

5 Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos modelos computacionais descritos no Capítulo 4. Primeiramente, serão apresentadas as simulações dos parâmetros de combustão, no motor *Fiat* 1,4 litros. Em seguida as predições de CO₂ equivalente e autonomia urbana para treze veículos representativos da frota nacional. E, finalmente, os parâmetros de desempenho e tempos de retomada de velocidade modelados para dois veículos flexíveis. As simulações serão validadas através da comparação com resultados experimentais não utilizados na geração dos modelos. Estes resultados são inéditos e atestam as contribuições do trabalho para o avanço das pesquisas relacionadas à modelagem computacional de motores/veículos voltada para o desenvolvimento de combustíveis.

5.1 Parâmetros de combustão

Conforme mencionado no Capítulo 4, o parâmetro básico para análise da combustão em motores é a curva de pressão no interior do cilindro. Neste item serão apresentados os resultados dos modelos desenvolvidos para a obtenção de curvas de pressão em comparação com os resultados experimentais, levantados por Machado (2012).

O expoente politrópico, o avanço de ignição e a eficiência volumétrica foram modelados e serviram como parâmetros de entrada para a modelagem das curvas de pressão. Os modelos obtidos para os três parâmetros citados também serão apresentados neste Capítulo.

5.1.1 Expoente politrópico

Conforme item 4.1.5.1, foi possível utilizar o mesmo valor de γ para as rotações 2250rpm, 3875rpm e 5500 rpm, sendo adotado 1,279. Este valor representa um valor intermediário entre os resultados experimentais de γ para os tempos de compressão (1,286) e expansão (1,278) na curva de pressão de referência (Mistura J a 3875 rpm – ver Figura 4.7) e está dentro da faixa proposta por Heywood (1988).

5.1.2 Avanço de Ignição

Para a modelagem do avanço de ignição, foram obtidas correlações por análise de regressão dos valores experimentais com o *IAD* dos combustíveis, para cada uma das rotações de teste. As correlações do avanço de ignição obtidas com as octanagens *MON* e *RON*, separadamente, resultaram em valores de R^2 ligeiramente menores. A Tabela 5.1 apresenta as equações, os coeficientes de determinação, R^2 , informados pelo programa Excel e os erros quadráticos médios, *EQM*, obtidos.

Tabela 5.1 – Modelos do avanço de ignição em função do *IAD* para as rotações 2250rpm, 3875rpm e 5500rpm.

Rotação (rpm)	Equação θ_{ig}	R^2	EQM ¹
2250	$\left(\frac{\theta_{ig}}{\theta_{ig0}}\right) = 0,4728 * \left(\frac{IAD}{IAD_0}\right) - 0,3995$ se $IAD \leq 96$	0,9752	1,6°
	$\theta_{ig} = -23$ se $IAD > 96$		
3875	$\left(\frac{\theta_{ig}}{\theta_{ig0}}\right) = 0,4464 * \left(\frac{IAD}{IAD_0}\right) - 0,3578$	0,9586	1,3°
5500	$\left(\frac{\theta_{ig}}{\theta_{ig0}}\right) = 0,8902 * \left(\frac{IAD}{IAD_0}\right)^2 - 1,5455 * \left(\frac{IAD}{IAD_0}\right) + 0,7779$	0,9546	1,3°

¹ $EQM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (y_{exp} - y_{sim})^2}$, onde n é o número de pontos, y_{exp} e y_{sim} os valores experimental e simulado da variável, respectivamente (ver item 4.5).

θ_{ig0} – ângulo de referência (-180°)

IAD_0 – octanagem de referência (87)

Para validar os modelos acima, foram utilizados os dados relativos aos ensaios com a gasolina de referência do trabalho de Machado (2012) cujo *IAD* vale 98,2. O critério de aceitação do resultado simulado foi de três graus para mais ou para menos em relação ao avanço de ignição experimental (Bougrine, 2009). A Tabela 5.2 ilustra os resultados experimentais e simulados para o avanço de ignição (θ_{ig}) com o citado combustível nas três rotações de teste.

Tabela 5.2 – Resultados experimentais e simulados para o avanço de ignição com a gasolina de referência.

Rotação (rpm)	θ_{ig} experimental (°APMS)	θ_{ig} simulado (°APMS)	Diferença (°)
2250	23,5	24,1	0,6
3875	26,5	26,3	0,2
5500	32	30,2	1,8

De acordo com a Tabela 5.2, os valores de avanço de ignição simulados situaram-se dentro da faixa de aceitação já mencionada. Portanto, os modelos apresentados na Tabela 5.1 foram considerados válidos.

A Figura 5.1 apresenta os resultados dos modelos acima descritos em comparação com os valores experimentais do avanço de ignição para todos os combustíveis nas três rotações de teste.

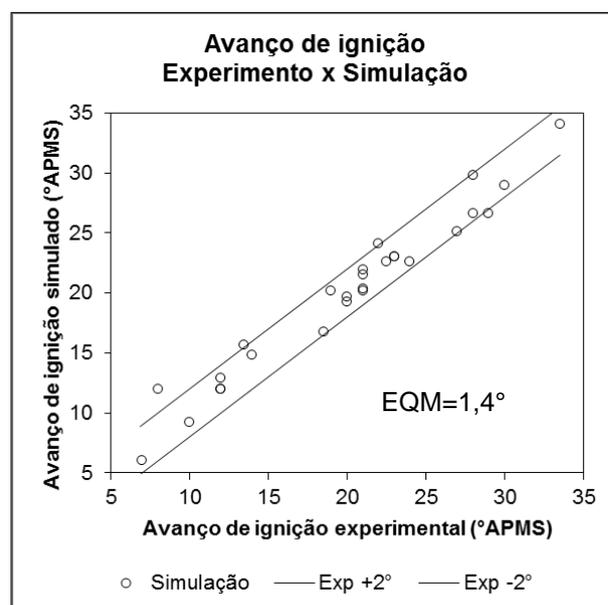


Figura 5.1 – Gráfico comparativo dos resultados experimentais e simulados para o avanço de ignição com todos os combustíveis nas três rotações de teste.

Foram obtidos valores de R^2 acima de 0,9 (correlação muito forte), tanto para os modelos individuais em cada rotação, conforme consta na Tabela 5.1. Para o ajuste por regressão envolvendo todos os resultados, mostrado na Figura 5.1, pode-se notar que apenas um resultado simulado apresentou diferença maior do que 2

graus em relação ao experimento. Além disso, o erro quadrático médio (*EQM*) ficou em 1,4 graus, muito próximo da resolução dos modelos para o ângulo do eixo de manivelas, que é de 1 grau. Portanto, os resultados comprovam que os valores experimentais e simulados são fortemente aderentes e que os modelos desenvolvidos predizem o avanço de ignição com adequada precisão.

5.1.3 Eficiência volumétrica

A eficiência volumétrica (η_v) foi modelada em função da relação ar-combustível estequiométrica (RAC_{esteq}) das misturas pertencentes à matriz de combustíveis testada por Machado, 2012. Esta variável também foi utilizada como parâmetro de entrada para a modelagem das curvas de pressão, sendo necessária para o cálculo da massa de ar admitida pelo motor. As equações obtidas por análise de regressão para as três rotações e combustíveis de teste, bem como os valores de R^2 e *EQM* são apresentados na Tabela 5.3. Além disso, a referida tabela apresenta também os resultados médios da incerteza experimental, $I_{Eméd}$, de η_v , calculada por Machado (2012).

Tabela 5.3 – Modelos da eficiência volumétrica em função da RAC_{esteq} para as rotações 2250rpm, 3875rpm e 5500rpm.

Rotação (rpm)	Equação η_v	R^2	EQM	$I_{Eméd}$
2250	$0,62726372 * (RAC_{esteq}^3) - 24,769517$ $* (RAC_{esteq}^2) + 325,9685$ $* (RAC_{esteq}) - 1428,75$	0,8362	0,0021	0,0020
3875	$0,30054570 * (RAC_{esteq}^3) - 11,829651$ $* (RAC_{esteq}^2) + 155,1694$ $* (RAC_{esteq}) - 677,36$	0,7752	0,0019	0,0015
5500	$0,58791783 * (RAC_{esteq}^3) - 23,19280$ $* (RAC_{esteq}^2) + 304,9204$ $* (RAC_{esteq}) - 1335,21$	0,5914	0,0033	0,0011

Os modelos de eficiência volumétrica foram validados com os dados relativos aos ensaios com a gasolina de referência do trabalho de Machado (2012) cuja RAC_{esteq} vale 13,13. O critério de validação foi tal que a diferença para o valor experimental não ultrapasse a ordem de 10^{-3} unidades, equivalente à incerteza experimental reportada por Machado (2012). As diferenças encontradas foram de 0,0085, 0,0007 e 0,0018 para as rotações, 2250, 3875 e 5500 rpm.

A Figura 5.2 apresenta os resultados dos modelos acima descritos em comparação com os valores experimentais da eficiência volumétrica para todos os combustíveis nas três rotações de teste.

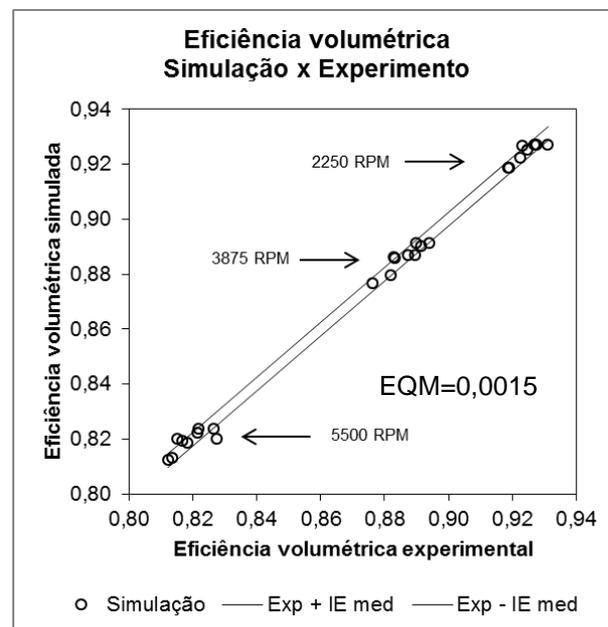


Figura 5.2 – Gráfico comparativo dos resultados experimentais e simulados de eficiência volumétrica para todos os combustíveis nas três rotações de teste.

Quando analisados individualmente, os modelos para cada rotação resultaram em correlações fortes para 2250 e 3875 rpm e moderada para 5500 rpm, de acordo com a Tabela 5.2. No entanto, considerando o ajuste envolvendo todos os resultados, ilustrado na Figura 5.2, verifica-se que somente três resultados simulados situaram-se além da faixa de aceitação cujos limites são os resultados experimentais mais ou menos a incerteza média reportada por Machado (2012), de 0,0015. Além disso, o EQM obtido para o modelo computacional foi similar à mencionada incerteza experimental. Isso comprova que os valores experimentais e simulados são fortemente aderentes e que os modelos propostos reproduzem com eficácia a eficiência volumétrica.

5.1.4 Curvas de pressão

De posse das características físico-químicas dos combustíveis e dos dados construtivos do motor, pode-se aplicar os modelos descritos no Capítulo 4, na seção 4.1, para simular as curvas de pressão no interior do cilindro do motor.

Conforme item 5.1.2, a octanagem exerce forte influência sobre o avanço de ignição, que por sua vez, afeta os níveis de pressão no interior do cilindro. Quanto à octanagem, as gasolinas nacionais estão especificadas em duas categorias: comum, com *IAD* mínimo de 87 e premium, com *IAD* mínimo de 91 (ANP, 2013).

Serão apresentadas comparações dos resultados experimentais e simulados da Mistura C, que possui octanagem ligeiramente abaixo daquela especificada para a gasolina comum (*IAD*=86,7). O objetivo é ilustrar a aderência entre as curvas medidas e calculadas para as três rotações de teste, mesmo com um combustível que não atende à especificação nacional.

Em seguida, serão mostrados os resultados de três combustíveis em uma dada rotação, representando níveis de octanagem baixo, intermediário e alto em relação às gasolinas comerciais. Para tanto, foram selecionadas as Misturas H (*IAD*=82,7), A (*IAD*=90,6) e G (*IAD*=94,2), de forma que sejam contempladas as duas categorias de gasolina especificadas e um caso de gasolina fora de especificação (*IAD*=82,7).

Serão apresentados, ainda, gráficos comparativos contendo os valores de *IMEP* e torque do motor: medidos pelo sistema de aquisição de dados do banco de provas e simulados, obtidos através das curvas de pressão simuladas.

Como forma adicional de avaliar a similaridade do formato das curvas de pressão experimentais e simuladas, a pressão máxima e o ângulo do eixo de manivelas em que esta foi alcançada também serão mostrados, bem como as diferenças entre estes valores.

As Figuras 5.3 a 5.5 ilustram as curvas de pressão experimentais e simuladas para a mistura C em 2250rpm, 3875rpm e 5500rpm.

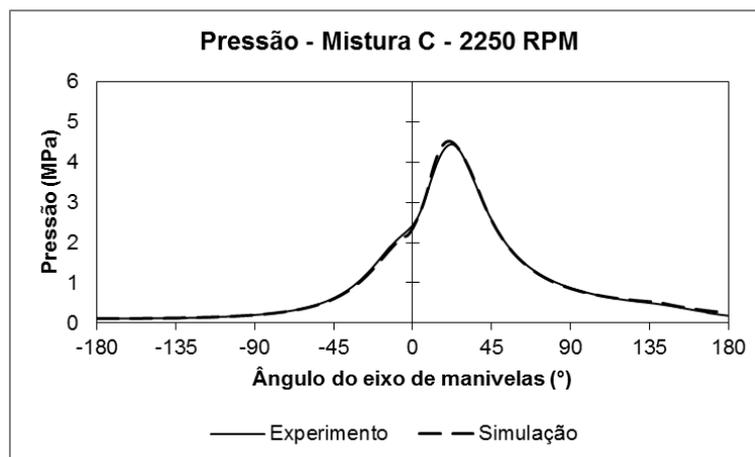


Figura 5.3 – Curvas de pressão experimental e simulada - Mistura C a 2250 rpm.

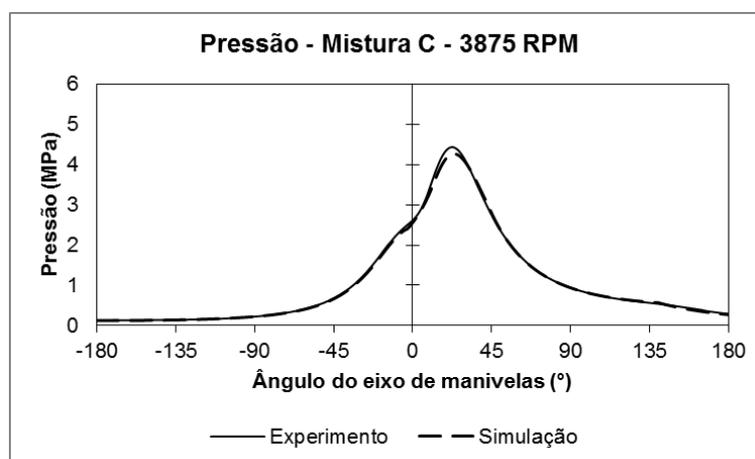


Figura 5.4 – Curvas de pressão experimental e simulada - Mistura C a 3875 rpm.

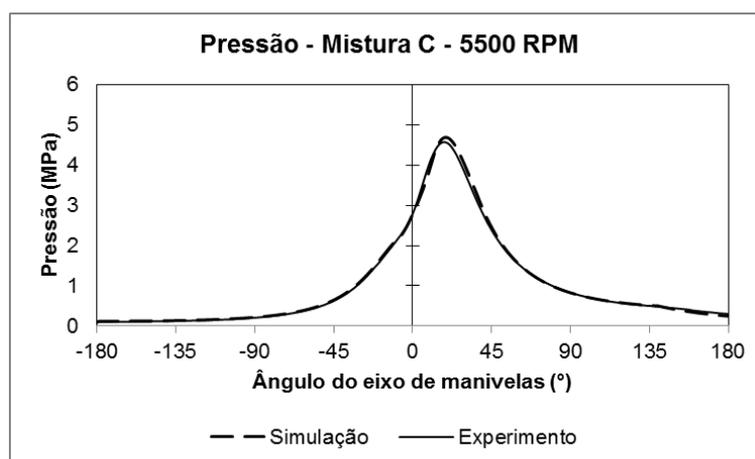


Figura 5.5 – Curvas de pressão experimental e simulada - Mistura C a 5500 rpm.

Para as três rotações é importante ressaltar a elevada aderência entre as curvas experimentais e simuladas, mostrando que os modelos são capazes de reproduzir os

efeitos da variação de rotação, mesmo simulando o comportamento de um combustível que não atende à especificação de octanagem requerida para o motor.

Nas rotações 2250rpm e 3875rpm a pressão apresentou comportamento bastante similar ao longo dos tempos de compressão e expansão, atingindo pressões máximas mais altas em comparação com 5500rpm. Por isso, nessa faixa de rotação (2250rpm a 3875rpm) o torque do motor é mais elevado e próximo ao valor máximo informado pelo fabricante. A rotação 5500rpm, referente à potência máxima informada pelo fabricante, resultou em níveis de pressão mais baixos, em função da queda da eficiência volumétrica. No entanto, a potência máxima é alcançada nesse ponto, pois a queda na pressão é suplantada pelo aumento da rotação do motor.

Procedimento semelhante foi adotado para analisar o impacto da variação da octanagem dos combustíveis nas curvas de pressão e no torque do motor. As Figuras 5.6 a 5.8 apresentam os resultados experimentais e simulados para a pressão nos tempos de compressão e expansão utilizando as Misturas H, A e G na rotação 2250rpm, selecionada por corresponder à rotação de torque máximo do motor informado pelo fabricante.

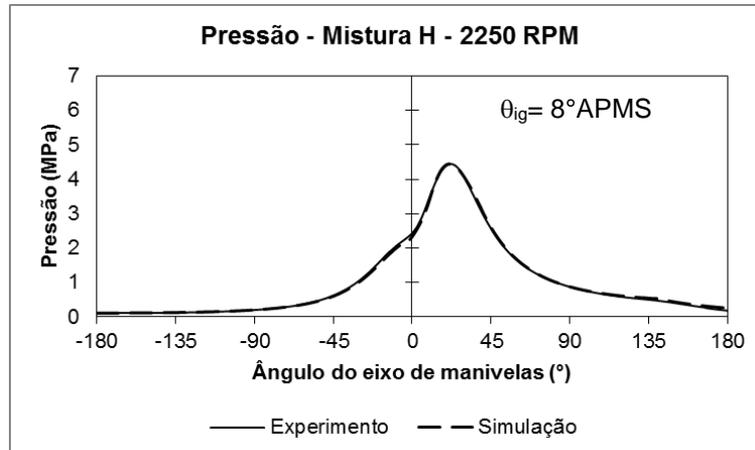


Figura 5.6 – Curvas de pressão experimental e simulada - Mistura H a 2250 rpm.

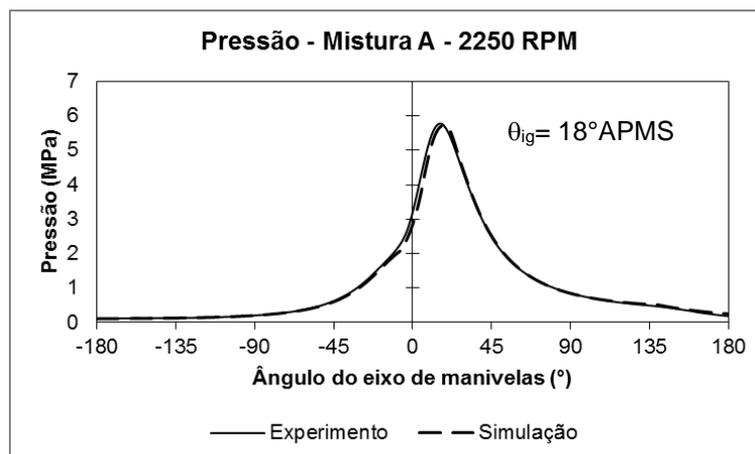


Figura 5.7 – Curvas de pressão experimental e simulada - Mistura A a 2250 rpm.

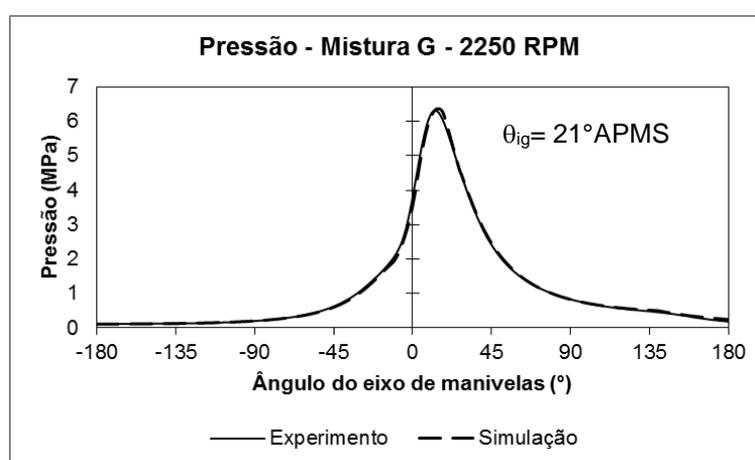


Figura 5.8 – Curvas de pressão experimental e simulada - Mistura G a 2250 rpm.

As curvas simuladas apresentaram grande aderência às experimentais. Isso mostra que os modelos também são capazes de reproduzir os efeitos de variações nas propriedades dos combustíveis, notadamente a octanagem, neste caso.

De acordo com as Figuras 5.6 a 5.8, o avanço de ignição foi maior conforme se aumentou a octanagem do combustível, resultando em curvas com três níveis distintos de pressão. O nível mais baixo ocorreu com a Mistura H. Devido a sua menor octanagem, o avanço de ignição teve que ser limitado em 8°APMS para evitar a ocorrência de detonação (Machado, 2012), resultando em um valor final baixo, isto é, em um ângulo do eixo de manivelas mais próximo do PMS, em comparação com as Misturas A e G. Isso significa que a combustão se iniciou mais tardiamente com a liberação de grande parcela de energia ocorrendo em volumes maiores da câmara de combustão (ângulos do eixo de manivelas mais distantes do PMS), gerando menores pressões no interior do cilindro.

Para as Misturas A e G, o avanço de ignição também foi limitado pela detonação (Machado, 2012), mas em ângulos maiores, 18°APMS e 21°APMS, devido aos seus respectivos valores mais elevados de octanagem. Por isso, a liberação de grande parcela de energia ocorreu em volumes menores da câmara de combustão (ângulos do eixo de manivelas mais próximos do PMS), resultando em pressões mais elevadas no interior do cilindro durante a combustão.

A partir das curvas de pressão simuladas e utilizando a eq. (4.47), foram obtidos os valores simulados de $IMEP$ ($IMEP_{sim}$). A Tabela 5.4 apresenta os valores de $IMEP$ experimentais ($IMEP_{exp}$) e $IMEP_{sim}$, bem como as diferenças percentuais encontradas entre estes para todas as configurações de teste.

Tabela 5.4 – Resultados de $IMEP_{exp}$ e $IMEP_{sim}$ e diferenças percentuais.

rpm	Mistura	$IMEP_{exp}$ (MPa)	$IMEP_{sim}$ (MPa)	Dif. %
2250	A	1,13	1,16	2,2%
	B	1,13	1,14	1,1%
	C	1,08	1,09	1,5%
	D	1,07	1,09	1,2%
	E	1,13	1,15	1,6%
	G	1,12	1,15	2,9%
	H	1,08	1,11	2,8%
	I	1,03	1,03	-0,3%
	J	1,15	1,16	1,1%
	3875	A	1,18	1,20
B		1,20	1,21	1,1%
C		1,13	1,13	0,2%
D		1,12	1,12	0,1%
E		1,19	1,21	2,0%
G		1,19	1,21	1,2%
H		1,10	1,12	1,8%
I		1,04	1,07	3,7%
J		1,22	1,21	-0,7%
5500		A	1,02	1,07
	B	1,05	1,07	1,9%
	C	1,02	1,03	0,9%
	D	1,01	1,02	0,7%
	E	1,05	1,08	2,2%
	G	1,05	1,07	1,7%
	H	1,02	1,04	1,4%
	I	1,01	1,01	-0,3%
	J	1,06	1,09	2,7%

Todos os resultados simulados apresentaram diferenças percentuais de até 3% em relação aos experimentos. Com base em trabalhos de modelagem anteriores (Barros, 2003; Najafy et al., 2009; Skarohlid, 2010; Melo et al., 2014) este percentual foi estabelecido como critério de aceitação das simulações. Apenas as misturas I a 3875rpm e A a 5500 rpm apresentaram $IMEP_{sim}$ com diferença percentual superior a 3%, com 3,7% e 4,5%, respectivamente.

Pode-se observar, ainda, que $IMEP_{sim}$ apresentou tendência sistemática de resultados maiores do que $IMEP_{exp}$, em média 1,5%. Isso pode ser explicado por desvios nos dados geométricos do motor, devido, por exemplo, a sua variação de produção ou nos dados de entrada para simulação da pressão no cilindro do motor.

Os resultados obtidos para $IMEP_{sim}$ confirmam que as curvas de pressão simuladas, mostradas nas Figuras 5.3 a 5.8, além de serem graficamente semelhantes às curvas experimentais, também reproduzem o comportamento da pressão média indicada no cilindro do motor, quando são variados os combustíveis.

Apesar de $IMEP$ ser utilizado como principal indicador de tendência semelhante entre resultados simulados e experimentais, um mesmo valor deste parâmetro pode ser obtido por curvas de pressão distintas. Por isso, torna-se importante avaliar com maior detalhe o aspecto gráfico das curvas de pressão simuladas e experimentais nos ângulos do eixo de manivelas correspondentes aos tempos de compressão e expansão. Para tanto, a pressão máxima e o ângulo de ocorrência desta pressão em ambos os casos foram comparados. As Figuras 5.9 a 5.14 apresentam os resultados para as três rotações de teste.

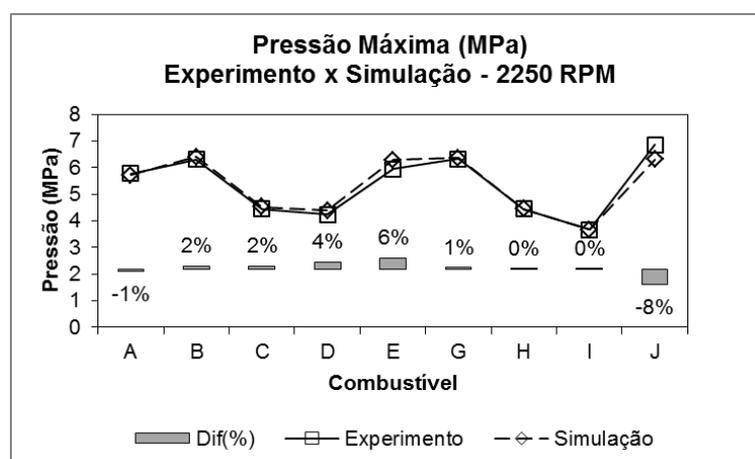


Figura 5.9 – Pressões máximas simuladas e experimentais – 2250rpm.

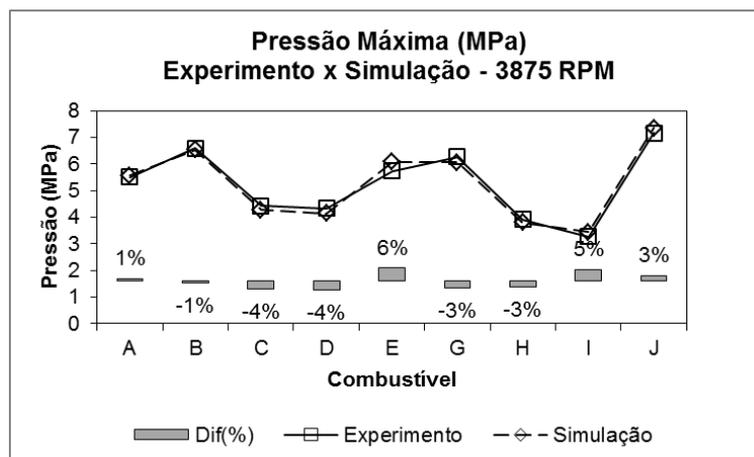


Figura 5.10 – Pressões máximas simuladas e experimentais – 3875rpm.

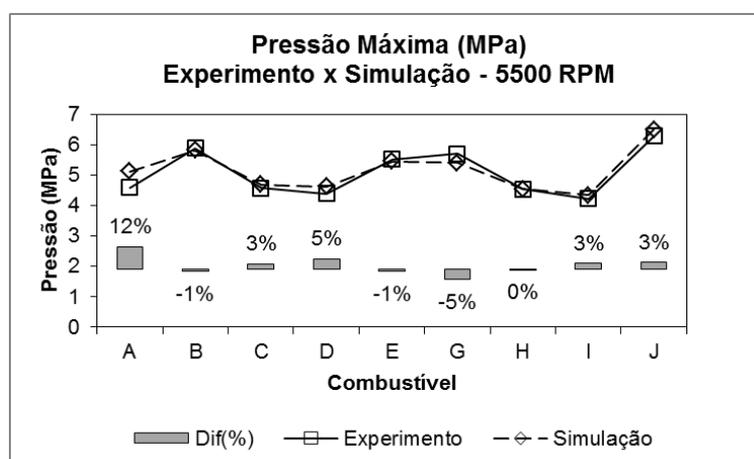


Figura 5.11 – Pressões máximas simuladas e experimentais – 5500rpm.

A grande maioria dos resultados simulados de pressão máxima situou-se dentro da faixa de variação de 5%, considerada como satisfatória para a modelagem do parâmetro em questão, em relação aos valores experimentais (Melo et al., 2014). Os casos simulados que excederam este percentual (Misturas E e J a 2250rpm – 6% e 8%, Mistura E a 3875 rpm – 6% e Mistura A a 5500rpm – 12%) não redundaram em modificação da tendência observada para os resultados de *IMEP* nos experimentos.

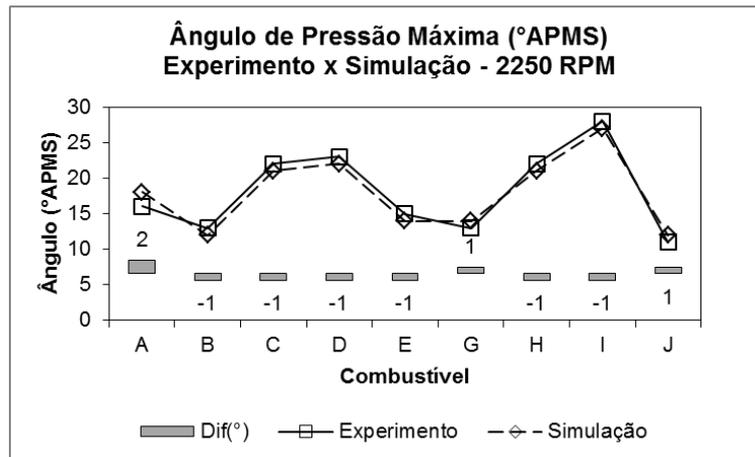


Figura 5.12 – Ângulos de pressão máxima simulados e experimentais – 2250rpm.

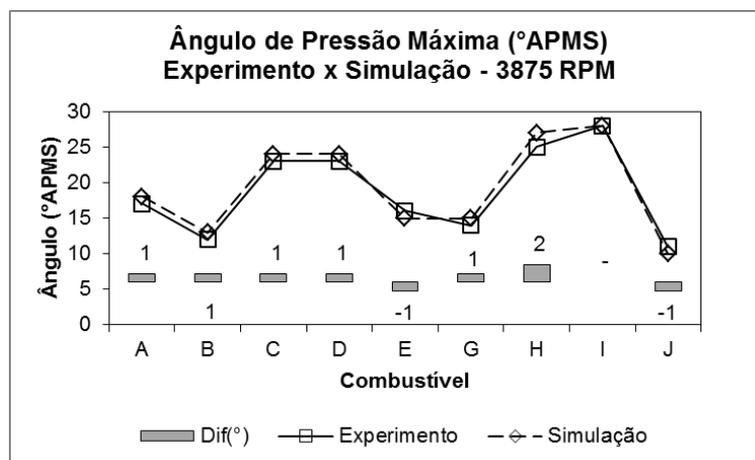


Figura 5.13 – Ângulos de pressão máxima simulados e experimentais – 3875rpm.

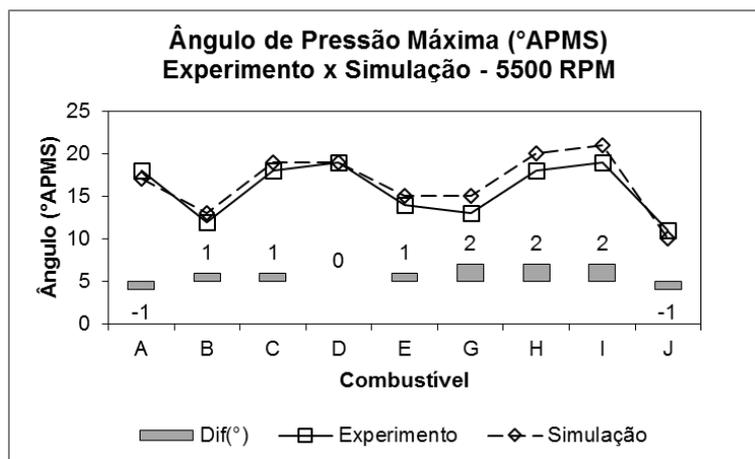


Figura 5.14 – Ângulos de pressão máxima simulados e experimentais – 5500 rpm.

Da mesma forma, os ângulos em que a pressão máxima ocorreu nas simulações distanciaram-se em até 2 graus do eixo de manivelas daqueles

observados nos experimentos, o que para efeitos de simulação foi considerado satisfatório (Bougrine et al., 2009).

5.1.5 Torque

Visando a evolução da simulação com foco no desempenho de motores e veículos, foram comparados os resultados experimentais e simulados de torque, obtidos conforme item 4.1.5.3. Antes, porém, serão apresentados os resultados do modelo desenvolvido para $TFMEP_{sim}$, os quais são utilizados para simulação do torque. Este modelo é representado pela eq. (5.1).

$$TFMEP_{sim} = 0,985 \times IMEP_{sim} \left[7,8452 \left(\frac{RPM_{ad}}{IAD} \right) + 0,0089 \right] \quad (5.1)$$

O fator $0,985$ foi introduzido de forma a compensar a tendência sistemática de $IMEP_{sim}$ assumir valores maiores que $IMEP_{exp}$ (ver item 5.1.4), não propagando tal tendência para os valores de $TFMEP_{sim}$ e, conseqüentemente, para o torque simulado (T_{sim}). A Figura 5.15 apresenta a comparação entre os resultados experimentais e simulados de $TFMEP$. O coeficiente de determinação (R^2) do ajuste entre $TFMEP_{exp}$ e $TFMEP_{sim}$ alcançou o valor de $0,9627$. O valor obtido para $EQM\%$ foi de 6% . Apesar do alto valor de $EQM\%$, a utilização do modelo não ocasionou distorções significativas nos valores de T_{sim} , conforme será visto a seguir.

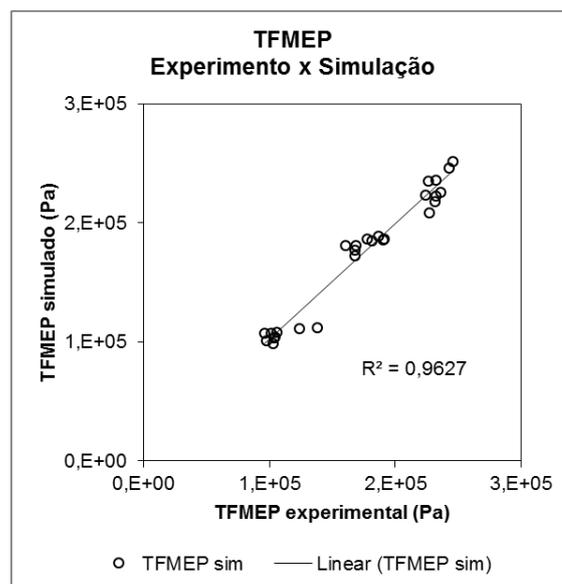


Figura 5.15 – Resultados comparativos de $TFMEP_{sim}$ e $TFMEP_{exp}$.

A Tabela 5.5 apresenta os valores de R^2 e EQM obtidos para o torque simulado em cada rotação de teste, bem como a incerteza média experimental encontrada no banco de provas para os valores experimentais.

Tabela 5.5 – Resultados de R^2 , EQM e $I_{Eméd}$ para a comparação dos valores de torque experimentais e simulados nas rotações 2250rpm, 3875rpm e 5500rpm.

Rotação (rpm)	R^2	EQM (Nm)	$I_{Eméd}$ (Nm)
2250	0,8828	1,73	0,27
3875	0,9840	1,60	0,27
5500	0,8101	2,40	0,21

Em todas as rotações de teste foi encontrado R^2 indicativo de forte correlação. No entanto, os erros quadráticos médios dos torques simulados se situaram uma ordem de grandeza acima da incerteza experimental.

A Figura 5.16 apresenta a comparação entre os valores de torque experimentais e simulados para todos os combustíveis, nas três rotações de teste.

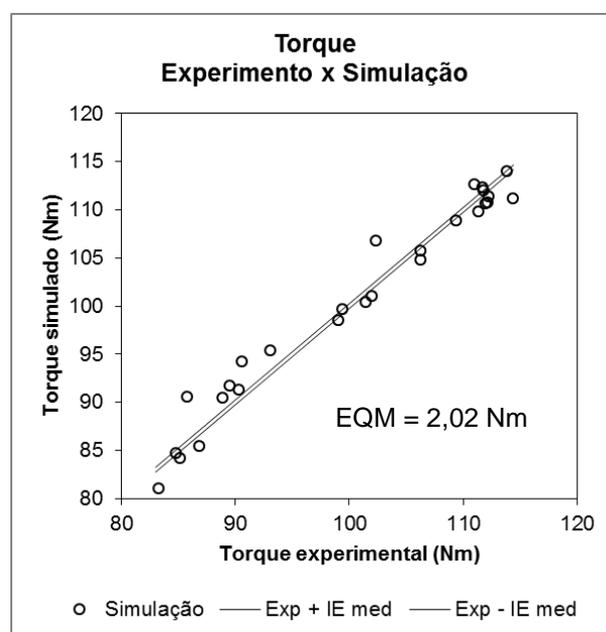


Figura 5.16 – Gráfico comparativo dos resultados experimentais e simulados do torque para todos os combustíveis nas três rotações de teste.

A comparação geral dos valores de torque simulados resultou em um erro médio quadrático (EQM) de 2,02Nm, valor uma ordem de grandeza superior àquele

obtido para a incerteza experimental geral de 0,25Nm. Isso pode ser explicado pelo fato de no cálculo do torque simulado estarem embutidos diversos valores obtidos também por simulação, tais como o avanço de ignição, a eficiência volumétrica e a curva de pressão no cilindro do motor, enquanto o torque experimental foi obtido a partir da medição de força pela célula de carga do dinamômetro. Conforme eqs. (4.52) e (4.53), o torque simulado (T_{sim}) é calculado utilizando-se o valor de $IMEP_{sim}$. Portanto, os resultados sistematicamente maiores de $IMEP_{sim}$, comentados anteriormente, influenciaram os valores do torque simulado (T_{sim}), sendo obtidos, também, resultados sistematicamente maiores do que os torques experimentais.

Diante dos resultados simulados, foi realizada uma análise com o objetivo de verificar a capacidade dos modelos de simulação do torque em reproduzir as tendências experimentais. Nas Figuras 5.17 a 5.19 são apresentados os resultados de torque para todas as misturas nas rotações 2250rpm, 3875rpm e 5500rpm.

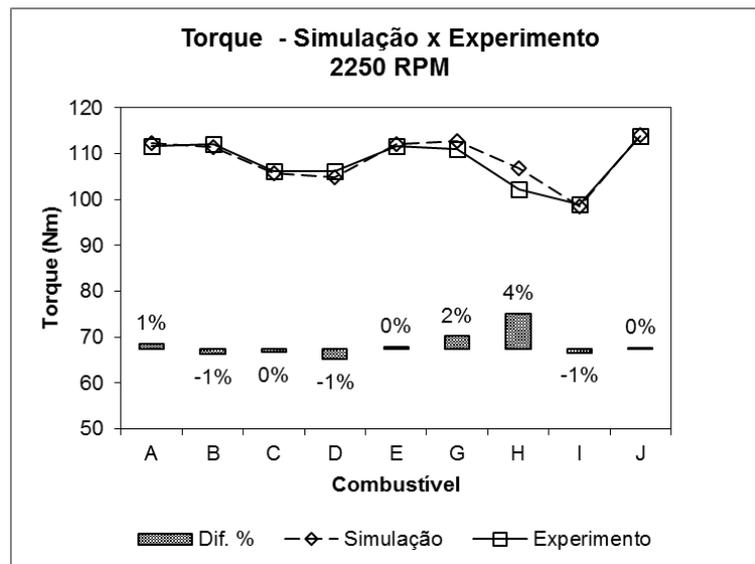


Figura 5.17 – Valores de torque experimentais e simulados a 2250rpm.

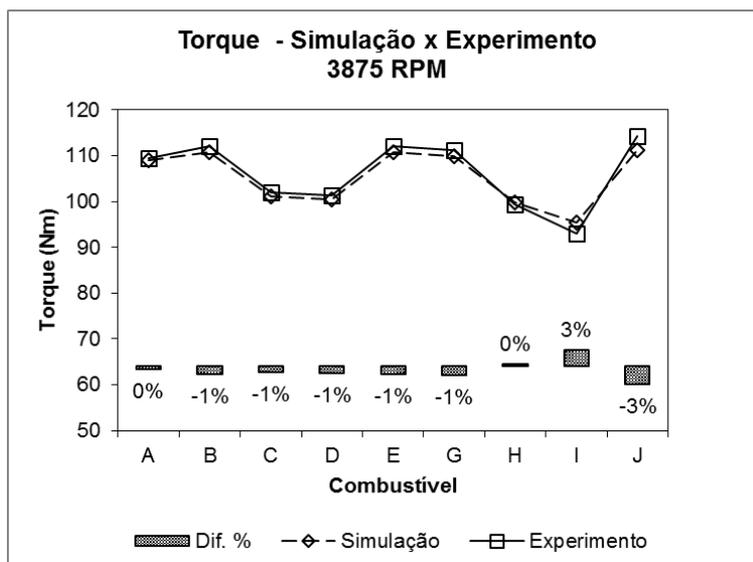


Figura 5.18 – Valores de torque experimentais e simulados a 3875rpm.

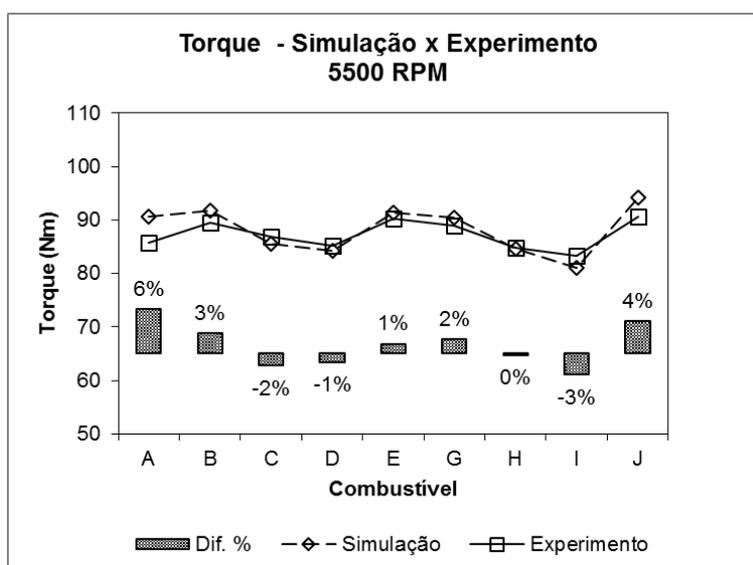


Figura 5.19 – Valores de torque experimentais e simulados a 5500rpm.

É possível notar que nas três rotações de teste os valores de torque simulados apresentaram tendências semelhantes às aquelas obtidas para os valores experimentais. Foram encontradas diferenças percentuais de até 3% entre as simulações e os experimentos, consideradas como satisfatórias com base em outros trabalhos na área de modelagem de motores e veículos (Millo et al., 2000; Barros, 2003; Anand, 2005; Bougrine et al., 2009; Carvalho et al., 2015). Apenas para as Misturas H a 2250rpm, bem como A e J a 5500rpm foram obtidas diferenças percentuais maiores, de 4%, 6% e 4%, respectivamente. No entanto, a tendência observada no experimento foi mantida.

5.2 Autonomia em veículos

Neste item serão apresentados os resultados dos modelos computacionais desenvolvidos para a simulação da autonomia urbana em veículos leves do ciclo Otto. Conforme já discutido no Capítulo 4, a autonomia urbana simulada é obtida a partir de propriedades dos combustíveis e de modelos para predição do CO_{2eq} .

A Tabela 5.6 abaixo apresenta, para cada veículo, a propriedade que resultou no melhor ajuste aos resultados experimentais de CO_{2eq} , em g/km, bem como o intervalo de tal propriedade dentro do qual o modelo gerado pode ser aplicado.

Tabela 5.6 – Características dos modelos de CO_{2eq} .

Veículo	Propriedade com melhor ajuste	Intervalo de aplicação do modelo
Fiat Uno Mille	ρ (kg/m ³)	744,8 a 755,1
VW Gol 1.6	ρ (kg/m ³)	744,8 a 755,1
Volvo S40 2.0T	ρ (kg/m ³)	718,0 a 760,9
VW Gol 1.0 2005	ρ (kg/m ³)	745,4 a 803,3
GM Vectra 2.0	PCS (MJ/kg)	41,1 a 43,1
Hyundai Tucson 2.0	ρ (kg/m ³)	744,8 a 755,1
Fiat Uno 1.0	PCS (MJ/kg)	25,3 a 43,1
Kia Cerato 1.6	ρ (kg/m ³)	744,8 a 755,1
Honda Civic 1.8	ρ (kg/m ³)	745,4 a 803,3
Ford Ka 1.0	ρ (kg/m ³)	745,4 a 803,3
VW Gol 1.0 2011	PCS (MJ/kg)	41,1 a 43,1
GM Celta 1.0	ρ (kg/m ³)	745,4 a 803,3
Peugeot 408 1.6T	ρ (kg/m ³)	747,8 a 758,9

Em 10 dos 13 veículos estudados, a massa específica foi a propriedade que apresentou melhores ajustes com os resultados experimentais de CO_{2eq} , enquanto em 3 veículos os melhores ajustes deste poluente ocorreram com o poder calorífico. Conforme mencionado no Capítulo 4, a análise de regressão foi conduzida caso a caso, pois cada veículo possui características particulares de calibração.

Os modelos gerados por análise de regressão são válidos dentro dos intervalos da propriedade do combustível utilizada para a sua construção. Conforme a base de dados cresça, maior poderá ser o intervalo de aplicação dos modelos, bem como

melhores deverão ser os ajustes entre as propriedades dos combustíveis e os resultados experimentais de CO_{2eq} . Dessa forma, os modelos poderão ser melhorados continuamente, tornando-se cada vez mais robustos, minimizando seus erros em relação aos resultados experimentais. A Tabela 5.7 apresenta os coeficientes angulares e lineares, A e B , bem como R^2 , e $EQM\%$ obtidos para os modelos de cada veículo.

Tabela 5.7 – Coeficientes angular, linear e de determinação dos modelos de CO_{2eq} .

Veículo	Ano	Fase PROCONVE	R^2	A	B	$EQM\%$
Fiat Uno Mille	1995	L2	0,7584	3,0142	-1,9204	0,8%
VW Gol 1.6	1997	L3	0,8230	1,5275	-0,5106	0,4%
Volvo S40 2.0T	2003	L3	0,9666	1,5372	-0,3202	0,6%
VW Gol 1.0	2005	L4	0,7059	-0,9081	1,7510	2,3%
GM Vectra 2.0	2007	L4	0,6679	-1,4723	2,6879	1,6%
Hyundai Tucson 2.0	2008	L4	0,0103	0,1936	1,0383	0,8%
Kia Cerato 1.6	2009	L5	0,4251	1,2724	-0,3489	0,9%
Honda Civic 1.8	2009	L5	0,9767	-1,0042	1,9679	0,5%
Fiat Uno 1.0	2009	L5	0,9312	0,1642	0,6144	1,0%
Ford Ka 1.0	2010	L5	0,3079	-0,4742	1,3001	3,0%
VW Gol 1.0	2011	L5	0,8370	-1,4034	2,3930	1,2%
GM Celta 1.0	2012	L5	0,8884	-0,6177	1,4310	0,6%
Peugeot 408 1.6T	2014	L6	0,9607	2,6814	-1,6232	0,4%

$$EQM\% = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum (y_{exp} - y_{sim})^2}}{\bar{y}_{exp}} \text{ (ver seção 4.5).}$$

Nota-se que o coeficiente de determinação apresentou elevada variação entre os veículos. Em quatro casos, para os veículos S40, Civic, Uno 1.0 e 408, foram encontrados R^2 acima de 0,9, indicando correlação muito forte com as respectivas propriedades dos combustíveis. Para cinco veículos, Uno Mille, Gol 1.6, Gol 1.0 2005, Gol 1.0 2011 e Celta foram encontradas fortes correlações ($0,7 \leq R^2 < 0,9$). No veículo Vectra foi obtida correlação moderada ($0,5 \leq R^2 < 0,7$). Nos veículos Cerato e Ka as correlações foram fracas ($0,3 \leq R^2 < 0,5$). E, finalmente, para o veículo Tucson a correlação foi desprezível ($R^2 < 0,3$).

Com relação ao coeficiente angular, foram obtidos valores positivos e negativos. Ou seja, variações direta e inversamente proporcionais do CO_{2eq} com

uma determinada propriedade, reforçando o argumento de que deveriam ser desenvolvidos modelos individuais para cada veículo.

Considerando que a incerteza experimental do ensaio de autonomia é de 1,5% (INMETRO, 2015) e que os valores de $EQM\%$ apresentados na Tabela 5.7 estão, em geral, dentro desta mesma faixa, os modelos de CO_{2eq} foram validados.

Apesar das correlações desprezível e fraca, os modelos dos veículos Tucson e Cerato apresentaram $EQM\%$ dentro do critério de aceitação adotado, indicando que o CO_{2eq} destes veículos apresenta pequena variação com a mudança dos combustíveis, considerando a faixa de aplicação dos modelos. Já o veículo Ka, cuja correlação do modelo foi fraca, bem como os veículos Gol 1.0 2005 e Vectra, apesar de correlações moderada e forte, excederam o limite pré-estabelecido, sendo encontrados $EQM\%$ de 3%, 2,3% e 1,6%, respectivamente. Para os demais veículos foram encontradas correlações moderadas, fortes ou muito fortes e todos os seus resultados simulados apresentaram $EQM\%$ dentro do critério de validação, de 1,5%.

Finalmente, foi realizada uma análise de tendências, com o objetivo de avaliar se os resultados simulados de autonomia urbana, mesmo aqueles obtidos a partir de modelos de CO_{2eq} com baixas correlações e com $EQM\%$ acima da incerteza do ensaio, seguem as tendências observadas nos experimentos. As Figuras 5.20 a 5.26 apresentam os gráficos comparativos dos resultados experimentais e simulados de autonomia urbana para os combustíveis listados na Tabela 4.6, bem como as diferenças percentuais entre os mesmos. No Apêndice II constam todos os resultados utilizados para a geração dos modelos de autonomia urbana.

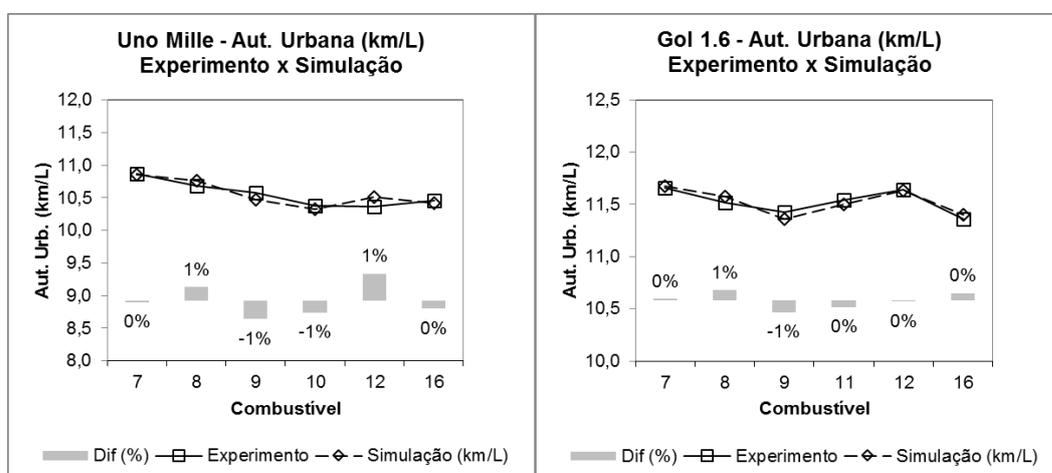


Figura 5.20 – Resultados experimentais e simulados de autonomia urbana para os veículos Uno Mille e Gol 1.6.

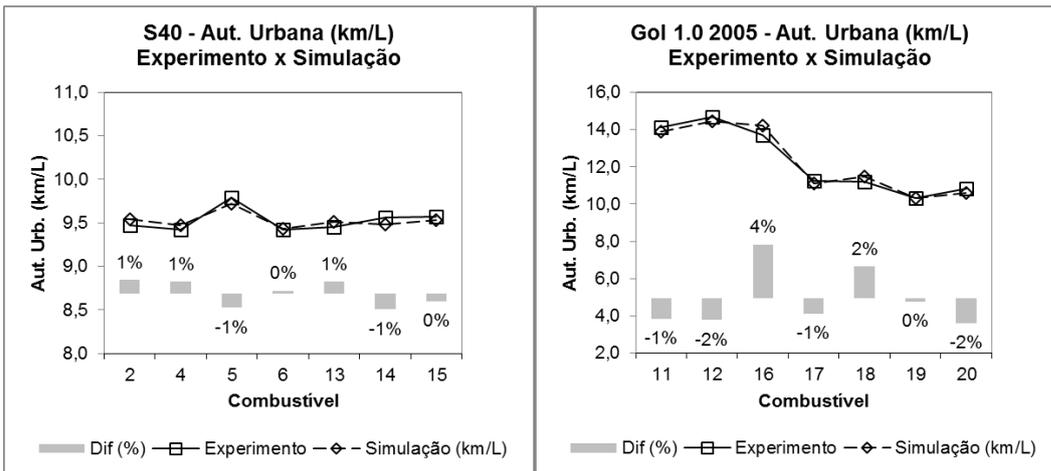


Figura 5.21 – Resultados experimentais e simulados de autonomia urbana para os veículos S40 e Gol 1.0 2005.

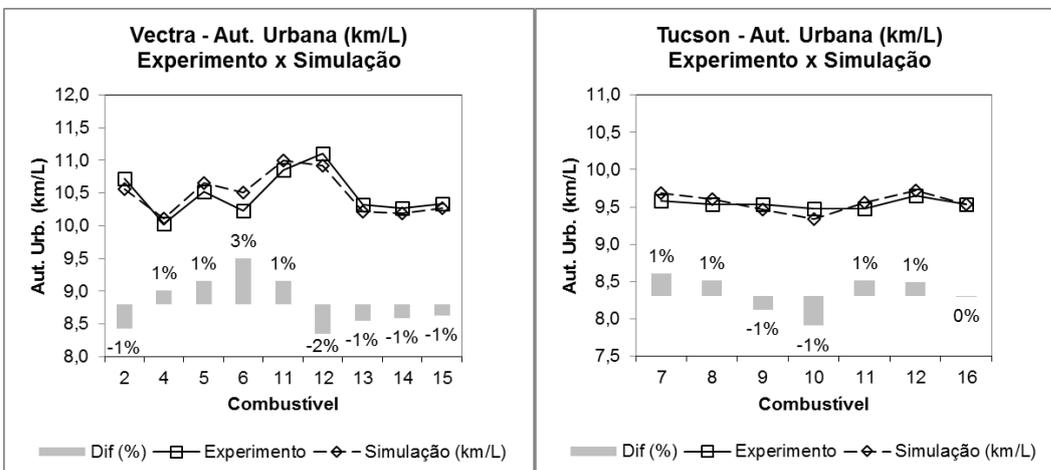


Figura 5.22 – Resultados experimentais e simulados de autonomia urbana para os veículos Vectra e Tucson.

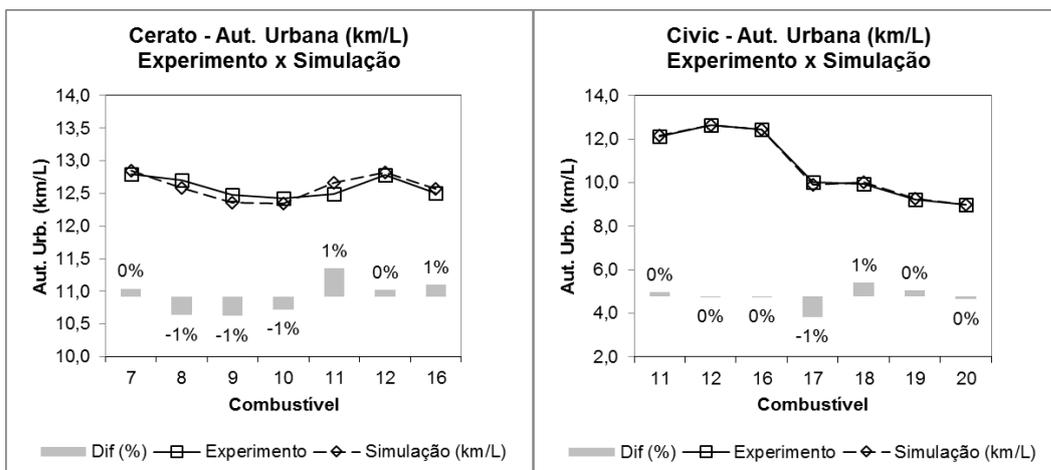


Figura 5.23 – Resultados experimentais e simulados de autonomia urbana para os veículos Cerato e Civic.

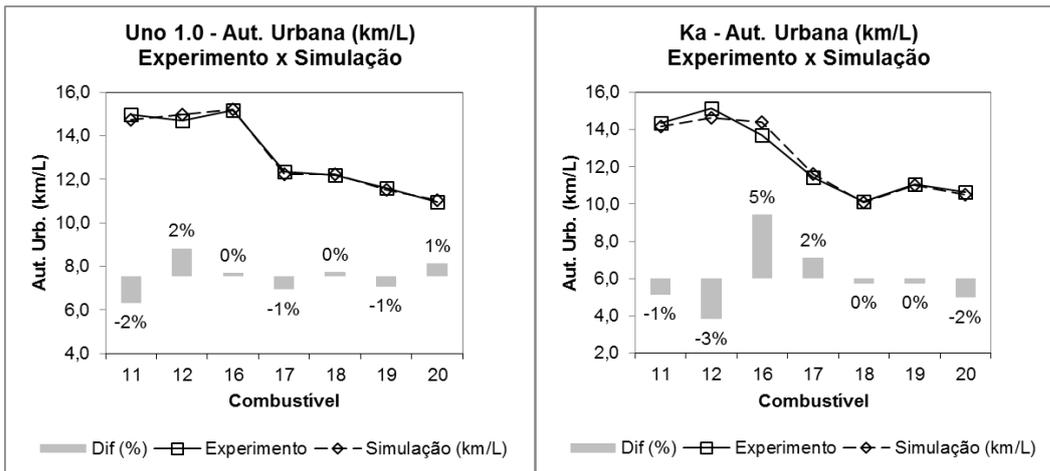


Figura 5.24 – Resultados experimentais e simulados de autonomia urbana para os veículos Uno 1.0 e Ka.

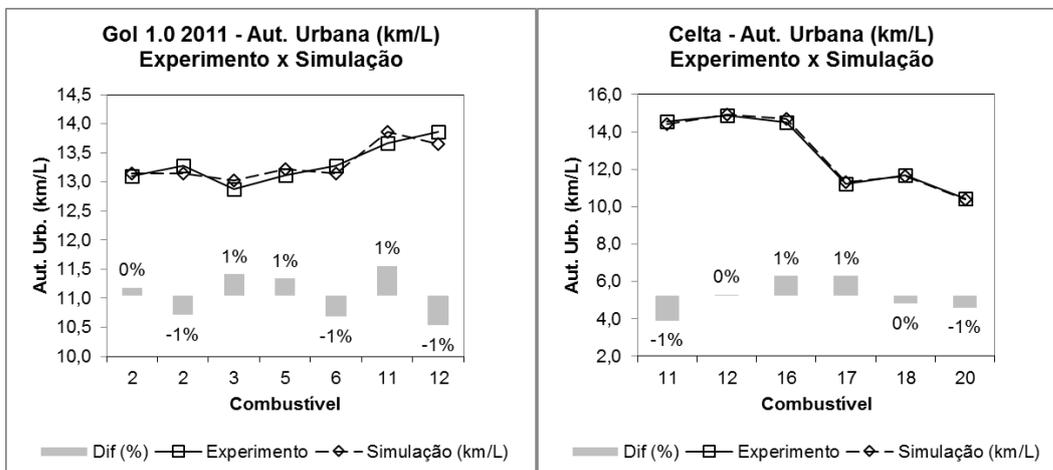


Figura 5.25 – Resultados experimentais e simulados de autonomia urbana para os veículos Gol 1.0 2011 e Celta.

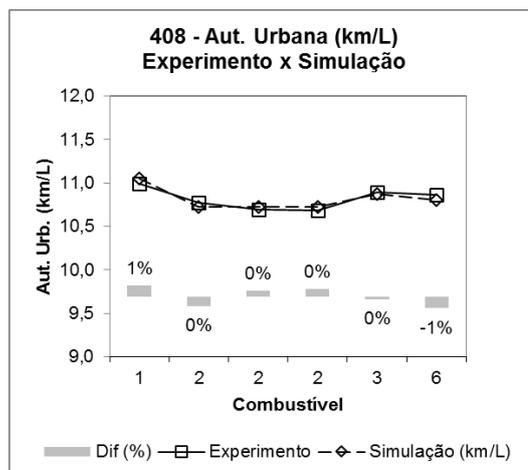


Figura 5.26 – Resultados experimentais e simulados de autonomia urbana para o veículo 408.

Utilizando como referência trabalhos anteriores de simulação do consumo de combustível em motores e veículos (Srivasan & Kothalikar, 2009; Thomas et al., 2013; Oh et al., 2014), foi estabelecido a diferença percentual máxima de 3% como critério de aceitação entre os resultados experimentais e simulados em cada caso.

Em geral, os resultados simulados permaneceram dentro da faixa de aceitação pré-estabelecidas e seguiram as mesmas tendências dos experimentos, em todos os veículos. Isso demonstra que a modelagem proposta é capaz de prever os resultados de autonomia urbana.

Nos veículos Ka, Vectra e Gol 1.0 2005, apesar dos resultados simulados com alguns combustíveis terem extrapolado o critério de 3%, pode-se notar que as tendências experimentais foram respeitadas.

Cada veículo apresenta características próprias de repetitividade e variação dos resultados de autonomia urbana com as propriedades do combustível. Por isso, cada um demanda bases de dados de tamanhos e faixas de aplicação diferentes. Sendo assim, para os modelos menos aderentes, seria necessário ampliar a base de dados com a finalidade de dar maior robustez aos resultados. De qualquer forma, em seu estágio atual, os modelos já podem ser aplicados em casos comparativos onde são esperadas diferenças elevadas de autonomia, como por exemplo, misturas gasolina-etanol com percentuais significativamente distintos.

Por sua vez, o modelo do veículo Tucson, que obteve correlação desprezível, precisaria ter a sua faixa de aplicação ampliada, devido à baixa sensibilidade do veículo às variações de propriedades avaliadas neste trabalho.

Nos veículos cujos dados contemplam apenas gasolinas, a possibilidade de variação das propriedades (massa específica e poder calorífico) foi bem menor do que nos veículos em que se dispunha de dados com etanol e misturas gasolina-etanol. No entanto, os modelos foram capazes de seguir as tendências experimentais, mesmo em casos de mudanças sutis da autonomia, onde a diferença entre os resultados encontrava-se dentro da faixa de incerteza do ensaio.

Como os modelos foram desenvolvidos a partir de uma base de dados existente, as faixas de aplicação destes, para algumas propriedades dos combustíveis, ficaram restritas. Com o aumento da base de dados do CENPES ou com a realização de uma campanha de testes específica para maximizar as suas faixas de aplicação, os modelos poderiam atender a maiores possibilidades de simulações da autonomia urbana.

5.3 Desempenho em veículos

Neste item serão apresentados os resultados dos modelos desenvolvidos para a obtenção dos tempos de retomada de velocidade em comparação direta com os experimentos em dinamômetro de chassi. Também serão os resultados simulados de parâmetros de desempenho em condições de velocidade constante em veículos, comparativamente aos respectivos resultados experimentais. Os modelos apresentados neste item foram desenvolvidos conforme metodologia descrita no Capítulo 4. Os veículos e combustíveis utilizados constam dos itens 4.3.1 e 4.3.2.

5.3.1 Retomada de velocidade

Para ambos os veículos utilizados, Vectra e Gol, em cada intervalo de velocidades (40-80km/h e 60-100km/h), os modelos foram subdivididos em duas partes, delimitadas por um valor do fator de potência (F_{POT}) a partir do qual foi observada mudança de comportamento nos tempos experimentais.

A Tabela 5.8 apresenta os coeficientes das equações, os coeficientes de determinação (R^2) dos modelos e os erros quadráticos médios percentuais ($EQM\%$) entre os resultados simulados e experimentais.

Tabela 5.8 – Coeficientes das equações, coeficientes de determinação e os erros quadráticos médios percentuais dos modelos para os veículos Vectra e Gol.

Veículo	Ensaio (km/h)	F_{POT}	R^2	A (2° grau)	B (1° grau)	C (indep.)	EQM%
Vectra	40-80	$\leq 1,5695$	0,9643		-0,3749	1,5950	0,1%
		$> 1,5695$	0,2559		-0,0060	1,0160	0,1%
	60-100	$\leq 1,4986$	0,9753		-0,4343	1,5632	0,1%
		$> 1,4986$	0,6883		-0,0279	0,9540	0,1%
Gol	40-80	$\leq 1,4620$	0,9925	6,1856	-15,7909	12,3657	0,1%
		$> 1,4620$	0,9586		-0,1542	1,4981	0,1%
	60-100	$\leq 1,4606$	0,9903	7,4929	-20,0252	14,5961	0,5%
		$> 1,4606$	0,8967		-0,1846	1,6017	0,3%

$$EQM\% = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum (y_{exp} - y_{sim})^2}}{\bar{y}_{exp}} \text{ (ver seção 4.5).}$$

As Figuras 5.27 e 5.28 apresentam os gráficos dos modelos obtidos para os veículos Vectra e Gol nos intervalos de velocidade de 40-80 km/h e 60-100 km/h em função de F_{POT} , ressaltando o valor deste fator que subdivide os modelos, em cada veículo e ilustrando os pontos experimentais.

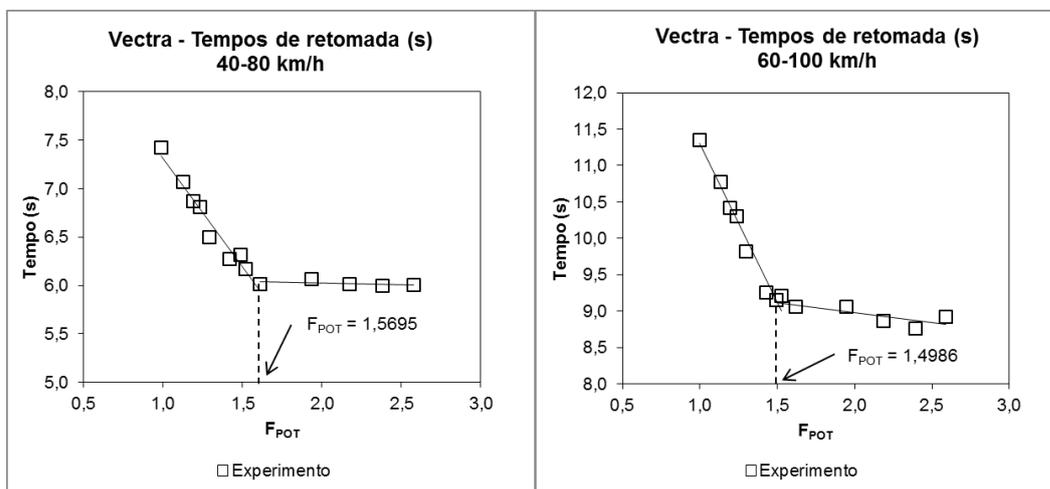


Figura 5.27 – Modelos obtidos para o veículo Vectra nos intervalos 40-80 km/h e 60-100 km/h.

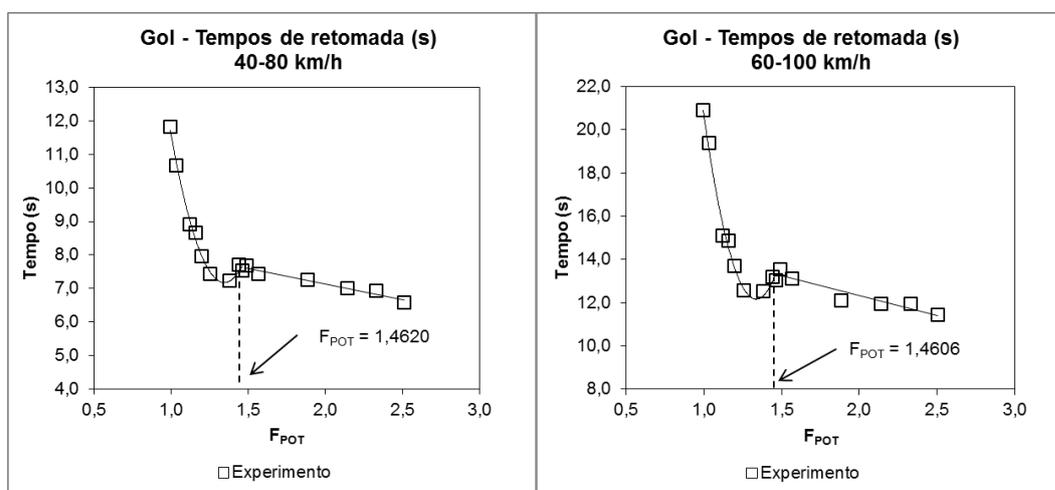


Figura 5.28 – Modelos obtidos para o veículo Gol nos intervalos 40-80 km/h e 60-100 km/h.

Em geral, os modelos apresentaram correlações consideradas muito fortes entre os tempos de retomada e F_{POT} , bem como valores de $EQM\%$ uma ordem de grandeza inferior à incerteza experimental, estimada em 1,2% (ver Apêndice I).

Porém, o modelo relativo aos tempos de retomada 40-80 km/h do veículo Vectra para combustíveis com F_{POT} maior que 1,5695 resultou em um R^2 menor que

0,3, indicando correlação desprezível. Isso ocorreu, pois, nesse caso, os tempos de retomada de velocidade praticamente não variaram conforme se aumentou F_{POT} . Isso indica que o veículo não é capaz de melhorar o seu desempenho, reduzindo os tempos de retomada. Ou seja, se um conjunto de propriedades resulta em um valor de F_{POT} maior do que 1,5695, não são esperados ganhos significativos de desempenho para o veículo em questão. Apesar disso, o $EQM\%$ foi de apenas 0,1% neste caso. Com relação à modelagem deste mesmo veículo, para o intervalo 60-100 km/h e F_{POT} maior que 1,4986, mesmo com R^2 indicando correlação moderada, o valor de $EQM\%$ também foi uma ordem de grandeza menor do que a incerteza experimental.

A Tabela 5.9 mostra a faixa de variação percentual de RON , ρ , PCS e RAC_{esteq} contemplada pelos modelos.

Tabela 5.9 – Faixa de variação percentual das propriedades utilizadas no cálculo de F_{POT} .

Propriedade	Influência em F_{POT}	Faixa de variação (%)	
		Vectra	Gol
RON	+	34,6%	32,9%
f_E	+	70,1%	82,0%
PCS	+	46,3%	46,3%
RAC_{esteq}	-	47,6%	47,6%
ρ	+	11,5%	8,6%

Menores valores de F_{POT} estão associados a combustíveis com menores octanagem RON e teor de etanol, f_E , que são as propriedades mais influentes em seu cálculo. Conforme se aumenta o valor de RON e f_E do combustível e, conseqüentemente F_{POT} , geralmente, os veículos modificam o avanço de ignição, aumentando o rendimento térmico do motor e obtendo menores tempos de retomada.

As demais propriedades exercem influências relativamente pequenas em F_{POT} . A massa específica, ρ , apresenta faixa de variação percentual reduzida em comparação às demais. As influências do PCS e da RAC_{esteq} são opostas e de magnitudes próximas (Machado, 2012), resultando em influências finais de menor importância. Porém, conforme discutido no Capítulo 4, o cálculo de F_{POT}

contemplando a combinação de todas as propriedades acima mencionadas possibilitou um maior refinamento dos modelos gerados, o que é extremamente desejável para o processo de desenvolvimento de combustíveis.

Alguns percentuais de variação das propriedades são diferentes entre os veículos, pois as Misturas J18 e I25 não foram utilizadas nos ensaios do veículo Vectra. A primeira foi utilizada apenas no Gol para checagem da variação do avanço de ignição dentro da faixa típica de gasolinas comerciais, em comparação com J25. Devido à sua baixa octanagem, a Mistura I25 resultou em níveis muito elevados de detonação no motor do veículo Vectra, sendo os seus testes suspensos para evitar possíveis danos mecânicos.

Pela Figura 5.27, verifica-se que o veículo Vectra apresenta ganhos significativos de desempenho conforme se aumenta o valor de F_{POT} . Nessa região estão gasolinas com teores entre 18 e 25% v/v de etanol anidro. No entanto, a partir de um determinado valor de F_{POT} , esse ganho passa a ser muito menos significativo e os tempos passam a ficar praticamente estabilizados. Isso ocorre no momento em que não é mais possível obter aumento significativo da octanagem via formulação da gasolina A.

Deste ponto em diante, para obter aumento de F_{POT} devem ser utilizados combustíveis com maiores teores de etanol (acima de 25%). Como consequência, devido às características do etanol, aumenta-se também o valor de RON do combustível. Dessa forma, o valor de F_{POT} cresce devido ao aumento do fator de etanol, f_E , e também pela elevação do valor de RON . Por essa razão, teoricamente, o veículo poderia incrementar ainda mais o avanço de ignição e continuar melhorando o seu desempenho. Porém, devido às suas características de projeto e calibração, os ganhos passam a ser menos significativos, com os tempos de retomada 40-80 km/h praticamente estabilizados e os de 60-100 km/h ainda decrescentes, mas em taxa muito menor.

O veículo Gol apresentou comportamento semelhante ao Vectra. No entanto, conforme pode ser notado na Figura 5.28, os tempos de retomadas, em ambos os intervalos de velocidade, não diminuem continuamente com o aumento de F_{POT} . No final da região de gasolinas com teores comerciais de etanol anidro, ocorre uma inversão (ponto de inflexão) e os tempos de retomada passam a crescer com o aumento de F_{POT} . Isso ocorre, pois, mesmo havendo aumento de octanagem, devido às características de projeto e calibração do veículo, este não é mais capaz de

modificar o avanço de ignição, não sendo possível obter ganho de desempenho por esta via.

Nesse momento, as demais propriedades que participam do cálculo de F_{POT} passam a influenciar mais fortemente este fator. A combinação das demais propriedades (PCS , RAC_{esteq} e ρ) pode resultar em comportamentos distintos, dependendo dos seus valores. Por isso, na região entre o ponto de inflexão e o valor de F_{POT} de transição, os modelos poderão apresentar maior imprecisão.

Para validar os modelos acima apresentados foram simulados os tempos de retomada de quatro combustíveis comerciais, cujas características constam da Tabela 5.10. Os resultados da validação encontram-se na Tabela 5.11.

Tabela 5.10 – Característica dos combustíveis de validação dos modelos de tempos de retomada de velocidade.

Propriedade	Vectra		Gol	
	Gasolina Premium	Gasolina Comum	Gasolina Padrão	Etanol Hidratado
RON	103,3	96,4	95	110,0
Teor de etanol (%v/v)	26	25	27	95
PCS (MJ/kg)	41354	41975	41658	25269
RACesteq	12,97	13,08	12,78	8,39
ρ (kg/m ³)	762,7	747,0	749,8	803,3

Tabela 5.11 – Resultados de validação dos modelos de tempos de retomada de velocidade.

Veículo	Combustível	Tempo (s) 40-80 km/h			Tempo (s) 60-100 km/h		
		Exp. (s)	Sim. (s)	Dif. (%)	Exp. (s)	Sim. (s)	Dif. (%)
Gol	Etanol Hidrat.	6,88	6,94	0,8%	11,84	11,91	0,6%
	Gas. Padrão	7,57	7,45	-1,6%	12,89	12,66	-1,8%
Vectra	Gas. Premium	6,33	6,40	1,1%	9,31	9,48	1,8%
	Gas. Comum	6,64	6,68	0,6%	10,14	10,02	-1,1%

Todas as diferenças percentuais entre os resultados simulados e experimentais ficaram abaixo de 2%. A incerteza experimental média ($I_{Eméd}$) foi de 1,2%. A variação aceita no ensaio de retomada de velocidade em pista é de até 3% (SAE

J1491, 2006). Portanto, os modelos desenvolvidos foram validados com sucesso, sendo capazes de prever os tempos de retomada de velocidade, nos intervalos de 40-80 km/h e 60-100 km/h, em ambos os veículos, com diferenças percentuais de mesma ordem da incerteza experimental e da referência normativa do ensaio.

As Figuras 5.29 a 5.32 mostram os resultados simulados e experimentais de retomada de velocidade separados por veículo e intervalo de velocidades, além de indicar as diferenças percentuais entre experimento e simulação para todos os combustíveis. Os resultados completos podem ser encontrados no Apêndice III.

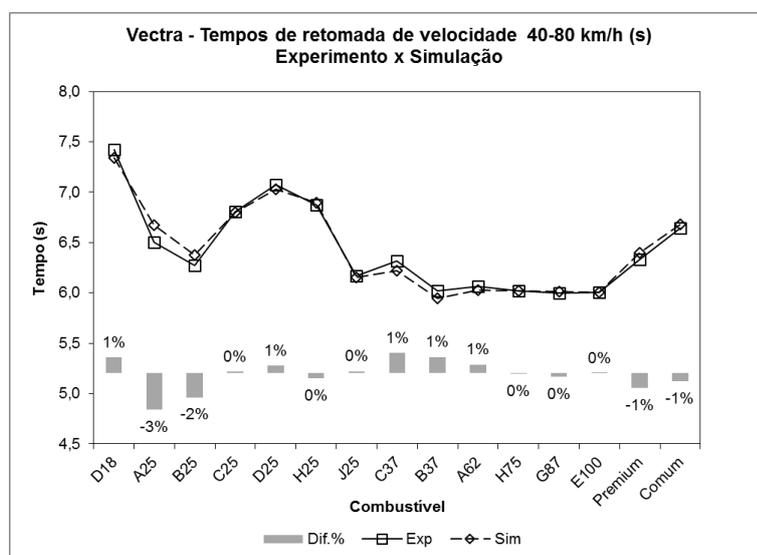


Figura 5.29 – Resultados experimentais e simulados dos tempos de retomada de velocidade 40-80 km/h para o veículo Vectra.

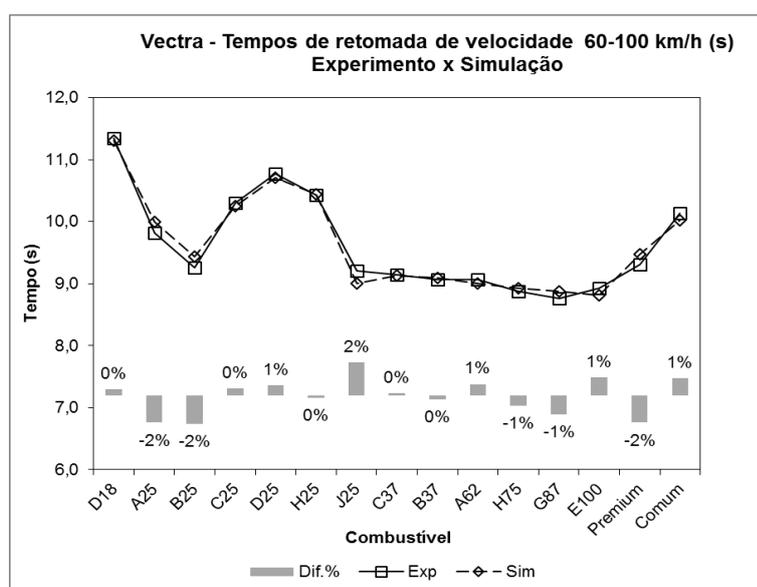


Figura 5.30 – Resultados experimentais e simulados dos tempos de retomada de velocidade 60-100 km/h para o veículo Vectra.

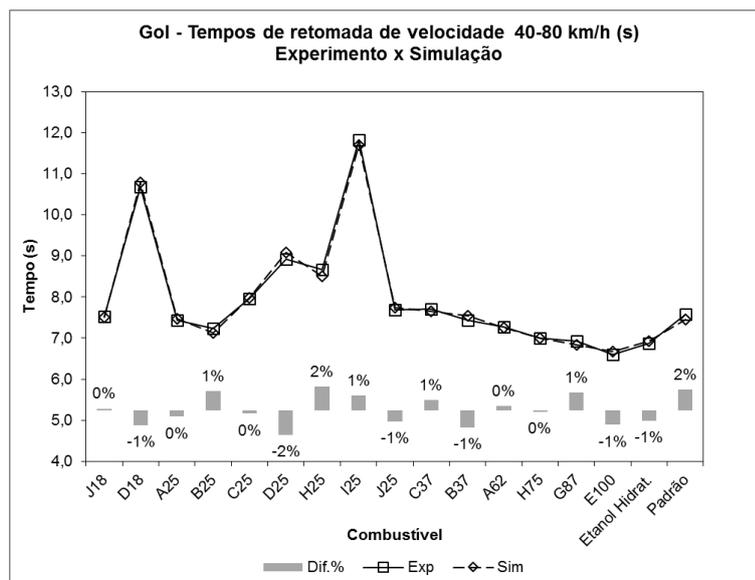


Figura 5.31 – Resultados experimentais e simulados dos tempos de retomada de velocidade 40-80 km/h para o veículo Gol.

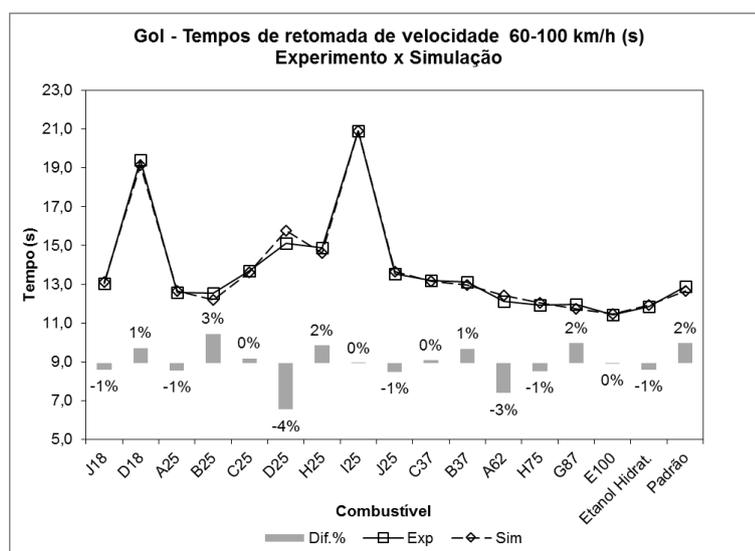


Figura 5.32 – Resultados experimentais e simulados dos tempos de retomada de velocidade 60-100 km/h para o veículo Gol.

Nota-se que para as Misturas D18 e I25, os tempos de retomada foram mais elevados. Isso pode ser explicado pela octanagem RON muito baixa apresentada por esses combustíveis e pelas formas como os sistemas de ignição dos veículos atuam nesses casos, as quais serão detalhadas no item seguinte, 5.3.2.

Em todos os casos, os resultados simulados dos tempos de retomada de velocidade se enquadraram na faixa de 3% de diferença em relação aos resultados experimentais, estabelecida como referência de comparação com ensaios de pista (SAE J1451, 2006).

No que se refere a ensaios em dinamômetro de chassi, a incerteza experimental é de 1,2% (ver Apêndice I). A maioria dos resultados simulados se situaram dentro de até 1% de diferença em relação aos experimentos, estando, portanto, dentro da faixa de aceitação para o ensaio. Também é possível observar que as tendências são as mesmas no experimento e na simulação. A exceção ocorreu com a mistura D25 no intervalo 60-100 km/h para o veículo Gol. No entanto, a diferença maior encontrada (4%) não alterou a tendência em relação ao experimento, como pode ser visto na Figura 5.32.

5.3.2 Condições de velocidade constante

Conforme descrito no Capítulo 4, a potência, o consumo, o avanço de ignição e lambda foram modelados como funções de propriedades dos combustíveis e da rotação dos motores. Os coeficientes destas funções, encontrados para todas as configurações de teste (veículo-marcha-velocidade), constam do Apêndice IV. As eficiências volumétrica, térmica, mecânica e global foram calculadas a partir dos resultados dos modelos acima mencionados.

Para cada configuração de teste foram calculados valores de $EQM\%$ dos modelos dos parâmetros de desempenho citados. Em seguida, foram obtidos valores médios de $EQM\%$, considerando todas as configurações de teste. Dessa forma, chegou-se a um único valor de $EQM\%$ para os modelos de cada parâmetro de desempenho. A Tabela 5.12 apresenta tais valores para os dois veículos estudados.

Tabela 5.12 – Valores médios de $EQM\%$ dos modelos de desempenho.

Parâmetro	Obtenção	Média EQM%	
		Vectra	Gol
Potência	Modelagem	0,90%	1,70%
Consumo de combustível	Modelagem	0,20%	0,40%
Avanço de ignição ¹	Modelagem	3°	1°
Lambda	Modelagem	0,00%	0,03%
Eficiência volumétrica	Cálculo a partir da modelagem	0,02%	0,03%
Eficiência térmica	Cálculo a partir da modelagem	0,01%	0,01%
Eficiência mecânica	Cálculo a partir da modelagem	0,00%	0,01%
Eficiência global	Cálculo a partir da modelagem	0,01%	0,01%

¹ Média EQM.

Os valores médios de $EQM\%$ obtidos têm a mesma ordem ou ordem de grandeza inferior às incertezas experimentais relativas (I_R) reportadas no Apêndice I, indicando que os modelos são capazes de reproduzir os valores experimentais. Com relação ao avanço de ignição, foram determinados os valores de EQM , pois cada grau do eixo de manivelas (resolução do modelo) pode representar percentual muito elevado em relação ao valor do avanço de ignição, o que distorceria a comparação entre experimento e simulação.

Para validação dos modelos em questão foi utilizada gasolina premium no veículo Vectra e etanol hidratado e gasolina padrão no veículo Gol. As características destes combustíveis podem ser consultadas na Tabela 5.10. As diferenças percentuais médias entre os resultados experimentais em dinamômetro de chassi e simulados, considerando todas as configurações de teste, são apresentadas na Tabela 5.13.

Tabela 5.13 – Diferenças percentuais médias entre os resultados experimentais e simulados para os combustíveis de validação.

Veículo Combustível	Vectra		Gol
	Gas.premium	Gas. padrão	Etanol hidratado
Potência	0,6%	2,5%	0,5%
Cons. de combustível	0,0%	0,0%	-0,8%
Avanço de ignição (°APMS)	-3	x ¹	x ¹
Lambda	2,1%	0,5%	-0,1%
Eficiência volumétrica	2,2%	0,5%	-0,8%
Eficiência térmica	0,5%	1,7%	0,9%
Eficiência mecânica	0,1%	0,8%	0,4%
Eficiência global	0,6%	3,0%	0,5%

¹ no veículo Gol não foi realizada a medição de avanço nos ensaios de validação dos modelos devido a problemas técnicos com o *scanner Bosch*.

As diferenças percentuais médias situaram-se na mesma ordem de grandeza das incertezas experimentais (ver Apêndice I) e dentro da faixa de 3%, que foi considerada satisfatória com base em outros trabalhos de modelagem (Millo et al., 2000; Barros, 2003; Anand, 2005; melo et al., 2012; Carvalho et al., 2015) e também . Para o avanço de ignição, novamente, os cálculos foram feitos com os valores absolutos e, no caso do Vectra, foi respeitado o critério de três graus de diferença entre simulação e experimento (Bougrine et al, 2009).

Faz-se necessário, no entanto, verificar se as variações entre experimento e simulação influenciam a capacidade dos modelos em reproduzir as tendências dos resultados experimentais.

Para tanto, foram obtidos valores médios dos parâmetros de desempenho em análise para cada uma das marchas de teste, representando as condições médias nas velocidades constantes de 40 a 80 km/h e 60 a 100 km/h. Com o objetivo de exemplificar os resultados obtidos, as Figuras 5.33 e 5.34 apresentam os valores experimentais e simulados médios, bem como as diferenças percentuais médias da potência e consumo de combustível para o intervalo de velocidade 40-80 km/h (veículo Vectra) e 60-100km/h (veículo Gol), utilizando cada combustível de teste. Estes parâmetros foram selecionados, pois foram aqueles modelados a partir dos dados experimentais. Os resultados completos de ambos os veículos para cada configuração de teste podem ser encontrados no Apêndice V.

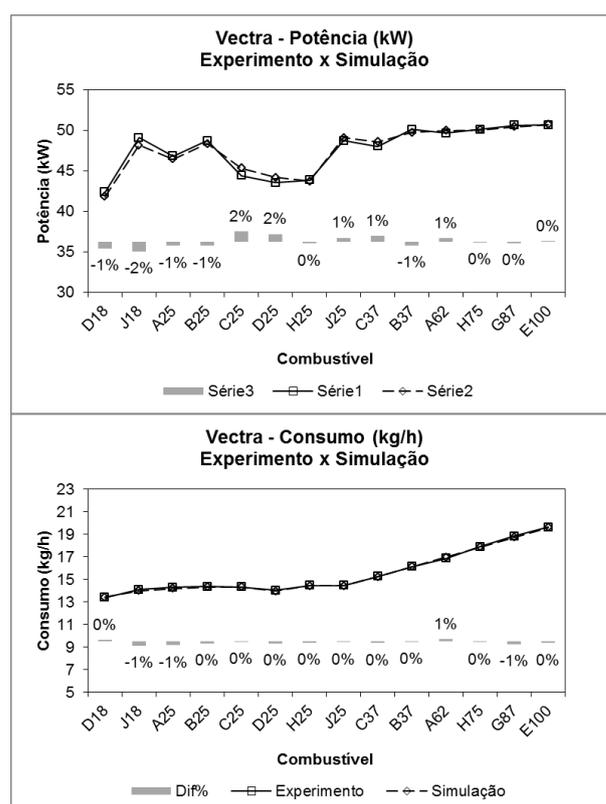


Figura 5.33 – Resultados experimentais e simulados médios e diferenças percentuais médias para o intervalo de velocidades 40-80 km/h com o Vectra.

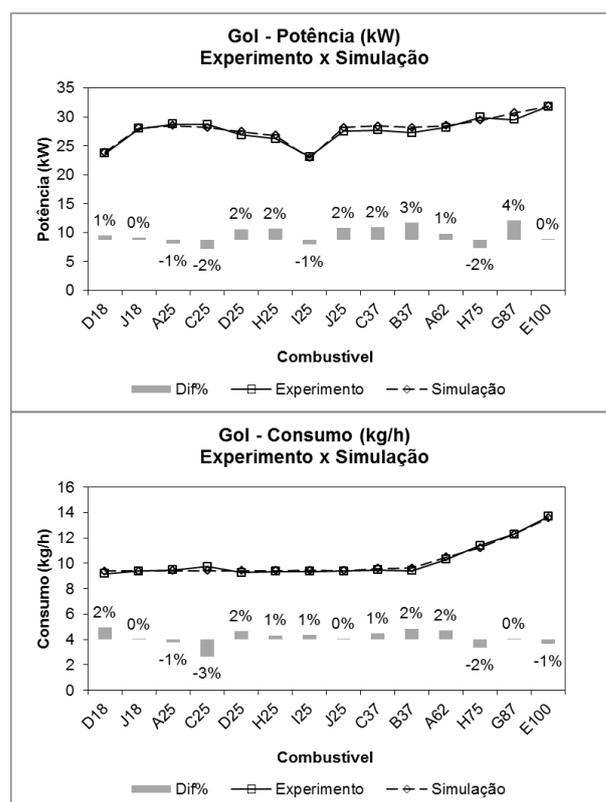


Figura 5.34 – Resultados experimentais e simulados médios e diferenças percentuais médias para o intervalo de velocidades 60-100 km/h com o Gol.

Em todos os gráficos é possível observar elevada aderência entre os valores experimentais e simulados. Isso indica que os modelos desenvolvidos para a predição dos parâmetros de desempenho em condições de velocidade constante, além de respeitarem variações percentuais na faixa da incerteza experimental dos ensaios, também são capazes de reproduzir as tendências observadas nos experimentos.

Com base nos resultados simulados acima apresentados e nas equações constantes do Capítulo 4, foram calculadas as eficiências volumétrica, térmica, mecânica e global. As diferenças percentuais médias encontradas entre os valores das eficiências volumétrica e térmica e aqueles obtidos a partir dos experimentos com os veículos Vectra e Gol, para os intervalos 40-80 km/h e 60-100 km/h, respectivamente, são apresentadas nas Figuras 5.35 e 5.36.

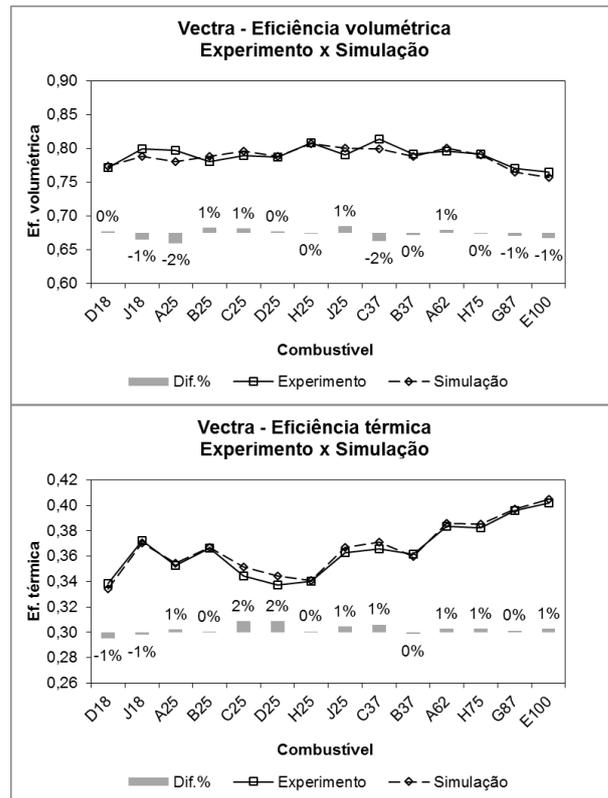


Figura 5.35 – Diferenças percentuais médias entre os valores experimentais e simulados das eficiências do veículo Vectra no intervalo 40-80 km/h.

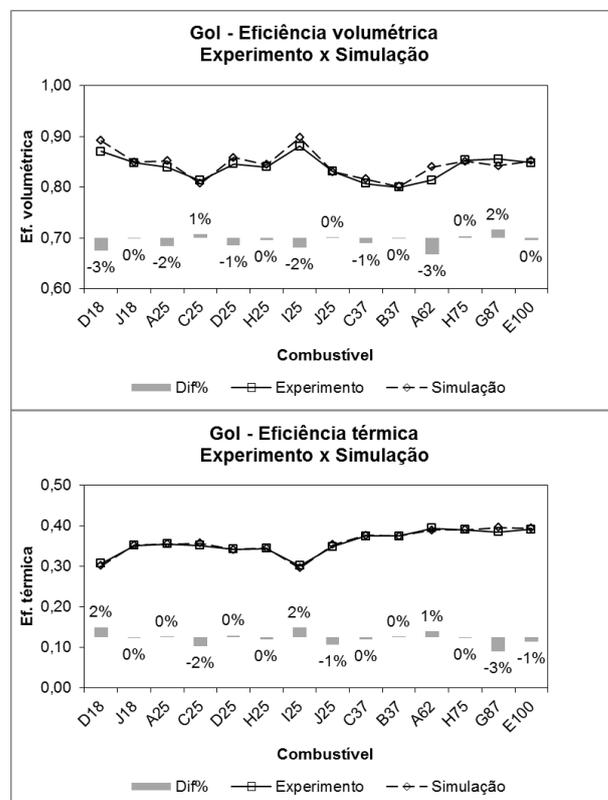


Figura 5.36 – Diferenças percentuais médias entre os valores experimentais e simulados das eficiências do veículo Gol no intervalo 60-100 km/h.

As eficiências são calculadas a partir de diversos parâmetros medidos/modelados. Portanto, os seus valores experimentais ou simulados são combinações de valores que carregam erros experimentais ou de ajuste das funções dos modelos.

Dessa forma, há probabilidade mais elevada destas combinações resultarem em diferenças percentuais entre experimento e simulação maiores do que aquelas observadas para os parâmetros modelados diretamente a partir de dados experimentais. No entanto, verificou-se pelas figuras acima que as diferenças percentuais obtidas na modelagem das eficiências situaram-se na mesma faixa dos parâmetros apresentados nas Figuras 5.33 e 5.34, de até 3%.

É possível notar a semelhança das tendências apresentadas nos gráficos do avanço de ignição, da eficiência térmica e da potência, em ambos os veículos. Isso comprova que o terceiro parâmetro é diretamente influenciado pelo segundo, que é resultado da influência do primeiro parâmetro. Por sua vez, o avanço de ignição, conforme já mencionado, está diretamente relacionado com a octanagem do combustível.

Além disso, dentre as três eficiências que compõem o cálculo da eficiência global, a eficiência térmica é aquela que apresenta maior amplitude de resultados e, portanto, é aquela que mais influencia os valores de eficiência global. Esse efeito pode ser notado comparando-se as tendências nos gráficos desses dois parâmetros, relativos aos dois veículos de teste. As variações das eficiências volumétrica e mecânica são mais sutis. Mesmo assim, os modelos conseguiram reproduzir as tendências experimentais.

A partir dos resultados de potência gerados pelos modelos e lançando mão da eq. (4.80), foram obtidos os tempos de retomada de velocidade nos intervalos 40-80 km/h e 60-100 km/h.

O fator de correção f_{ret} assumiu o valor de 1,0655 para as retomadas 40-80 km/h e 60-100 km/h em ambos os veículos. Apenas para o veículo Gol, pelos motivos expostos no Capítulo 4, f_{ret} obtido para combustíveis com octanagem *RON* menor que 92, foi definido pela eq. (5.2) para ambas as retomadas.

$$f_{ret \text{ VW Gol}} = -1,4671 \frac{RON - RON_{min}}{RON} + 1,2987 \quad (5.2)$$

A Tabela 5.14 mostra os valores experimentais e simulados de retomadas de velocidade em dinamômetro de chassi com os combustíveis de validação, cujas características podem ser encontradas na Tabela 5.10, bem como as diferenças percentuais entre os mesmos.

Tabela 5.14 – Tempos de retomada de velocidade experimentais em dinamômetro de chassi e simulados e diferenças percentuais para os combustíveis de validação.

Veículo	Ret. (km/h)	Combustível	Experimento (s)	Simulação (s)	Dif (%)
Vectra	40-80	Premium	6,33	6,21	1,9%
	60-100	Premium	9,31	9,43	-1,2%
Gol	40-80	Padrão	7,57	7,53	0,5%
	40-80	H100	6,88	6,73	2,2%
	60-100	Padrão	12,89	12,69	1,6%
	60-100	H100	11,84	11,30	4,5%

De acordo com os resultados acima, apenas um caso apresentou diferença percentual de 4,5%, sendo que todas as demais ficaram dentro de 3%, que é o nível de dispersão aceito para ensaios experimentais de retomada em pista (SAE J1491-06,2006) e na mesma ordem de grandeza da incerteza experimental, de 1,2%. Isso indica que os modelos foram capazes de reproduzir os valores obtidos nos experimentos.

Para verificar a capacidade dos modelos em seguir as tendências experimentais, as Figuras 5.37 e 5.38 apresentam os tempos de retomada experimentais e simulados para os veículos Vectra e Gol nos intervalos de 40-80 km/h e 60-100 km/h, bem como as diferenças percentuais observadas entre experimento e simulação.

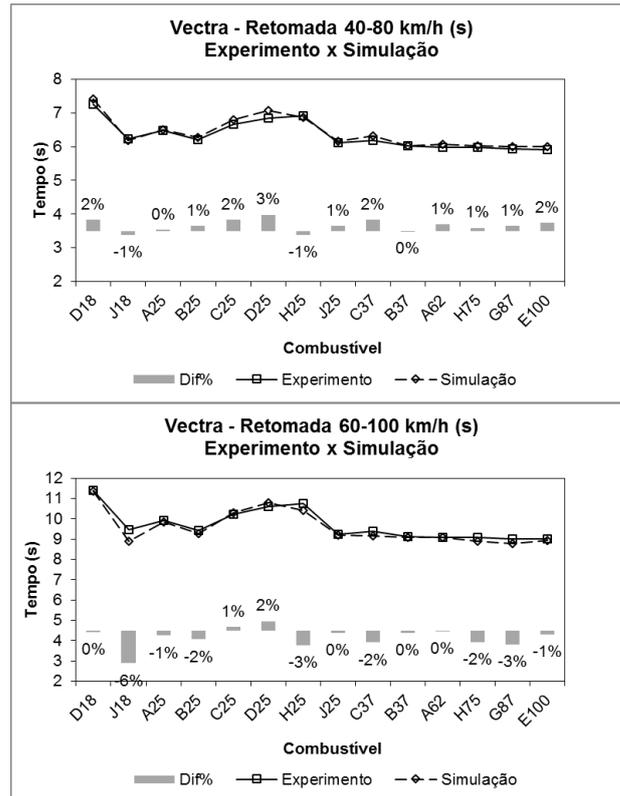


Figura 5.37 – Tempos experimentais e simulados de retomada de velocidade e diferenças percentuais para o veículo Vectra.

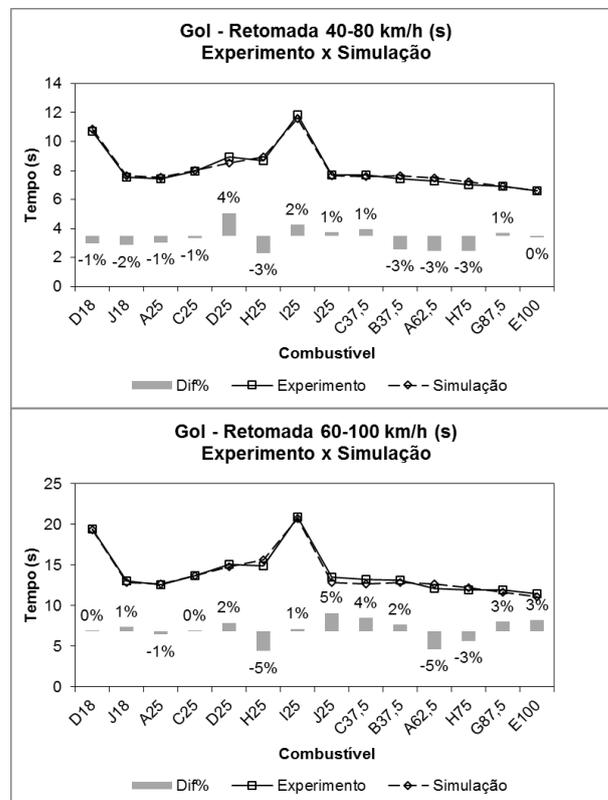


Figura 5.38 – Tempos experimentais e simulados de retomada de velocidade e diferenças percentuais para o veículo Gol.

Nota-se que, para ambos os veículos, os resultados simulados nos intervalos de 40-80 km/h e 60-100 km/h resultaram nas mesmas tendências verificadas no experimento, apesar de alguns casos terem extrapolado o limite de aceitação acima mencionado, de 3%. Os resultados completos dos tempos de retomada de velocidade simulados a partir das condições de velocidade constante podem ser encontrados no Apêndice V.

Outro aspecto que merece destaque é o comportamento semelhante da variação dos tempos de retomada de velocidade nos dois intervalos estudados, o que ocorreu nos dois veículos. Isso pode ser explicado pelas faixas de rotação do motor serem próximas, levando os motores a funcionar em regimes semelhantes.

A modelagem dos tempos de retomada de velocidade a partir de dados experimentais em condições de velocidade constante se mostrou menos precisa do que as simulações obtidas a partir de resultados experimentais de retomada de velocidade (ver item 5.3.1). Porém, este tipo de modelagem viabiliza a obtenção de resultados transientes em veículos a partir de dados obtidos em bancada de motores. Para tanto, é necessário estimar/modelar previamente as perdas mecânicas do veículo, incluindo trem de propulsão, rodas dianteiras e traseiras e resistência do ar.