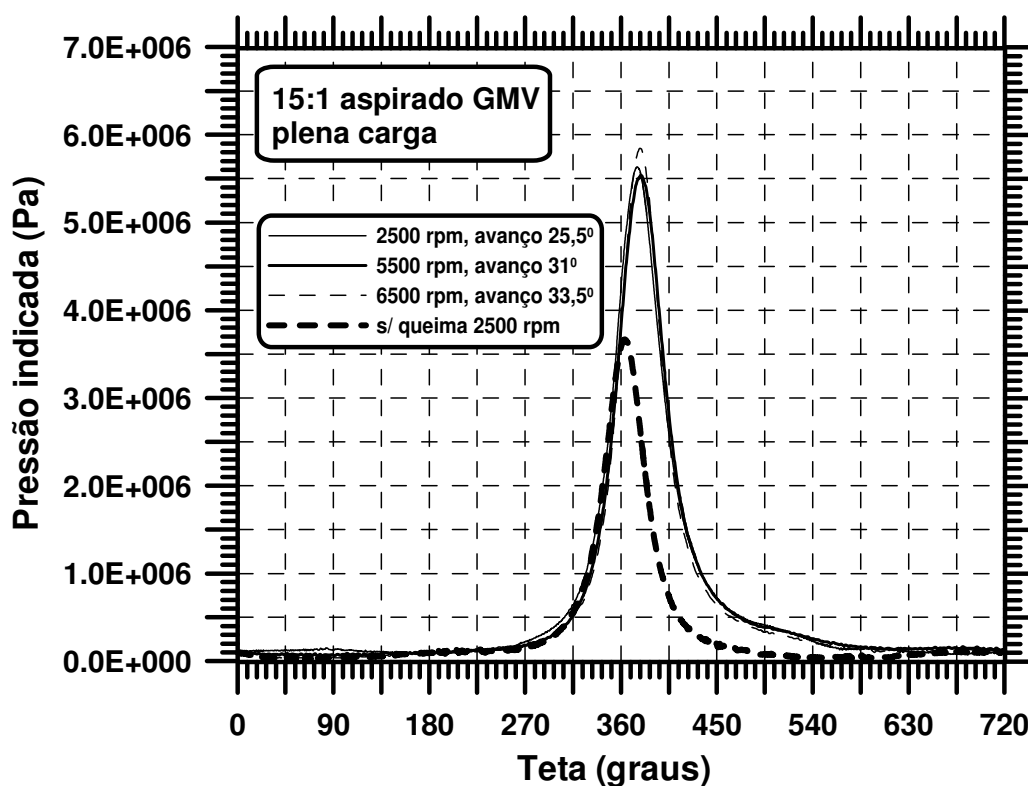


Figura 4.48 – Pressão indicada no ciclo do motor aspirado a GNV com razão volumétrica de compressão de 15:1 a plena carga

A Figura 4.48 apresenta a pressão indicada no ciclo do motor aspirado a GNV com razão volumétrica de compressão de 15:1, a plena carga, para diferentes regimes de rotação. Observa-se que os valores de pressão apresentam pouca variação em função do regime de rotação. O pico de pressão do motor com queima a 2500 rpm é 51% maior que a máxima pressão do cilindro sem queima, no mesmo regime de rotação. O pico de pressão, encontrado a 2500 rpm com a razão volumétrica de compressão de 15:1 para o motor a GNV é 11% maior que o encontrado com 15:1 operando com álcool hidratado. Esse aumento explica-se pelo avanço de ignição, $25,5^{\circ}$ para o GNV e $16,5^{\circ}$ para o álcool. Para o GNV os avanços de ignição foram limitados por LDI a 2500 e 5500 rpm e limitado por MBT a 6500 rpm. Entretanto, o motor aspirado a álcool com razão volumétrica de compressão de 11:1 apresenta a máxima pressão de queima a 2500 rpm, sendo 18% maior que o motor a GNV com razão volumétrica de compressão de 15:1. Neste caso, os avanços de ignição são praticamente os mesmos, sendo de 24° para o álcool e de $25,5^{\circ}$ para o GNV.

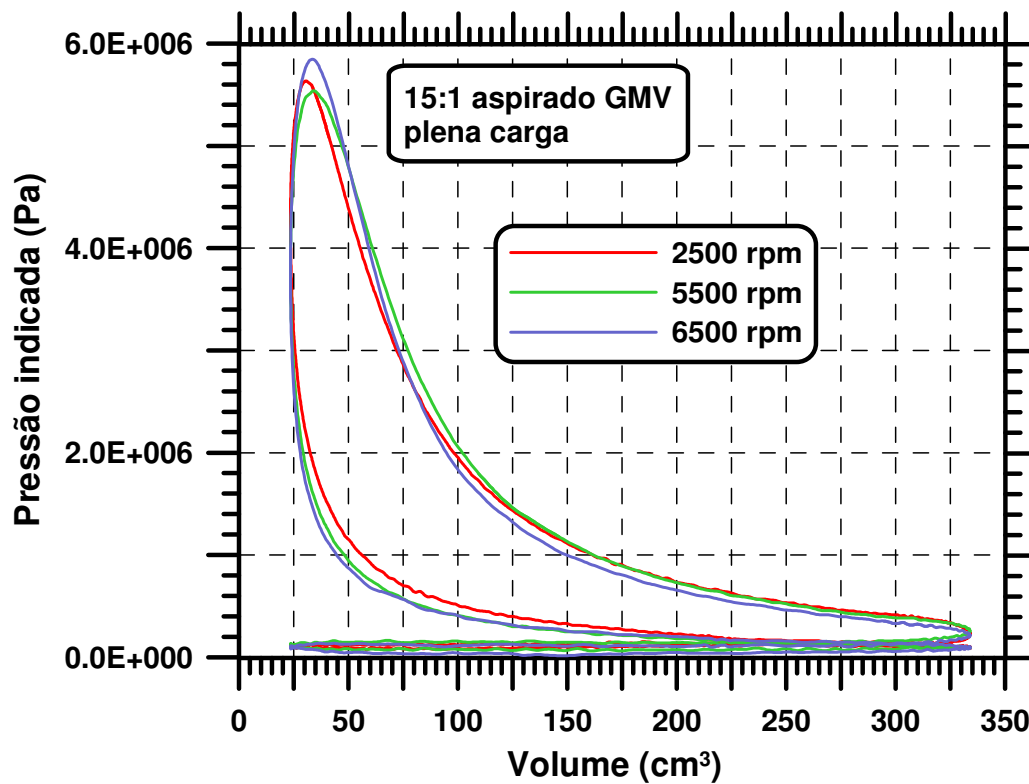


Figura 4.49 – Diagrama P x V para o motor aspirado a GNV com razão volumétrica de compressão de 15:1 a plena carga

A Figura 4.49 apresenta o diagrama P x V para esse motor em diferentes regimes de rotação. As curvas apresentam o formato esperado, estando as máximas pressões de queima bem próximas. Contudo, a pressão máxima de queima a 6500 rpm é a mais elevada, sendo este regime de rotação o único onde se atingiu o MBT durante o processo de calibração e ajuste, estando a pressão máxima ligeiramente adiantada em relação a 5500 rpm.

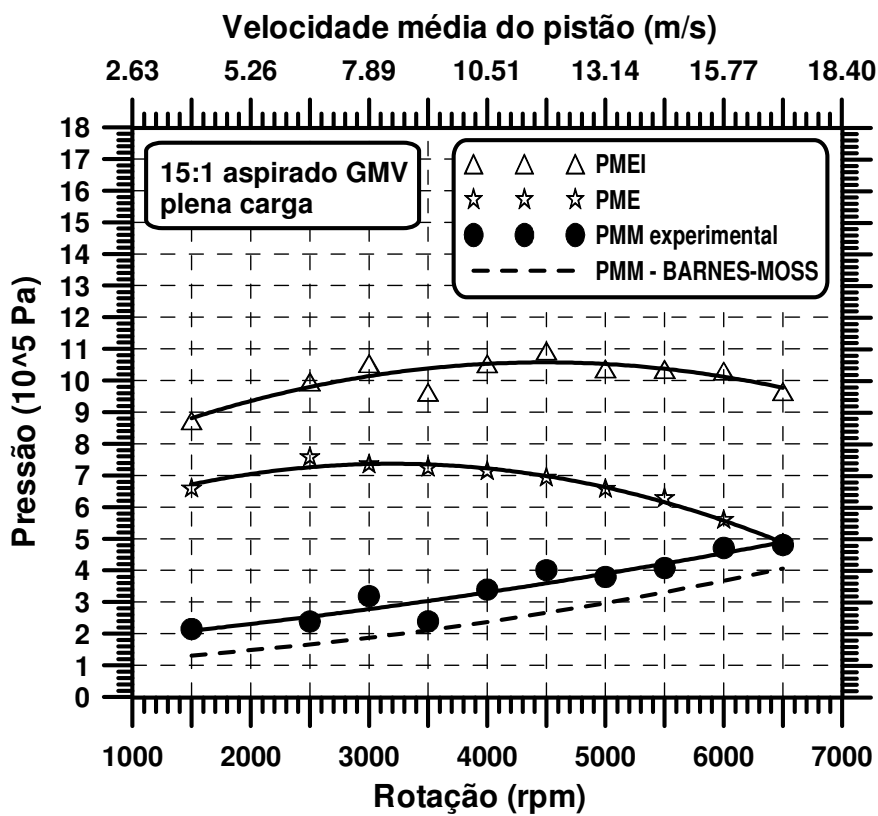


Figura 4.50 – Pressões médias do motor aspirado a GNV com razão volumétrica de compressão de 15:1 a plena carga

A Figura 4.50 apresenta as pressões médias do motor para diferentes regimes de rotação. Neste caso, a curva de pressão média motorizada experimental também apresenta em média valores 30% maiores que os obtidos através da correlação de Barnes-Moss, confirmando o ocorrido com o álcool utilizando os mesmos pistões e, conseqüentemente, a mesma relação volumétrica de compressão. Isto indica que não existe uma relação direta entre a pressão média motorizada e o combustível utilizado, sendo que a razão volumétrica de compressão, a massa do pistão, as pressões de queima, o trabalho de bombeamento e o regime de rotação constituem os parâmetros principais para estimativa da pressão média motorizada. Porém se as pressões de ciclo fossem bem diferentes, resultado de calores de combustão diferentes por exemplo, então o combustível teria influência.

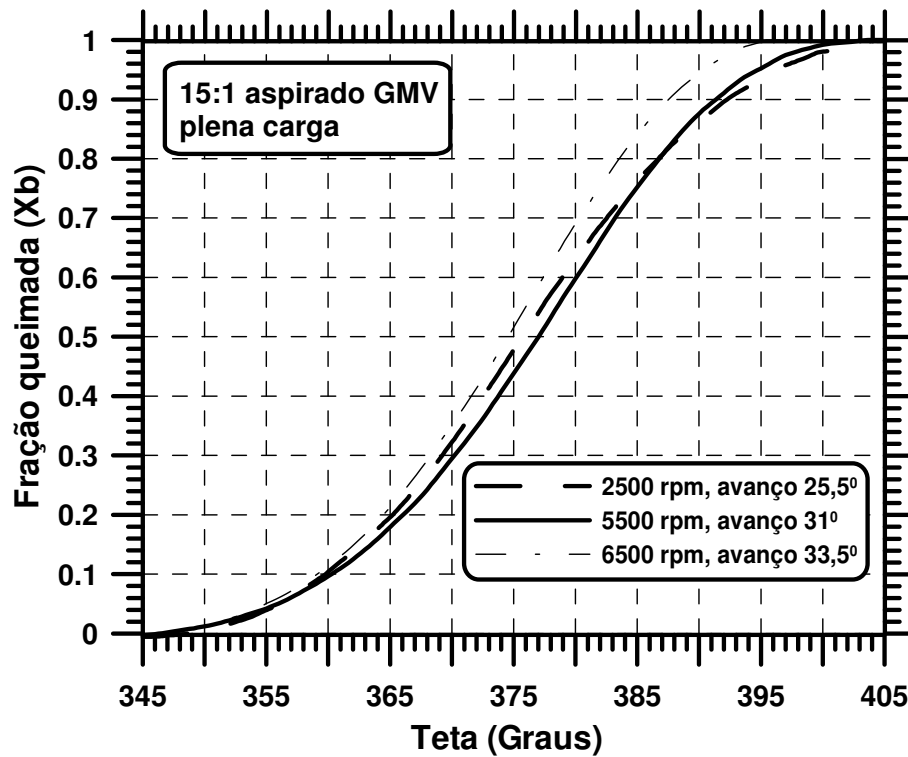


Figura 4.51 – Fração queimada do motor aspirado a álcool com razão volumétrica de compressão de 15:1 em plena carga

A Figura 4.51 apresenta a evolução da fração queimada do motor para diferentes regimes de rotação. O comportamento da queima mostra-se de forma similar ao álcool com a mesma razão volumétrica de compressão, apresentando inclinações semelhantes com menor sensibilidade às variações de regime de rotação para 2500 e 5500 rpm. Constata-se que a duração de queima é menor para 6500 rpm em relação às demais rotações.

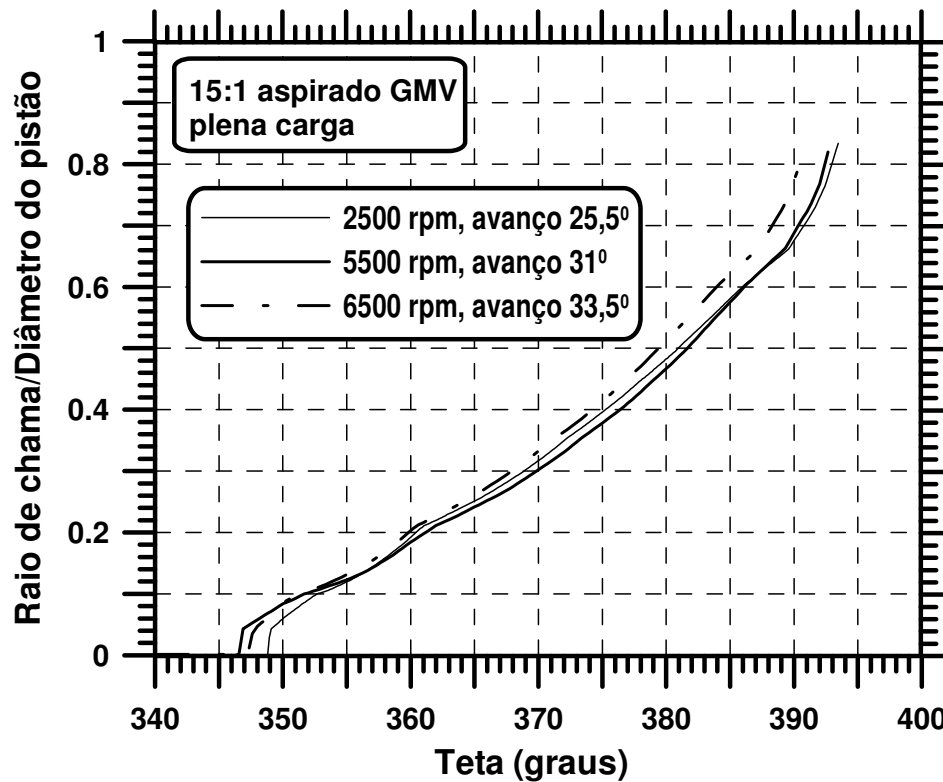


Figura 4.52 – Raio de chama adimensional do motor aspirado a GNV com razão volumétrica de compressão de 15:1 em plena carga

A Figura 4.52 apresenta o raio de chama adimensional do motor para diferentes regimes rotação. Nota-se que para a razão volumétrica de compressão de 15:1 o comportamento com GNV mostra, basicamente, o mesmo raio final de chama obtido com o álcool na mesma razão volumétrica de compressão.

Os resultados mostram, de uma forma geral, que o comportamento da combustão do motor funcionando com GNV para a razão volumétrica de compressão de 15:1 é similar ao álcool com a mesma razão volumétrica de compressão. Porém, o motor com GNV apresenta menor variação das pressões máximas no ciclo em função da rotação.

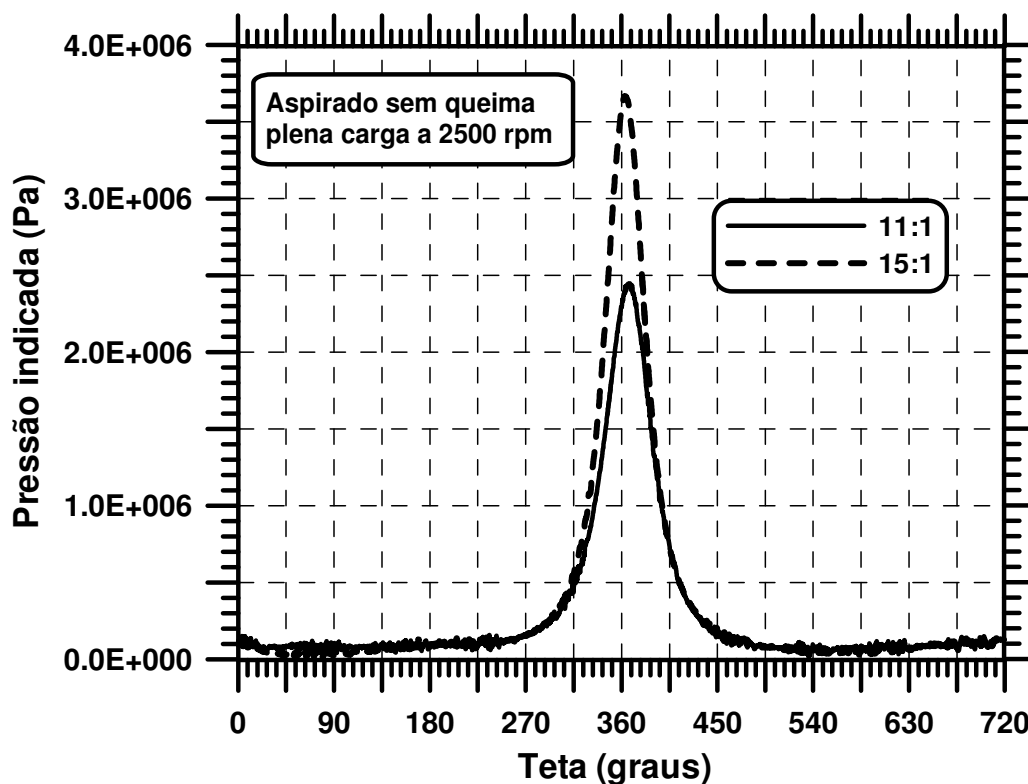


Figura 4.53 – Pressão indicada no ciclo do motor aspirado com razão volumétrica de compressão de 11:1 e 15:1 a 2500 rpm sem queima em plena carga

A Figura 4.53 apresenta a pressão indicada no ciclo do motor aspirado com razão volumétrica de compressão de 11:1 e 15:1 a 2500 rpm sem queima, com borboleta totalmente aberta. A pressão máxima atingida com a razão volumétrica de compressão de 15:1 é 50% maior que a pressão máxima alcançada com a razão volumétrica de compressão de 11:1, estando em conformidade com os cálculos teóricos.

Em testes para levantamento da pressão de atrito, estando o motor desligado e sendo acionado externamente, os picos máximos de pressão ocorrem ligeiramente antes do PMS. Isto ocorre devido ao atrito e a transferência de calor do gás para o cilindro. Contudo, medindo-se a pressão no cilindro sem queima com o motor em funcionamento, a pressão máxima de queima ocorre ligeiramente após o PMS devido à transferência de calor do motor aquecido para o cilindro em teste.

A Figura 4.54 apresenta as pressões médias motorizadas do motor aspirado para várias razões volumétricas de compressão e diferentes combustíveis em toda faixa de rotação

do motor. A correlação de Barnes-Moss apresenta uma excelente aproximação dos resultados experimentais para o álcool com razão volumétrica de compressão de 11:1 e para a mistura de gasolina e álcool com razão volumétrica de compressão de 12,5:1. Porém, para o motor com razão volumétrica de compressão de 15:1, seja com álcool ou com GNV, as pressões médias motorizadas experimentais são maiores que as obtidas através da correlação citada. Embora haja adição de material na cabeça do pistão para incrementar a razão volumétrica de compressão para 12,5:1, a quantidade é bem menor que a quantidade adicionada para 15:1, bem como as pressões máximas de compressão. Desta forma para a razão volumétrica de compressão de 12,5:1 a rotação é ainda o parâmetro mais relevante na geração do atrito e a correlação de Barnes-Moss mostra-se adequada.

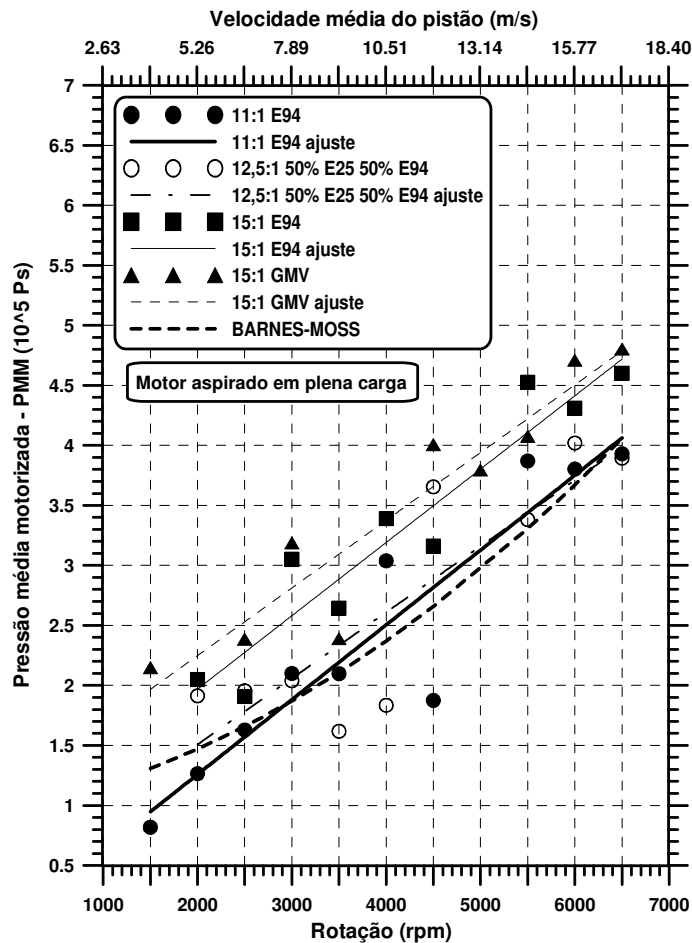


Figura 4.54 – Pressões médias motorizadas do motor aspirado para várias razões volumétricas de compressão e diferentes combustíveis

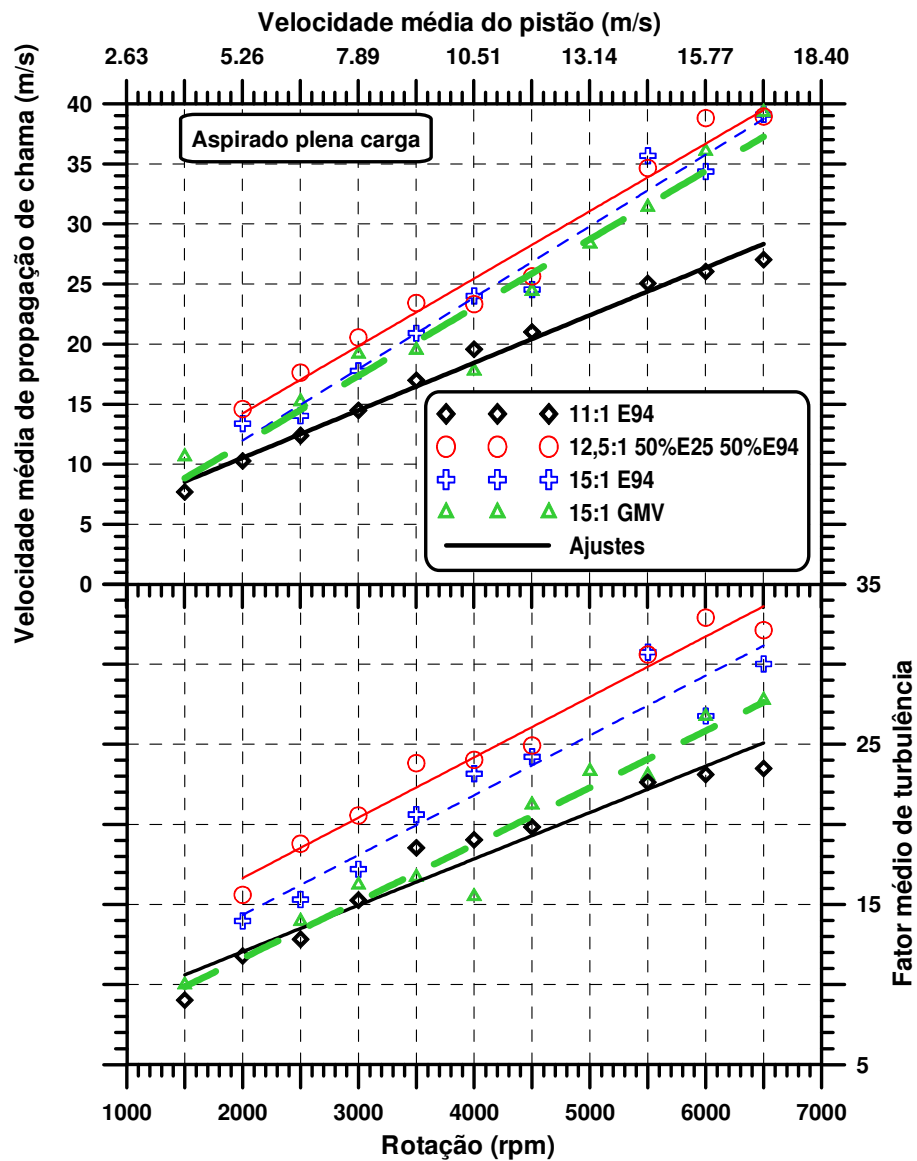


Figura 4.55 – Velocidade média de propagação da chama e Fator médio de turbulência para o motor aspirado com diferentes razões volumétricas de compressão e diferentes combustíveis

A Figura 4.55 apresenta os valores médios de velocidade de propagação da chama e o fator de turbulência para o motor aspirado, operando com diferentes razões volumétricas de compressão e diferentes combustíveis. A velocidade da propagação da chama é a soma da velocidade da chama com a velocidade de expansão da frente devido ao

aquecimento do gás e o aumento do volume do cilindro. A velocidade da propagação da chama é uma função direta da velocidade da chama. Portanto, podem-se inferir da Figura 4.55 as velocidades da chama. O aumento da rotação aumenta a turbulência e, conseqüentemente, a velocidade média de chama. O aumento da razão volumétrica de compressão produz um aumento da velocidade média de chama, como pode ser observado pela comparação entre 15:1 e 11:1 com álcool. O aumento da razão volumétrica de compressão aumenta a massa específica e a temperatura do gás, o que aumenta a velocidade de chama laminar. A maior compressão aumenta a produção de turbulência, o que aumenta o fator de turbulência. A adição de maior proporção de gasolina ao álcool aumenta a velocidade média de chama, como pode ser visto na Figura 4.55, para a mistura de 50% de álcool hidratado e 50% de gasolina C com a razão volumétrica de compressão de 12,5:1. Desta forma, para as condições testadas no motor aspirado, o combustível que produz a maior velocidade de chama é a gasolina, seguida pelo álcool e por último pelo GNV. Contudo, o álcool operando no motor com razão volumétrica de compressão de 11:1 possui menor velocidade média de chama que o GNV para a razão volumétrica de compressão de 15:1. Isto demonstra que se o GNV operar em condições propícias, ou seja, com razões volumétricas de compressão elevadas, o GNV pode alcançar velocidades médias de chama mais elevadas que o álcool nas condições ideais de funcionamento.

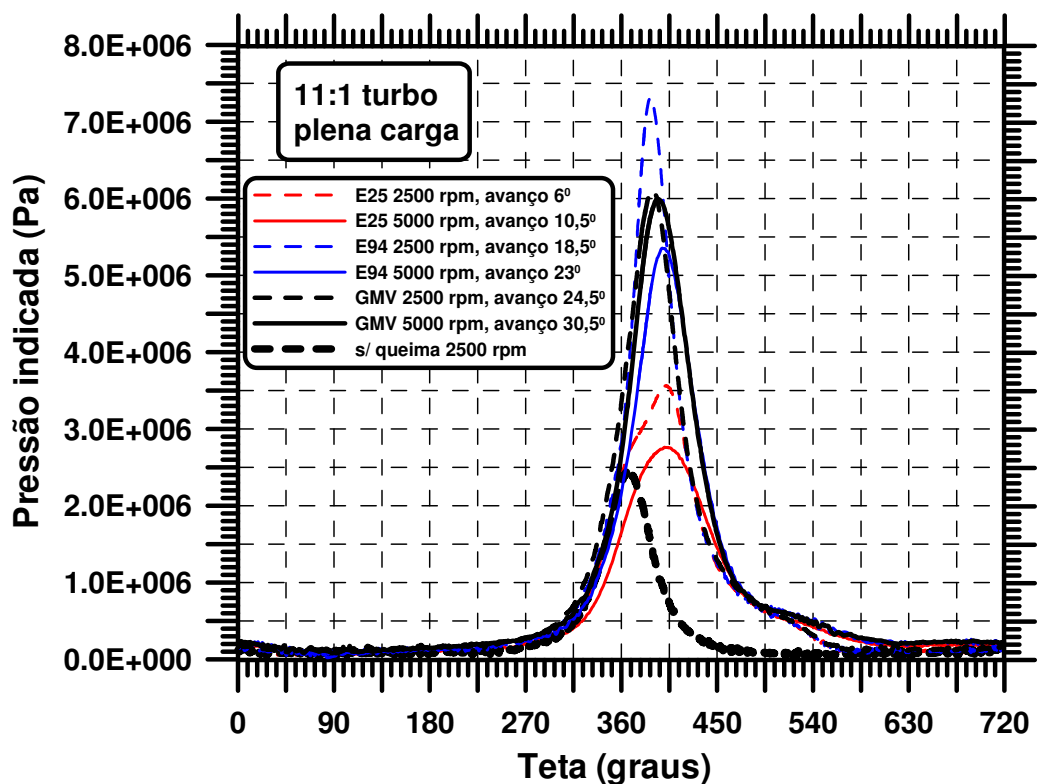


Figura 4.56 – Pressão indicada no ciclo do motor turboalimentado com razão volumétrica de compressão de 11:1 em plena carga e diferentes combustíveis

A Figura 4.56 apresenta a evolução da pressão indicada no ciclo do motor turboalimentado com razão volumétrica de compressão de 11:1, em plena carga e utilizando diferentes combustíveis. Nota-se o aumento das pressões ao longo da exaustão para o motor turboalimentado, fruto do estrangulamento do escape devido à presença da turbina. Observa-se que na rotação de 2500 rpm, correspondente a rotação de torque máximo do motor, encontra-se a pressão máxima de queima para todos os combustíveis. Assim, como no motor aspirado, no motor turboalimentado o GNV apresenta a menor variação entre as pressões máximas de queima em função da rotação. A magnitude da pressão é função da pressão de turboalimentação, da quantidade de energia introduzida através do combustível e do ponto de ignição. O álcool apresenta as maiores pressões máximas a 2500 rpm, seguido pelo GNV e em seguida pela gasolina. A 5000 rpm o GNV passa a superar a pressão máxima encontrada para o álcool. A menor resistência à detonação da gasolina não possibilitou utilizar os mesmos valores

de pressão na admissão e avanço do álcool e do GNV, o que limitou significativamente a pressão máxima de queima da gasolina.

A Figura 4.57 apresenta o diagrama P x V para o motor turboalimentado operando com diferentes combustíveis. Observa-se um achatamento do diagrama P x V para o motor turboalimentado em relação ao motor aspirado. Isto se deve tanto ao atraso da ignição como a uma combustão mais lenta. O próprio atraso da ignição desloca a combustão para um momento mais tardio, onde as temperaturas e turbulência preexistentes na câmara de combustão são menos propícias a uma rápida propagação da chama.

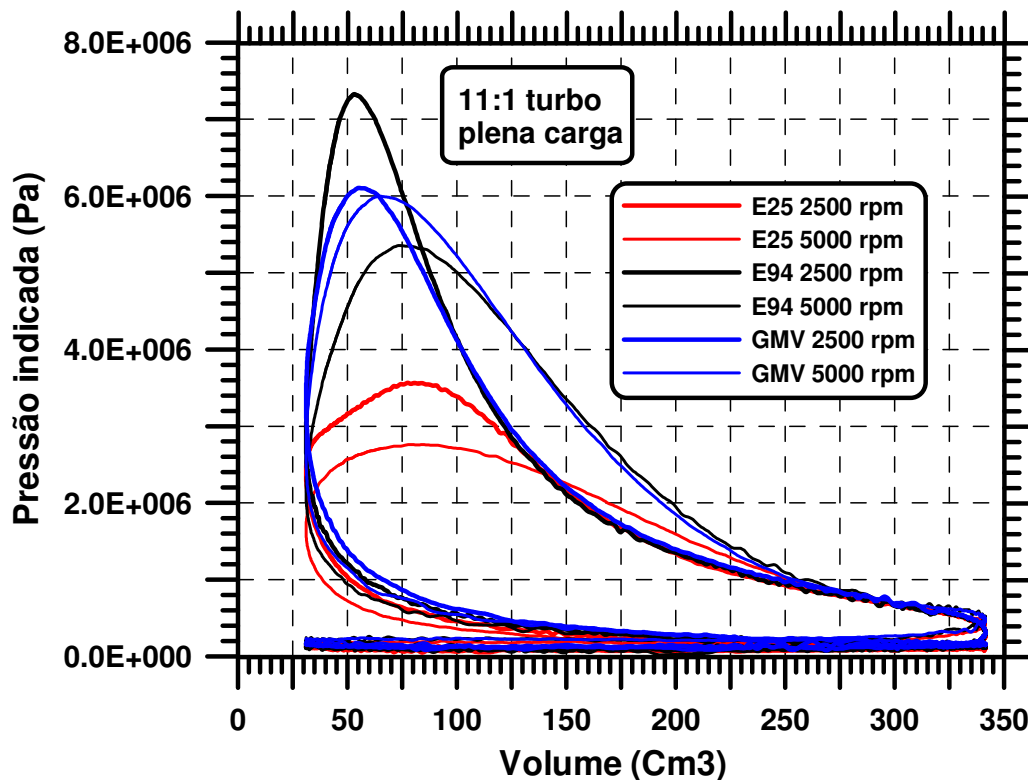


Figura 4.57 – Diagrama P x V para o motor turboalimentado com razão volumétrica de compressão de 11:1 em plena carga para diferentes combustíveis

As Figuras de 4.58 a 4.60 apresentam as pressões médias do motor turboalimentado à gasolina C, álcool etílico hidratado e GNV com razão volumétrica de compressão de 11:1 em regime de plena carga em função da rotação. As correlações existentes para

estimativa da pressão média motorizada levam em consideração a rotação do motor como o parâmetro principal, o que se aplica bem a motores aspirados. Contudo, os resultados apresentados demonstram que o trabalho de bombeamento passa a ser também uma parcela relevante na determinação da pressão média motorizada em motores turboalimentados. Mesmo as correlações mais modernas como a apresentada por FARINHA *et al.* (1990) que utiliza a pressão máxima de queima para a melhor avaliação do atrito, falham na previsão da pressão média motorizada em motores turboalimentados. Um possível motivo é o fato dessas correlações não levarem em consideração as condições de restrição no escapamento, oriundas da presença da turbina, o que aumenta sobremaneira o trabalho de bombeamento. Um outro possível motivo é não serem os componentes do motor testado projetados para trabalhar na condição do motor turbo. Há a possibilidade dos filmes de óleo estarem trabalhando com espessura menores que as mais adequadas, seja em função tanto das maiores cargas mecânicas como térmicas.

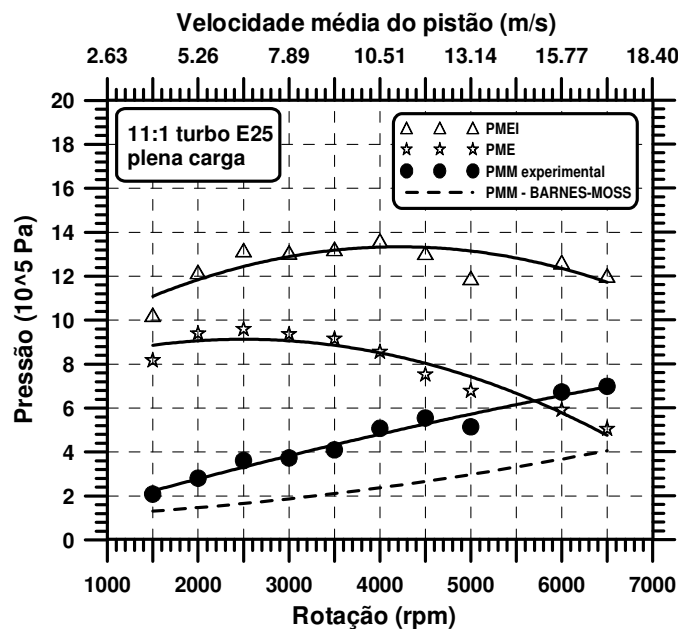


Figura 4.58 – Pressões médias do motor turboalimentado a gasolina com razão volumétrica de compressão de 11:1 em plena carga

A defasagem da pressão média motorizada em relação à estimativa encontrada através da correlação de Barnes-Moss e o crescimento dessa defasagem, em função do aumento

da rotação, podem ser vistos nas Figuras 4.58 a 4.60. Pode-se observar o crescimento da pressão média motorizada em função da pressão de turboalimentação utilizada, sendo assim, as maiores pressões médias motorizadas são as do GNV, seguidas pelo álcool e finalmente pela gasolina.

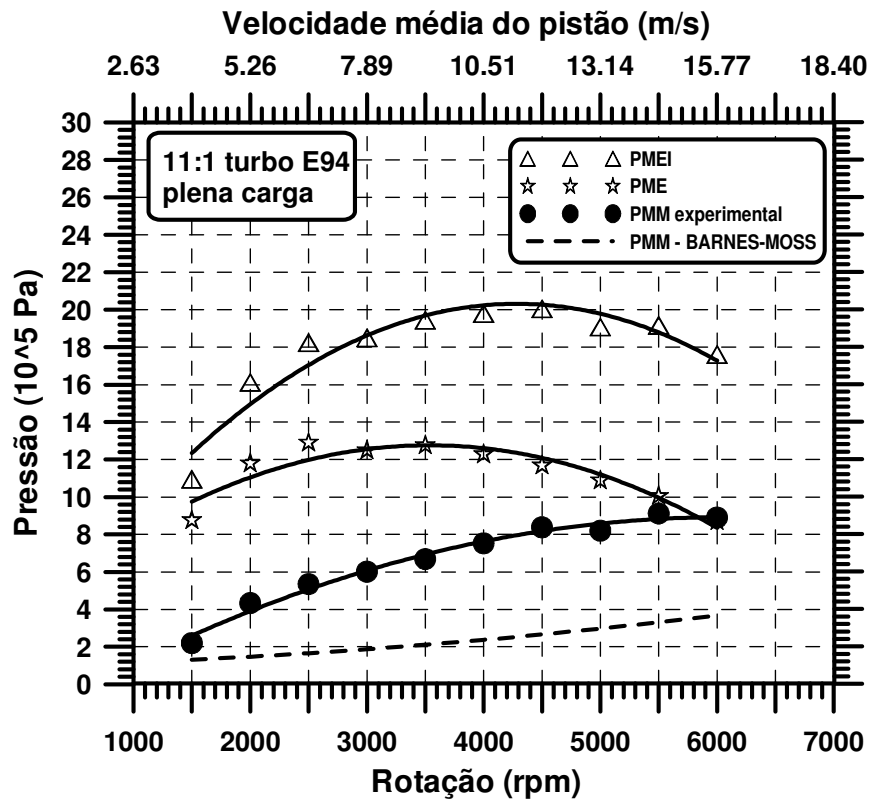


Figura 4.59 – Pressões médias do motor turboalimentado a álcool com razão volumétrica de compressão de 11:1 em plena carga

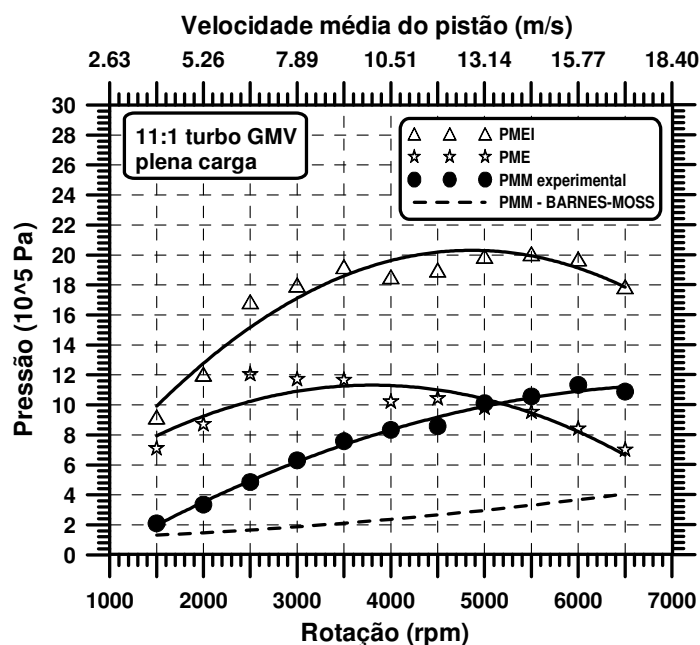


Figura 4.60 – Pressões médias do motor turboalimentado a GNV com razão volumétrica de compressão de 11:1 em plena carga

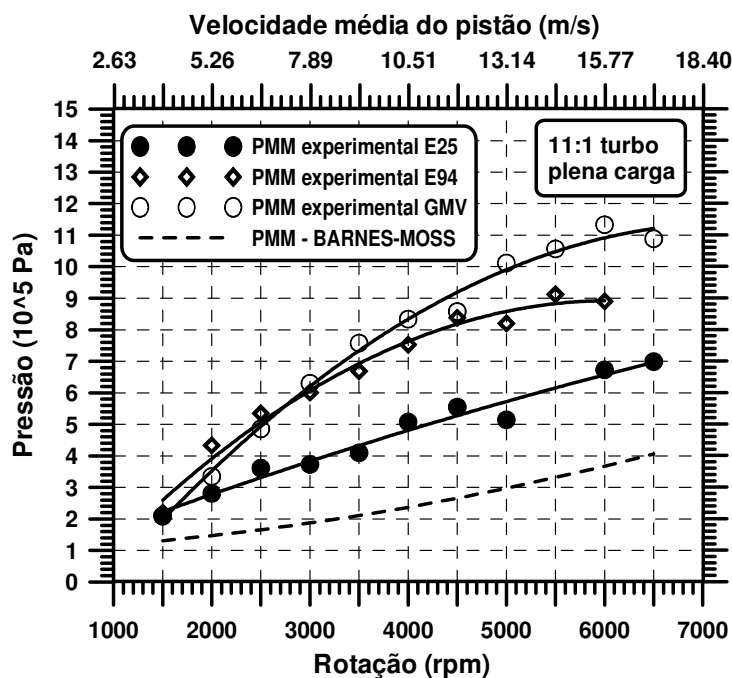


Figura 4.61 – Pressões médias motorizadas do motor turboalimentado com razão volumétrica de compressão de 11:1 em plena carga com diferentes combustíveis

A Figura 4.61 apresenta as pressões médias motorizadas do motor turboalimentado com razão volumétrica de compressão de 11:1, em plena carga, operando com diferentes combustíveis. Através da Figura 4.61 é possível observar que o aumento das pressões de turboalimentação influencia diretamente no crescimento das pressões médias motorizadas. Pode-se visualizar também que os resultados experimentais apresentam um distanciamento crescente com a rotação em relação à correlação de Barnes-Moss. A pressão média motorizada para o motor turboalimentado a gasolina a 6500 rpm chega a ser quase o dobro do estimado pela correlação de Barnes-Moss. Para o motor turboalimentado a álcool a pressão média motorizada chega a superar o dobro previsto pela correlação e para o motor a GNV quase o triplo.

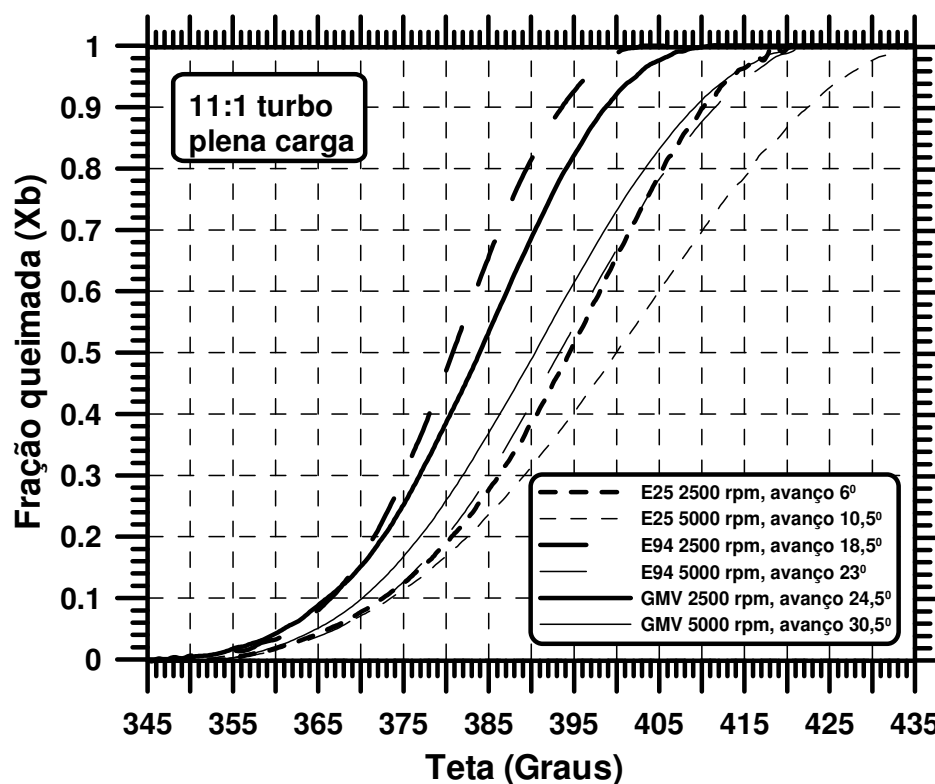


Figura 4.62 – Fração queimada do motor turboalimentado com razão volumétrica de compressão de 11:1 em plena carga com diferentes combustíveis

A Figura 4.62 apresenta a fração queimada do motor turboalimentado operando com diferentes combustíveis. Através da Figura 4.62 pode-se observar que a gasolina apresenta as menores inclinações e termina a combustão mais tarde que os demais

combustíveis, o que decorre dos pequenos avanços de ignição praticados. Nota-se para todos os combustíveis um comportamento bem diferenciado da evolução da fração queimada de 2500 rpm para 5500 rpm, tanto na duração angular quanto na inclinação. Isso demonstra que houve um crescimento da duração angular de queima na medida em que a rotação foi aumentada, devido ao aumento da velocidade de chama não ser suficiente para compensar este efeito.

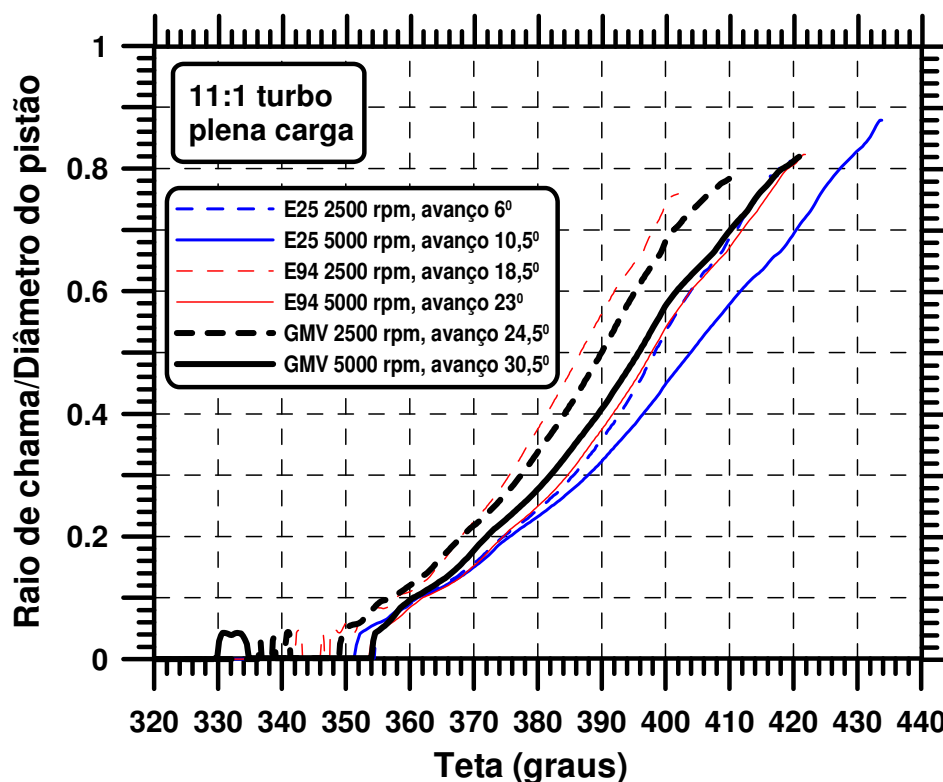


Figura 4.63 – Raio de chama adimensional do motor turboalimentado com razão volumétrica de compressão de 11:1 em plena carga com diferentes combustíveis

A Figura 4.63 apresenta o raio de chama adimensional do motor turboalimentado para diferentes regimes rotação do motor. Os raios de chama são maiores para 5000 rpm quando comparados com a rotação de 2500 rpm para todos os combustíveis, mostrando também uma diferença na evolução da combustão.

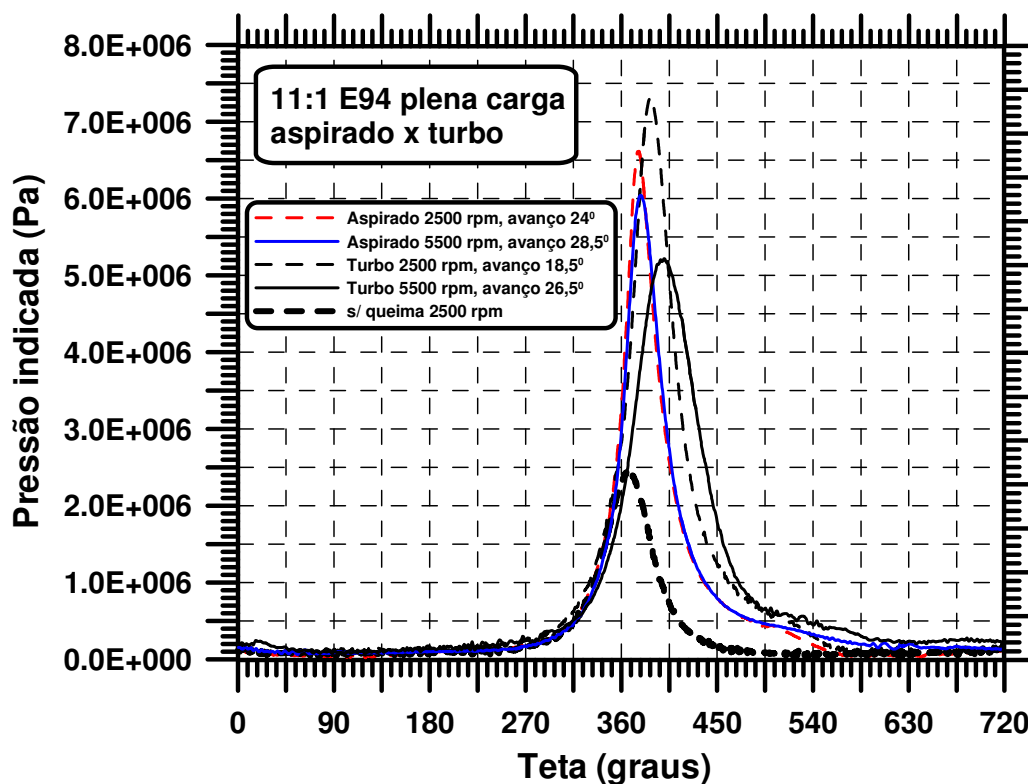


Figura 4.64 – Pressão indicada no ciclo do motor aspirado e turboalimentado a álcool com razão volumétrica de compressão de 11:1 em plena carga

As Figuras 4.64 a 4.67 apresentam a pressão indicada no ciclo e o diagrama P x V para o motor aspirado e turboalimentado operando com álcool etílico hidratado e GNV. Observa-se, tanto para o álcool quanto para o GNV, que as pressões máximas atingidas com o motor turboalimentado ocorrem atrasadas relativamente ao motor aspirado. Nota-se também que o motor turboalimentado produz pressões máximas maiores que o motor aspirado a 2500 rpm, tanto para o álcool quanto para o GNV, com um alargamento maior do diagrama P x V para as versões turboalimentadas. A 5500 rpm o efeito de alargamento do diagrama é intensificado quando comparado com as versões aspiradas para ambos os combustíveis. Contudo, para o motor turboalimentado a GNV, a pressão máxima do ciclo a 5500 rpm é ligeiramente maior que do motor aspirado, já para o motor a álcool, a pressão máxima alcançada com o motor turboalimentado chega a ser menor que a versão aspirada. Porém, devido ao efeito de alargamento do ciclo, a pressão média do ciclo do motor turboalimentado a álcool é bem maior que do motor aspirado.

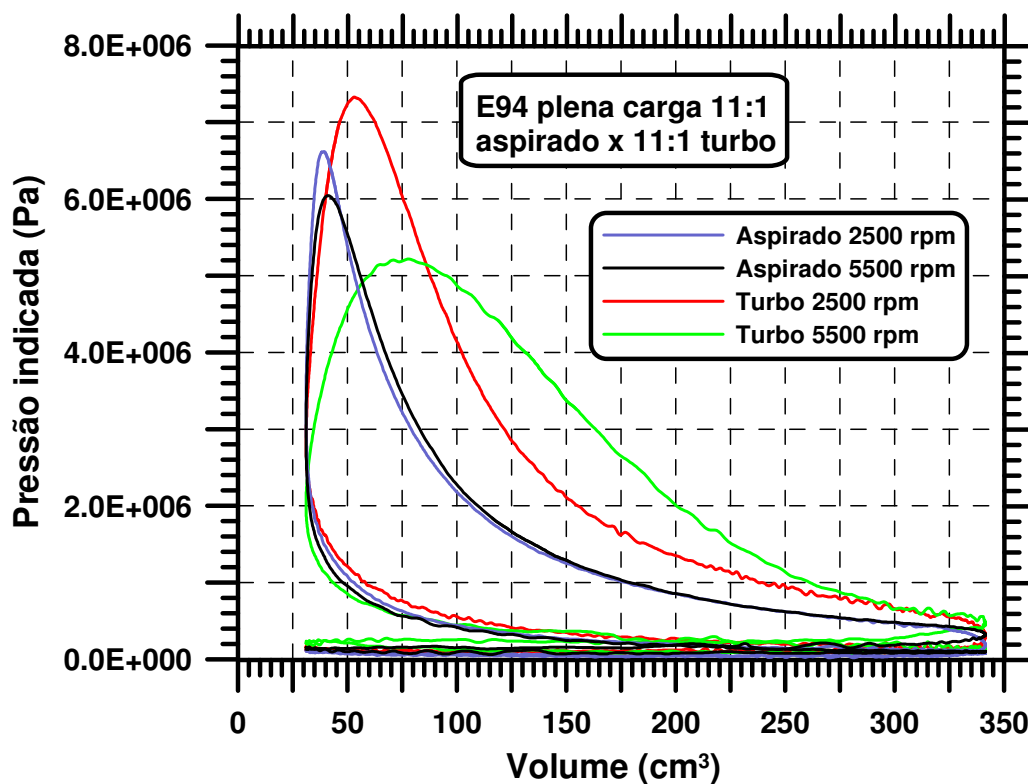


Figura 4.65 – Diagrama P x V para o motor aspirado e turboalimentado a álcool com razão volumétrica de compressão de 11:1 em plena carga

Tanto para o motor aspirado quanto para o motor turboalimentado, observa-se maior variação da pressão máxima de combustão em função da rotação para o álcool em relação ao GNV. O alargamento do diagrama P x V, ampliado em rotações mais elevadas para o motor turboalimentado com álcool ou GNV, advém do menor crescimento da velocidade de propagação de chama. Em ambos os casos pode-se observar uma alta pressão ao longo de toda exaustão, o que implica em uma grande retenção de gás queimado. A maior quantidade de gás queimado residual afeta a velocidade de chama, o que explicaria a combustão mais demorada. A menor variação da pressão máxima para o motor a GNV pode ser explicada pelos elevados ângulos de avanço de ignição praticados, os quais possibilitaram atingir o MBT em quase todos os pontos de operação, seja para a versão aspirada, seja turboalimentada. As Figuras 4.66 e 4.67 mostram as pressões indicadas e o diagrama P x V para as versões do motor a GNV, onde o avanço praticamente não sofreu modificação quando da turboalimentação.

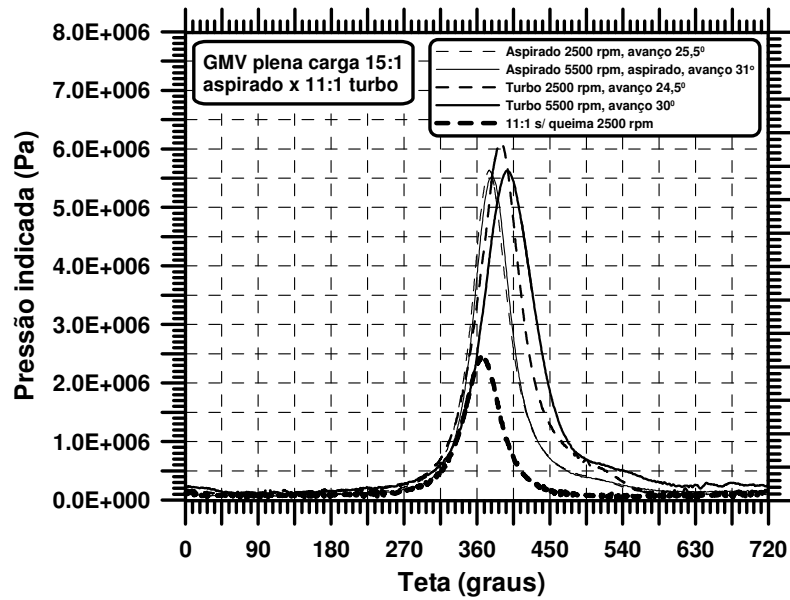


Figura 4.66 – Pressão indicada no ciclo do motor a GNV aspirado com razão volumétrica de compressão de 15:1 e turboalimentado com razão volumétrica de compressão de 11:1 em plena carga

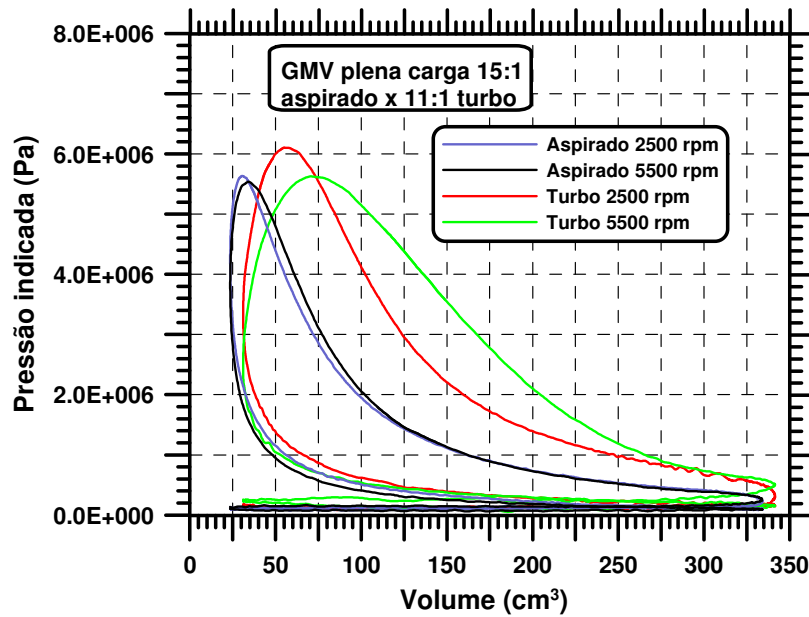


Figura 4.67 – Diagrama P x V para o motor a GNV aspirado com razão volumétrica de compressão de 15:1 e turboalimentado com razão volumétrica de compressão de 11:1 em plena carga

As Figuras 4.68 e 4.69 apresentam a fração queimada do motor aspirado e turboalimentado funcionando com álcool e GNV em plena carga. As versões do motor aspirado variam pouco a inclinação da curva em relação à rotação e sofrem pouca alteração em relação à duração angular de queima. Ao contrário, as versões turboalimentadas apresentam uma alteração da inclinação bem maior da curva a 5500 rpm, aumentando significativamente a duração angular de queima quando comparadas com as curvas a 2500 rpm. O motor aspirado a GNV praticamente não apresenta alteração na curva da fração queimada de 2500 rpm para 5500 rpm.

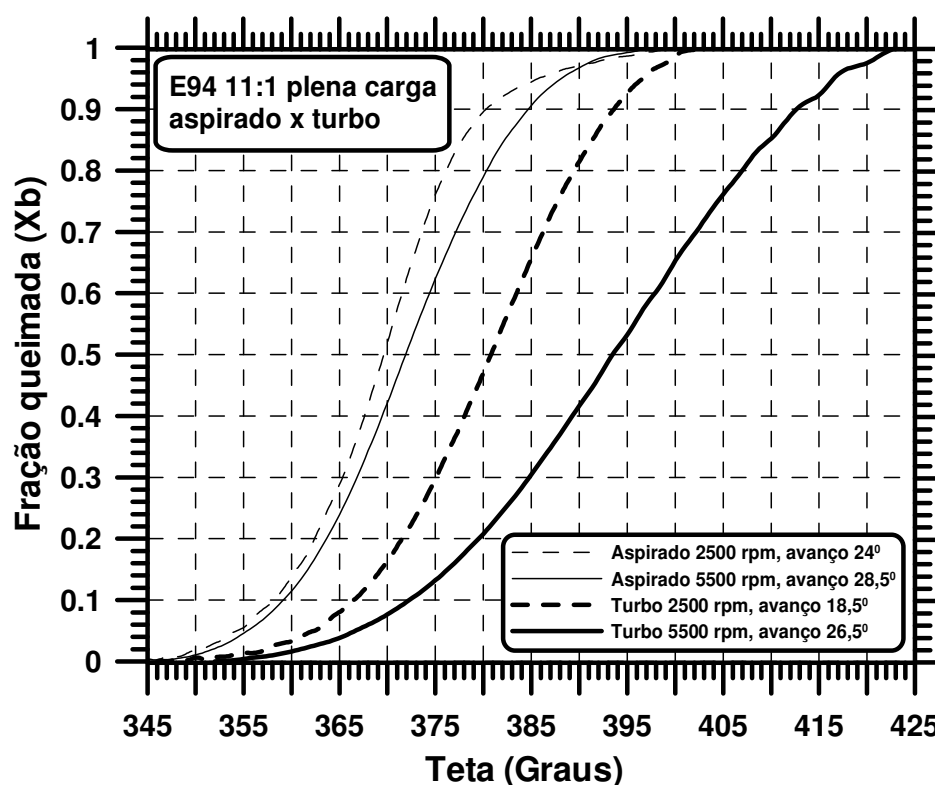


Figura 4.68 – Fração queimada do motor aspirado e turboalimentado a álcool com razão volumétrica de compressão de 11:1 em plena carga

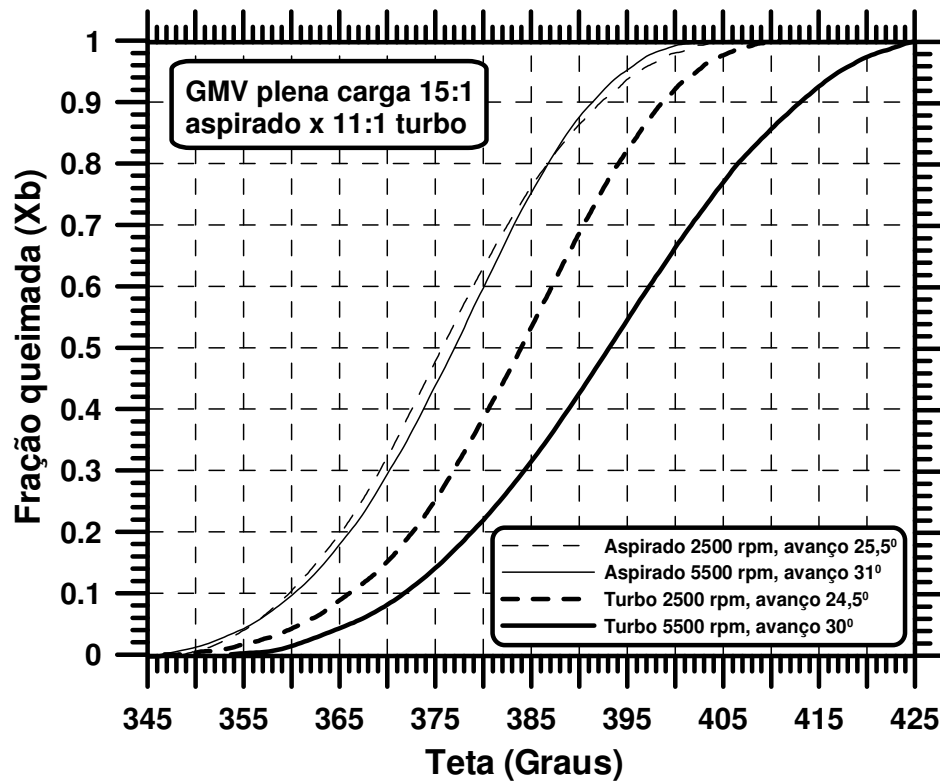


Figura 4.69 – Fração queimada para o motor a GNV aspirado com razão volumétrica de compressão de 15:1 e turboalimentado com razão volumétrica de compressão de 11:1 em plena carga

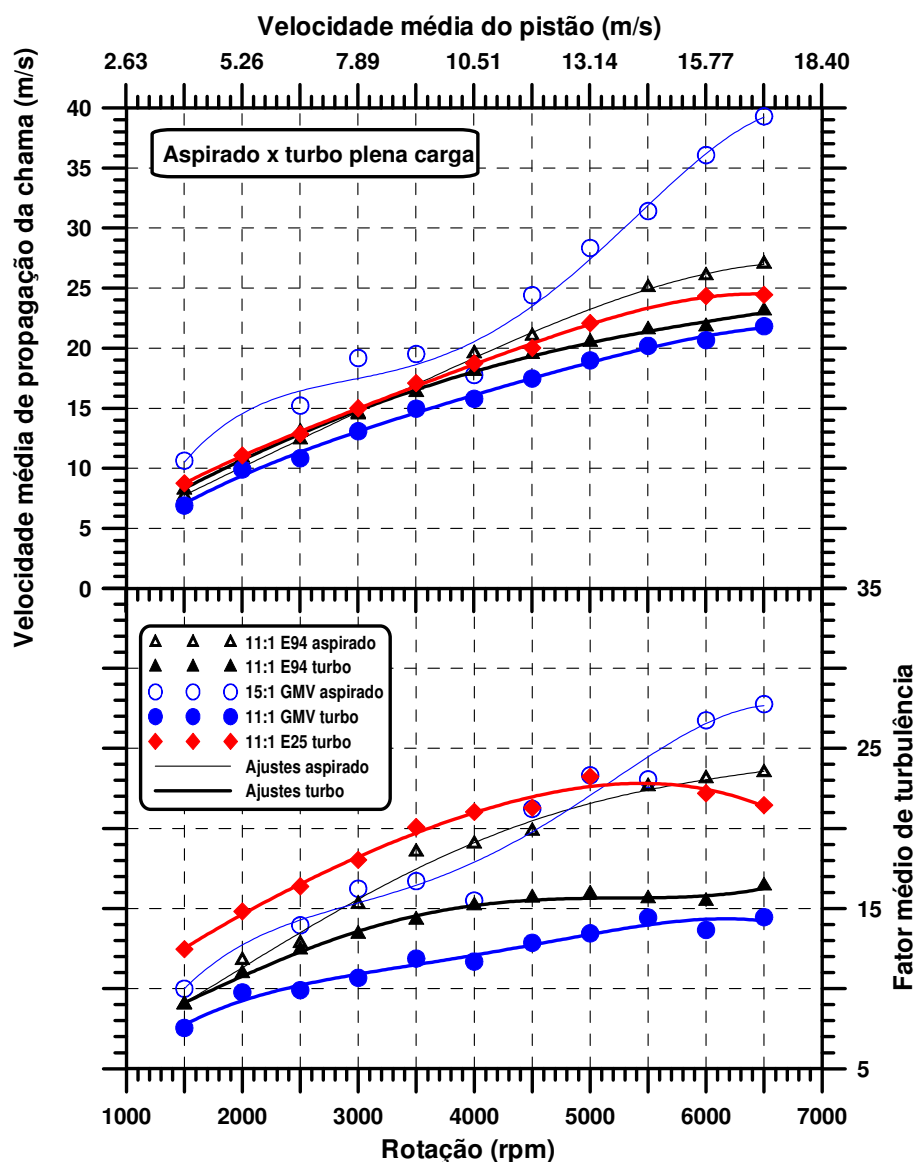


Figura 4.70 – Valores médios de velocidade e fator de turbulência para o motor aspirado e turboalimentado para várias razões volumétricas de compressão e combustíveis

A Figura 4.70 apresenta os valores de velocidade média de propagação da chama e do fator médio de turbulência para o motor aspirado e turboalimentado para várias razões volumétricas de compressão e diferentes combustíveis. Novamente, credita-se essa redução da velocidade de propagação no motor turbo a diluição da mistura ar-combustível pelos gases queimados. O atraso da combustão nas fases iniciais é aumentado pela expansão do volume da câmara e o decaimento da turbulência que ocorre após o PMS, implicando na maior sensibilidade da duração de combustão na

configuração turboalimentada devido ao aumento da velocidade do motor. Para as condições de operação deste motor turboalimentado obtêm-se o mesmo comportamento da velocidade de propagação da chama obtido com o motor aspirado, ou seja, o combustível mais veloz é a gasolina, seguido pelo álcool e finalmente pelo GNV.

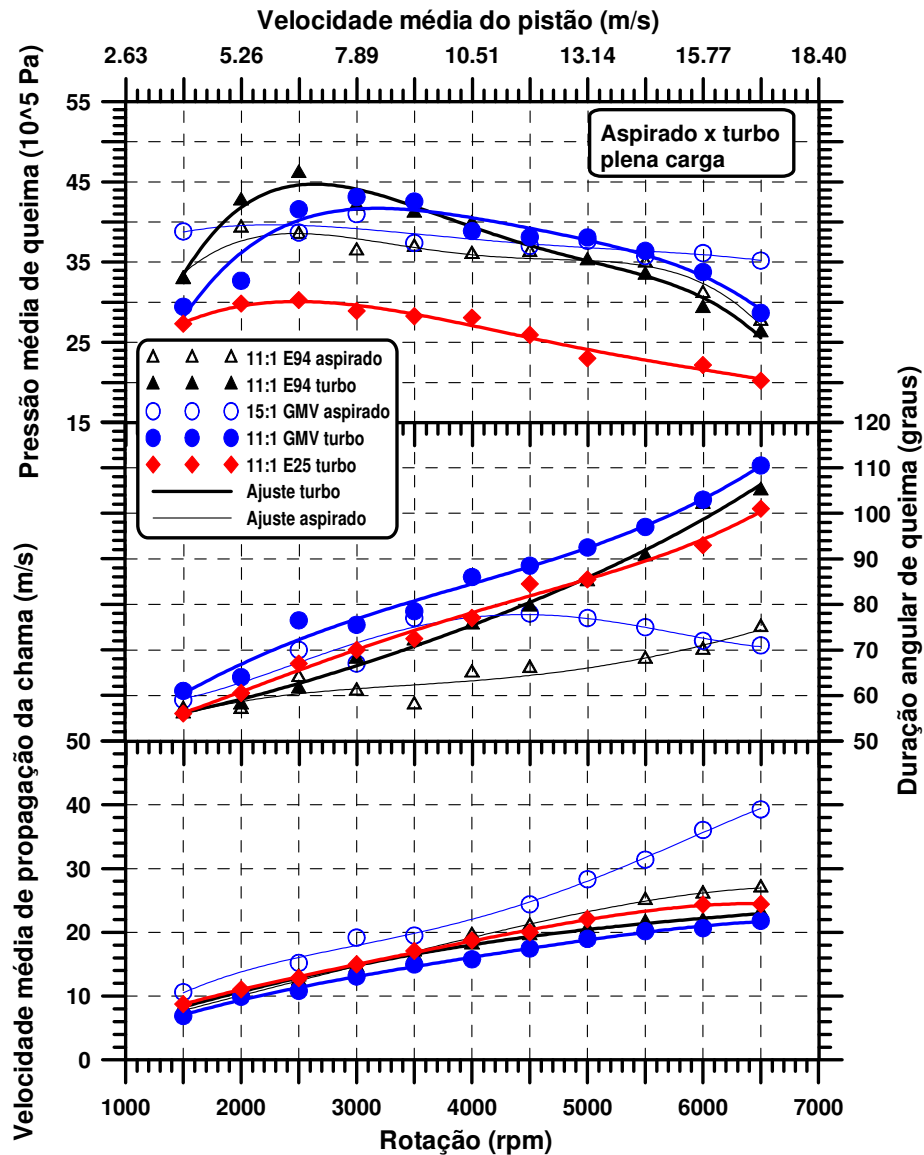


Figura 4.71 – Parâmetros médios de combustão e duração angular de queima

A Figura 4.71 apresenta os parâmetros de pressão média de queima, duração angular de queima e velocidade média de propagação da chama. O crescimento mais acentuado da duração angular de queima para as versões do motor turboalimentado estão diretamente

ligados ao menor crescimento da velocidade de propagação de chama em relação às versões do motor aspirado. A máxima pressão média de queima ocorre na rotação de torque máximo para todas as configurações do motor testadas. A duração angular de queima dos motores aspirados apresenta menor sensibilidade com a rotação devido ao crescimento mais acentuado da velocidade de propagação da chama para regimes de rotação mais elevados.

4.5. Considerações Finais

Os resultados mostraram que a capacidade de resistência à auto-ignição, como amplamente estabelecido pela literatura, tem uma grande influência nos ganhos que cada combustível pode proporcionar. Para reduzir ou mesmo eliminar essas diferenças, uma abordagem seria aumentar a resistência do motor à auto-ignição de tal forma que as variações entre combustíveis sejam irrelevantes para as condições de operação do motor ou, então tratar especificamente as limitações do combustível menos favorecido em detrimento dos outros combustíveis. Para tanto, uma série de medidas está à disposição, independentemente de qual seja a opção escolhida.

A abordagem à turboalimentação utilizada na presente investigação manteve a pressão na admissão, antes da borboleta, a máxima possível em cargas parciais. Como consequência houve a necessidade de se atrasar a ignição em relação ao MBT mesmo em cargas parciais, principalmente com gasolina, pelos motivos que se seguem. Uma vez que em cargas parciais, para o controle da carga, há a necessidade do uso de estrangulamento, por meio do fechamento da borboleta, a expansão do ar que ocorre após a mesma se dá de forma irreversível, isto é, nem todo o trabalho possível é produzido, o que resulta em retenção de energia no ar e, portanto, uma queda de temperatura menor que a máxima possível. Adicionalmente, tanto as medições de pressões no cilindro ao final da exaustão como as taxas de queima nos motores turboalimentados indicaram que há um nível considerável de retenção de gás queimado de um ciclo para outro. A combinação desses dois fatores aumenta a incidência de detonação.

Há combinações específicas dos parâmetros de projeto que refletem o melhor compromisso para a operação do motor naturalmente aspirado e, obviamente, não a são

para os motores turboalimentados. Adicionalmente, os resultados obtidos indicam que seria possível aperfeiçoar o motor para melhor adequá-lo a turboalimentação. As limitadas quedas de temperatura no resfriador e a operação freqüente em LDI tornam evidente a necessidade de aumento da capacidade de resfriamento.

Embora não tenha sido medida, as emissões de óxidos de nitrogênio tendem a ser maiores quando as temperaturas na admissão aumentam. A recirculação de gases queimados resfriados é um recurso muito efetivo no controle desses poluentes. A aplicação de recirculação no motor proposto tende a ser mais efetiva que em motores usuais. Em primeiro lugar, a dependência exponencial da produção dos óxidos com a temperatura significa que o efeito da diluição dos gases recirculados é mais intenso nas temperaturas maiores que ocorrem nesse motor. Aumentando-se a recirculação de gases queimados, há a necessidade de se abrir mais a borboleta para se manter a carga do motor constante, o que reduz o trabalho do compressor e da turbina, reduzindo o aumento da temperatura do ar de admissão e a retenção de gás queimado. Por fim, a presença de gases queimados já resfriados inibem a detonação. O resultado seria operação em MBT com menores perdas por bombeamento, aumentando a eficiência, desde que o sistema de combustão fosse adequadamente desenvolvido para operar com mistura ar-combustível diluída por gases queimados. A recirculação de gases queimados e resfriados também tem sido proposta para controlar a detonação em plena carga.

Em motores com aspiração natural, o coeficiente de descarga da válvula de admissão tem um fator preponderante sobre o desempenho final do motor, com alimentação forçada nem tanto, uma vez que o desempenho pode ser ajustado pela pressão na admissão, sendo que o nível de pressão admissível depende de fatores outros que o coeficiente de descarga da válvula. Um fator de maior importância é a resistência à auto-ignição. Dessa forma, o duto de admissão pode ser aprimorado, projetando-o para aumentar a turbulência e a homogeneidade da mistura ar-combustível no momento da combustão. Em conjunto com um sistema de ignição mais eficaz, a maior turbulência propicia a operação eficiente com um alto nível de recirculação de gás queimado o que, segundo a linha de raciocínio desenvolvida no parágrafo anterior, permite o aumento da eficiência do motor em cargas parciais.

O aumento do atrito com o aumento da pressão na admissão sugere que os componentes mecânicos podem ser aperfeiçoados para operação com turbocompressor. As maiores pressões do ciclo geram maiores cargas sobre o filme de óleo, tendendo levá-lo a uma condição limite ou mesmo rompimento. Adicionalmente, há indicações que a carga térmica sobre o pistão tenha sido excessiva, produzindo temperaturas e expansões além dos valores de projeto, o que também tende a aumentar o atrito. Um projeto adequado das partes mecânicas deve produzir resultados melhores que os encontrados nesse trabalho. Uma eventual incapacidade do pistão e conjunto de anéis em dissipar adequadamente o calor também induz auto-ignição do combustível.

Procurando tirar partido de tecnologias mais avançadas para manter a ignição em MBT sem alívio da turboalimentação, há a opção de operação com mistura pobre em cargas parciais. Adotando-se um processo de combustão mais turbulento com um sistema de ignição mais eficiente, eliminam-se os problemas usualmente associados com misturas pobres: combustão lenta, instável e aquecimento do motor. A situação é análoga à utilização de recirculação de gases queimados. Empobrecendo a mistura para uma mesma carga, a borboleta assume uma posição mais aberta, o que reduz o trabalho de compressor e da turbina, reduzindo o aumento da temperatura do ar de admissão e a retenção de gás queimado. A operação em MBT será mais freqüente apesar de uma alta razão volumétrica de compressão. Em função da maior resistência à auto-ignição da mistura pobre, pode ser interessante a manutenção de certa quantidade de gás queimado visando à redução da emissão de óxidos de nitrogênio. Essa retenção pode ser conseguida com um maior cruzamento das válvulas. Com um desenvolvimento cuidadoso, as pressões na exaustão durante o cruzamento das válvulas excederiam as de admissão apenas em cargas parciais. Em plena carga, a pressão da admissão excederia a de exaustão, propiciando a remoção de grande parte dos gases queimados, reduzindo a tendência à auto-ignição. Para se dispor desse tipo de controle seria necessário o uso de turbina de geometria variável. Essa solução requer tecnologias, ora em franco desenvolvimento, que permitam o controle de emissão de misturas pobres.

É bem estabelecida a maior resistência à auto-ignição de motores utilizando injeção direta. Essa maior resistência está fortemente conectada à redução de temperatura da mistura produzida pela vaporização do combustível. Em motores de injeção indireta, a

literatura indica que grande parte desse benefício é anulado em função do combustível obter calor dos componentes, onde se deposita na forma de filme, para vaporizar. Os resultados obtidos nesse trabalho indicam também ser esse o caso no motor testado. Outro aspecto relevante da injeção direta é eventualmente reduzir o tempo de permanência do combustível em um ambiente quente e oxidante, diminuindo a produção dos precursores da auto-ignição. Portanto, a utilização de injeção direta, principalmente quando se considera o conteúdo de álcool na gasolina brasileira, trará uma grande melhoria à operação do motor multicom combustível e turboalimentado: investigações mais recentes, BROMBERG; HEYWOOD *et al.* (2006) indicaram o aumento substancial da resistência à auto-ignição que a adição de álcool produz na gasolina.

O ciclo Miller, o qual é caracterizado por uma razão de compressão geométrica menor que a expansão, foi a longo tempo proposto para reduzir a pressão e a temperatura do gás ao final da compressão e durante a combustão. Uma maneira de implantá-lo é atrasar o fechamento da admissão, permitindo que parte do ar admitido retorne ao coletor nas fases iniciais da compressão. Caso seja utilizado um resfriador é possível a manutenção da razão de compressão **efetiva**, mantendo-se a quantidade de ar admitida, mas melhorando-se a resistência à auto-ignição. Naturalmente, a maior dependência do turbocompressor traz uma redução da dirigibilidade, a qual não ocorre neste trabalho devido à pequena faixa de operação do motor onde o turbocompressor está inoperante, esta faixa é comumente chamada de *turbolag*. Caso se utilize comando de válvulas de duração variável, pode haver uma substituição substancial da compressão da mistura no cilindro pela compressão no compressor, tornando quase que desnecessário o uso da borboleta, OLIVEIRA (2002) e SCHIRM (2003). A redução da temperatura da mistura eliminaria a ocorrência de LDI em cargas parciais, com o conseqüente benefício na eficiência, na dirigibilidade e na redução da emissão de óxidos de nitrogênio.

Contudo, trabalhos futuros são necessários para determinação dos parâmetros de emissões de poluentes, que podem apontar modificações relevantes no processo de desenvolvimento dos motores multicom combustíveis. Estudos para determinação do comportamento do GNV injetado no coletor em sistemas de injeção indireta e sua correlação com a dinâmica do ar no coletor de admissão são necessários.