

6

Análise dos resultados de influência dos componentes nas propriedades dos combustíveis e parâmetros de desempenho do motor

Neste capítulo são apresentadas as análises de influência dos componentes nas propriedades dos combustíveis e nos parâmetros de desempenho do motor. Conforme descrito no Capítulo 4, as análises são realizadas utilizando-se a técnica de Planejamento e Análise de Misturas. Os resultados são apresentados como curvas de nível das superfícies de resposta das variáveis de interesse no domínio triangular das formulações, juntamente com os modelos matemáticos correspondentes, seu nível de significância e qualidade de ajuste. Pode-se afirmar que, no geral, os desvios-padrão dos coeficientes dos modelos foram uma ordem de grandeza abaixo dos seus respectivos valores, indicativo da qualidade dos modelos também para realizar previsões, quando atendidos os critérios descritos no Capítulo 4. As baixas incertezas dos resultados experimentais (Tabela AV.1), menores que as diferenças encontradas entre os combustíveis, suportam a relevância das análises realizadas neste capítulo e no Capítulo 7, referente à influência dos componentes nos parâmetros de combustão. Os resultados apresentados permitem correlacionar as propriedades dos combustíveis com os parâmetros de desempenho, extraindo considerações relevantes para formulação de combustíveis e validando a técnica para utilização com este propósito.

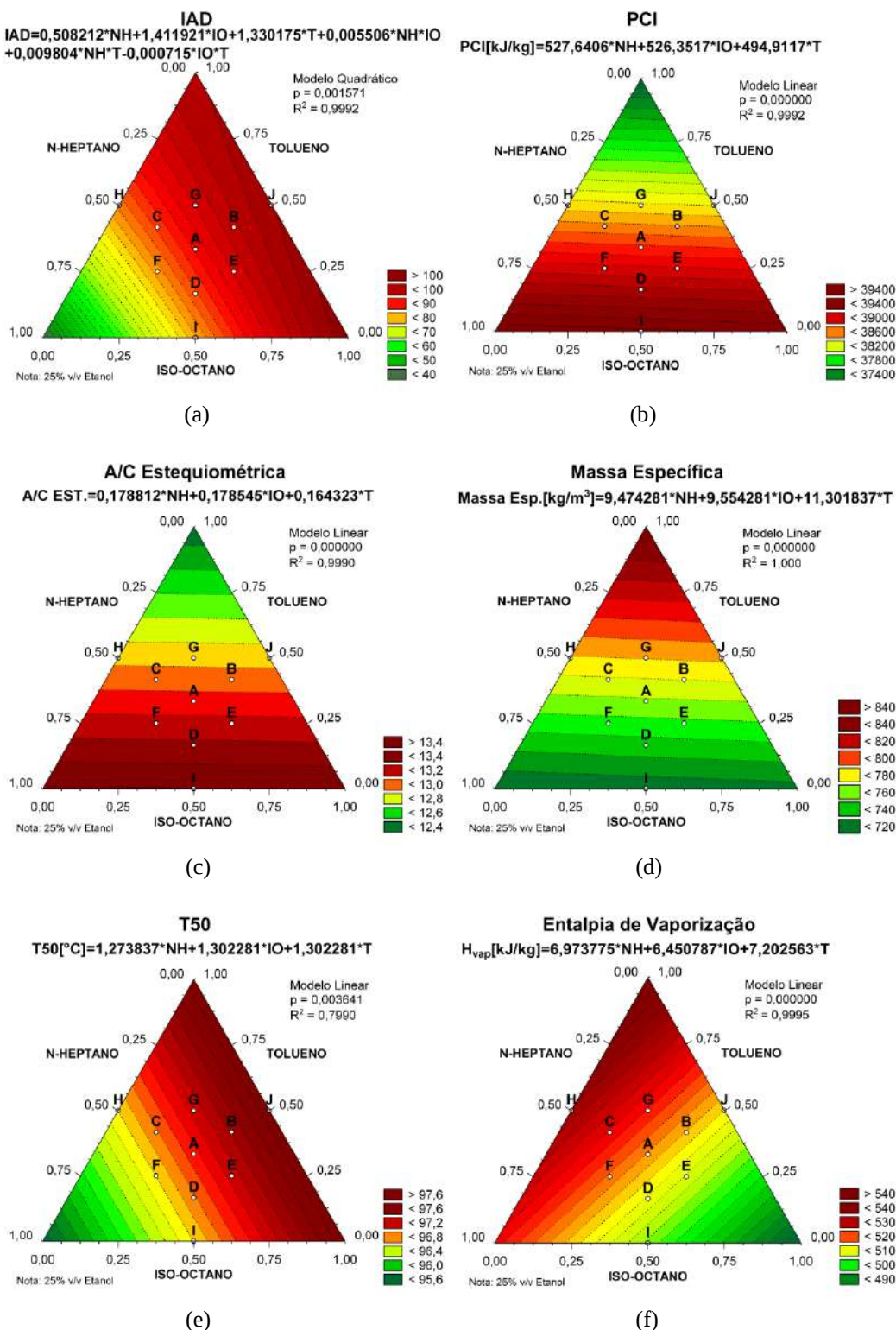
6.1.

Influência dos componentes nas propriedades dos combustíveis

Nesta seção são apresentadas as influências dos componentes utilizados em propriedades relevantes das formulações reduzidas. Estas análises servirão como base para auxiliar na explicação da influência dos componentes nos parâmetros de desempenho e combustão do motor, analisadas neste e nos capítulos subsequentes.

Nas Figuras 6.1(a-f) são apresentadas as curvas de nível das superfícies de resposta obtidas para as propriedades Índice Antidetonante (IAD), poder

calorífico inferior (PCI), relação ar-combustível estequiométrica, massa específica, T50, e entalpia de vaporização (H_{vap}).



Figuras 6.1(a-f) – Propriedades dos combustíveis, (a) – Índice antidetonante (IAD); (b) – Poder calorífico inferior (PCI); (c) – Relação ar-combustível estequiométrica; (d) – Massa específica; (e) – T50; (f) – Entalpia de vaporização (H_{vap}).

Foi obtido bom nível de significância e ajuste dos dados experimentais de IAD com um modelo quadrático. Este resultado mostra tendência semelhante ao obtido por Morgan et al., (2010), que utilizou misturas de tolueno, iso-octano e n-heptano, sendo mais preciso do que modelos lineares usualmente adotados quando não há informações adicionais. Apesar do IAD mais elevado do tolueno puro, o iso-octano foi mais efetivo do que o tolueno em elevar o IAD das formulações reduzidas. Este comportamento se deve à existência de relações sinérgicas e antagônicas na mistura dos componentes utilizados com relação ao número de octano.

É interessante notar que, para os componentes utilizados, poder calorífico inferior e relação ar-combustível estequiométrica mostram a mesma tendência (Figuras 6.1(b) e 6.1(c)), que é contrária à tendência observada para a massa específica (Figura 6.1(d)). Por sua vez, IAD (Figura 6.1(a)) e T50 (Figura 6.1(e)) apresentam tendências semelhantes. Estas semelhanças de tendências só poderiam ser generalizadas a partir de análises mais profundas envolvendo as estruturas moleculares dos componentes. Este, porém não é o foco do presente trabalho.

Na Figura 6.2 é apresentado o poder calorífico inferior por kg de ar estequiométrico, razão entre o poder calorífico inferior e a relação ar-combustível estequiométrica das formulações.

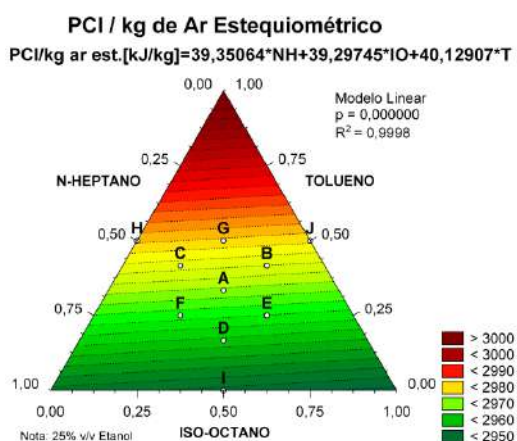


Figura 6.2 – Poder calorífico inferior por kg de ar estequiométrico.

Este parâmetro está associado à quantidade de energia presente na mistura ar-combustível admitida pelo motor sob λ unitário. Nota-se que, apesar do poder calorífico inferior mais baixo do tolueno (Figura 6.1(b)), sua razão ar-combustível estequiométrica também inferior (Figura 6.1(c)) eleva o poder

calorífico por kg de ar estequiométrico das formulações com maiores teores deste componente.

Na Figura 6.3 é apresentada a entalpia de vaporização por kg de ar estequiométrico, razão entre a entalpia de vaporização e a relação ar-combustível estequiométrica das formulações.

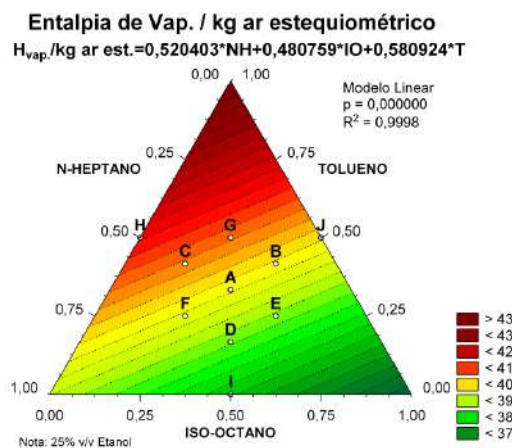
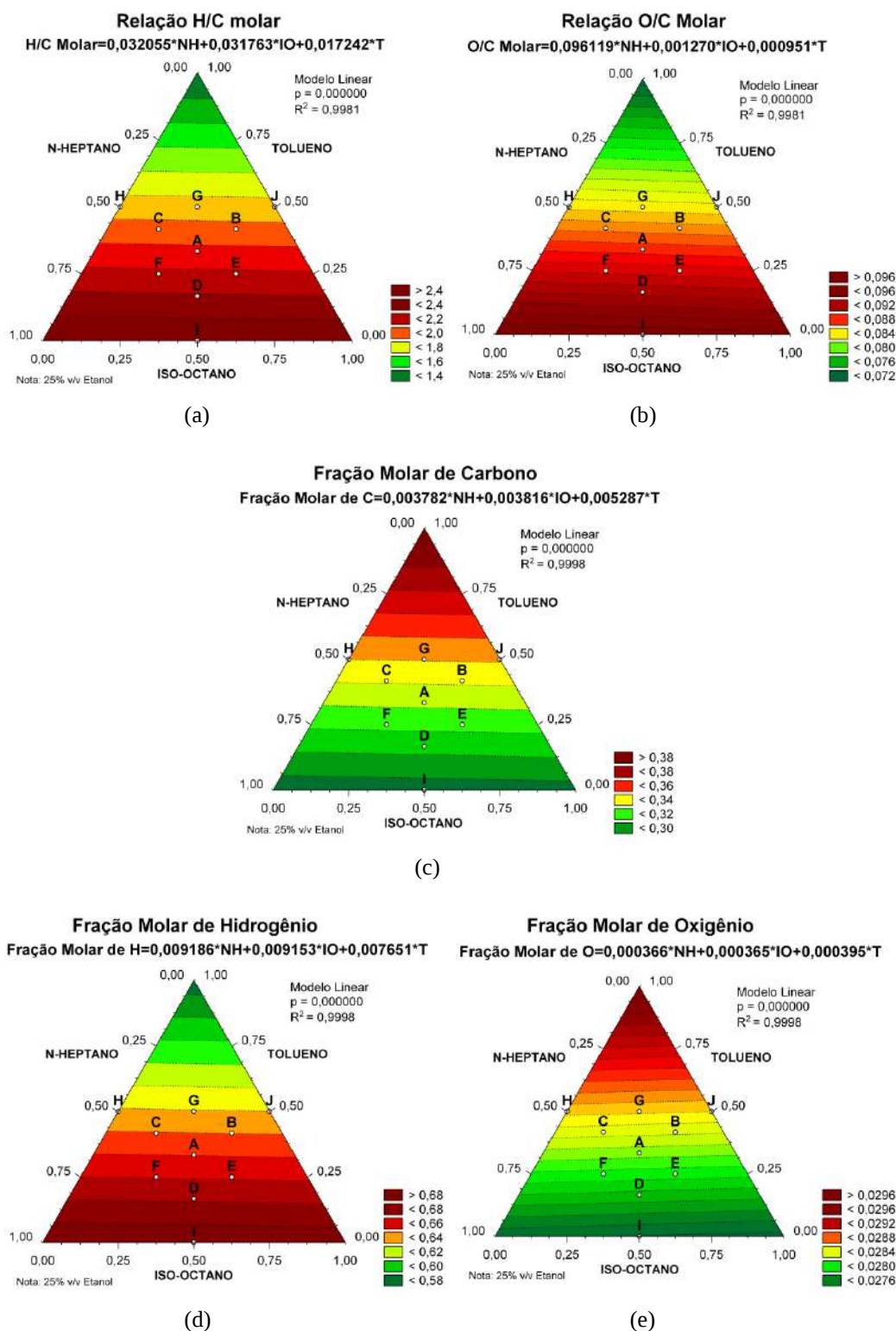


Figura 6.3 – Entalpia de vaporização por kg de ar estequiométrico.

Este parâmetro está associado à quantidade de energia necessária para vaporizar o combustível admitido pelo motor sob λ unitário (estequiometria). As formulações com maiores teores de tolueno apresentam as maiores entalpias de vaporização por kg de ar estequiométrico, em função das suas maiores entalpias de vaporização (Figura 6.1(f)) e menores relações ar-combustível estequiométricas (Figura 6.1(c)).

Nas Figuras 6.4(a-e) são apresentadas as influências dos componentes, respectivamente, nas relações hidrogênio-carbono (H/C) e oxigênio-carbono (O/C) molares, e nas frações molares de carbono, hidrogênio e oxigênio das formulações reduzidas.



Figuras 6.4(a-e) – Relações molares, (a) – Relação H/C molar; (b) – Relação O/C molar; (c) – Fração molar de carbono; (d) – Fração molar de hidrogênio; (e) – Fração molar de oxigênio.

Nota-se pelas Figuras 6.4(a-e), incluindo os modelos gerados, que a estrutura molecular do tolueno, em forma de anel e com a presença de ligações duplas entre átomos de carbono, contribui para a redução do conteúdo de hidrogênio e aumento dos conteúdos de carbono e oxigênio das formulações com maiores teores deste componente. Desta forma há uma diminuição da relação H/C molar a partir de maiores concentrações de tolueno nas formulações. O aumento do conteúdo de carbono suplanta o aumento do conteúdo de oxigênio, na medida em que maiores teores de tolueno contribuem para diminuir a relação O/C molar.

Por sua vez, iso-octano e n-heptano apresentam comportamento mais uniforme entre si, sendo que a maior cadeia do iso-octano mostra maior força para aumentar o conteúdo de carbono, reduzindo os conteúdos de hidrogênio e oxigênio em relação ao n-heptano. Desta forma, o iso-octano contribui para reduzir as relações H/C e O/C molares em relação ao n-heptano.

6.2.

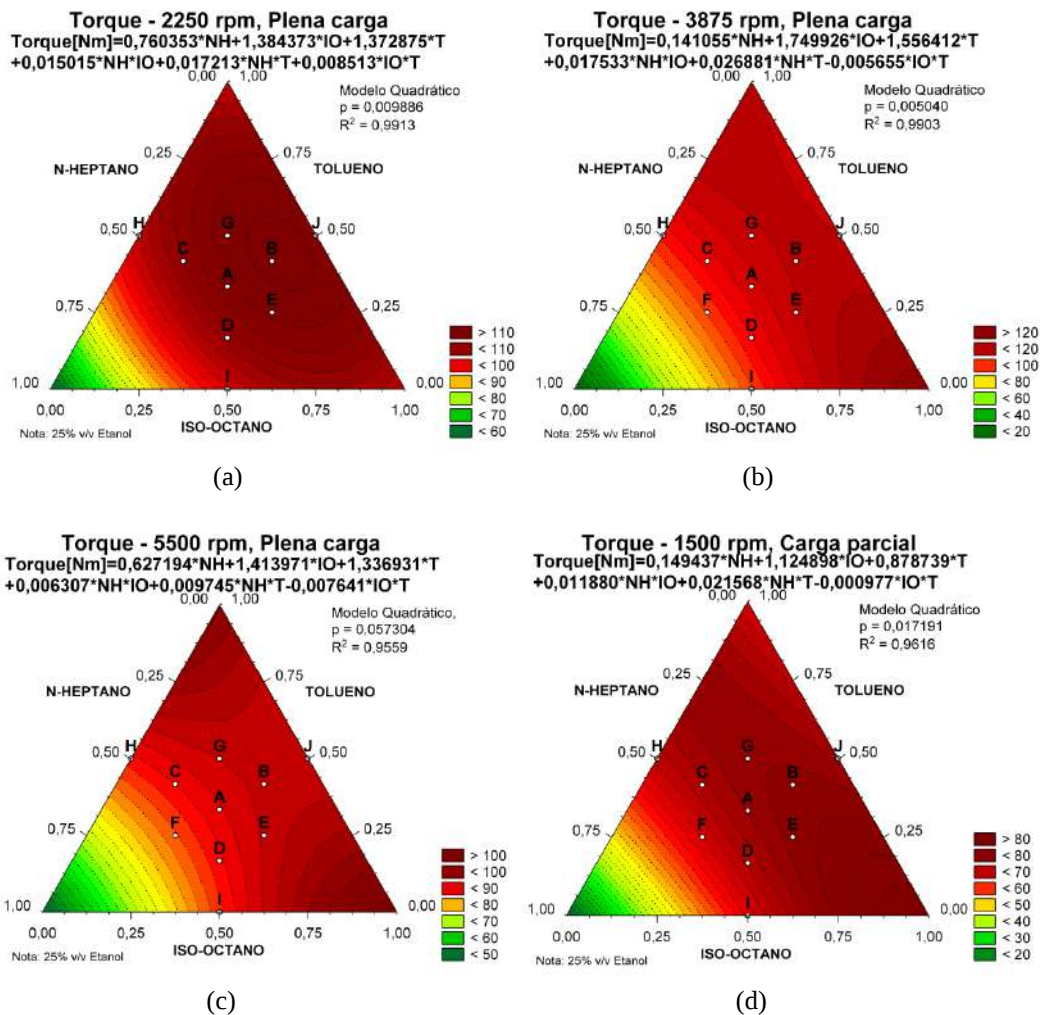
Influência dos componentes nos parâmetros de desempenho do motor

Nesta seção são apresentadas as influências dos componentes utilizados e das propriedades dos combustíveis nos parâmetros de desempenho do motor: torque de eixo; consumo de combustível; consumo específico; eficiência global; eficiência volumétrica; estabilidade de combustão e emissões de poluentes. A estabilidade de combustão, apesar de ser um parâmetro de combustão, foi tratada neste capítulo por estar relacionada com a dirigibilidade do veículo.

É importante salientar que, em função do projeto do motor, das seis condições operacionais avaliadas, todas as condições em plena carga e mais a condição de 1500 rpm em carga parcial apresentaram susceptibilidade para ocorrência de detonação. Tal ocorrência limitou o avanço de ignição calibrado para as formulações de octanagens mais baixas. As condições de 2250 e 3875 rpm em carga parcial não apresentaram susceptibilidade para ocorrência de detonação com as formulações avaliadas.

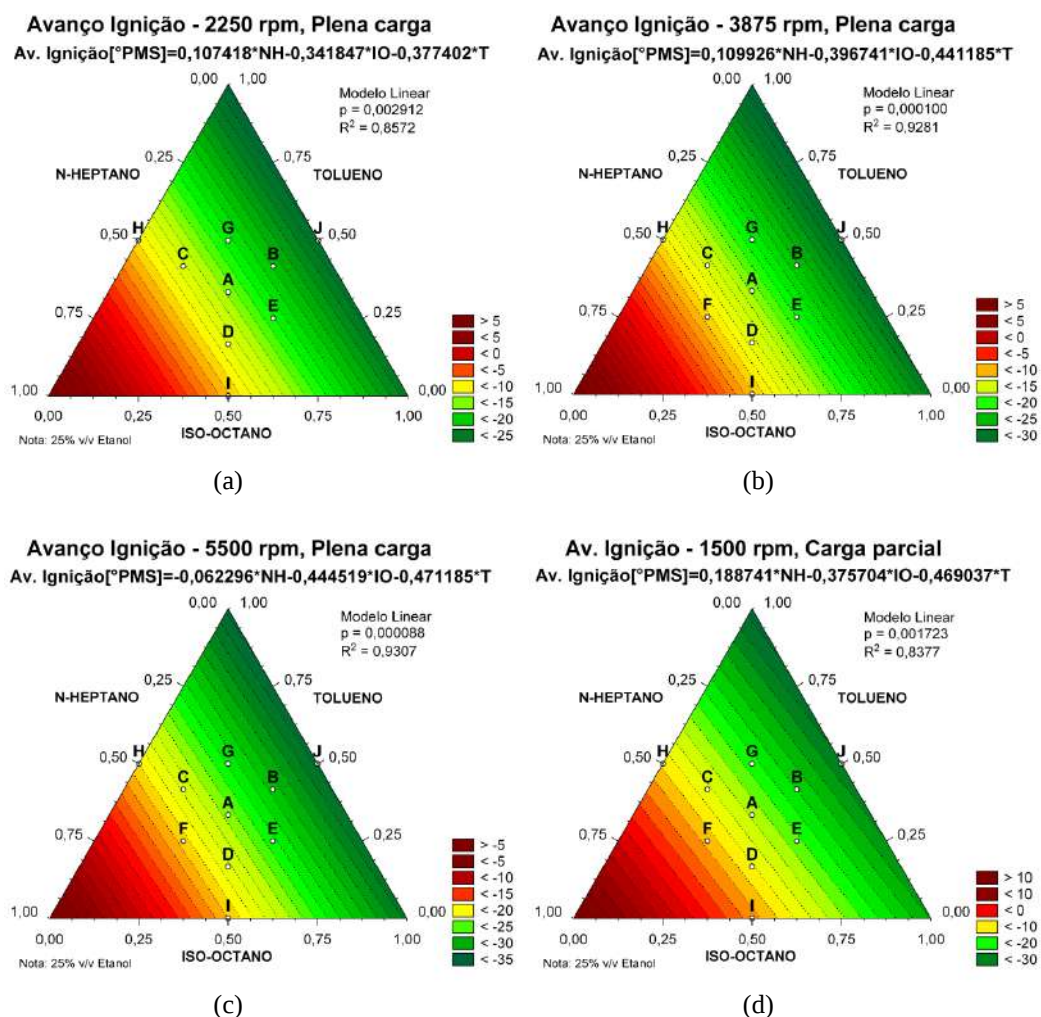
6.2.1. Torque de eixo

Para o torque foram obtidos modelos estatisticamente significativos para as condições de 2250, 3875 e 5500 rpm em plena carga e para a condição de 1500 rpm em carga parcial. As tendências podem ser visualizadas nas Figuras 6.5(a-d), e são semelhantes à Figura 6.1(a), referente ao IAD.



Figuras 6.5(a-d) – Torque do motor, (a) – 2250 rpm em plena carga; (b) – 3875 rpm em plena carga; (c) – 5500 rpm em plena carga; (d) – 1500 rpm em carga parcial.

A susceptibilidade para ocorrência de detonação nestas condições operacionais influenciou a calibração do avanço de ignição do motor, limitando-o principalmente com as formulações de octanagens mais baixas (maiores teores de n-heptano), conforme pode ser observado nas Figuras 6.6(a-d), referentes ao avanço de ignição otimizado.



Figuras 6.6(a-d) – Avanço de ignição, (a) – 2250 rpm em plena carga; (b) – 3875 rpm em plena carga; (c) – 5500 rpm em plena carga; (d) – 1500 rpm em carga parcial.

Nas Figuras 6.6(a-d), os sinais negativos presentes nas legendas indicam ângulos antes do PMS. Assim, maiores ângulos de avanço de ignição correspondem a valores negativos com maiores módulos. Os maiores avanços de ignição, otimizados para o *MBT* (*Maximum Break Torque*) ou *MBT* / LDI (Limite de Detonação Inferior) coincidentes nas formulações com maiores teores de tolueno e iso-octano, explicam as tendências destes componentes contribuírem para elevar o torque. Por sua vez, as formulações com maiores teores de n-heptano apresentaram torques reduzidos, na medida em que foram calibrados menores avanços de ignição, no LDI.

As Figuras 6.5(a-d), incluindo os modelos gerados, também sugerem que o iso-octano pode ser mais efetivo que o tolueno em aumentar o torque. A mudança

de tendência observada na condição operacional 2250 rpm em plena carga pode estar associada à ausência da formulação F.

Nota-se que a tendência de maior efetividade do iso-octano em elevar o torque não é correspondida pelas tendências observadas no avanço de ignição, que mostram uma maior efetividade do tolueno (coeficientes negativos com maiores módulos) na elevação do avanço de ignição em relação ao iso-octano. Tal fato será analisado no Capítulo 7, referente aos resultados dos parâmetros de combustão.

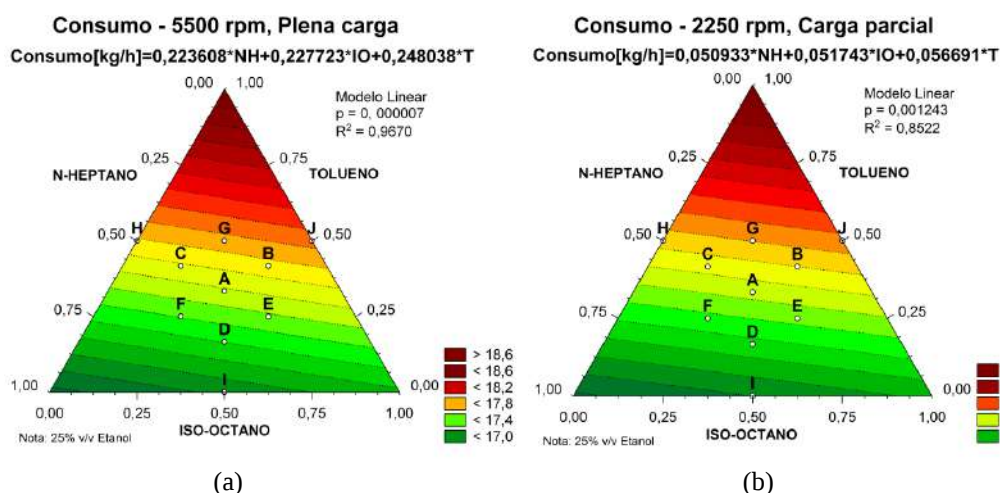
Por sua vez, observa-se que a maior efetividade do tolueno em elevar o avanço de ignição quando comparado ao iso-octano não é correspondida pelas tendências observadas para o IAD (Figura 6.1(a)), que sugerem maior efetividade do iso-octano em relação ao tolueno no aumento do IAD. Este fato mostra que as metodologias de determinação do IAD, baseadas em motores *CFR*, de concepção antiga e operando com velocidades de rotação baixas, podem não retratar completamente as condições de combustão de um motor comercial moderno. Também deve ser considerado o fato de que as octanagens *MON* e *RON*, que compõem o IAD, são determinadas a partir de modificações da razão de compressão do motor *CFR* até se atingir uma condição análoga ao LDI, que pode não retratar completamente condições de *MBT*, levando às diferenças de tendências observadas.

É importante salientar que para um motor com determinada razão de compressão, podendo-se isolar o efeito da octanagem em relação a outros parâmetros, existe um IAD ótimo, associado a um mapa de calibração de avanços ótimos. Aumentos superiores de IAD não contribuem para elevações de torque. Assim, as extrapolações observadas nas Figuras 6.5(a-d) auxiliam na indicação das tendências esperadas para elevações nas razões de compressão dos motores.

Para as condições operacionais não susceptíveis à ocorrência de detonação, 2250 e 3875 rpm em carga parcial, não foi possível estabelecer modelos estatisticamente significativos para correlacionar a concentração dos componentes com o torque desenvolvido.

6.2.2. Consumo de combustível

Considerando o consumo de combustível, foram obtidos modelos estatisticamente significativos para todas as condições operacionais avaliadas, apresentando as mesmas tendências, as quais podem ser observadas nos exemplos das Figuras 6.7(a-b), referentes a 5500 rpm em plena carga e 2250 rpm em carga parcial.



Figuras 6.7(a-b) – Consumo de combustível, (a) – 5500 rpm em plena carga; (b) – 2250 rpm em carga parcial.

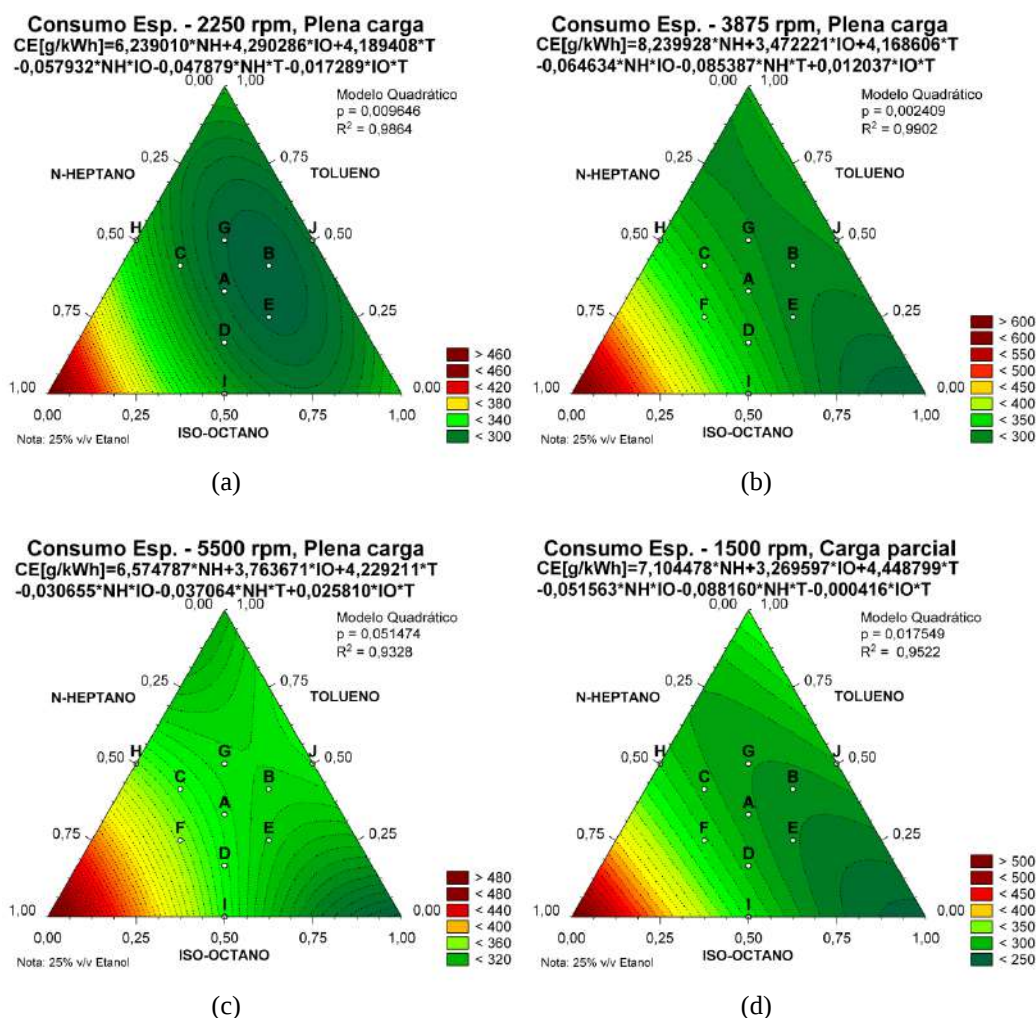
Maiores concentrações de tolueno tenderam a elevar o consumo de combustível, enquanto maiores concentrações de iso-octano e n-heptano tenderam a reduzi-lo. O n-heptano se mostrou mais efetivo que o iso-octano na redução do consumo de combustível. É interessante notar a relação que existe entre as Figuras 6.7(a-b) e a Figura 6.1(c), referente à relação ar-combustível estequiométrica. Quanto maior a relação ar-combustível estequiométrica da formulação, menor o consumo de combustível. Na Figura 6.1(c) nota-se uma leve assimetria que contribui para a maior efetividade do n-heptano em relação ao iso-octano na redução do consumo de combustível. As menores massas específicas e T50 (Figuras 6.1(d) e 6.1(e)) das formulações com maiores teores de n-heptano também contribuem em favor do n-heptano, na medida em que facilitam a evaporação e formação da mistura ar-combustível.

Apesar das pequenas diferenças entre as relações ar-combustível estequiométricas das formulações foi possível observar seu impacto no consumo de combustível.

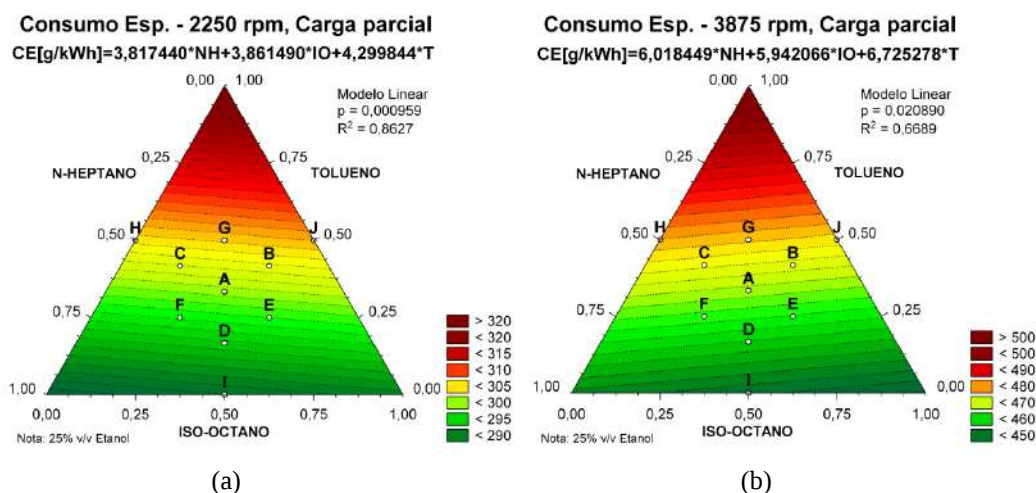
6.2.3.

Consumo específico de combustível

Nas Figuras 6.8(a-d) são apresentados os modelos estatisticamente significativos obtidos para as condições operacionais de plena carga e para 1500 rpm em carga parcial, enquanto nas Figuras 6.9(a-b) são mostrados os modelos obtidos para as condições de 2250 e 3875 rpm em carga parcial.



Figuras 6.8(a-d) – Consumo específico de combustível, (a) – 2250 rpm em plena carga; (b) – 3875 rpm em plena carga; (c) – 5500 rpm em plena carga; (d) – 1500 rpm em carga parcial.



Figuras 6.9(a-b) – Consumo específico de combustível, (a) – 2250 rpm em carga parcial; (b) – 3875 rpm em carga parcial.

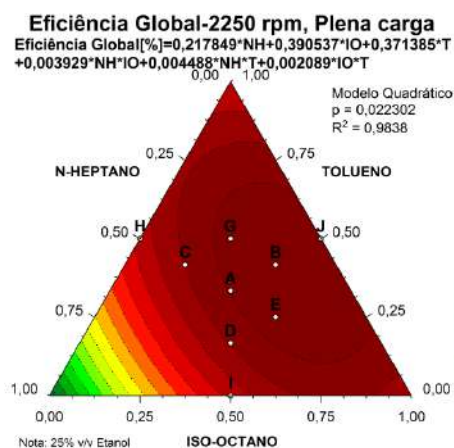
Para uma dada velocidade de rotação do motor, o consumo específico é influenciado por ambos, torque e consumo de combustível. Nas condições operacionais em que a ocorrência de detonação representou uma limitação para os combustíveis de baixa octanagem, há boa concordância entre o consumo específico (Figuras 6.8(a-d)) e o torque (Figuras 6.5(a-d)). Para estas condições operacionais, quanto maior é o torque, menor é o consumo específico, favorecendo as formulações com maiores concentrações de tolueno e iso-octano. O iso-octano se mostrou mais efetivo que o tolueno em reduzir o consumo específico. Tal fato pode ser explicado observando-se as Figuras 6.7(a-b) em que maiores teores de tolueno elevam o consumo de combustível (menores relações ar-combustível estequiométricas, Figura 6.1(c)), enquanto o iso-octano o reduz (maiores relações ar-combustível estequiométricas).

Fica também evidenciado que, para estas condições operacionais, o IAD do combustível apresenta maior impacto sobre o consumo específico do que a relação ar-combustível estequiométrica. As formulações com elevados teores de tolueno tendem a reduzir o consumo específico em relação às formulações com maiores teores de n-heptano, o que implica na elevação do torque e/ou redução do consumo. Ocorre que a elevação dos teores de tolueno tende a aumentar o IAD (Figura 6.1(a)), o que tende a elevar o torque e reduzir o consumo específico. Simultaneamente, maiores teores de tolueno decrescem a relação ar-combustível estequiométrica, aumentando o consumo de combustível e tendendo a elevar o consumo específico.

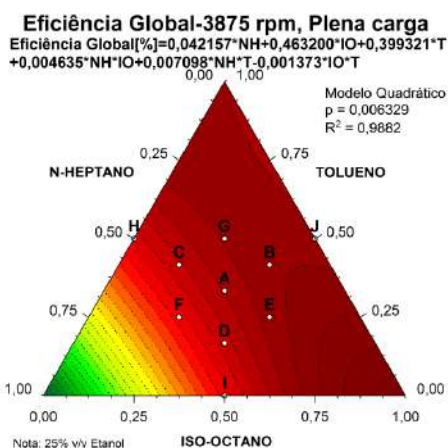
Nas condições operacionais não susceptíveis à detonação há boa concordância entre as tendências do consumo específico (Figuras 6.9(a-b)) e as tendências do consumo (Figura 6.7(a-b)). Nestas condições, o torque do motor não se altera significativamente entre os combustíveis, tanto que não foi possível obter modelos estatisticamente significativos para o torque nestas condições (Seção 6.2.1.). Desta forma, a relação ar-combustível estequiométrica se torna uma propriedade mais importante que o IAD na redução do consumo específico. Este fato pode ser uma consideração importante em aplicações especiais, incluindo formulações para combustíveis de competição, em que as elevadas velocidades rotacionais dos motores não deixam tempo hábil para ocorrência da detonação e o IAD tende a não ser um parâmetro tão importante. Motores de motocicletas (elevadas rotações) e motores estacionários operando em condições não sujeitas à detonação também podem ser favorecidos por esta consideração.

6.2.4. Eficiência global do motor

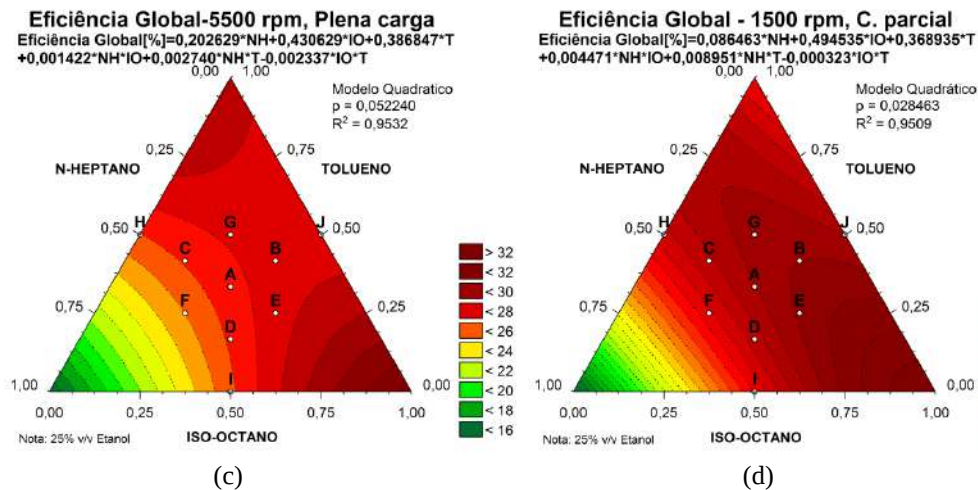
Considerando a eficiência global, obtiveram-se modelos estatisticamente significativos para todas as condições operacionais, exceto para 3875 rpm em carga parcial. Esta condição operacional apresentou as eficiências mais baixas e maiores dificuldades na observação de diferenças entre os combustíveis. Nas Figuras 6.10(a-d) e 6.11 são mostrados os modelos matemáticos e as tendências de influências dos componentes sobre a eficiência global, respectivamente para as condições operacionais passíveis e não passíveis de ocorrência de detonação.



(a)



(b)



Figuras 6.10(a-d) – Eficiência global do motor, (a) – 2250 rpm em plena carga; (b) – 3875 rpm em plena carga; (c) – 5500 rpm em plena carga; (d) – 1500 rpm em carga parcial.

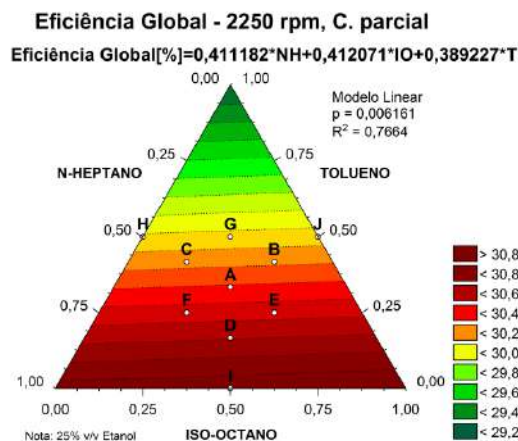


Figura 6.11 – Eficiência global do motor, 2250 rpm em carga parcial.

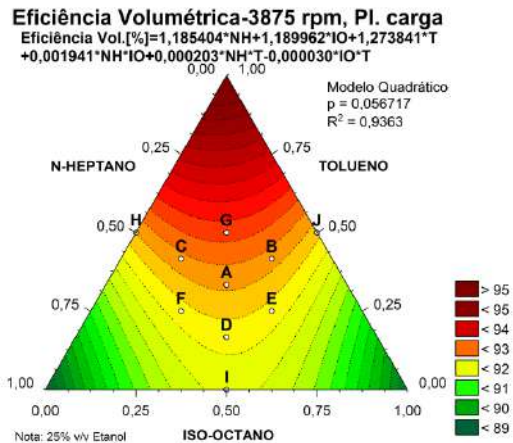
Foi observado comportamento coerente entre a eficiência global e o consumo específico (Figuras 6.8(a-d) e 6.9(a-b)) por razões semelhantes às consideradas na seção anterior. De uma maneira geral, os menores consumos específicos corresponderam a maiores eficiências. Para as condições operacionais passíveis de detonação há boa correlação entre as tendências observadas para a eficiência global (Figuras 6.10(a-d)) e o torque desenvolvido (Figuras 6.5(a-d)). Quanto maior o torque, maior a eficiência global para as formulações com maiores teores de tolueno e iso-octano. Novamente o iso-octano é levemente superior ao tolueno no aumento da eficiência do motor. O IAD do combustível (Figura 6.1(a)) tem maior impacto sobre a eficiência global do que a relação ar-combustível estequiométrica.

Nas condições operacionais não passíveis de detonação há boa concordância entre a eficiência global (Figura 6.11) e o consumo de combustível (Figura 6.7(b)). As diferenças observadas no consumo de combustível foram a principal causa das diferenças encontradas na eficiência global, uma vez que as diferenças de torque entre as formulações foram menos significativas nestas condições operacionais. Assim, a redução do consumo de combustível proporcionou maiores eficiências globais. Como o consumo de combustível está diretamente associado à relação ar-combustível estequiométrica (Figura 6.1(c)), esta propriedade se mostra mais importante que o IAD na melhora da eficiência global do motor.

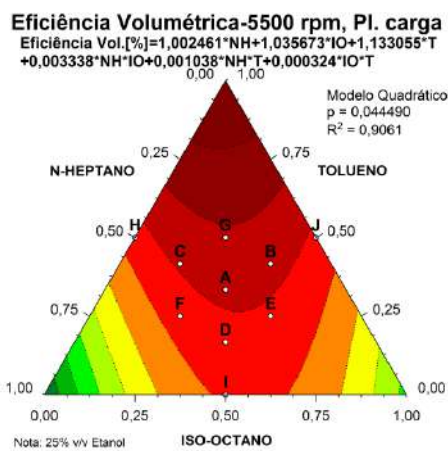
Por sua vez, o poder calorífico inferior por kg de ar estequiométrico (Figura 6.2) também contribuiu no comportamento da eficiência global, na medida em que, para as condições sujeitas à detonação, as formulações com maiores teores de iso-octano apresentaram elevadas eficiências globais e, simultaneamente, os mais baixos níveis de poder calorífico inferior por kg de ar estequiométrico. Nas condições não susceptíveis à detonação, as formulações com maiores teores de tolueno apresentaram as mais baixas eficiências e, simultaneamente, os mais elevados níveis de poder calorífico inferior por kg de ar estequiométrico. Na condição de 2250 rpm em carga parcial, há uma inversão de tendência da eficiência global em relação ao consumo específico ao comparar-se o comportamento das formulações de maiores teores de iso-octano com as formulações de maiores teores de n-heptano (comparar Figuras 6.11 e 6.9(a)). Os mais baixos níveis de poder calorífico inferior por kg de ar estequiométrico das formulações com maiores teores de iso-octano favoreceram suas maiores eficiências em relação às formulações com maiores teores de n-heptano, que, por sua vez, apresentaram os mais baixos consumos específicos.

6.2.5. Eficiência volumétrica

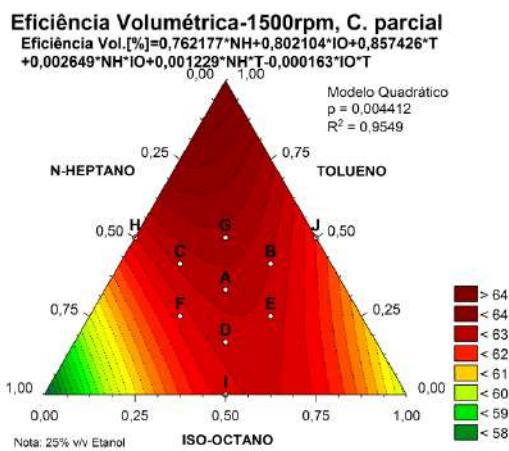
Com relação à eficiência volumétrica, obtiveram-se modelos estatisticamente significativos nas condições operacionais 3875 e 5500 rpm em plena carga e 1500 rpm em carga parcial. As tendências podem ser visualizadas nas Figuras 6.12(a-c) e estão relacionadas com a Figura 6.1(c), referente à relação ar-combustível estequiométrica.



(a)



(b)



(c)

Figuras 6.12(a-c) – Eficiência volumétrica, (a) – 3875 rpm em plena carga; (b) – 5500 rpm em plena carga; (c) – 1500 rpm em carga parcial.

Quanto menor a relação ar-combustível estequiométrica maior a eficiência volumétrica. Para esta análise, deve-se lembrar que foi adotada a mesma posição da borboleta do acelerador nos ensaios em dada condição operacional para as diferentes formulações. Desta forma, a relação observada entre eficiência volumétrica e relação ar-combustível estequiométrica pode ser explicada pelo fato de que as menores relações ar-combustível estequiométricas representam maiores quantidades de combustível fornecidas ao motor para um lambda fixo (maiores consumos, Figuras 6.7(a-b)), o que exige maiores quantidades de energia para sua vaporização. Esta energia é extraída do ar de admissão, resfriando-o e aumentando sua massa específica. Maiores concentrações de tolueno tenderam a melhorar a eficiência volumétrica.

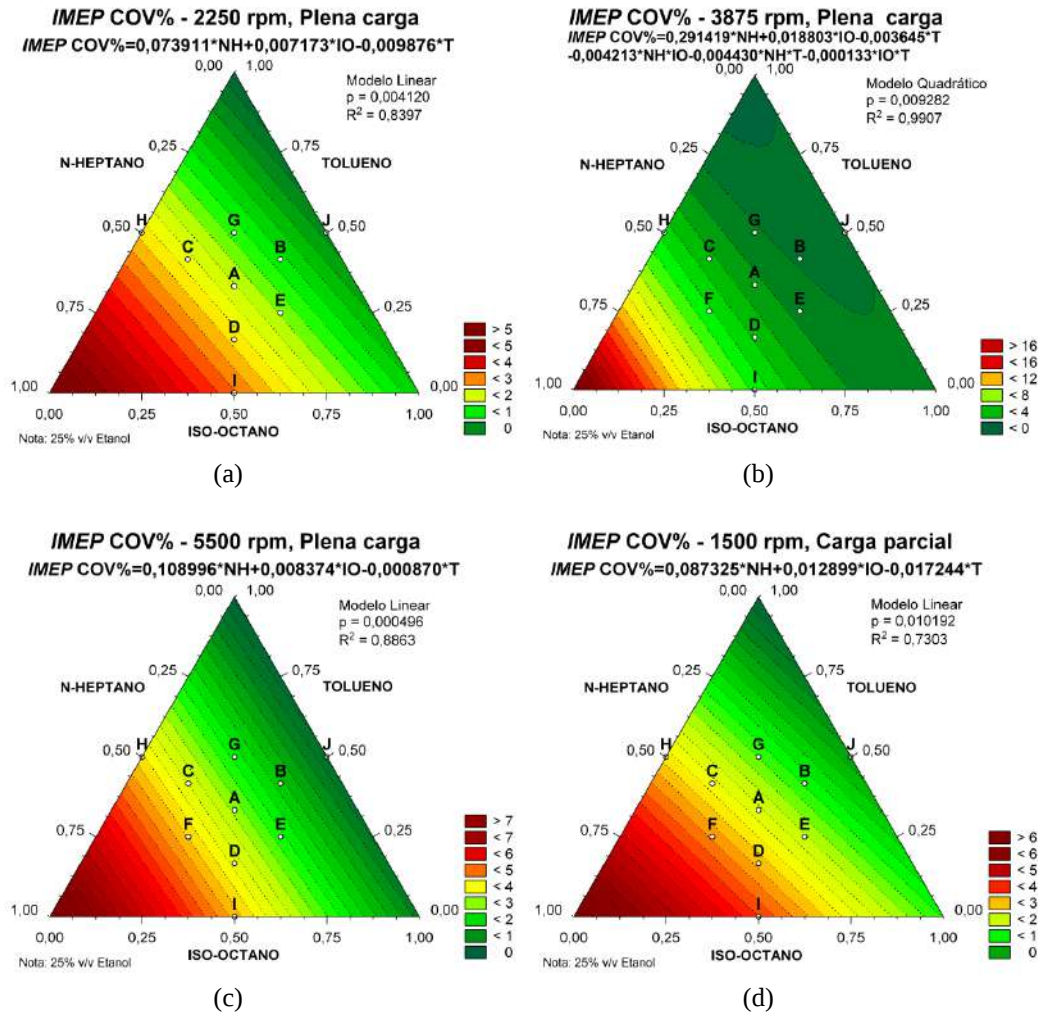
As maiores entalpias de vaporização por kg de ar estequiométrico das formulações com maiores teores de tolueno (Figura 6.3) também contribuem para

a melhoria das eficiências volumétricas destes combustíveis. O fato das formulações com maiores teores de iso-octano apresentarem tendências de eficiências volumétricas superiores às formulações com maiores teores de n-heptano evidenciam uma maior influência do consumo de combustível em relação à entalpia de vaporização por kg de ar estequiométrico na eficiência volumétrica. Isto ocorre porque o iso-octano contribui simultaneamente para aumentar o consumo de combustível e reduzir a entalpia de vaporização por kg de ar estequiométrico em relação ao n-heptano.

Para estas condições operacionais e combustíveis avaliados, a eficiência volumétrica desempenhou um papel de menor impacto no aumento da eficiência global do motor, uma vez que o aumento nas concentrações de iso-octano se mostrou mais efetivo que o aumento nas concentrações de tolueno na melhora da eficiência global (Figuras 6.10(b-d)).

6.2.6. Estabilidade de combustão

Neste trabalho a estabilidade da combustão foi avaliada através do coeficiente de variação da pressão média efetiva indicada, $COV\%_{IMEP}$, calculado conforme descrição no Capítulo 4. Valores reduzidos do $COV\%_{IMEP}$ estão associados a melhores estabilidades de combustão. Para o $COV\%_{IMEP}$ foram obtidos modelos estatisticamente significativos para as condições operacionais de 2250, 3875 e 5500 rpm em plena carga e para a condição de 1500 rpm em carga parcial. As tendências visualizadas nas Figuras 6.13(a-d) podem ser relacionadas com a Figura 6.1(a), referente ao IAD, Figuras 6.6(a-d), referentes ao ângulo de avanço de ignição calibrado, e com as Figuras 6.5(a-d), referentes ao torque de eixo.



Figuras 6.13(a-d) – Estabilidade de combustão, (a) – 2250 rpm em plena carga; (b) – 3875 rpm em plena carga; (c) – 5500 rpm em plena carga; (d) – 1500 rpm em carga parcial.

Foi possível relacionar estabilidade de combustão, IAD, avanços de ignição e torque somente para as condições operacionais passíveis de ocorrência de detonação. Tolueno e iso-octano melhoram a estabilidade de combustão porque, ao elevarem o IAD do combustível, permitem o ajuste da calibração do motor com maiores ângulos de avanço de ignição em relação ao PMS, otimizando o torque desenvolvido. Fica evidenciado nesta análise que esta otimização também contribui para a estabilidade de combustão. Elevadas concentrações de n-heptano decrescem o IAD, o torque e a estabilidade de combustão porque não é possível avançar a ignição para o ponto de torque ótimo quando o motor detona. Desta forma, maiores ângulos de avanço de ignição, calibrados no ponto ótimo (*MBT*), estão associados com $COV\%_{IMEP}$ mais baixos, indicando melhores estabilidades de combustão.

Apesar das diferenças encontradas entre as diferentes formulações reduzidas, os valores calculados para o $COV\%_{IMEP}$ foram em geral baixos. Todas as combinações de formulações com condições operacionais apresentaram $COV\%_{IMEP}$ bem inferiores a 10%, limite relacionado com problemas de dirigibilidade nos veículos (Heywood, 1988). Este fato reforça a adequação dos componentes e formulações reduzidas selecionados para representar o comportamento de gasolinas comerciais em motor.

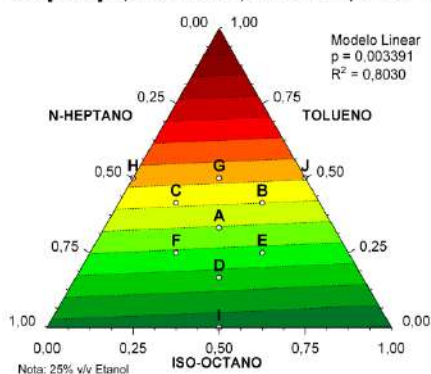
6.2.7. Emissões

Nesta seção são apresentadas as influências dos componentes nas emissões de dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos (HC). Devido a problemas operacionais durante a execução dos ensaios, não foi possível o registro das emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x). Os resultados das emissões de poluentes em concentração volumétrica podem ser vistos na Tabela AV.1 do Apêndice V e mostraram coerência com cálculos estequiométricos de combustão completa e simulação de combustão com hipótese de equilíbrio químico. Os modelos foram gerados para as variáveis de interesse tanto em concentração volumétrica (% volumétrico ou ppmC em volume) como em g/kWh, conforme metodologia de cálculo descrita no Capítulo 4. Será dada maior ênfase às emissões medidas em concentração volumétrica, para facilitar as correlações com as frações molares dos átomos de carbono, hidrogênio e oxigênio das formulações. Em seguida são feitas considerações a respeito das mudanças nas tendências das emissões específicas calculadas em g/kWh em relação às emissões medidas em concentração volumétrica.

6.2.7.1. Emissões de CO_2

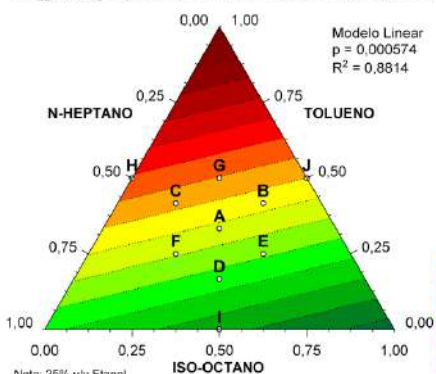
Nas Figuras 6.14(a-f) podem ser observados os modelos estatisticamente significativos elaborados para as emissões de CO_2 em todas as condições operacionais avaliadas.

Emissões de CO₂ - 2250 rpm, Plena carga
 $CO_2[\%vol.] = 0,160857 \cdot NH + 0,159926 \cdot IO + 0,178931 \cdot T$



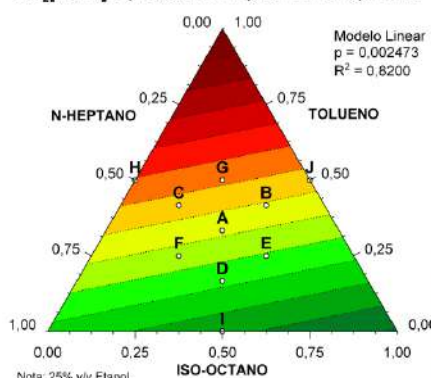
(a)

Emissões de CO₂ - 3875 rpm, Plena carga
 $CO_2[\%vol.] = 0,164286 \cdot NH + 0,159292 \cdot IO + 0,179355 \cdot T$



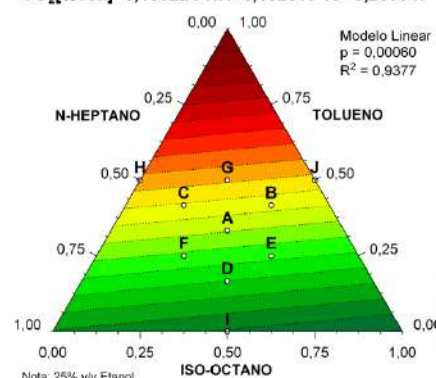
(b)

Emissões de CO₂ - 5500 rpm, Plena carga
 $CO_2[\%vol.] = 0,164890 \cdot NH + 0,161165 \cdot IO + 0,178859 \cdot T$



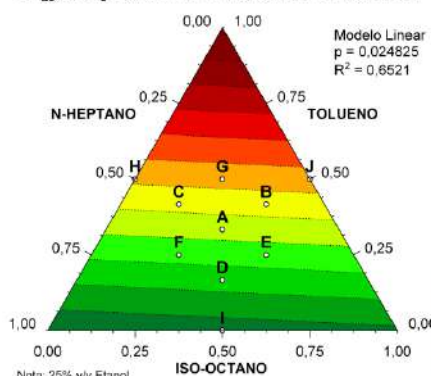
(c)

Emissões de CO₂ - 1500 rpm, C. parcial
 $CO_2[\%vol.] = 0,185224 \cdot NH + 0,182515 \cdot IO + 0,208547 \cdot T$



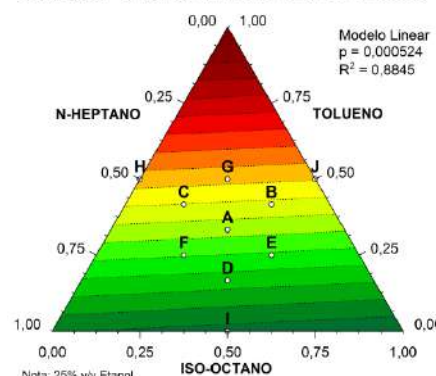
(d)

Emissões de CO₂ - 2250 rpm, C. parcial
 $CO_2[\%vol.] = 0,186880 \cdot NH + 0,187769 \cdot IO + 0,203007 \cdot T$



(e)

Emissões de CO₂ - 3875 rpm, C. parcial
 $CO_2[\%vol.] = 0,182790 \cdot NH + 0,181520 \cdot IO + 0,205309 \cdot T$



(f)

Figuras 6.14(a-f) – Emissões de CO₂, (a) – 2250 rpm em plena carga; (b) – 3875 rpm em plena carga; (c) – 5500 rpm em plena carga; (d) – 1500 rpm em carga parcial; (e) – 2250 rpm em carga parcial; (f) - 3875 rpm em carga parcial.

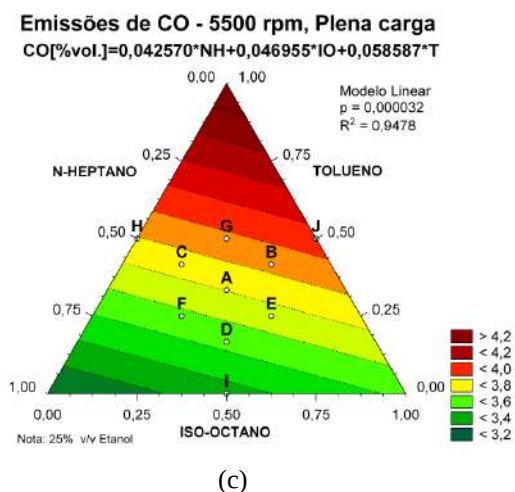
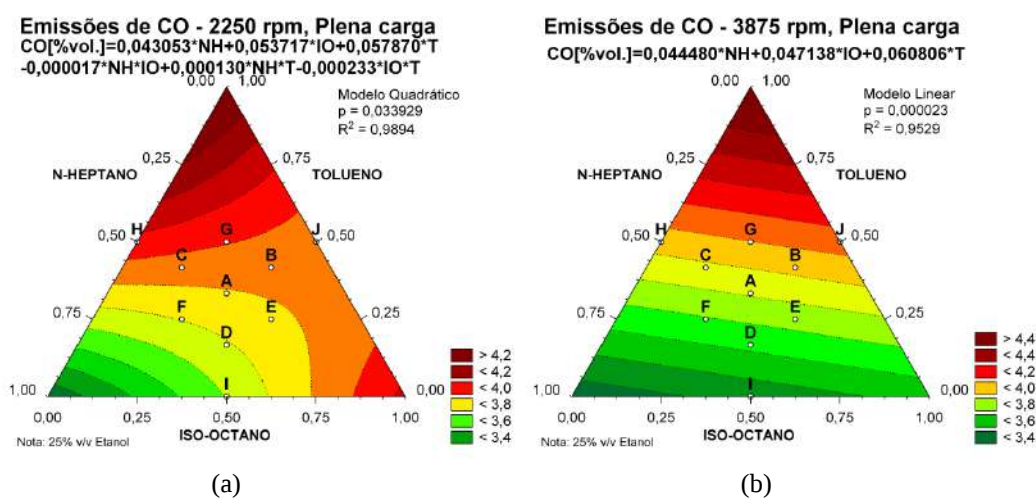
De uma maneira geral, as formulações com maiores teores de tolueno apresentaram níveis mais elevados de emissões de CO₂. Tal fato pode ser explicado em conjunto pelas maiores frações molares de carbono e oxigênio,

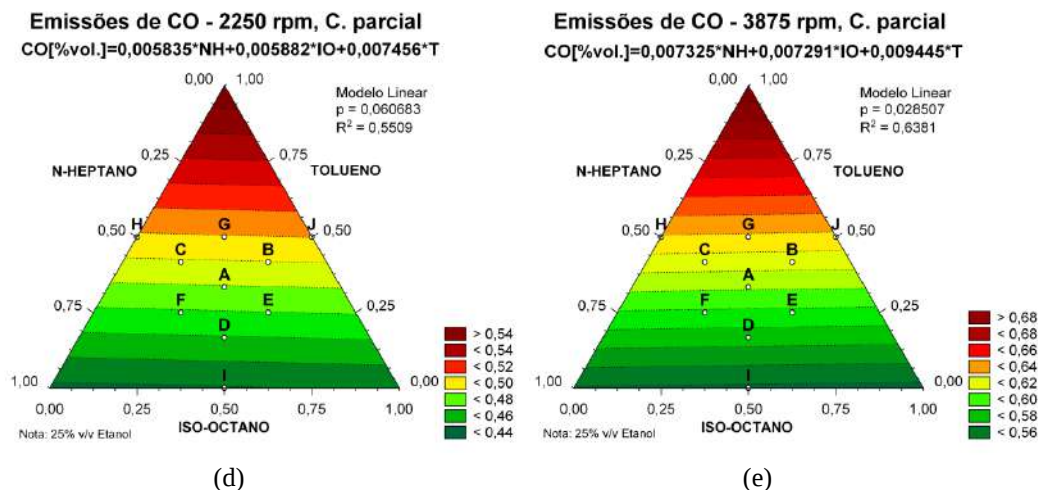
menores frações molares de hidrogênio e pelos maiores consumos de combustível destas formulações (Figuras 6.4(c-e) e Figuras 6.7(a-b)).

6.2.7.2.

Emissões de CO

Considerando as emissões de CO, foram elaborados modelos estatisticamente significativos para todas as condições operacionais, exceto para a condição de 1500 rpm em carga parcial, conforme pode ser observado nas Figuras 6.15(a-e).





Figuras 6.15(a-e) – Emissões de CO, (a) – 2250 rpm em plena carga; (b) – 3875 rpm em plena carga; (c) – 5500 rpm em plena carga; (d) – 2250 rpm em carga parcial; (e) - 3875 rpm em carga parcial.

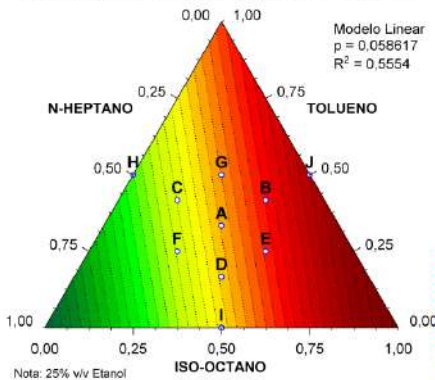
De uma maneira geral, as tendências foram semelhantes às observadas para o CO_2 e as formulações com maiores teores de tolueno apresentaram os níveis mais elevados de emissões de CO. Tal fato também pode ser explicado pelas maiores frações molares de carbono, menores frações molares de hidrogênio e pelos maiores consumos de combustível destas formulações (Figuras 6.4(c-d) e Figuras 6.7(a-b)), associados às suas menores eficiências de combustão, cuja análise será feita no Capítulo 7 (Figuras 7.10(a-d) e 7.11).

É interessante notar que, para a maior parte das condições operacionais, com exceção de 3875 rpm em carga parcial, maiores teores de n-heptano contribuíram para redução dos níveis de emissões de CO de forma mais efetiva que as formulações com maiores teores de iso-octano. Embora não tenha ocorrido uma correlação direta para todas as condições operacionais, de uma maneira geral, isto explica as tendências de maiores níveis de CO_2 das formulações com maiores teores de n-heptano em relação às formulações com maiores teores de iso-octano (Figuras 6.14(a-f)). Tal fato está relacionado com as maiores eficiências de combustão das formulações com maiores teores de n-heptano (Figuras 7.10(a-d) e 7.11), que promoveram maior conversão de CO em CO_2 , e cuja análise será feita no Capítulo 7.

6.2.7.3. Emissões de HC

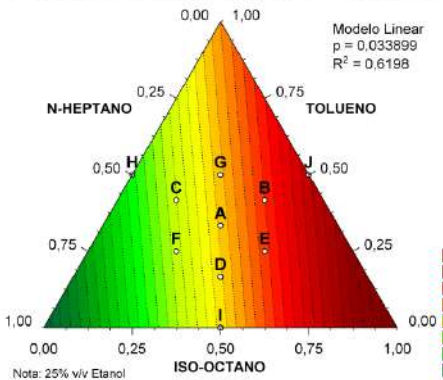
Com relação às emissões de HC foi possível obter modelos estatisticamente significativos para as condições operacionais de 3875 e 5500 rpm em plena carga e para as condições de 1500 e 3875 rpm em carga parcial, conforme pode ser observado nas Figuras 6.16(a-d).

Emissões de HC - 3875 rpm, Plena carga
 $HC[ppm_vC]=1,92847 \cdot NH+11,61228 \cdot IO+8,17354 \cdot T$



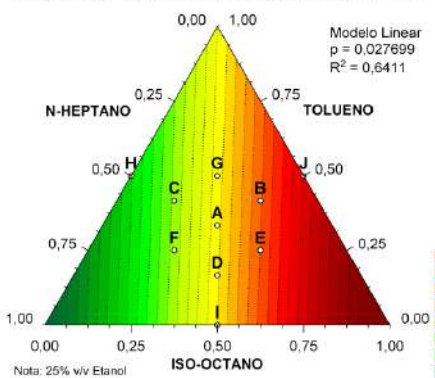
(a)

Emissões de HC - 5500 rpm, Plena carga
 $HC[ppm_vC]=2,961820 \cdot NH+7,799915 \cdot IO+5,737693 \cdot T$



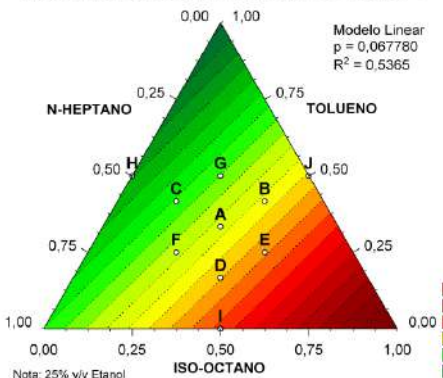
(b)

Emissões de HC - 1500 rpm, C. parcial
 $HC[ppm_vC]=5,28504 \cdot NH+14,45837 \cdot IO+9,59488 \cdot T$



(c)

Emissões de HC - 3875 rpm, C. parcial
 $HC[ppm_vC]=6,67568 \cdot NH+11,12521 \cdot IO+4,98425 \cdot T$



(d)

Figuras 6.16(a-d) – Emissões de HC, (a) – 3875 rpm em plena carga; (b) – 5500 rpm em plena carga; (c) – 1500 rpm em carga parcial; (d) - 3875 rpm em carga parcial.

Apesar da baixa qualidade dos ajustes dos modelos, de uma maneira geral os comportamentos foram semelhantes entre as diferentes condições operacionais, o que reforça as tendências verificadas. Em geral, as formulações com maiores teores de iso-octano contribuíram de forma mais significativa para elevar os níveis de emissões de HC, enquanto maiores teores de n-heptano contribuíram para

reduzi-lo. Neste caso, as relações H/C e O/C molares e as frações molares de carbono, hidrogênio e oxigênio (Figuras 6.4(a-e)) parecem não estar contribuindo para este comportamento, na medida em que estas são bastante semelhantes entre as formulações com maiores teores de iso-octano e as formulações com maiores teores de n-heptano. Novamente, a maior eficiência de combustão das formulações com maiores teores de n-heptano (Figuras 7.10(a-d) e 7.11) estão contribuindo para redução das emissões de HC.

A explicação encontrada para a diferença de comportamento entre as formulações com maiores teores de iso-octano e as formulações com maiores teores de tolueno está na maior disponibilidade de átomos de hidrogênio (maiores frações molares de hidrogênio, Figura 6.4(d), e maiores relações H/C, Figura 6.4(a)) para as formulações com maiores teores de iso-octano, enquanto as formulações com maiores teores de tolueno possuem maiores frações molares de oxigênio (Figura 6.4(e)), favorecendo a formação de CO e CO₂ em detrimento do HC.

A disponibilidade de átomos de hidrogênio e a eficiência de combustão têm influência direta na difusão do combustível na camada de óleo e na retenção do combustível no espaçamento entre pistão e cilindro, respectivamente. Estes são os mecanismos principais da emissão de HC nos motores (Heywood, 1988).

Deve-se ainda destacar que a maior massa molecular do iso-octano em relação aos demais componentes também favorece sua maior solubilidade no óleo lubrificante, na medida em que a solubilidade do combustível no óleo é uma função positiva da sua massa molecular. Neste caso, o combustível é absorvido na camada de óleo sobre o cilindro durante a admissão e compressão, sendo dessorvido no momento em que a pressão e a concentração de combustível nos gases do cilindro caem durante a expansão. Neste momento não é mais possível sua combustão completa, aumentando as emissões de HC (AVL, 2011).

De uma maneira geral as características moleculares dos diferentes combustíveis apresentaram maior impacto sobre as tendências de influência dos componentes nas emissões medidas em concentração volumétrica do que as condições de calibração do motor. Isto ocorreu porque as influências dos componentes em condições susceptíveis e não susceptíveis à detonação apresentaram tendências semelhantes.

Como tendência geral coerente, as formulações reduzidas B e E apresentaram os níveis de emissões mais próximos em relação aos do combustível comercial de referência. Comparando as emissões de CO e HC das formulações reduzidas B e E, com as do combustível comercial de referência utilizado, têm-se diferenças aleatórias de até 10% para o CO e de até 30% para o HC. Tal fato indica que, apesar das formulações reduzidas reproduzirem bem os outros parâmetros de desempenho (ver Capítulo 5), as emissões de poluentes de pequenas concentrações (CO, HC), em geral, apresentam desvios maiores. Portanto, o uso de formulações reduzidas nos programas de simulação não dispensará o emprego frequente de fatores de correção para as previsões quantitativas dos modelos de emissões destes códigos. Espera-se, entretanto, que as influências qualitativas dos componentes nas emissões das formulações reduzidas sejam mantidas para as emissões dos combustíveis comerciais.

6.2.7.4. Emissões específicas em g/kWh

É interessante notar que ao converter as emissões em concentração volumétrica para emissões específicas, em g/kWh, há algumas mudanças de tendências, uma vez que o consumo de combustível e a potência desenvolvida pelo motor passam a ter impactos mais significativos.

No caso das emissões de CO₂, nas condições passíveis de detonação, exemplificadas pela condição de 3875 rpm em plena carga, na Figura 6.17, as formulações com maiores teores de n-heptano apresentaram maiores níveis de emissões. Isto ocorreu em função dos menores torques (e potências) desenvolvidos com estas formulações. As tendências de menores emissões em concentração volumétrica, associadas às tendências de maiores torques das formulações com maiores teores de iso-octano em relação às formulações com maiores teores de tolueno (Figuras 6.14(a-d) e 6.5(a-d)), favorecem o iso-octano. Este componente contribui para menores níveis de emissões em g/kWh do que o tolueno.

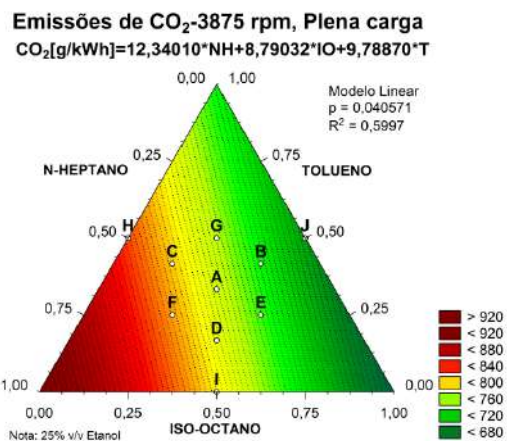


Figura 6.17 – Emissões de CO₂ em g/kWh a 3875 rpm, plena carga.

Considerando as condições operacionais não susceptíveis à detonação, exemplificadas pela condição de 2250 rpm em carga parcial, na Figura 6.18, os menores consumos de combustível (Figura 6.7(b)) favoreceram as formulações com maiores teores de n-heptano. Estas apresentaram tendências de menores níveis de emissões de CO₂, seguido pelas formulações com maiores teores de iso-octano e, por fim, tolueno. Isto porque, para estas condições operacionais, não há diferenças relevantes entre os torques (e potências) desenvolvidos com as diferentes formulações.

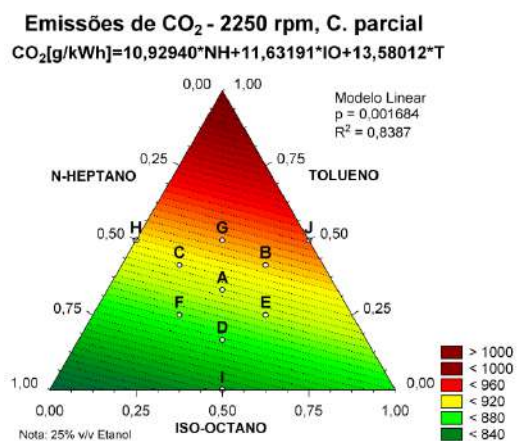


Figura 6.18 – Emissões de CO₂ em g/kWh a 2250 rpm, carga parcial.

Para as emissões de CO as mudanças de tendências foram semelhantes ao comportamento observado para o CO₂. Nas condições operacionais passíveis de detonação, exemplificadas pela condição de 3875 rpm em plena carga, na Figura 6.19, as formulações com maiores teores de n-heptano tenderam a emitir mais, em função dos menores torques (e potências) desenvolvidos com estas formulações. Novamente, as tendências de menores emissões em concentração volumétrica,

associadas às tendências de maiores torques desenvolvidos pelas formulações com maiores teores de iso-octano em relação às formulações com maiores teores de tolueno (Figuras 6.15(a-c) e 6.5(a-d)) favoreceram o iso-octano, que contribui para menores níveis de emissões em g/kWh do que o tolueno.

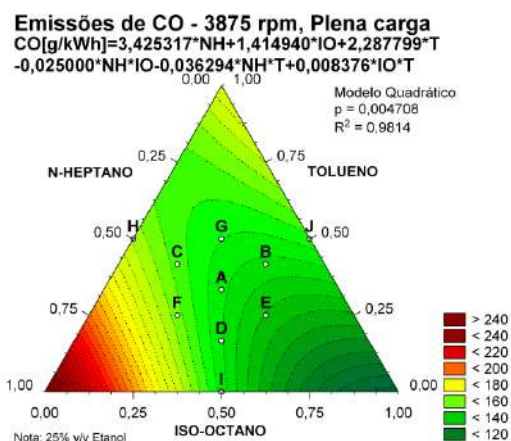


Figura 6.19 – Emissões de CO em g/kWh a 3875 rpm, plena carga.

Para as condições operacionais não passíveis de detonação, exemplificadas pela condição de 2250 rpm em carga parcial, na Figura 6.20, os menores consumos de combustível reforçam os menores níveis de emissões de CO em concentração volumétrica observados para as formulações com maiores teores de n-heptano (Figura 6.15(d)). Em seguida vêm as formulações com maiores teores de iso-octano e, por fim, tolueno. Isto porque para estas condições operacionais, não há diferenças relevantes entre os torques (e potências) desenvolvidos com as diferentes formulações.

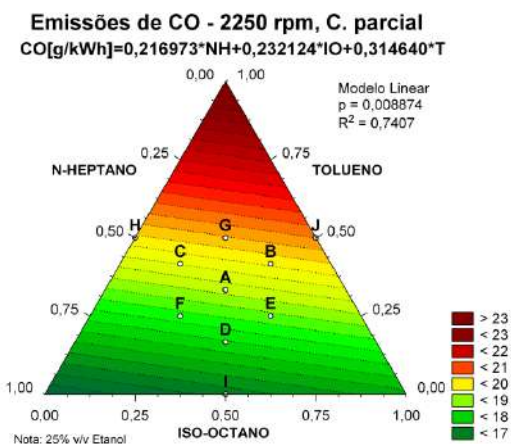
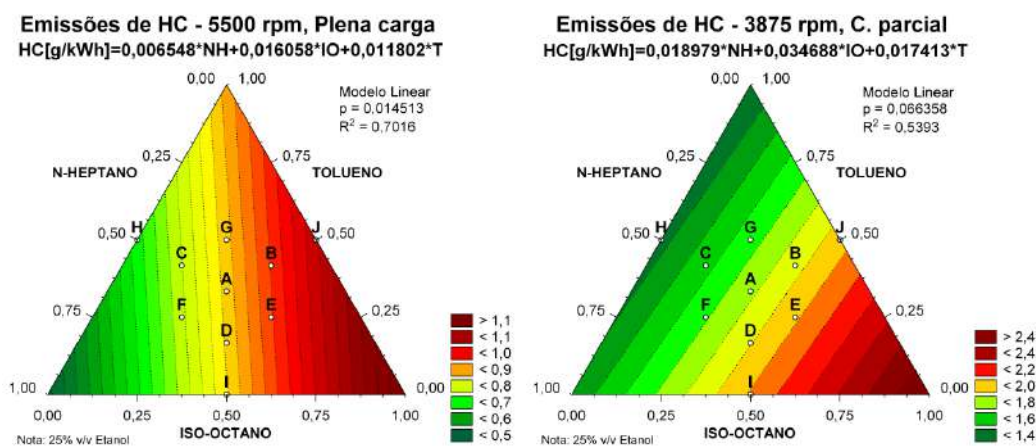


Figura 6.20 – Emissões de CO em g/kWh a 2250 rpm, carga parcial.

Com relação às emissões de HC, as tendências encontradas para as emissões em concentração volumétrica (Figuras 6.16(a-d)) são mantidas nas emissões em g/kWh, tanto nas condições susceptíveis como não susceptíveis à detonação. Estas condições são representadas, respectivamente, por 5500 rpm em plena carga, na Figura 6.21(a), e 3875 rpm em carga parcial, na Figura 6.21(b). A comparação com as Figuras 6.16(b) e 6.16(d) evidencia a manutenção das tendências em relação às emissões medidas em concentração volumétrica. Tal fato ocorreu devido às maiores diferenças observadas entre as emissões de HC das diferentes formulações reduzidas em concentração volumétrica, de tal forma que estas influenciaram de forma mais significativa as emissões em g/kWh.



Figuras 6.21(a-b) – Emissões de HC em g/kWh, (a) – 5500 rpm em plena carga; (b) – 3875 rpm em carga parcial.

6.3. Comentários

As análises apresentadas neste capítulo indicam que formulações reduzidas podem ser utilizadas para investigar componentes de combustíveis e identificar suas influências nas propriedades dos combustíveis e nos parâmetros de desempenho em motor.

Considerando as formulações reduzidas utilizadas no presente trabalho, nas condições operacionais sujeitas à detonação maiores concentrações de tolueno e iso-octano aumentam o torque e a eficiência global do motor e reduzem o consumo específico de combustível. N-heptano e iso-octano reduzem o consumo de combustível. O iso-octano é mais efetivo que o tolueno em reduzir o consumo

específico e melhorar a eficiência global porque contribui simultaneamente para elevar o torque e reduzir o consumo de combustível. Foi possível relacionar maiores concentrações de tolueno e iso-octano com melhores estabilidades de combustão. O tolueno tende a melhorar a eficiência volumétrica do motor.

Nas condições operacionais não susceptíveis à detonação, maiores teores de n-heptano e iso-octano reduzem o consumo de combustível e melhoram a eficiência global do motor.

O iso-octano se mostrou um componente importante ao promover efeitos desejáveis em todas as condições operacionais, independentemente da ocorrência de detonação.

As análises indicaram correlação entre a relação ar-combustível estequiométrica, o consumo específico de combustível e a eficiência global do motor sob condições onde a ocorrência de detonação não é susceptível. Desta forma, a relação ar-combustível estequiométrica é um parâmetro importante para classificação de combustíveis nas condições operacionais onde a detonação não se apresenta. Este fato pode ser uma consideração importante em aplicações especiais, incluindo formulações de combustíveis para motores de competição e motocicletas, com elevadas velocidades rotacionais, onde o IAD pode não ser um parâmetro tão importante, e para motores estacionários operando por longos períodos em condições não passíveis de detonação.

Com relação às emissões medidas em concentração volumétrica, o tolueno contribuiu de forma mais significativa para elevar os níveis de emissões de CO_2 e CO, devido às maiores frações molares de carbono e oxigênio, menores frações molares de hidrogênio, maiores consumos de combustível e menores eficiências de combustão das formulações com maiores teores de tolueno. Por sua vez, o n-heptano contribuiu de forma mais significativa para reduzir as emissões de CO e HC, devido à melhor eficiência de combustão das formulações com maiores teores deste componente. Os menores consumos de combustível favorecem n-heptano e iso-octano na redução das emissões de CO_2 e CO em relação ao tolueno. O iso-octano contribuiu para elevar de forma mais significativa os níveis de emissões de HC. Isto provavelmente deve-se à influência do iso-octano na maior disponibilização de átomos de hidrogênio e na redução do conteúdo de

oxigênio das formulações em relação ao tolueno, associada à menor eficiência de combustão em relação ao n-heptano. A maior massa molecular do iso-octano também favorece uma maior solubilidade no óleo lubrificante, das formulações com maiores teores deste componente, com impacto na elevação de emissões de HC.

De uma maneira geral o n-heptano contribuiu de forma mais significativa para reduzir as emissões medidas em concentração volumétrica. As características moleculares dos diferentes combustíveis e o consumo de combustível apresentaram maior impacto sobre as emissões medidas em concentração volumétrica do que as condições de calibração do motor.

Considerando as emissões em g/kWh, para CO₂ e CO, nas condições operacionais sujeitas à detonação a calibração do motor exerceu forte influência nas emissões, modificando as tendências das emissões medidas em concentração volumétrica. Neste caso, as formulações com maiores teores de n-heptano passaram a apresentar os maiores níveis de emissões. Para estas condições operacionais, as formulações com maiores teores de iso-octano apresentaram os menores níveis de emissões, devido aos maiores torques desenvolvidos, associados a emissões não elevadas em concentração volumétrica. O consumo de combustível tendeu a influenciar de forma mais significativa as condições operacionais não sujeitas à detonação, favorecendo a redução das emissões das formulações com maiores teores de n-heptano. Para as emissões de HC as tendências encontradas nas emissões medidas em concentração volumétrica são mantidas nas emissões em g/kWh, tanto nas condições passíveis como não passíveis de detonação. Isto ocorreu devido às maiores diferenças observadas entre as emissões das diferentes formulações reduzidas em concentração volumétrica, de tal forma que estas influenciaram mais significativamente as emissões em g/kWh. Neste caso, as formulações com maiores teores de n-heptano continuam apresentando os menores níveis de emissões, enquanto as formulações com maiores teores de iso-octano continuam apresentando os maiores níveis de emissões de HC.

Assim, o n-heptano favorece a redução das emissões de poluentes em g/kWh em aplicações onde a ocorrência de detonação não seja susceptível. Nas aplicações com exigência de elevada octanagem, iso-octano e tolueno favorecem a

redução de emissões em g/kWh de CO₂ e CO, sendo o iso-octano mais efetivo nestas reduções. Por sua vez, o iso-octano contribui para elevar as emissões em g/kWh de HC em relação ao tolueno e n-heptano.

Se o controle dos níveis de emissões para determinada aplicação adotar medição em concentração volumétrica, como é comum nos programas de inspeção de frotas, as formulações com maiores teores de n-heptano são favorecidas, tendendo a reduzir as emissões.

Apesar das maiores emissões de HC observadas para o iso-octano, de uma maneira geral este componente continuou apresentando efeitos desejáveis no que diz respeito às emissões de poluentes, sendo o componente de melhor compromisso para desempenho e emissões nas diferentes condições operacionais do motor.