

## 5 Resultados e discussões

### 5.1. Análise do funcionamento do modo Diesel

Determinaram-se as curvas de desempenho para o modo Diesel, lembrando que o motor é estacionário e o torque máximo produzido a plena carga é de  $12,5 \text{ N}\cdot\text{m}$  a uma rotação de 2500 RPM na qual se geram 3,3 kW, isto segundo o fabricante (Manual Lintec D5).

A Figura 23 apresenta a variação do torque, potência, consumo específico de combustível (cec) e rendimento térmico, com a rotação. Podemos observar, que o torque máximo fornecido pelo fabricante na rotação especificada acima, não foi atingido, isso devido provavelmente ao desgaste do motor, já que foi utilizado em diferentes ensaios (desgastes em válvulas, came e demais componentes do motor). O torque máximo atingido foi de  $10,24 \text{ N}\cdot\text{m}$ , que corresponde a uma rotação de 2600 RPM.

A potência máxima alcançada foi de 2,8 kW, o consumo específico se encontrou próximo a  $260 \text{ g/kWh}$  nos pontos de maior torque.

O maior rendimento térmico atingido foi de 32,73 %, valor que é considerado baixo para um motor de combustão de ciclo Diesel (Heywood, 1988).

Segundo especificações do fabricante, o motor foi projetado para trabalhar em uma rotação constante, por este motivo resulta impossível comparar estes resultados com o modo HCCI, processo onde se geram baixos torques, principalmente por trabalhar com misturas fracas em combustível.

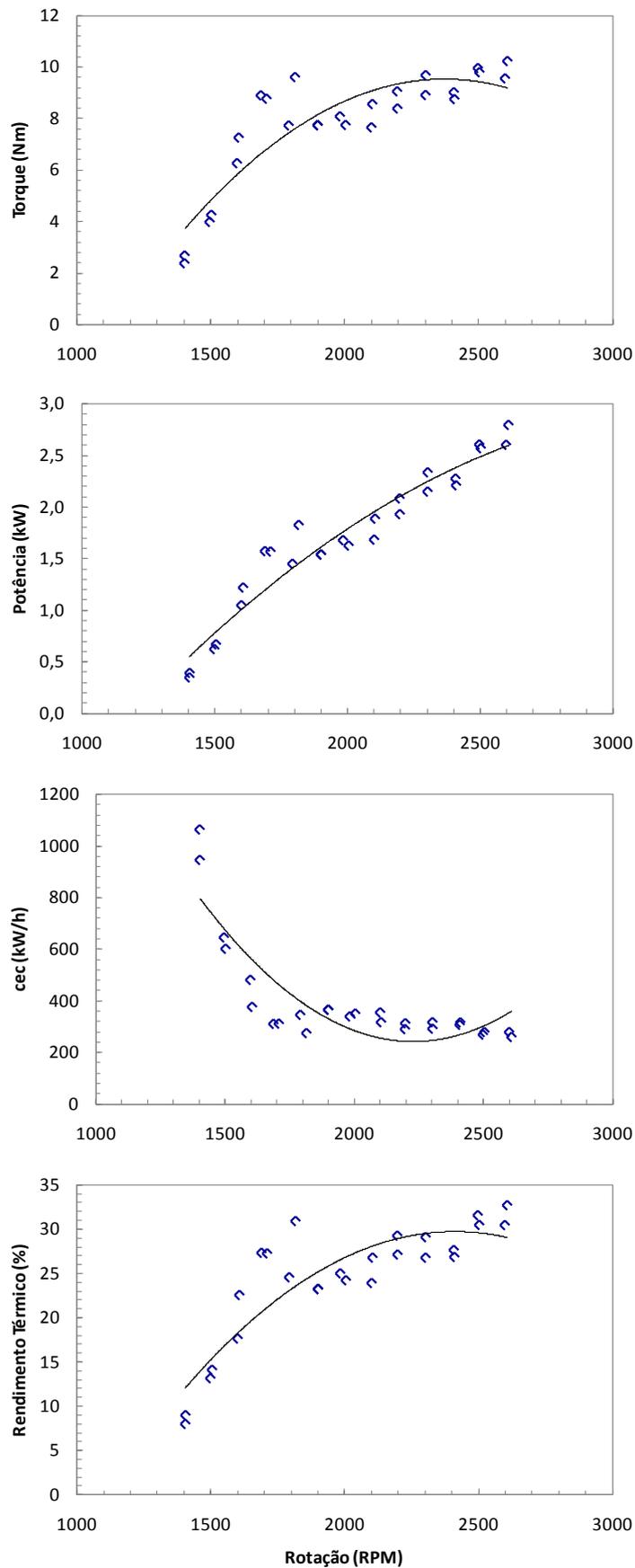


Figura 23 - Torque, Potência, cec e Rendimento Térmico - Rotação (RPM), modo Diesel convencional plena carga.

Os resultados obtidos permitem observar a dispersão dos dados experimentais e verificar o funcionamento normal do dinamômetro de bancada.

## **5.2. Avaliação do desempenho do modo HCCI**

### **5.2.1. Condições de operação**

Como foi descrito no capítulo anterior, foram realizados ensaios experimentais para avaliar o funcionamento do motor Diesel em modo HCCI, mudando basicamente a temperatura de entrada do ar e a quantidade de combustível injetado no coletor, esta última controlada pelo Duty Cycle (controle de vazão mássica) no bico injetor. As considerações sobre a quantidade de combustível presente na mistura foram feitas usando a constante de excesso de ar ( $\lambda$ ).

À grande dificuldade no controle do processo de combustão HCCI, se adicionou não ter controle da temperatura na parede do motor, já que o sistema de arrefecimento funcionava por convecção forçada de ar. Isto traz como consequência, quando a rotação do motor é alta, que a temperatura do óleo e da parede também aumentem. Sendo o comportamento diferente quando se trabalha a baixa rotação (onde se tem maior tempo de exposição da área do cilindro para perdas de calor). O fato anterior condicionou muito a estabilidade do processo, mesmo assim, foram atingidos pontos de operação estável, onde se fez a análise da combustão.

Para conseguir operar em modo HCCI precisa-se atingir as condições de auto-ignição, isto é, um ambiente térmico adequado. É por isto que não foi possível uma partida em frio, então, utilizou-se o modo Diesel convencional para acondicionar o motor até atingir uma temperatura maior a 70 °C no óleo e maior a 100 °C no bloco do motor. A variação da temperatura do óleo em função da rotação é apresentada na Figura 24. Pode-se observar um incremento máximo da variação de temperatura ( $\Delta T$ ) de 7°C na temperatura de óleo, isto quando se aumenta a temperatura de alimentação de 75°C até 95°C.

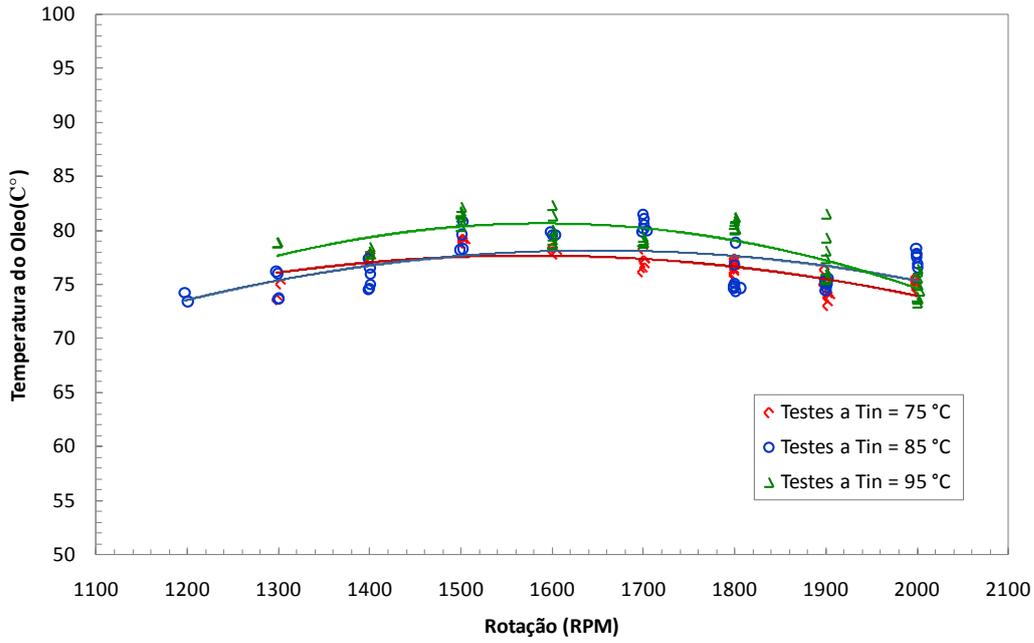


Figura 24 – Temperatura do óleo com rotação às temperaturas de alimentação de 75, 85, e 95 °C

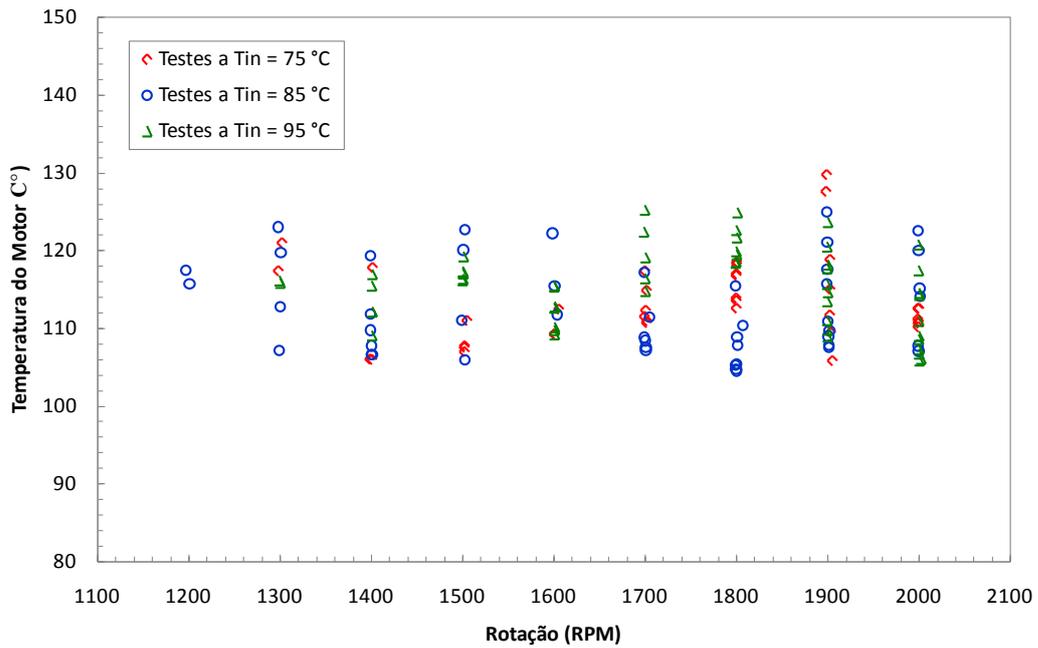


Figura 25 - Temperatura do bloco com rotação às temperaturas de alimentação de 75°C, 85°C, e 95 °C

Na Figura 25 se apresenta a variação da temperatura do motor com a rotação. O sensor de temperatura foi colocado no bloco, perto da câmara de combustão. A grande variabilidade para esta temperatura indica que esta variável não depende da temperatura de alimentação. A dispersão dos dados é devida

fundamentalmente aos diferentes valores de lambda, com os quais se trabalhou. Então, diferentes quantidades de combustível presentes na mistura, afetam diretamente a temperatura do bloco.

Segundo Chang et al (2005) o limite de estabilidade da combustão dos motores HCCI depende mais da temperatura da parede do cilindro, que da temperatura de alimentação. Por isto, seria mais conveniente a utilização de um motor resfriado por água para poder fixar esta temperatura.

A Figura 26 mostra a variação do fator lambda para diferentes rotações. Pode-se observar que para o HCCI os valores de lambda se encontraram entre 2 até 4, o qual concorda com a faixa de operação que é apresentada por Zhao H. ,(2007). As linhas descontínuas indicam a média do lambda utilizado em cada temperatura de alimentação. O aumento na temperatura de alimentação limitou a quantidade de combustível a ser injetado, isso é explicado em função do ponto onde acontece a ignição. Maiores temperaturas de ingresso adiantam o tempo de inicio da auto-ignição, o incremento de combustível tem o mesmo efeito. Agora, se temos concentrações de combustíveis consideráveis com altas temperaturas na alimentação a probabilidade de atingir a zona de detonação é muito alta, dentro de uma região onde o torque não é o melhor nem o mais estável, com consequente dano na estrutura do motor, como foi apresentado no trabalho de Hiraya, Hasegawa, Urushihara, Liyama, & Itoh, (2002). Pelo anterior, se deve procurar um equilíbrio entre o aumento ou diminuição destas variáveis, em função de uma combustão estável e de alta geração de torque. Na Figura 26 a maior quantidade de combustível (lambda próximo de 2,5) para a menor temperatura de entrada (75 °C) vem explicada pela maior quantidade de calor liberado, nas fases prévias à auto-ignição, do combustível presente.

À temperatura de 85 °C os valores de lambda aumentam pelo discutido acima, e aumentaram ainda mais em 95 para não chegar a zonas instáveis de detonação.

Nota-se que os valores de lambda diminuem quando se aproximam à zona onde a eficiência volumétrica é máxima. Nesta faixa se dispõe de maior quantidade de oxigênio para queimar maior quantidade de combustível.

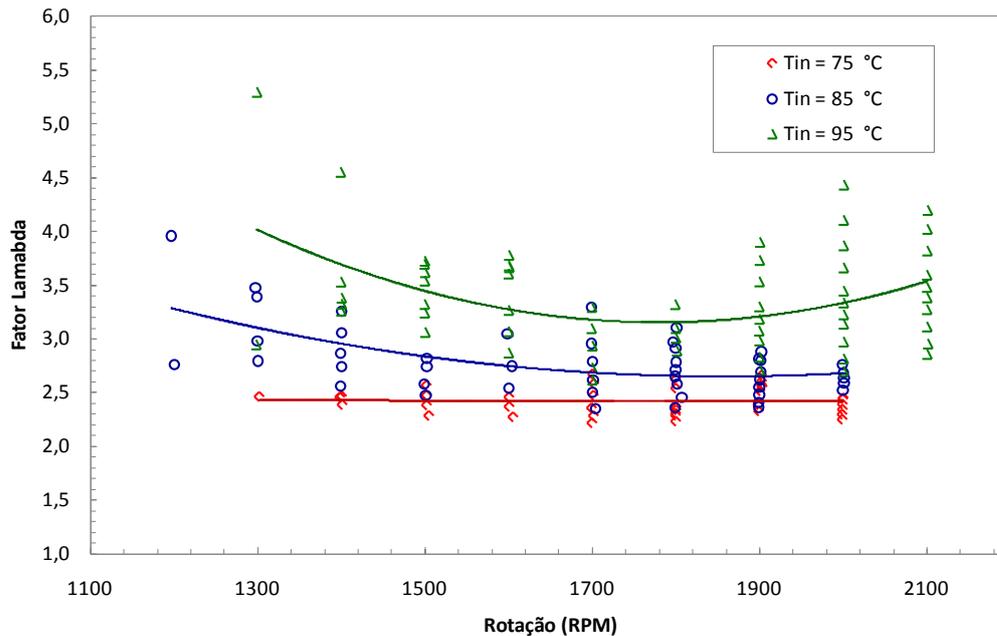


Figura 26 - Fator Lambda com rotação (RPM) a diferentes temperaturas de alimentação.

O efeito da temperatura de ingresso na eficiência volumétrica é considerável. O fato de incrementar a temperatura do ar faz com que a densidade diminua e com isso a quantidade de oxigênio que o processo de combustão poderia dispor. Ter utilizado um motor com alta razão de compressão permitiu a utilização de baixos valores na temperatura de ingresso da mistura, já que muitos artigos sinalam temperaturas de entrada a mais de 150 °C com razões de compressão entre 10:1 e 14:1 (Zhao H. , 2007).

A Figura 27 mostra o efeito da temperatura no fluxo de ar na entrada ao motor através da eficiência volumétrica. Como pode ser visto, o aumento da velocidade aumenta a eficiência volumétrica até um ponto onde os efeitos de atrito combinados à velocidade de abertura e fechamento de válvulas, façam diminuir seu valor, o maior valor de eficiência volumétrica acontece entre 1800 até 2000 RPM.

Segundo o Heywood (1985) no caso de motores de PFI, a quantidade de combustível influencia também na eficiência volumétrica, mas no caso de um combustível como a gasolina o efeito é desprezível. Assim, só fica o efeito da temperatura de entrada.

O aumento da temperatura até 75 °C faz com que a eficiência diminua em média 7 % quando se compara a uma temperatura de entrada de 25 °C, sem

aquecimento. Já um aumento até 95 °C no ingresso de ar provoca uma diminuição de até 12,5%, isto na região donde a eficiência volumétrica é máxima.

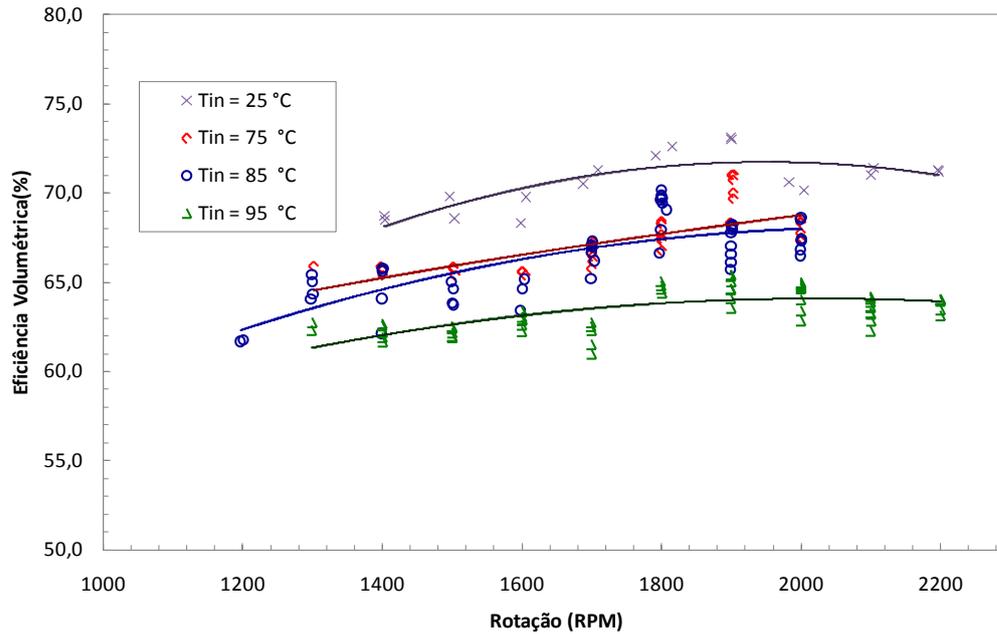


Figura 27 - Eficiência volumétrica com Rotação (RPM) às diferentes de alimentação (25, 75, 85, e 95).

### 5.2.2. Performance do HCCI

A região onde se testou o motor e conseguiu se obter a auto-ignição controlada se encontra entre 1200 e 2200 RPM. Maiores faixas de velocidade foram atingidos quando se elevou a temperatura de alimentação, isto para a temperatura de 95 °C.

Na Figura 28 se apresentam os torques obtidos para as três temperaturas de entrada. Onde se ressalta os pontos de cor azul para a temperatura de 85 °C e se coloca a linha de tendência para estes. Os pontos em vermelho correspondem à temperatura de 75 °C na entrada, na qual se conseguiu a injeção das maiores quantidades de combustível. Os pontos correspondentes à temperatura de 95 °C se apresentam em cor verde.

A tendência da média dos valores a 85 °C (linha descontínua) foi similar para as três temperaturas, podendo ser visto que o maior torque gerado se encontra na faixa donde a eficiência volumétrica é máxima. Na Figura 29, pode ser visualizado melhor o efeito combinado sobre o torque, a esta temperatura, quando se muda a rotação e a quantidade de combustível da mistura. Nessa temperatura

de ingresso se conseguiu obter os maiores níveis de torque, na faixa de velocidades estudada. Quando se incrementa a temperatura de alimentação o ponto de inicio da ignição é adiantado, permitindo obter maiores valores de temperatura ao interior do cilindro e ter maior tempo para a oxidação das espécies presentes na fase de combustão (HTHR). Em resumo, se tem maior quantidade e combustível queimado, resultando em maior geração de torque.

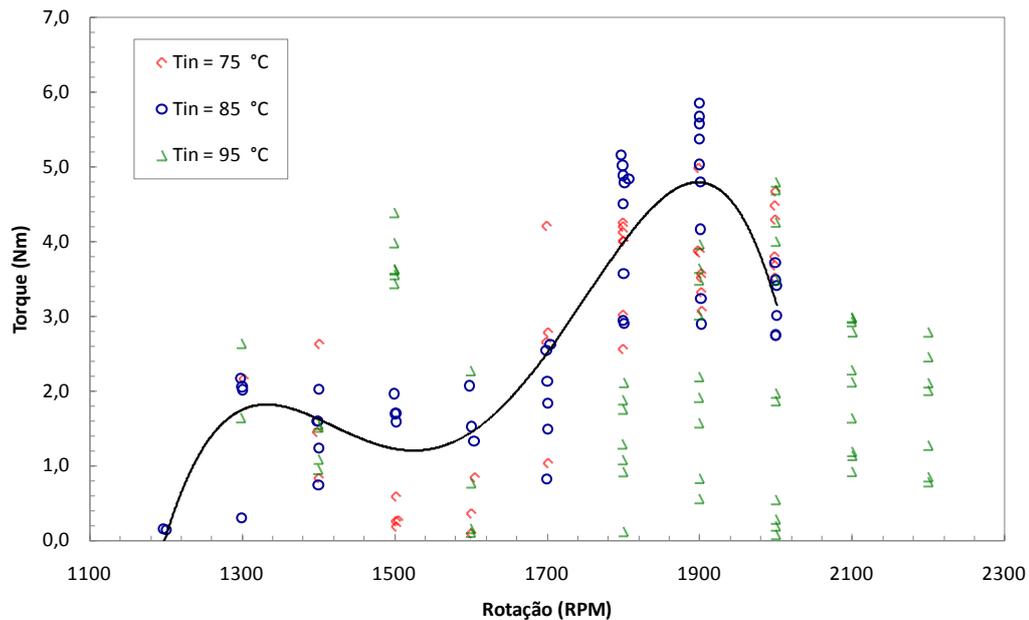


Figura 28 - Torque com Rotação (RPM) às diferentes temperaturas de ingresso (75, 85 e 95 °C).

Quando se incrementa a temperatura de ingresso até 95 °C a grandeza dos torques obtidos diminui principalmente pelo fato de ter se operado com altos valores de lambda, é dizer que misturas fracas em combustível podem terminar facilmente em falha de ignição.

Mesmo trabalhando com maiores concentrações de combustível na mistura na temperatura de 75 °C se obteve torques baixos, isso será explicado na seguinte seção. Os pontos que apresentaram torque negativo, que podem ser vistos nas planilhas do apêndice 3, não foram considerados nas figuras apresentadas; o torque gerado pela combustão nestes pontos só serve para vencer os efeitos inerciais e de fricção do motor.

Elevadas concentrações de combustível, junto com fatores que permitem atingir maiores valores de pressão e temperatura no interior do cilindro fazem

acontecer um adiantamento de auto-ignição, podendo gerar detonação (Alkidas, 2007). Esta região foi percebida pelo som, vibração da bancada, estabilidade no registro de dados do torque e perfis da curva de pressão interna.

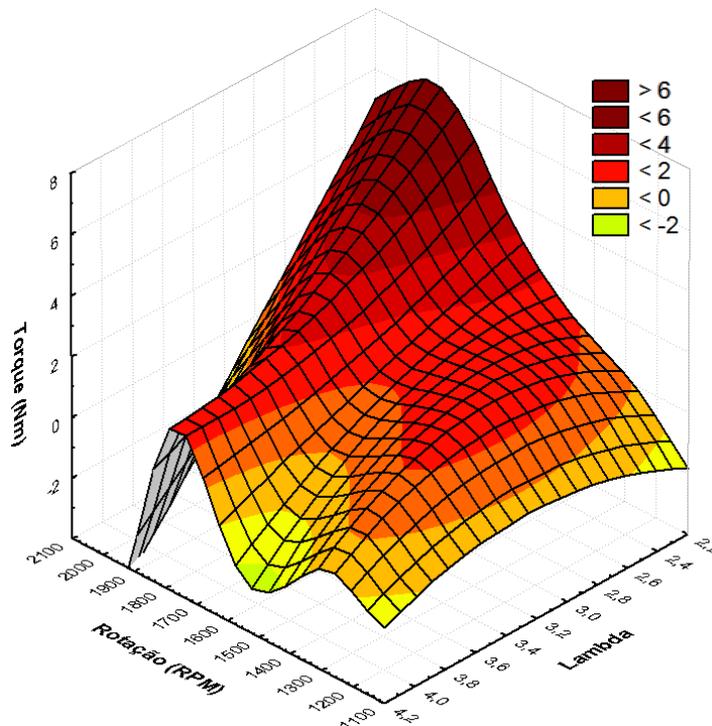


Figura 29 – Torque em função da rotação e o fator lambda a 85 °C

A dispersão obtida para o torque em função do lambda utilizado em cada uma das temperaturas de ingresso é apresentada na Figura 30. Esta figura permite identificar com maior facilidade os valores para o fator lambda, nos quais se operou para as três temperaturas de ingresso. Por exemplo, a maior quantidade de pontos para a temperatura de 95 °C encontra-se acima de 2,8 no valor de lambda.

A análise da Figura 31, que relaciona o coeficiente de variação do torque com a rotação, permite explicar porque, na seguinte seção deste capítulo, a faixa de rotação foi restrita para valores entre 1800 até 2000 RPM. Em baixas velocidades menores a 1800 RPM o COV apresenta valores muito altos, para estes pontos o registro do torque é muito instável, nestas velocidades segundo a Figura 26 se esteve trabalhando com fracas ou consideráveis concentrações de combustível em função da temperatura de ingresso. Onde se podem ter apresentado falhas na ignição ou detonações (com presença de baixos torques gerados, alto consumo de combustível e baixo rendimento térmico). É daí que vem os altos valores para o COV.

O anterior pode ser evidenciado na zona estável com uma rotação de 1900 RPM, onde a variação da quantidade de combustível pode levar desde baixos valores de COV até muito altos, isso principalmente quando se trabalha com misturas pobres de combustível (a 95 °C). Isso contrasta com a idéia de ampliar a faixa de trabalho por outros médios, como EGR que tem uma provada eficácia.

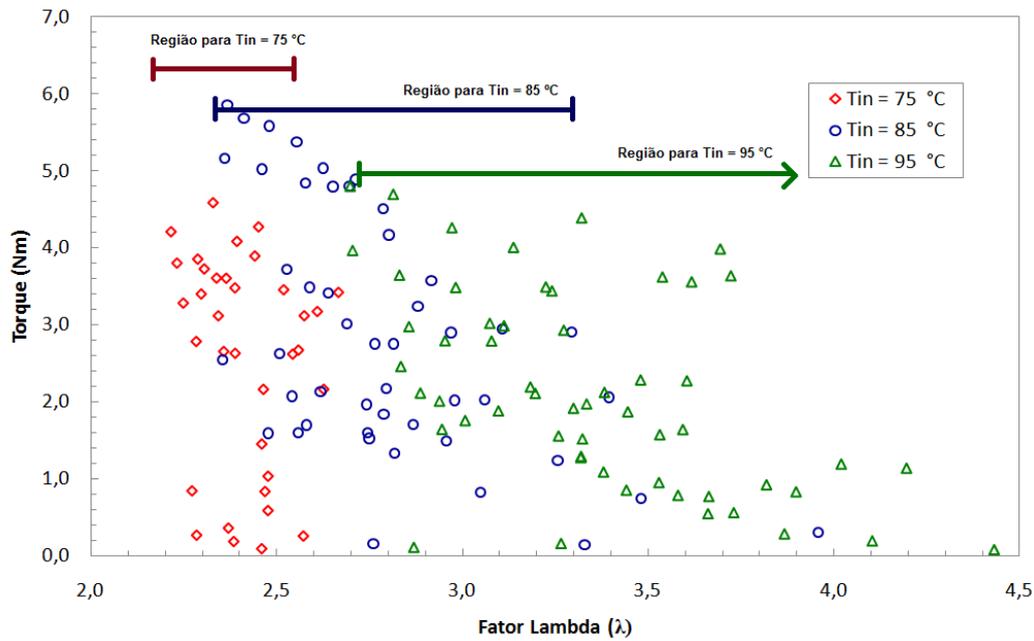


Figura 30 - Torque – Fator Lambda às diferentes temperaturas de alimentação (75, 85 e 95 °C).

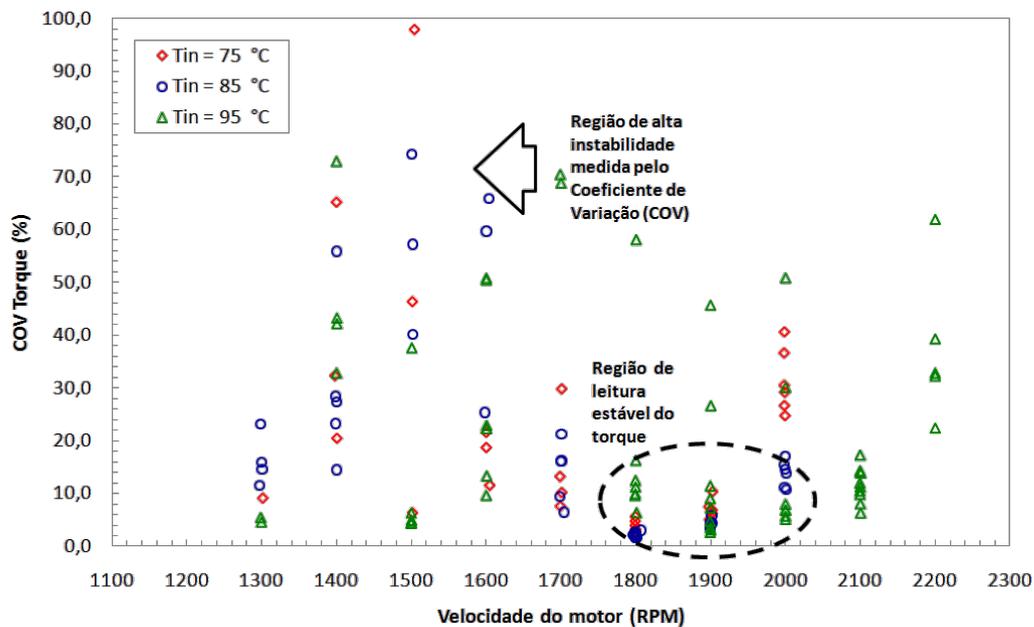


Figura 31 – Coeficiente de variação do torque (COV) – Rotação do motor às diferentes temperaturas de alimentação (75, 85 e 95 °C).

Na Figura 32 onde também os pontos a 85 °C tem sido ressaltados, e a média polinomial deles se apresenta como uma linha descontínua. Nota-se que na região onde o torque foi estável, coincide com os maiores rendimentos térmicos obtidos. Observa-se o mesmo comportamento para as outras duas temperaturas. Como já foi dito acima se encontra na maior disposição de ar neste intervalo de rotação.

Na temperatura de 95 °C, onde menor quantidade de combustível foi injetada, se obteve uma eficiência comparável às outras duas temperaturas que operaram com maiores quantidades de combustível. Os torques são também comparáveis, o que resulta interessante já que a esta temperatura se teve uma maior faixa de trabalho.

Foram obtidos altos rendimentos térmicos para alguns pontos; quando se trabalha a 75 °C, os quais são comparáveis aos de maiores temperaturas na alimentação (entre 20 e 35 %). Isso pode ser explicado pelo efeito direto que tem a quantidade de combustível de permitir atingir maiores valores de liberação de calor na fase de baixa temperatura (LTHR), mesmo que está fase seja considerada para muitos pesquisadores desprezível, por se tratar de gasolina (Yao, M et al. , 2009). Na fase de alta temperatura (HTHR) também se apresentará maior liberação de energia.

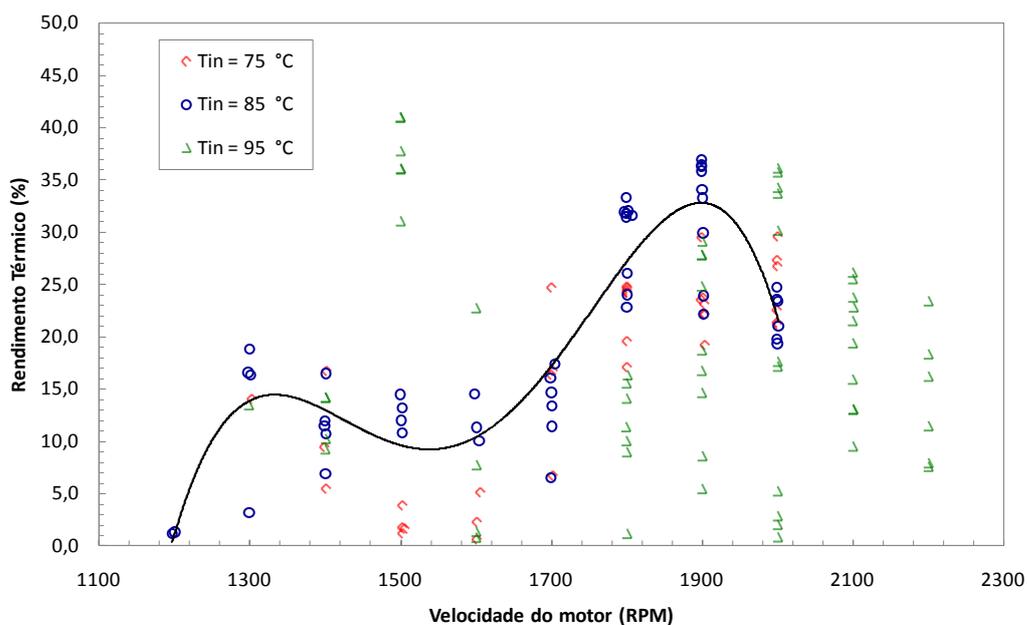


Figura 32 - Rendimento Térmico – Rotação do motor às diferentes temperaturas de alimentação (75, 85 e 95 °C).

O incremento da temperatura de alimentação faz com que a faixa de trabalho para a quantidade de combustível presente na mistura seja aumentada para 85 e 95 °C. Porém, quando a temperatura se incrementou, os valores de lambda também se elevaram. Isto trouxe como resultado a diminuição do torque que foi produzido, além disso, o aumento da temperatura também fez com que o rendimento se incremente.

A Figura 33 é referencial, e permite enxergar melhor a variação do consumo específico em função da velocidade do motor e do fator lambda para a temperatura de 85 °C. Pode-se ver claramente que os valores de *cec* são mantidos baixos (< 500 g/kWh, região de cor verde obscuro na figura), com lambdas menores a 3,4 e a rotações acima de 1700 RPM. Quando o fator lambda é maior de 3,2 e a velocidade é baixa (menor a 1700 RPM) pode se ver um rápido aumento do *cec* até valores muito altos. Isso pode ser entendido como falha de ignição para estes pontos, faixa vermelha na figura, onde existe combustão e os torques gerados não chega a vencer as cargas da fricção.

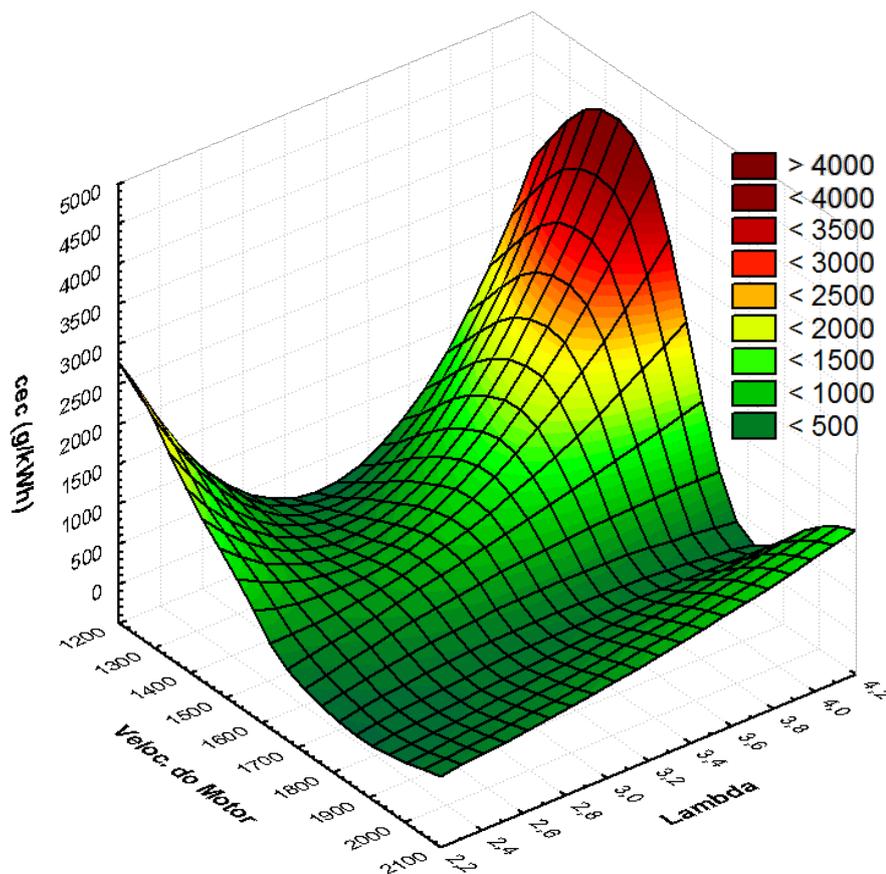


Figura 33 - Consumo específico em função da velocidade do motor e lambda à temperatura de 85 °C

Uma menor temperatura na alimentação permitiu obter maiores valores na temperatura de escape do motor, principalmente pelo fato de ter permitido a injeção de maiores quantidades de combustível, que permitiu a geração de maior quantidade de substâncias que elevaram a capacidade calorífica da mistura de produtos, os quais conservaram o calor do interior (pontos em vermelho, Figura 34). Uma maior temperatura na alimentação não está associada diretamente com a geração de maiores temperaturas no escapamento. O fator responsável pelos menores valores à temperatura de 95 °C na alimentação são as fracas misturas de combustível, nas quais se conseguiu operar o HCCI. Aliás, aqui também poderia influir o calor sensível das misturas de produtos que se tinham maior quantidade de combustível.

É importante também distinguir que a maior temperatura conseguida se encontrou ao redor de 220 °C, quando no modo diesel convencional as temperaturas são maiores a 310 °C, isto será discutido na última seção do capítulo.

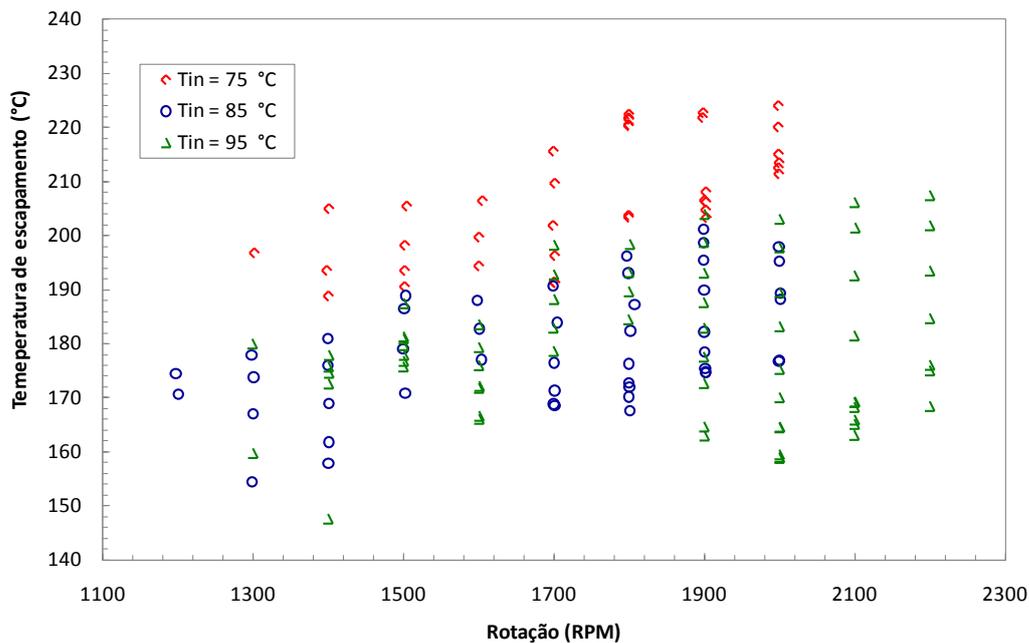


Figura 34 - Temperatura de escapamento – Rotação do motor às diferentes temperaturas no ingresso (75, 85 e 95 °C)

### 5.2.3.

#### **Análise do Desempenho em modo HCCI com curvas de pressão interna**

O fato de não se ter conseguido colocar em fase o registro da pressão interna com o ângulo do eixo de manivelas não permitiu fazer uma análise com muita precisão do momento certo onde acontece a ignição, tendo como referência o TDC, mas isso não impede de fazer uma análise de comparação de variações no início de ignição quando se muda alguma das variáveis consideradas no presente estudo, como a temperatura da entrada e a quantidade de combustível injetado. Assim se apresenta nesta seção uma análise das curvas de pressão indicada em função do tempo para a melhor faixa de operação (1800, 1900 e 2000 RPM).

Após feita a análise das pressões internas, são apresentadas as variáveis de desempenho para todos os pontos obtidos nesta faixa como: a potência, o consumo específico de combustível e o rendimento térmico.

#### 5.2.3.1.

##### **Efeito das variáveis de controle**

###### *Efeito da injeção do combustível.*

Tem-se encontrado dois comportamentos característicos para as curvas de pressão, um dos quais não é muito discutido na bibliografia, e se apresentou à temperatura mais baixa ensaiada (75°C), o segundo é amplamente discutido nas referências, para as outras duas temperaturas (85 e 95 °C).

Dos pontos que apresenta a Figura 35 pode-se perceber uma maior faixa de operação quando a temperatura é incrementa pelos efeitos discutidos na seção anterior. Na temperatura de 95 °C, onde as concentrações de combustível foram as menores, as pressões máximas que se geraram foram maiores que os pontos que continham maiores quantidades de combustível.

Pode ser visto também a tendência de aumento da pressão máxima, quando a quantidade de combustível aumenta para as três temperaturas. Só é percebida uma tendência anormal para 1900 RPM à temperatura de 75 °C

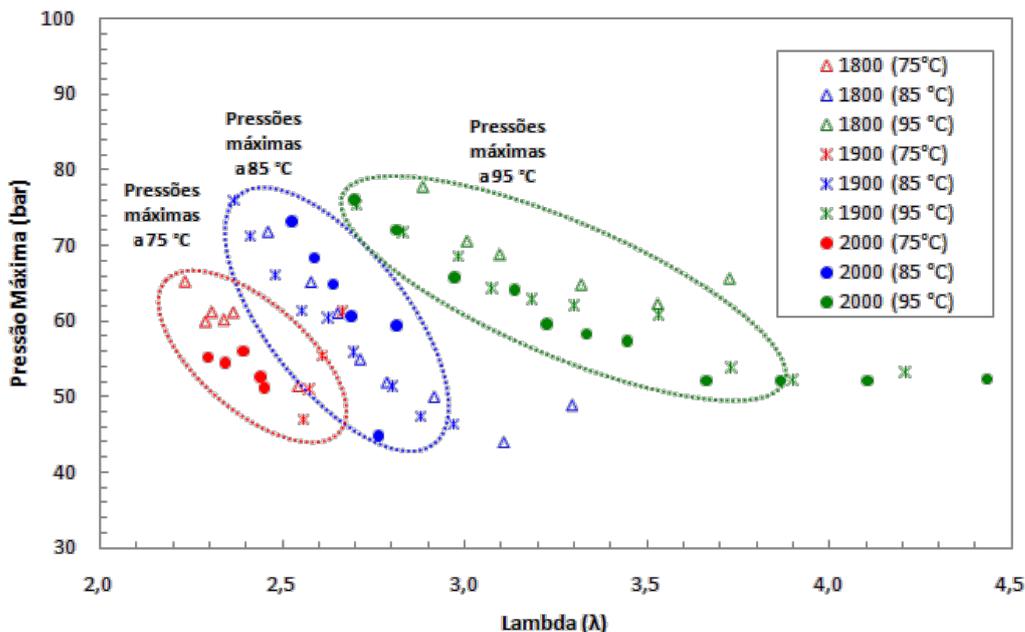


Figura 35 – Pressão máxima – Lambda para as rotações na faixa mais estável para as três temperaturas.

Na Figura 36 se apresentam os valores para a pressão interna à temperatura de 75 °C; pode-se distinguir que o efeito de incremento da quantidade de combustível na mistura tem duas consequências. O primeiro comportamento aparece quando se aumenta a quantidade de combustível na mistura, isto faz com que a pressão ao interior diminua com risco de poder ocasionar perda da combustão (de 2,67 até 2,51 lambda). Quando se atinge um  $\lambda = 2,39$  se gera uma elevada pressão interna com sinais de detonação. Este comportamento pode ser explicado pelo fato de que, nesta baixa temperatura de alimentação, se tem uma influência dos calores sensíveis dos produtos gerados pela compressão antes de atingir a auto-ignição.

Como ser visto na Figura 37, os valores para o calor sensível das espécies menores que vem da quebra de uma molécula maior de combustível aumentam com a temperatura. Assim fazem sentir sua presença com a diminuição da temperatura máxima que poderia ser atingida ao interior do cilindro. Isto provoca maior atraso no ponto de auto-ignição, e quando isto acontece o pistão já se encontra descendo, impedindo que a pressão se incremente, e com isso a temperatura. Este comportamento foi também percebido por Machrafi & Cavadiasa, 2008.

Segundo a Figura 37, os componentes do ar não teriam influência sob a combustão, e seu calor específico permanece quase constante. Um aumento

considerável da quantidade de combustível na mistura faz com que esta restrição seja superada, mas se apresenta o risco de detonação, como se observa na Figura 36, para os menores valores de lambda.

Outra característica importante das curvas de Figura 36 se encontra no ponto de auto-ignição, que acontece após do TDC, é dizer com um considerável atraso, onde os torques quantos os rendimentos, são comparáveis aos que se consegue às outras temperaturas ensaiadas (85 e 95 °C para a mesma rotação). Isso poderia ser explicado pela rápida combustão, característica do processo, quando acontece na fase de expansão e dá um maior aproveitamento na energia liberada na combustão. Por exemplo, o MEP obtido a um  $\lambda = 2,67$  é comparável ao de  $\lambda = 2,39$ , só que este último acontece com um perfil de detonação e claramente adiantado do TDC.

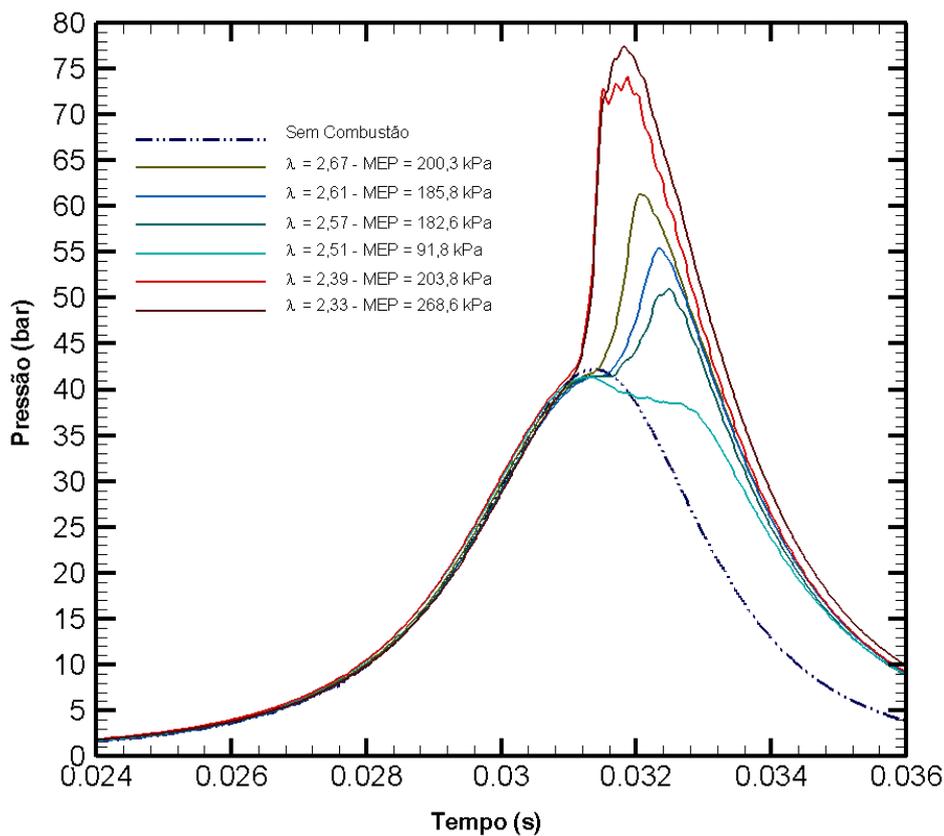


Figura 36 – Pressão interna com tempo a diferentes valores de lambda a 75 °C de temperatura de entrada @ 1900 RPM.

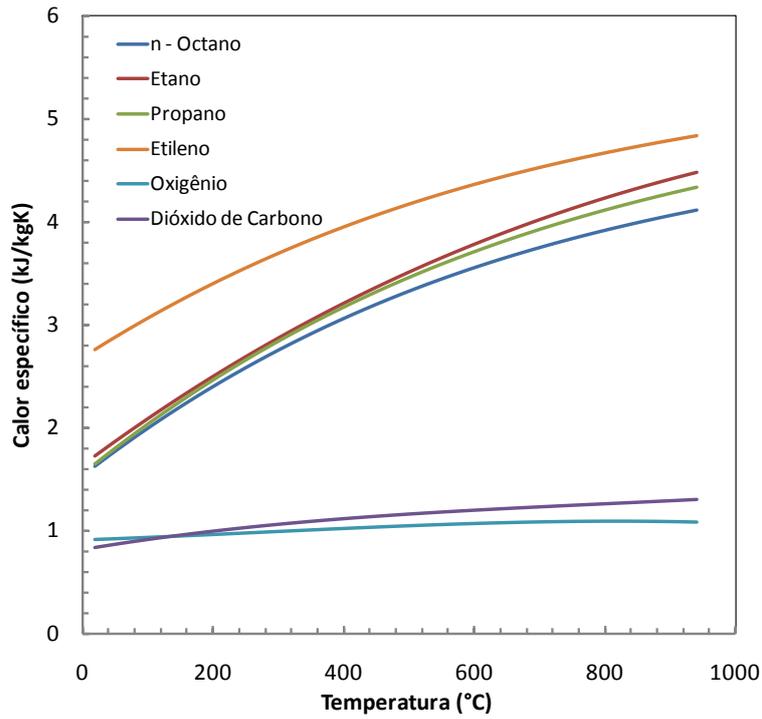


Figura 37 – Calor específico – temperatura para diferentes espécies de gases presentes na fase de baixa temperatura (LTHR). (Wyllen, V., 2003)

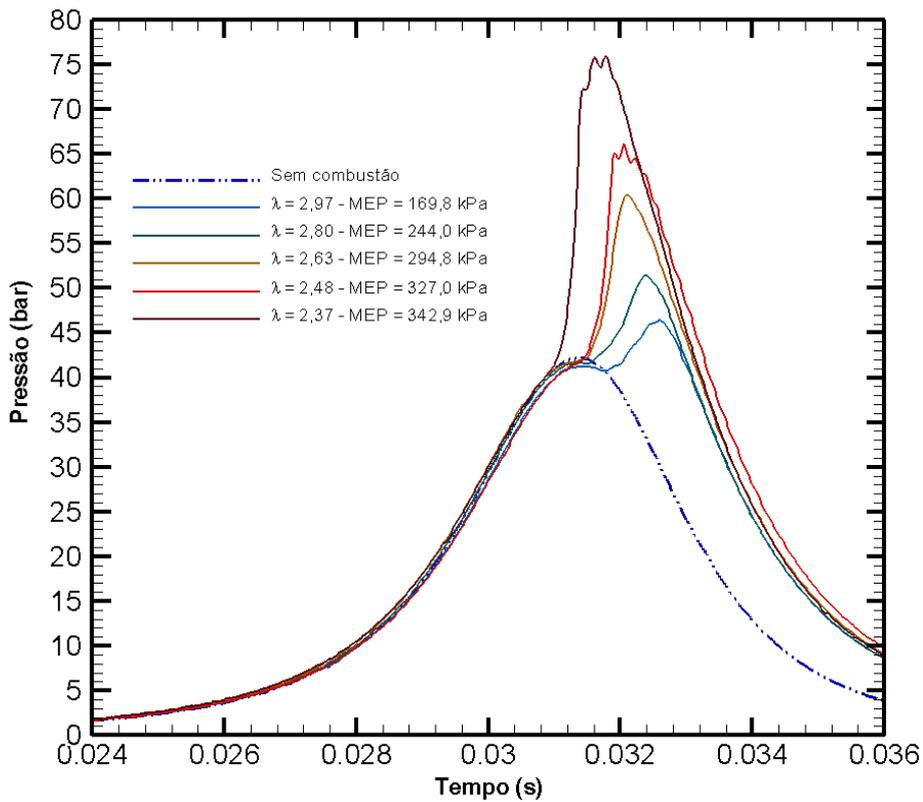


Figura 38 – Pressão Interna com tempo a diferentes valores de lambda e 85 °C de temperatura de ingresso @ 1900 RPM.

A Figura 38 e Figura 39 mostram o perfil das curvas de pressão para a mesma rotação de 1900 RPM às outras duas temperaturas 85 e 95 °C. Estas curvas apresentam o segundo efeito, como consequência do aumento da quantidade de combustível. Assim, nota-se o adiantamento do ponto de auto-ignição. Isto poderia ser explicado pela liberação de maior quantidade de calor (fase de LTHR) que permite atingir o ponto de auto-ignição mais cedo, vencendo os efeitos de aumento do calor sensível.

Com a variação da quantidade de combustível se conseguiu mexer no ponto de início da combustão para antes ou após do TDC. Para aqueles que aconteceram ligeiramente antes do TDC conseguiram uma maior MEP, sem presença de detonação. Já os pontos que apresentaram um adiantamento considerável antes do TDC foram aqueles que apresentaram perfis de detonação, produzindo também consideráveis valores de MEP. Quando se olha para magnitude das pressões registradas no ponto com  $\lambda = 2,37$ , o valor de MEP não é muito maior àquele que acontece no TDC com  $\lambda = 2,48$ , ver Figura 38.

Os pontos onde a combustão acontece após do TDC apresentaram consideráveis valores para a MEP, significando que menores quantidades de combustível podem ser utilizadas para a geração de níveis de torque consideráveis, já que o trabalho produzido é mais bem aproveitado, pelo fato de ser uma combustão rápida (Alkidas, 2007).

O perfil de detonação é caracterizado pelos picos abruptos de pressão presentes em uma mesma curva. Isto é bem percebido na Figura 39, onde a máxima quantidade de combustível admitida pelo motor nestas condições faz com que perfis de detonação se apresentem, colocando em risco à estrutura do motor.

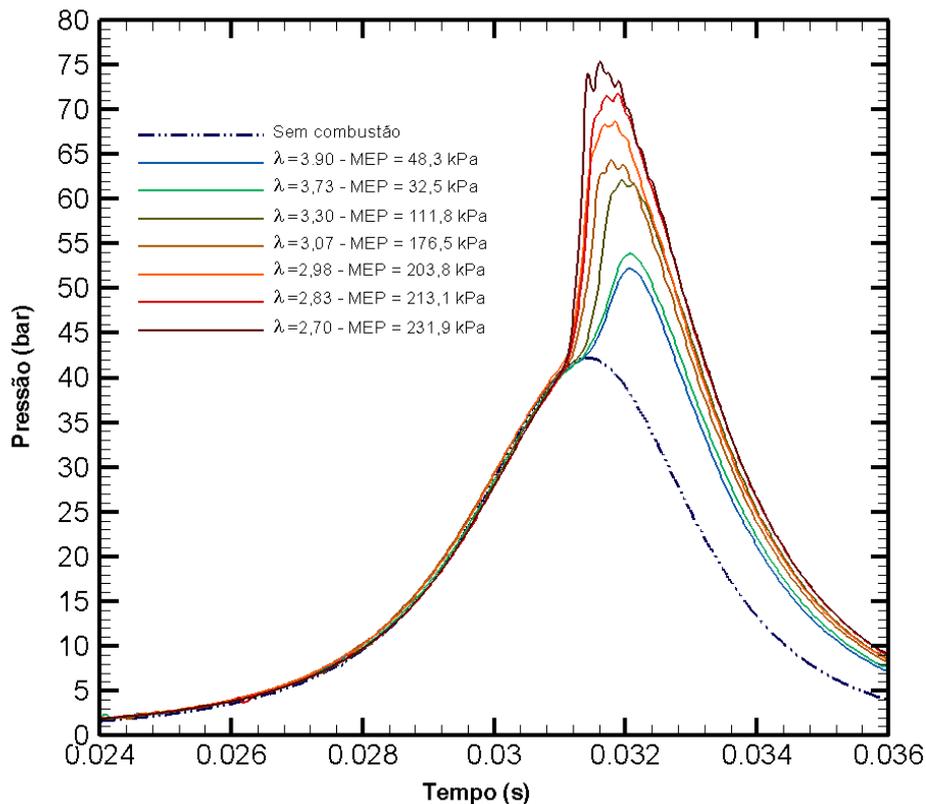


Figura 39 – Pressão Interna com tempo a diferentes valores de lambda a 95 °C de temperatura de ingresso @ 1900 RPM.

Quando se faz uma análise das curvas de pressão da Figura 39, onde a temperatura na alimentação aumenta até 95 °C, pode-se apreciar novamente um deslocamento do ponto de auto-ignição ao se variar a quantidade de combustível. A sensibilidade da combustão nestas condições, quando se muda o valor de lambda, é bem observada nos valores de MEP. O nível de pressões máximas atingidas aumenta com a quantidade de combustível injetada. A curva de pressão que é mais rica ( $\lambda=2.70$ ) apresenta perfis característicos à detonação. Isto limitou a injeção de maiores quantidades de combustível. Pode-se perceber também que o início da combustão se dá sempre antes do TDC.

As Figura 40 e 41 mostram o comportamento normal de aumento dos valores de pressão interna com o aumento da quantidade de combustível presente na mistura. Também é visto que à menor velocidade (para esta faixa, 1800 RPM) pode-se obter geração considerável de torque, mesmo com perfis de pressão baixos. O tamanho da faixa de trabalho pode ser medida indiretamente pela quantidade de pontos para estas duas velocidades.

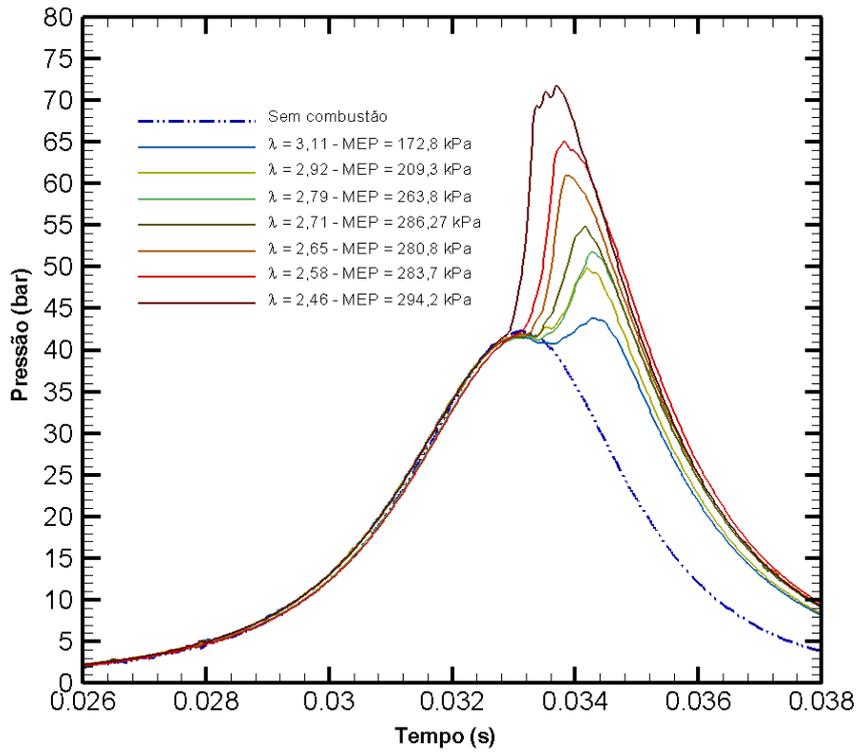


Figura 40 - Curvas de pressão - tempo para diferentes valores de lambda a 85 °C de temperatura de ingresso @ 1800 RPM.

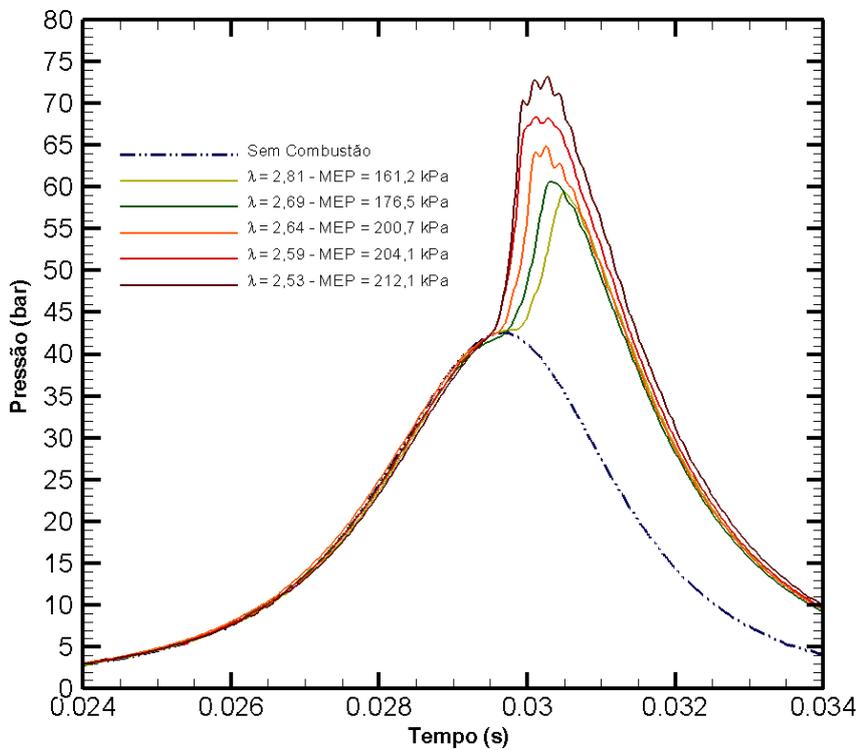


Figura 41 – Curvas de pressão – tempo para diferentes valores de lambda a 85 °C de temperatura de ingresso @2000 RPM.

***Efeito da temperatura de ingresso.***

O efeito do aumento da quantidade de combustível, como já foi discutido, provoca um avanço no tempo de início da combustão. Quando a esse efeito se soma a elevação da temperatura de ingresso, o resultado é um notório adiantamento da combustão. Isto pode ser evidenciado através dos valores de pressão interna, os quais são mostrados na Figura 42.

Assim, quando se tem uma mistura com lambda igual a 2,97 a 85 °C na temperatura de ingresso, e se passa a 95 °C, se vê um adiantamento considerável do início da auto-ignição, onde o valor de MEP se incrementa em 34 kPa (17% maior). Para a curva que tinha um  $\lambda=2,7$  se pode ver uma mudança de um perfil estável para um que apresenta características de detonação pelo efeito da elevação da temperatura de 85 até 95 °C.

O avanço conseguido pelo incremento da temperatura, ou pela quantidade de combustível na mistura, permite maior geração de torque, sempre que não prejudique na trajetória do pistão na fase de compressão, ou o calor sensível dos componentes gerados não interfira no tempo de início da auto-ignição, como visto nas gráficas de pressão interna até agora apresentadas.

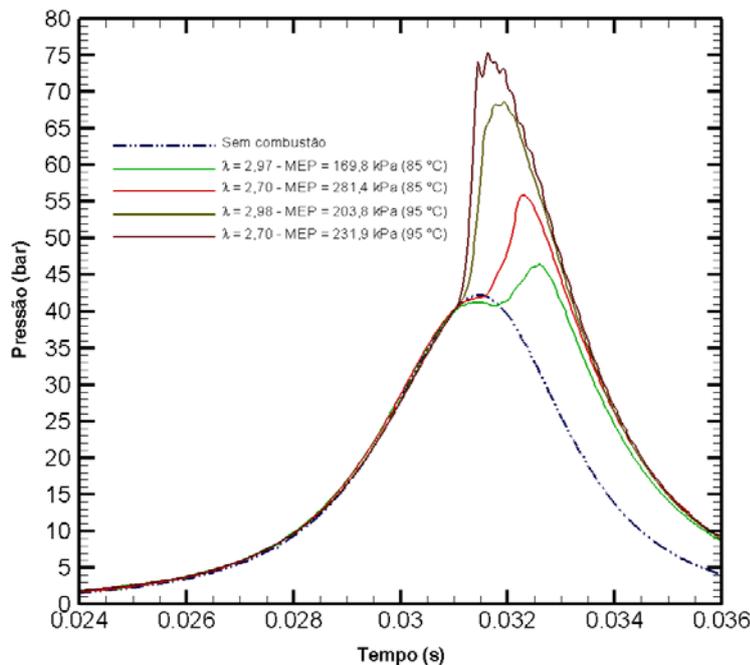


Figura 42 – Pressão interna com tempo às temperaturas de 85 e 95 °C com valores de lambda comparáveis @ 1900 RPM.

Quando a ignição acontece antes do TDC uma maior quantidade de combustível se oxida pelo maior espaço de tempo que as elevadas temperaturas são retidas ao interior do cilindro, ver Figura 43.

Na Figura 43 se compararam misturas com similar fator lambda às diferentes temperaturas de ingresso. O aumento nos valores das curvas de pressão por efeito da temperatura de ingresso é observado. A curva à maior temperatura é a que tem os maiores perfis de pressão depois de obtida a ignição, mas o valor de MEP é menor que para a curva com temperatura de 85 °C. Uma explicação a este comportamento é visto pelo inicio da auto-ignição, que é encontrado com um menor atraso do que para o caso das outras duas curvas (75 e 85 °C), podendo gerar interferência na trajetória de compressão do pistão, fazendo com que não se consiga obter o máximo esperado no valor de MEP, mesmo tendo maior queima do combustível.

Para o caso das curvas que não apresentam detonação, a auto-ignição acontece perto do TDC, fazendo com que o toque seja mais bem aproveitado.

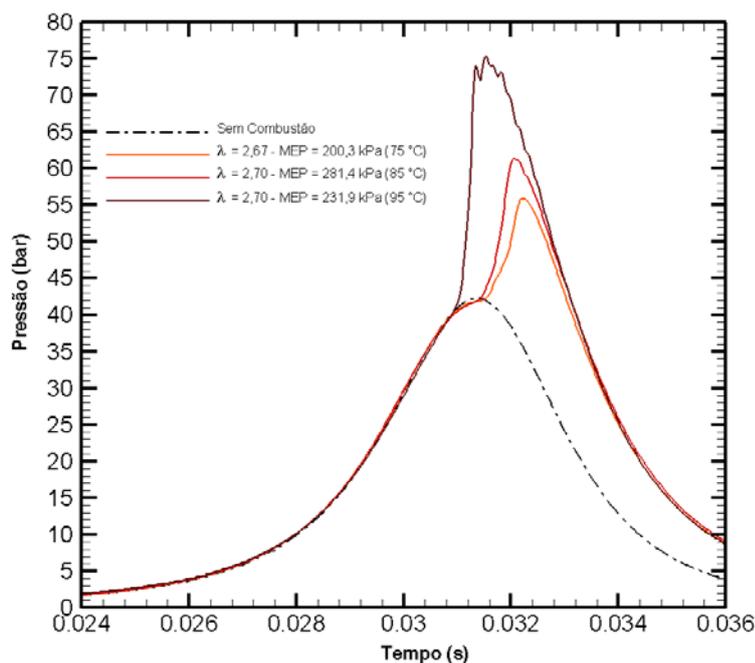


Figura 43 – Pressão Interna com tempo, efeito da temperatura no início da ignição @ 1900 RPM.

### **5.2.3.2. Rendimentos para a faixa mais estável**

Os valores para a potência, o consumo específico de combustível e o rendimento para a melhor faixa de operação são apresentados.

Na rotação de 1800 RPM os valores da potência aumentam quando a quantidade de combustível se incrementa, isso para todas as temperaturas de ingresso; produzindo maiores valores de torque e como consequência eficiências mais altas. Assim, na Figura 44 se apresenta os valores obtidos para a potência, consumo específico de combustível e o rendimento térmico para as três temperaturas de ingresso, através dos quais se distingue que os maiores valores de potência foram obtidos a 85 °C.

As outras duas temperaturas (75 e 95 °), nas quais se conseguiu menores valores de torque ou potência, apresentaram também elevado consumo específico de combustível, já que estão relacionadas inversamente.

Na temperatura de 75 °C, que por sua vez apresentou as maiores concentrações de combustível, o calor liberado nestas condições parece não ter sido o suficientemente alto para conseguir temperaturas que permitam oxidar o CO formado. Uma estreita faixa de trabalho foi observada.

Já quando se aumentou a temperatura de ingresso a 85 °C conseguiu-se obter uma maior temperatura ao interior do cilindro, permitindo que mais combustível se queime, gerando maiores valores de torque, como foi discutido na anterior seção.

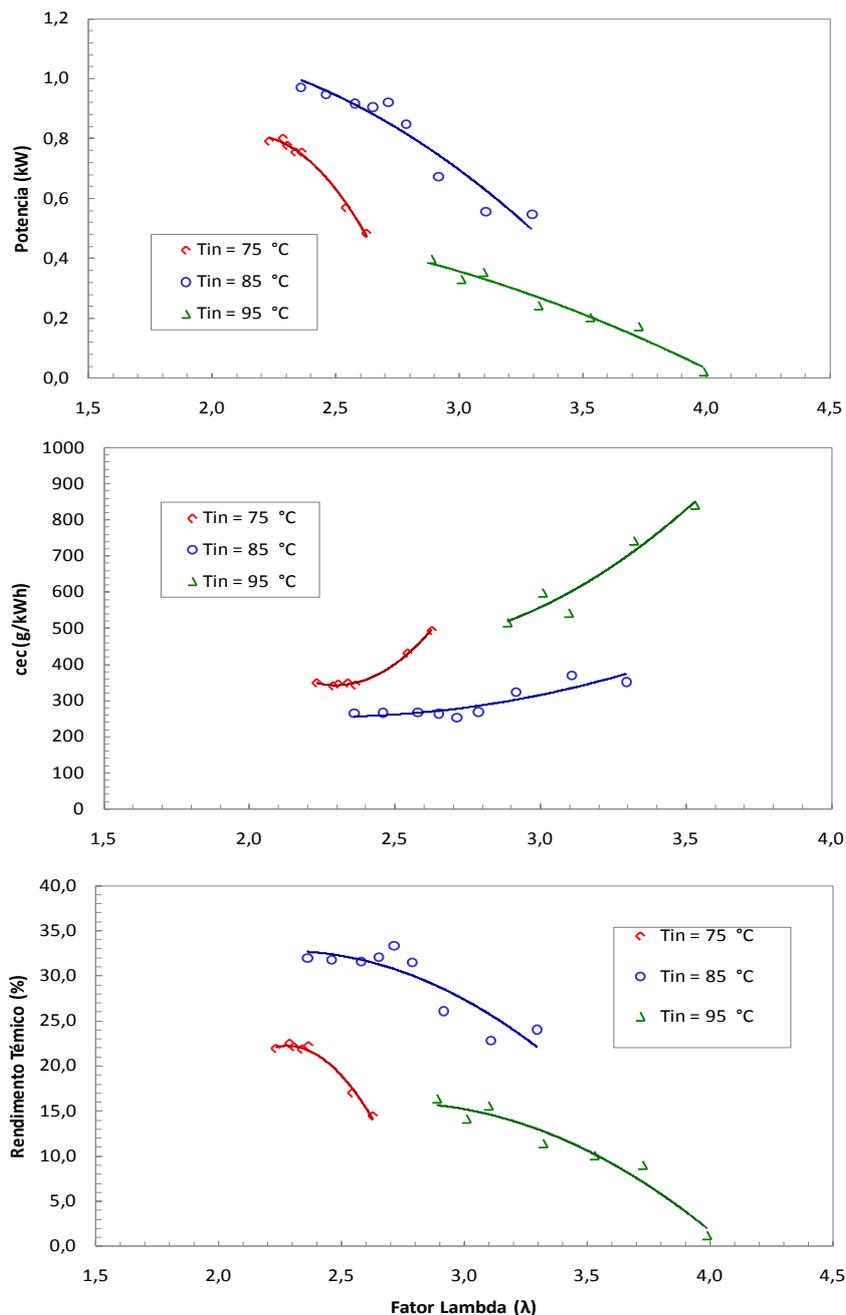


Figura 44 - Potência, cec e Rendimento Térmico com Lambda @1800

Para temperatura de 95 °C, onde as menores quantidades de combustível foram injetadas, pode ser visto que boa parte dos pontos se encontrou perto da zona de falha de ignição. Isto é visto pelos baixos valores de potência gerados quando o fator lambda aumenta (ver Figura 44).

Aqui também lembramos que o limite de injeção de combustível foi definido pela estabilidade do motor, o valor da pressão interna, assim como o

perfil da mesma, para não danificar o motor. O Máximo rendimento obtido para esta rotação foi de 33,34 % (temperatura de 85 °C, Figura 44).

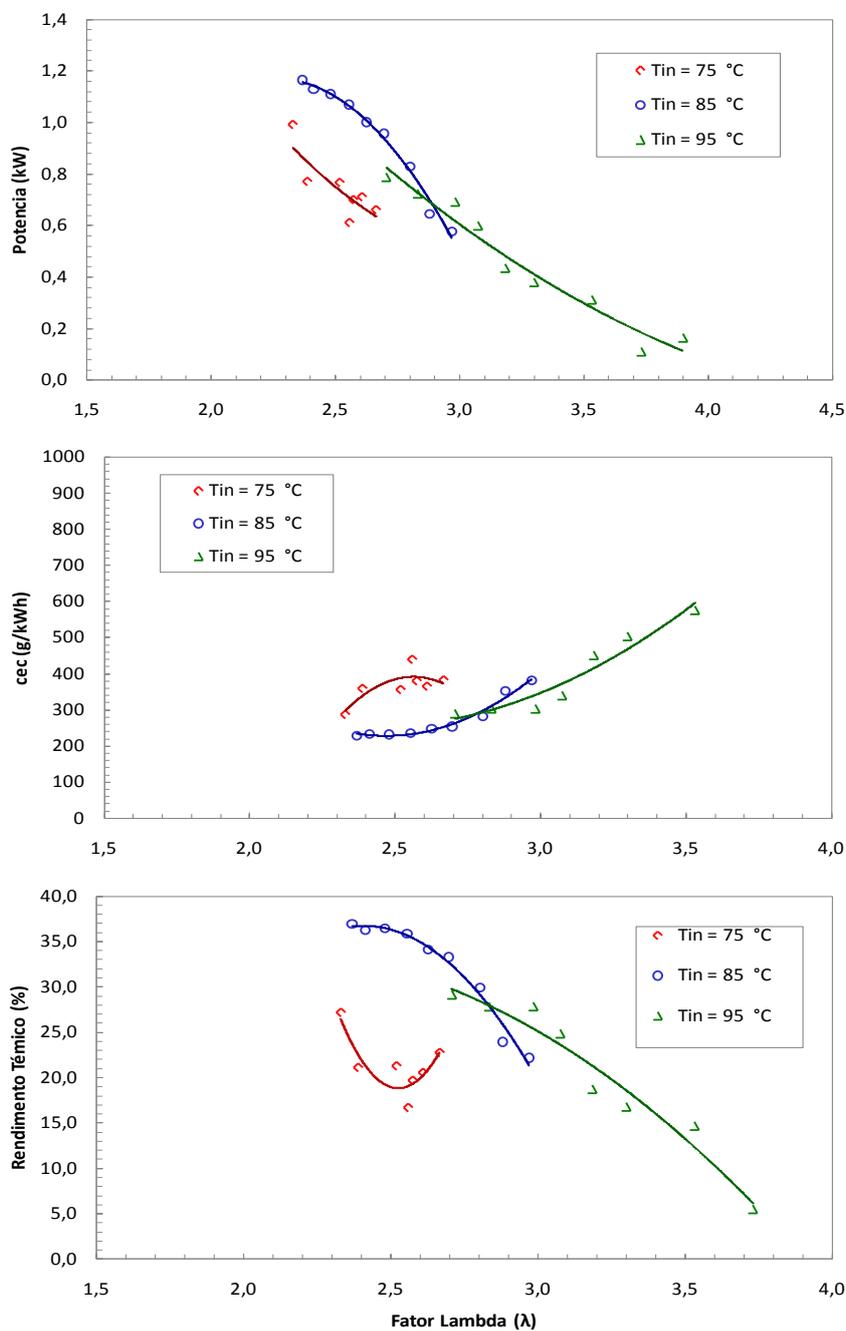


Figura 45 - Potência, cec e Rendimento Térmico com Lambda@ 1900 RPM

Na Figura 45 se apresentam a mesmas variáveis que se utilizaram para avaliar o desempenho do motor em modo HCCI na figura anterior. O comportamento é normal para os pontos a 85 e 95 °C; aumento o torque com a quantidade de combustível para a rotação de 1900 RPM.

Aqui também houve uma reduzida faixa de trabalho para a temperatura de 75 °C, além de um comportamento fora do esperado. Isto foi discutido quando se fez a análise das curvas de pressão, e que pode ser evidenciado na diminuição do valor de torque quando se aumenta a concentração do combustível. Isto se mostrara mais evidente a 2000 RPM (Figura 46). Esta queda vem acompanhada de uma repentina elevação do torque quando se atinge a zona de detonação.

Novamente os consumos específicos, assim como os rendimentos, são os melhores para alguns dos pontos à temperatura de 85 °C. Em geral os rendimentos atingidos na temperatura de 95 °C aumentaram com a quantidade de combustível presente na mistura (Figura 45).

Finalmente, quando se faz uma análise para as curvas de rendimento a 2000 RPM (ver, Figura 46), pode ser percebido para a temperatura de 75 °C uma tendência de queda na potência quando a concentração do combustível aumenta; nestas condições, se a injeção de maior quantidade de combustível na mistura continuasse, a região de detonação seria atingida. A faixa de trabalho foi novamente estreita nesta temperatura.

Nas condições atingidas a esta velocidade a faixa de operação para os pontos da temperatura de 85 °C é estreita, mas com sentido crescente quando se aumenta a quantidade de combustível. O mais interessante para estes pontos é que com a maior temperatura de trabalho (95 °C) a faixa de operação foi aumentada, o que se vê refletido na maior quantidade de pontos obtidos para todas as rotações consideradas nesta análise. Para os pontos de mistura rica se obteve torques consideráveis com boas eficiências.

Um aumento maior na temperatura (além de 95 °C) traz o risco de atingir rapidamente a zona de detonação (Hiraya et al., 2002). Foram feitos testes a maior temperatura na alimentação, os quais apresentaram menores rendimentos, e isso desalentou a análise destes.

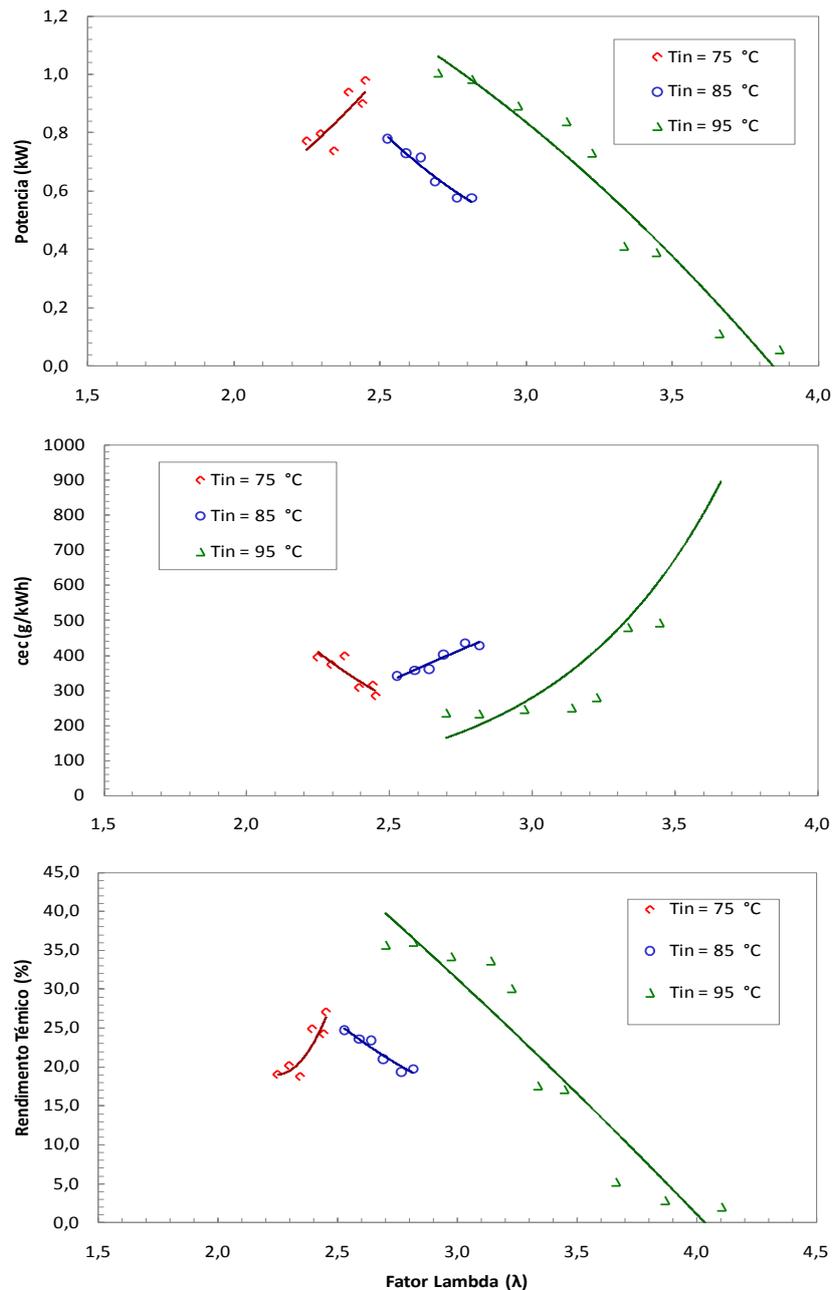


Figura 46 - Potência, cec e Rendimento Térmico com lambda @ 2000 RPM

**5.2.4. Emissões HCCI**

Nesta seção se apresenta a medição das emissões feitas para a temperatura de alimentação de 85 °C, com a qual se obteve os melhores rendimentos. A principal razão de não se ter avaliado as emissões para as outras duas temperaturas foi a indisponibilidade do equipamento de medição TESTO 350 XL, já que o mesmo se encontrava em pleno uso para projetos do laboratório, além disso, o

sensor que fazia a determinação de hidrocarbonetos (HC) se encontrava descalibrado. Os sensores operativos permitiram a determinação da concentração de NOx e CO em partes por milhão em base seca.

Os NOx são uma medida que indica indiretamente se as temperaturas dentro do cilindro foram muito elevadas, que permitiram a reação do nitrogênio do ar. Níveis elevados de CO no escapamento por sua vez indicam temperaturas insuficientes (< 1100 K) para obter a oxidação do CO a CO<sub>2</sub> quando a combustão acontece (Baumgarten, 2006).

Os valores das emissões específicas para NOx e CO foram determinadas segundo a Diretiva 2005/55/EC e a NBR – 14489 da Associação Brasileira de Normas Técnicas e que é utilizado por Cuisano (2006).

Quando se observa a Figura 47 que mostra as emissões específicas de NOx, se percebe que na região de maior estabilidade (1800 até 2000 RPM) os valores diminuem até encontrar-se por debaixo dos limites da Euro IV. Isso é explicado pela forma como a combustão acontece (combustão homogênea), e pelo fato de não apresentar regiões com frente de chama onde é comum encontrar altas temperaturas, onde as reações com o nitrogênio do ar são favorecidas. O grande espalhamento dos pontos para fora dos limites das normas EURO sinala que consideráveis níveis de temperatura foram atingidos ao interior do cilindro com baixa produção de potência, isso pelo tipo de unidade utilizada, já que para seu calculo se considera o inverso da potência gerada.

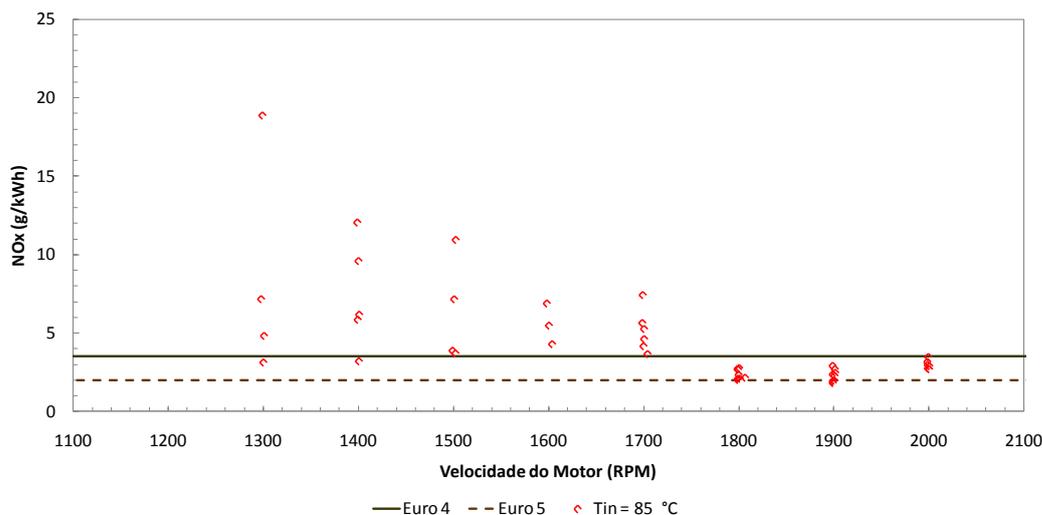


Figura 47 - Emissões específicas de NOx com a velocidade junto aos níveis máximos permitidos para a EURO 4 e 5, T in = 85 °C

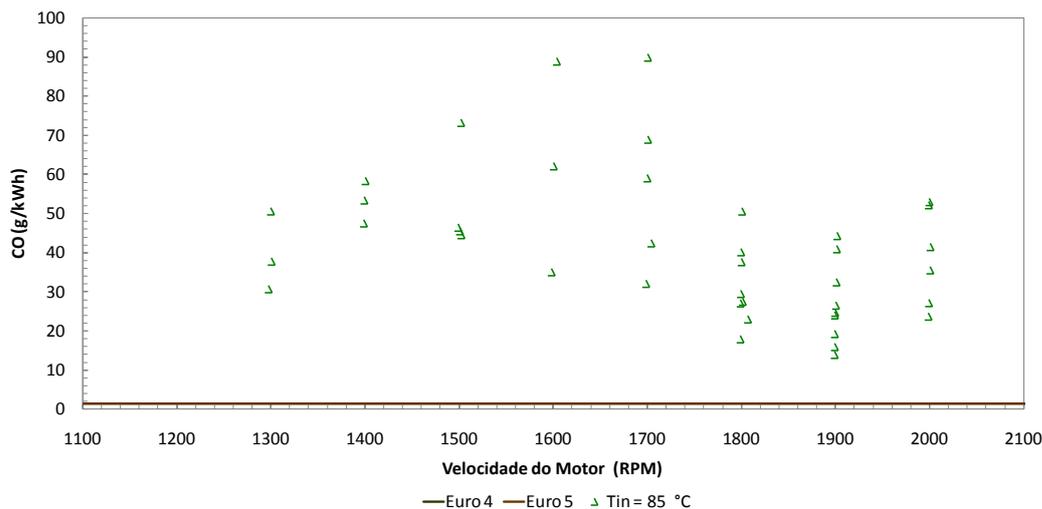


Figura 48 - Emissões específicas para CO com a velocidade e os níveis máximos para a EURO IV e V, Tin = 85 °C

Ao olhar diretamente para a Figura 48, contrariamente ao que acontece com o NOx, os níveis de CO encontraram-se por acima dos limites para as normas EURO isso principalmente pelo fato de o HCCI ser um processo que acontece a baixa temperatura, isto evidenciou uma das desvantagens deste tipo de combustão.

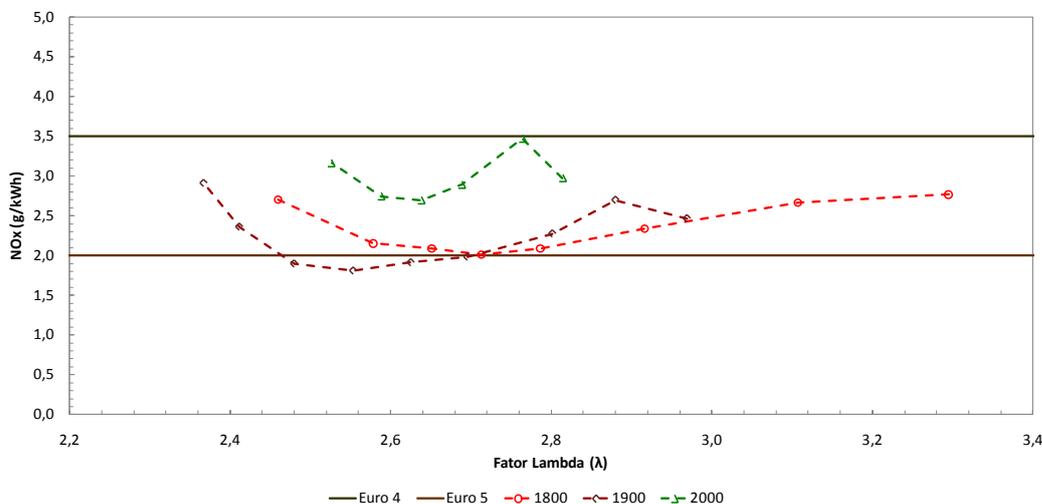


Figura 49 - Emissões específicas de NOx - lambda a diferentes velocidades com os limites máximos da EURO IV e V

O efeito da quantidade de combustível sobre o NOx gerado é apresentado na Figura 49, onde se percebe que um aumento na quantidade do combustível aumenta os níveis deste poluente. Todos os pontos cumprem a atual normativa do PROCONVE P-6 (EURO IV, na figura) e só poucos valores se encontram por

baixo do futuro P-7 (EURO V). É importante destacar que, mesmo que se aumente a diluição do combustível acima de um valor de 2,6, no lambda, aparentemente não se obteria uma redução significativa do poluente.

O efeito da elevação da concentração do combustível faz com que a temperatura no interior se incremente permitindo diminuir as quantidades de CO (Figura 50). Como já foi discutido, o aumento da quantidade de combustível gera avanço do início da combustão, isto se traduz em elevação da pressão interna, fazendo com que o processo transcorra submetido a altas temperaturas durante maior faixa de tempo. Porém, os níveis de CO obtidos são elevados, os sistemas atuais de tratamento deste poluente junto com os HC são menos custosos e apresentam maior eficiência do que tratar com NOx e fuligem, principalmente pelo fato de que estes sistemas operariam a menores temperaturas no escapamento. (Congress, USA,2001)

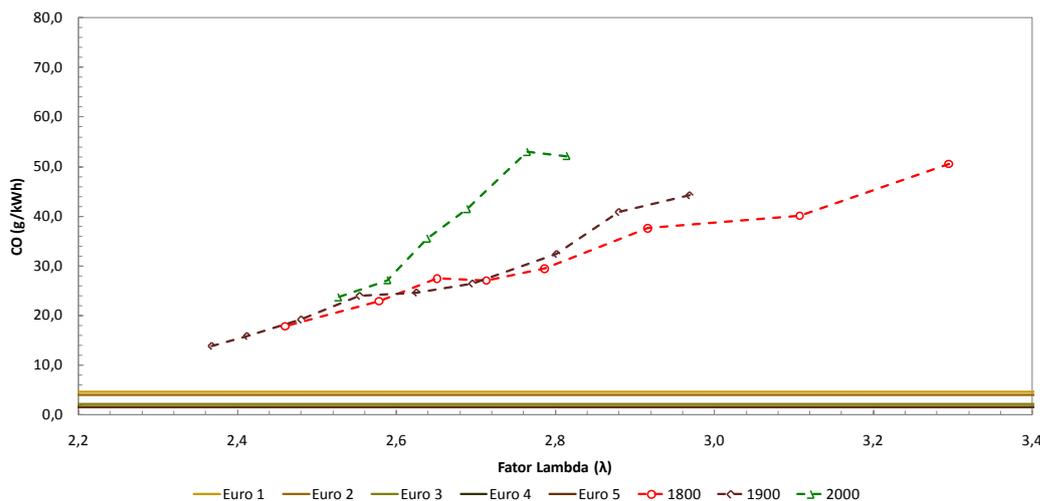


Figura 50 - Emissões específicas de CO com lambda a diferentes velocidades, junto aos limites da EURO IV e V

Enquanto que com a fuligem só se conseguiu fazer uma avaliação visual da qual se pode considerar zero emissões de material particulado em modo HCCI, assim são apresentadas a Figura 51 e a Figura 52 como referência da diferença entre os dois tipos de combustão. A Figura 51 corresponde ao processo diesel convencional e apresenta elevada geração de fuligem.



Figura 51 – Foto do escapamento operando em modo Diesel



Figura 52 – Foto do escapamento operando em modo HCCI

### 5.3. Avaliação e Comparação dos resultados Diesel – HCCI

Uma comparação certa entre os dois tipos de combustão poderia ser estabelecida se o torque ou a potência fossem mantidos constantes, variando algum parâmetro com os quais se trabalhou (temperatura de entrada ou concentração de combustível).

O dinamômetro de bancada utilizado não possuía um sistema de fixação do torque, por isso não se fez comparações com torque constante. Além disso, é importante ressaltar que no modo Diesel as potências geradas foram muito maiores às obtidas para o HCCI e a quantidade de combustível que é injetada ao

motor não pode ser regulada para trabalhar a menores cargas que a projetada para este tipo de motor estacionário.

Frente a estas dificuldades se fez uma comparação referencial para o melhor e pior ponto encontrado no modo diesel em relação à melhor faixa de operação do HCCI. Assim, se pode diferenciar os ganhos que poderiam ser obtidos com este novo tipo de combustão. Foram comparados os parâmetros específicos de temperatura de escapamento, MEP, rendimento térmico e consumo específico. Enquanto as emissões; não foi possível fazer uma comparação pela indisposição do equipamento, como foi dito acima. Das Figuras 51 e 52, pode ser visto por comparação que a poluição por fuligem é alta na combustão diesel.

Na Figura 53 se observa os pontos para a temperatura do escapamento na faixa mais estável do HCCI para as três temperaturas (em cores verde, azul e vermelho). Os pontos em roxo são para o Diesel na mesma velocidade, e as linhas descontinuas em azul e vermelho são para o melhor e pior ponto logrado na combustão Diesel (este último se obteve a 2600 RPM), respectivamente. A descrição é igual para as demais gráficas até a Figura 56.

Nesta figura se mostra que a temperatura de escapamento para a combustão HCCI se manteve inferior a 240 °C e que no modo diesel no melhor ponto atingiu perto dos 440 °C, 200 °C a mais. O que comprova a presença de chamas de difusão na combustão diesel, presentes na maior parte do processo de expansão. A presença de mais altas temperaturas significa também maior geração de NOx.

Na Figura 54, como já era esperado, se atinge valores de MEP menores no modo HCCI, isso pelo fato de que a combustão acontece com misturas pobres em combustível quando comparadas ao Diesel. À temperatura de entrada de 95 °C, a maior quantidade de pontos se encontram por debaixo do menor valor encontrado no modo Diesel, isso encontra explicação novamente no fato de que, a esta temperatura, as quantidades de combustível em HCCI foram mais baixas e os pontos de início de auto-ignição para alguns pontos se encontraram muito adiantados do TDC.

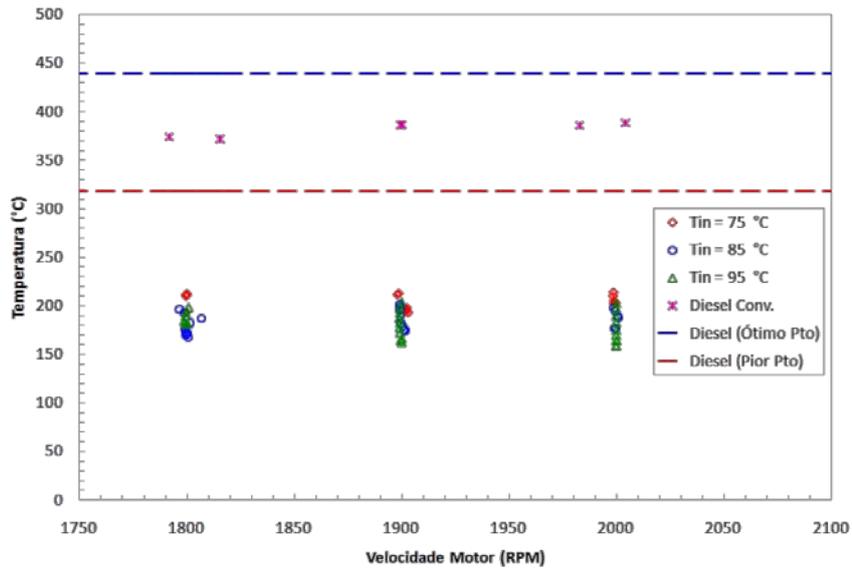


Figura 53 - Temperatura do escapamento - velocidade. HCCI - Diesel

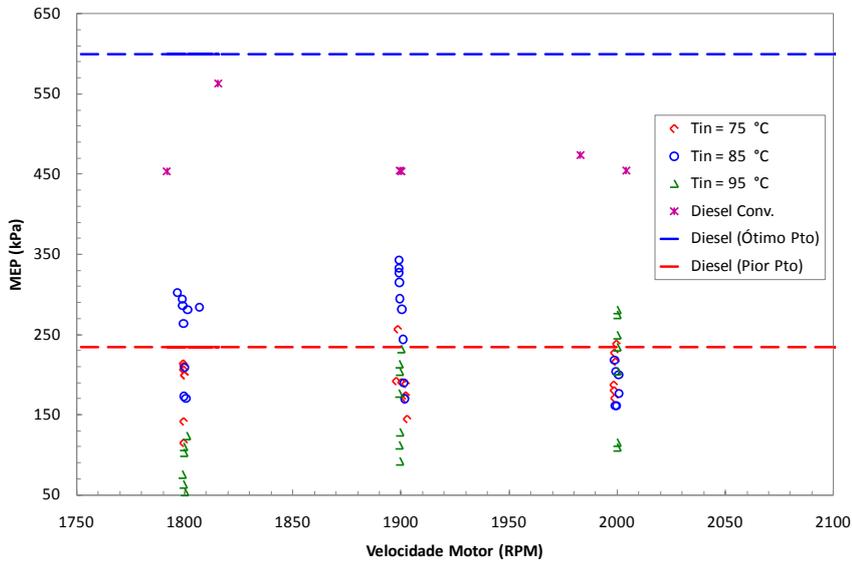


Figura 54 - MEP com a velocidade. Pontos a diferentes Temperaturas de alimentação.  
HCCI - Diesel

Quando se observa a Figura 55 se consegue enxergar uma das vantagens do HCCI, quanto ao rendimento, já que se conseguiram consumos específicos de combustível (cec) menores a 240 g/kWh, mas só para uns poucos pontos. Na Figura 56 se vê que é possível obter rendimentos térmicos maiores ao Diesel, principalmente para a temperatura de 85 °C, o melhor rendimento obtido foi de 37 %.

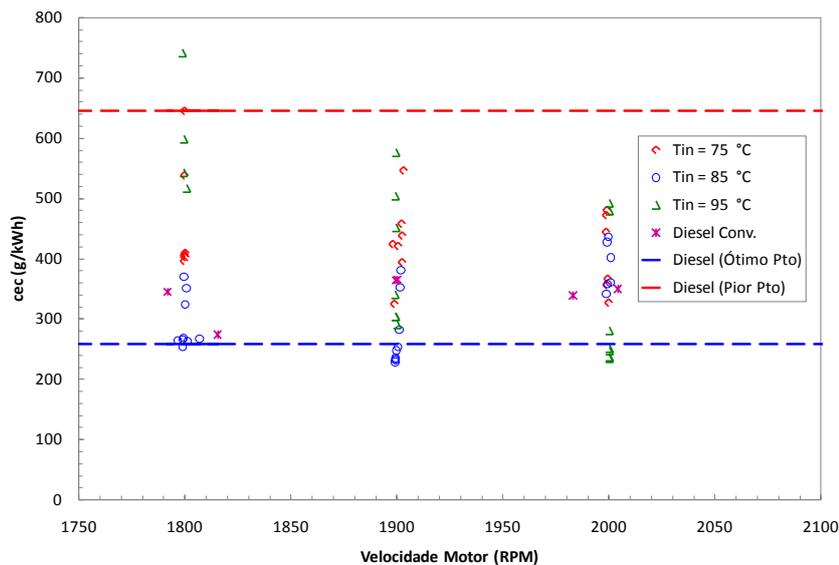


Figura 55 - Consumo específico de combustível com velocidade para diferentes Temperaturas de alimentação. HCCI – Diesel

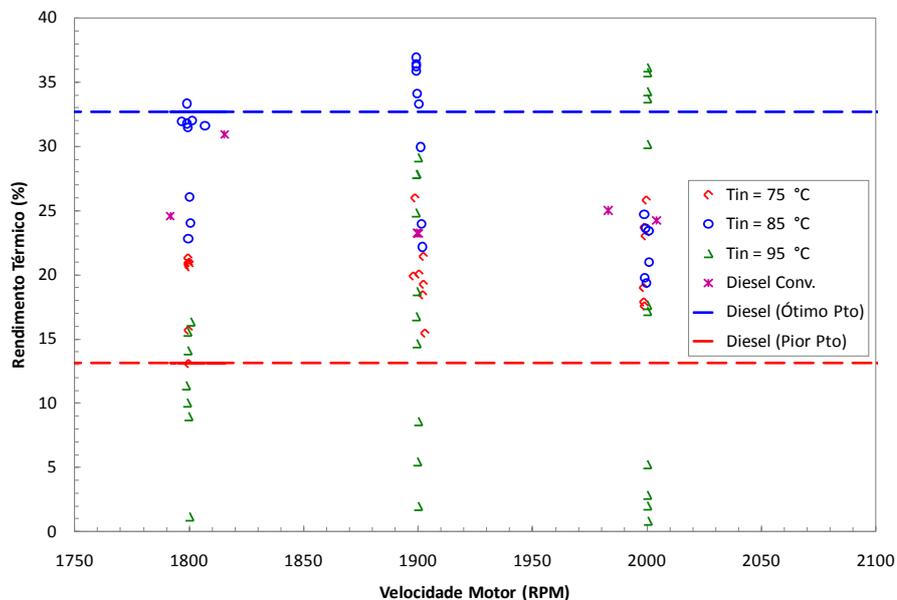


Figura 56 - Rendimento Térmico com velocidade para diferentes temperaturas de alimentação. HCCI - Diesel

O alto rendimento obtido para a temperatura de 85°C é devido fundamentalmente ao incremento da temperatura mantendo as maiores concentrações de combustível utilizadas para os ensaios comparáveis às utilizadas a 75 °C (ver Figura 30).

Quando juntas as curvas de pressão interna para o modo Diesel e HCCI, pode-se perceber muitas variações, e se o gráfico de calor liberado fosse obtido, estas variações seriam mais evidentes.

Assim, na Figura 57, se pode ver que para o modo Diesel se tem uma elevação da pressão muito antes de atingir o ponto morto superior. Isso pode ser explicado pelo adiantamento da injeção ( $20^\circ$  antes do TDC, segundo manual) e a posterior pré-ignição, para passar finalmente à difusão da combustão. A etapa de difusão se apresenta pela continua injeção de combustível, o que faz com que as pressões, devido à combustão, sejam mantidas após do TDC.

O processo de mistura homogênea é uma combustão rápida, e que acontece em quase todo o volume da câmara de combustão depois que a auto-ignição inicia. O anterior faz com que a pressão se incremente rapidamente para após diminuir por efeito de expansão e perdas de calor. Isso faz com que no processo HCCI os tempos de combustão sejam menores do Diesel, como é visto na Figura 57 e a Figura 58.

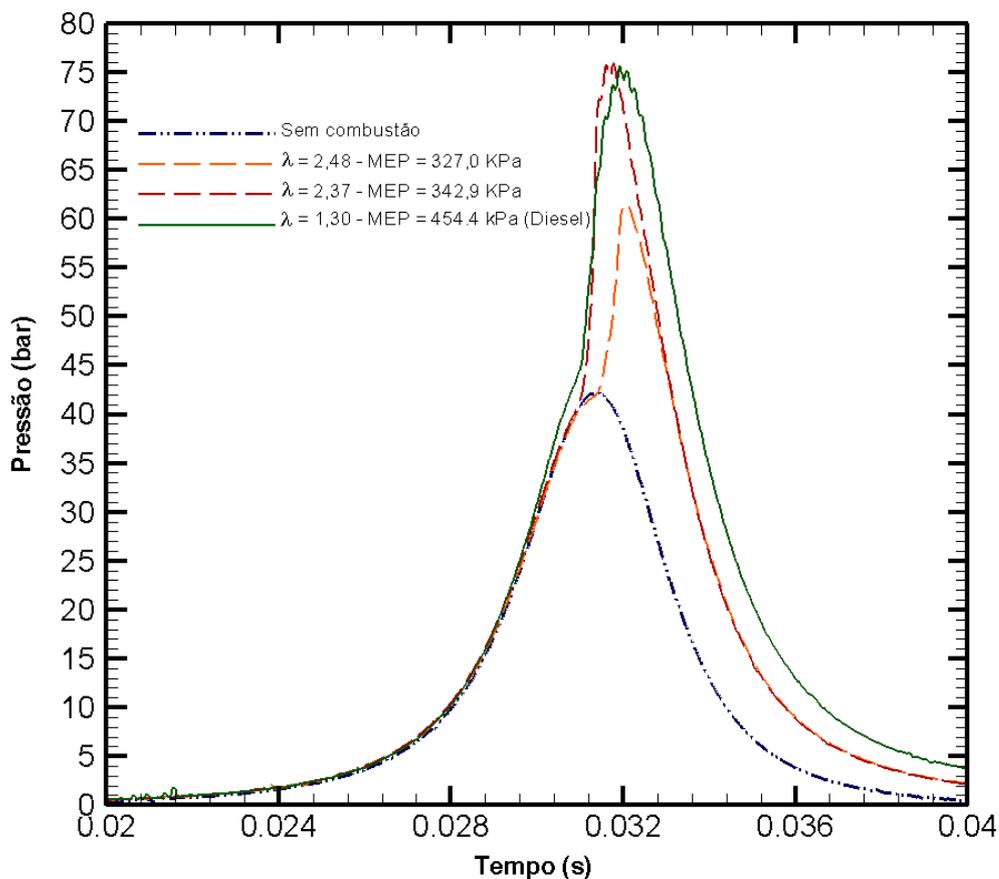


Figura 57 – Pressão interna – Tempo, comparação HCCI @ 1900 RPM ( $T_{in} = 85^\circ\text{C}$ ) com a combustão Diesel convencional.

Nota-se também na Figura 57 que, mesmo o HCCI tenha alcançando um perfil de pressão igual à do Diesel não gera igual Pressão Média Efetiva (MEP).

Similar comportamento é observado na Figura 58, onde se apresentam as curvas de pressão quando as condições de operação se encontram perto da detonação para as três temperaturas de alimentação junto à curva de pressão para o Diesel.

Não se percebe um perfil diferenciado para as curvas de HCCI, só um ligeiro adiantamento da ignição para a curva que opera a 95 °C. Todas as curvas para HCCI geram valores inferiores ao se comparar com o MEP do modo Diesel.

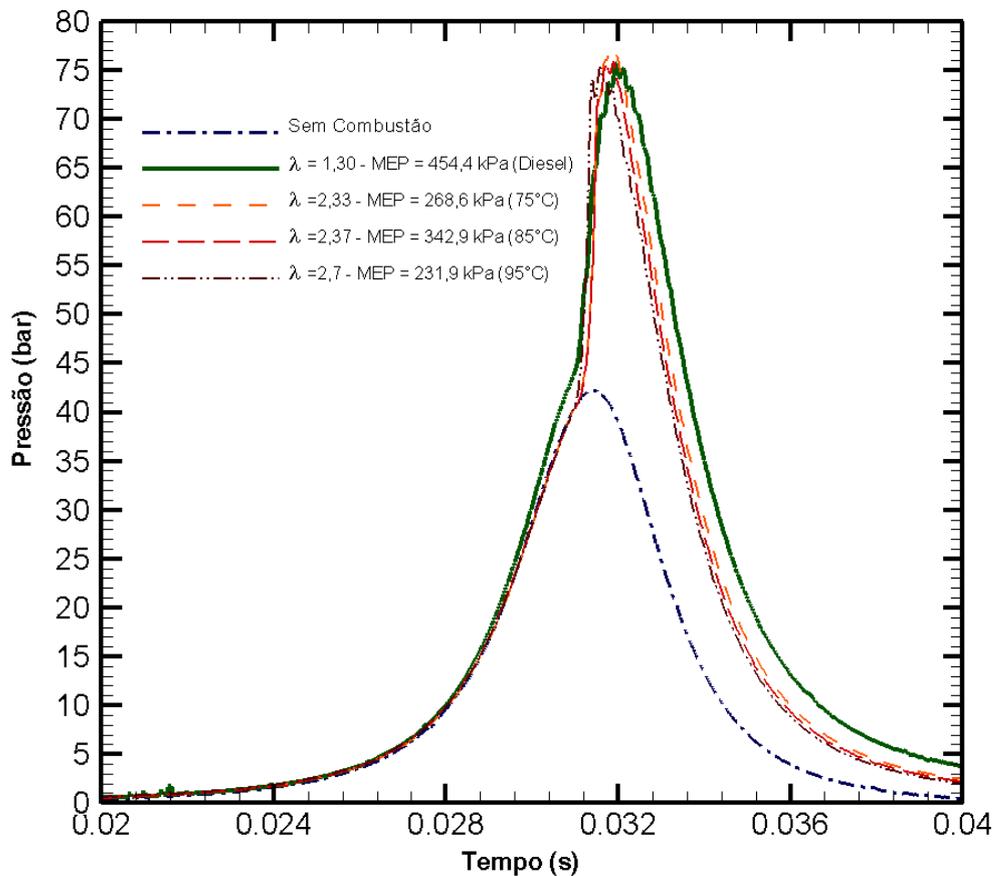


Figura 58 – Pressão interna – Tempo, comparação HCCI a diferentes temperaturas de alimentação @ 1900 RPM ( $\lambda \approx 2,6$ ) com a combustão Diesel convencional.