

8 Resultados e Discussões

Os experimentos deste trabalho foram feitos seguindo os procedimentos descritos no Capítulo 4. Os resultados obtidos estão organizados a seguir em dois grupos: o primeiro destinado a mostrar os desempenhos dos motores original e modificado operando com apenas com diesel; o segundo dedicado a expor os efeitos do motor modificado funcionando simultaneamente com diesel e etanol.

8.1 Resultados dos Testes com Motor Original – Teste 0

Os experimentos iniciais do Teste 0 foram realizados para verificar se os resultados de performance (torque e potência) estavam de acordo com os dados fornecidos pelo catálogo do fabricante.

Após a certificação de que o desempenho do motor original estava em conformidade com os parâmetros fornecidos pelo catálogo do fabricante, foram realizados outros experimentos para construir uma base de dados que foram empregados na análise comparativa com o motor modificado para operar com tecnologia RCCI.

A Tabela 8.1 apresenta os resultados dos ensaios realizados com o motor original YANMAR NSB50 baseado nos seguintes parâmetros:

- Injeção única de diesel;
- Pressão no injetor diesel de 140 bar;
- Ponto de injeção: (-8° PMS);
- Rotação de 1600, 1800 e 2000 rpm.
- Carga de 25, 50, 75 e 100%;

Tabela 8.1: Resultados dos Testes com Motor Original – Teste 0

ROTAÇÃO (RPM)	CARGA (%)	TORQUE (N.m)	POTÊNCIA (kW)	VAZÃO (kg/h)	ENERGIA (kJ/h)	CEC_D (kg/kWh)	RENDIMENTO (%)
1600	100	18,27	2,98	1,01	42.925,0	0,34	25,0
	75	14,62	2,35	0,73	31.025,0	0,31	27,3
	50	9,31	1,56	0,41	17.425,0	0,26	27,0
	25	4,82	0,76	0,25	10.625,0	0,33	25,0
1800	100	20,11	3,76	1,28	54.400,0	0,33	25,0
	75	15,00	2,78	0,81	34.425,0	0,29	29,0
	50	9,98	1,82	0,46	19.550,0	0,25	33,0
	25	5,02	0,91	0,38	16.150,0	0,42	20,0
2000	100	20,29	4,20	1,64	69.700,0	0,39	22,0
	75	15,24	3,12	0,84	35.700,0	0,27	31,0
	50	10,17	2,07	0,54	22.950,0	0,26	32,0
	25	5,04	1,05	0,34	14.450,0	0,32	26,0

A Figura 8.1 mostra as curvas de torque, de potência e de consumo específico do motor diesel original, que foram montadas a partir dos resultados dos experimentos do Teste 0.

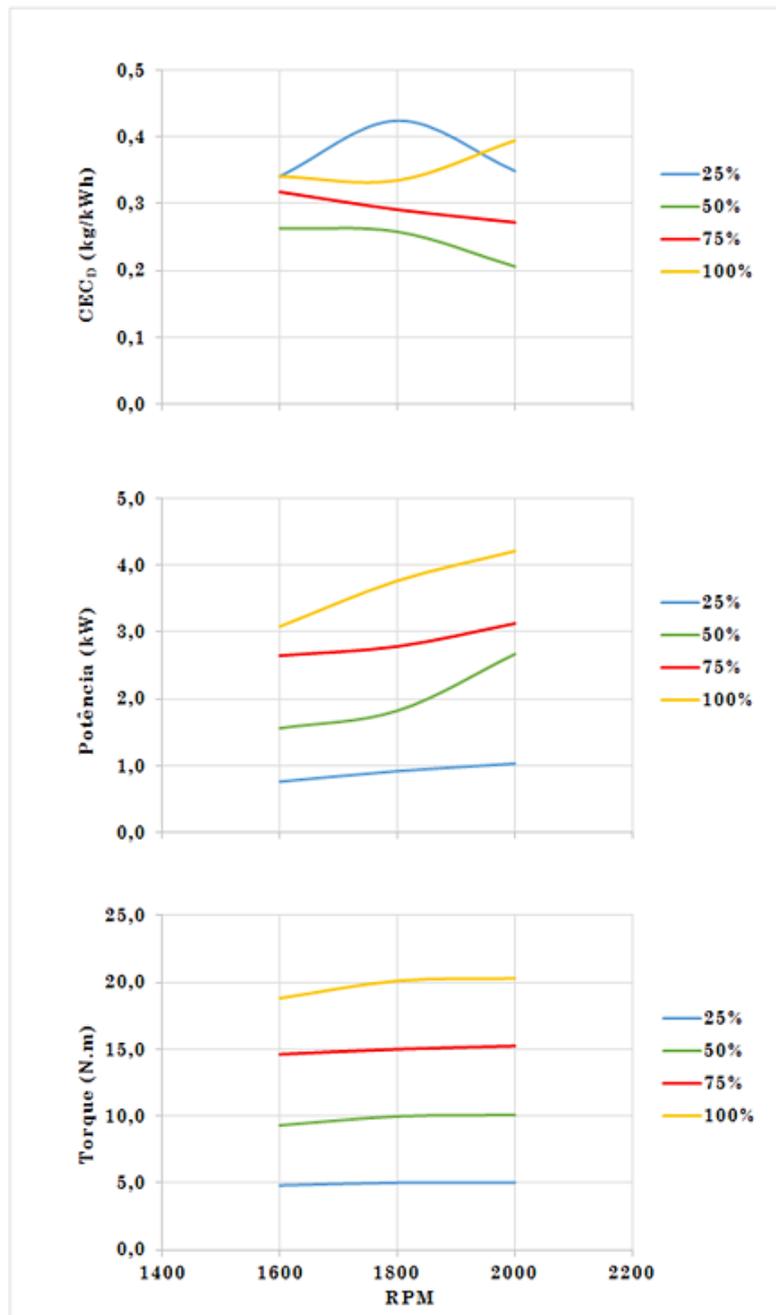


Figura 8.1: Resultados do motor original – Teste 0

A Figura 8.2 exibe o calor aparente liberado no experimento realizado com o motor original, funcionando a 1600 rpm, com vazão de 0,25 kg/h. Nestas condições o motor original gerou potência de 0,76 kW, rendimento de 25,0% e máximo calor aparente liberado de 201,9 J em +83° PMS.

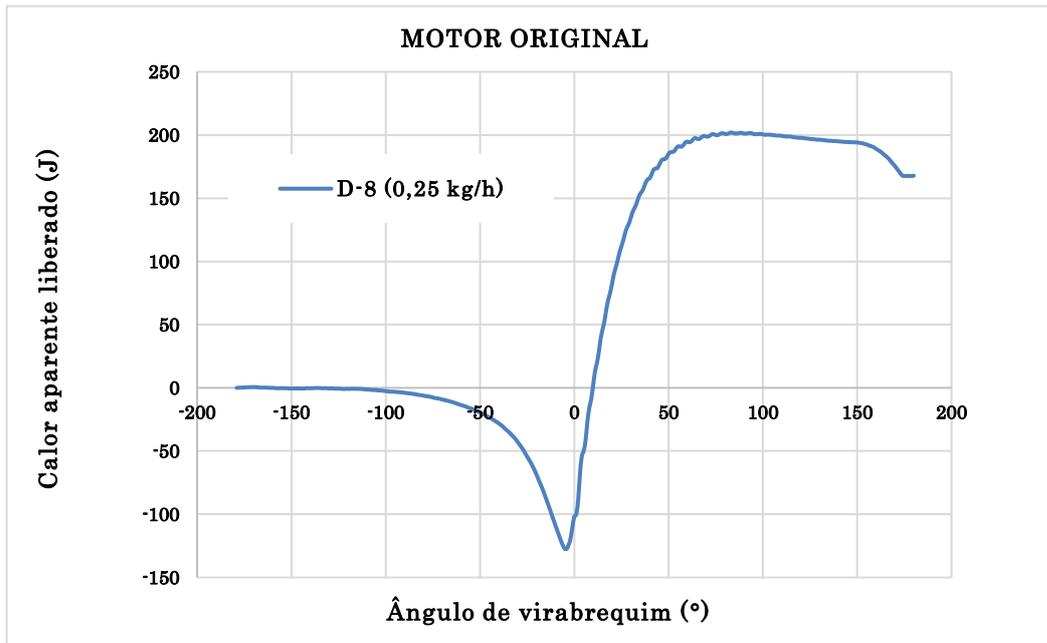


Figura 8.2: Calor aparente liberado motor original, operando a 1600 rpm, com vazão de 0,25 kg/h.

A Figura 8.3 mostra a curva que descreve o comportamento da pressão no interior do cilindro do motor original, com pressão máxima de 73,9 bar a +4° PMS e o início da combustão se deu -4° PMS.

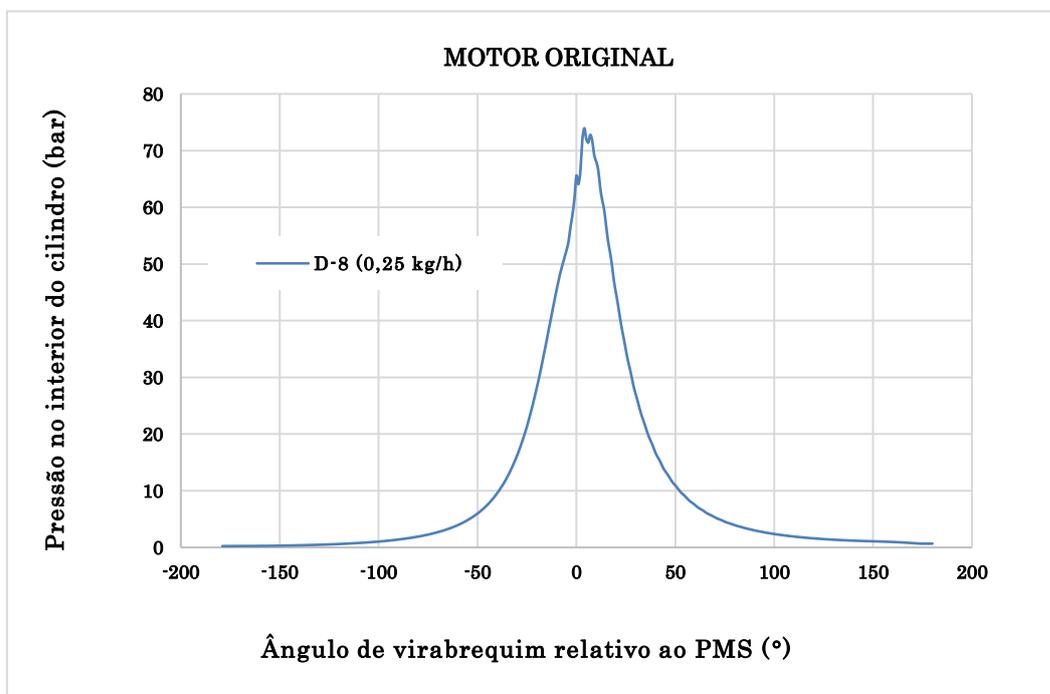


Figura 8.3: Pressão no interior do cilindro do motor original, operando a 1600 rpm, com vazão de 0,25 kg/h.

8.2

Resultados dos Testes com Motor Modificado Operando com Diesel – Teste D

Após a adaptação para operar com dois combustíveis injetados diretamente na câmara de combustão, foram realizados testes para verificar se o motor modificado, operando apenas com diesel, conservaria desempenho semelhante ao do motor original. Neste teste foram realizados ensaios com o motor modificado operando a 1600 rpm, abastecido apenas com óleo diesel.

8.2.1

Resultados do Teste D1

Foram realizados 4 experimentos com uma injeção de diesel a -8° PMS (D-8). As Tabelas 8.2 e 8.3 apresentam, respectivamente os dados do motor modificado e do motor original funcionando a 1600 rpm.

Tabela 8.2: Resultados do Teste D1 (Motor Modificado)

EXPERIMENTO	VAZÃO DE DIESEL (kg/h)	TORQUE (N.m)	POTÊNCIA (kW)	ENERGIA TOTAL (kJ/h)	RENDIMENTO (%)
1	1,01	2,5	0,40	43.009	3,4
2	0,73	1,47	0,27	31.105	3,2
3	0,41	-1,07	-0,16	17.346	-
4	0,25	-1,82	-0,28	10.536	-

Tabela 8.3: Extrato dos resultados do Teste 0 (Motor Original)

EXPERIMENTO	VAZÃO DE DIESEL (kg/h)	TORQUE (N.m)	POTÊNCIA (kW)	ENERGIA TOTAL (kJ/h)	RENDIMENTO (%)
1	1,01	2,98	2,98	42.925	25,0
2	0,73	2,35	2,35	31.025	27,3
3	0,41	1,56	1,56	17.425	27,0
4	0,25	0,76	0,76	10.625,0	25,0

Nos resultados do Teste D1, expostos na Tabela 8.2, verifica-se que, o motor modificado operando com as vazões de 0,25 kg/h e de 0,41 kg/h (experimentos 3 e 4) não foram suficientes para o motor funcionar com autonomia. Confrontando os resultados expostos nas Tabelas 8.2 e 8.3, nota-se que o motor modificado apresenta desempenho inferior em todos os experimentos do Teste D1. No Experimento 1, por exemplo, o motor modificado funciona com uma vazão de 1,01 kg/h, correspondendo que uma energia de 43.009 kJ/h. Netas condições foi gerado uma potência de 0,40 kW e um rendimento de 3,4%. Com esta mesma vazão o motor original obteve uma potência de 2,98 kW e alcançou um rendimento de 25,0%.

Outros testes foram realizados nos mesmos moldes do Teste D1, modificado apenas quantidade de energia empregada no motor modificado. Mesmo aumentando significativamente a vazão de diesel, o motor modificado não apresentou funcionamento adequado. Em um experimento operando a 1600 rpm com vazão de 2,61 kg/h, por exemplo, o motor modificado gerou uma potência de 1,06 kW, com rendimento de apenas 3,4%. Resultados abaixo do esperado se comparado ao motor original, que funcionando com menos da metade da vazão gerou uma potência quase três vezes maior, conforme pode ser observado no experimento 1 da Tabela 8.3.

8.2.2

Resultado do Teste D2

Foram realizados 4 experimentos com uma injeção de diesel, com vazão de 0,80 kg/h em vários pontos relativo ao PMS. A Tabela 8.4 apresenta os resultados de torque, potência e rendimento obtidos injetando óleo diesel em diferentes pontos. Constatou-se, assim, que a redução observada no rendimento do motor modificado não estava relacionada com o ponto de avanço da injeção do diesel.

Tabela 8.4: Resultados do Teste D2

ROTAÇÃO (RPM)	POSIÇÃO (°)	TORQUE (N.m)	POTÊNCIA (kW)	CEC _D (kg/kWh)	RENDIMENTO (%)
1600	+4	1,28	0,20	3,71	2,3
	-2	3,66	0,60	1,32	6,4
	-8	4,10	0,68	1,20	7,1
	-14	2,26	0,39	2,04	4,1

8.2.3 Resultado do Teste D3

Foram realizados 4 experimentos com uma injeção de diesel com vazão de 2,61 kg/h em vários pontos relativo ao PMS. A Tabela 8.5 apresenta os resultados de torque, potência e rendimento obtidos injetando diesel em diferentes pontos de injeção.

Tabela 8.5: Resultados do Teste D3

ROTAÇÃO (RPM)	POSIÇÃO (°)	TORQUE (N.m)	POTÊNCIA (kW)	CEC _D (kg/kWh)	RENDIMENTO (%)
1600	4	5,46	0,89	2,91	2,9
	-2	5,80	0,96	2,73	3,1
	-8	6,42	1,06	2,46	3,4
	-14	3,88	0,73	3,62	2,3

Os valores de potência, torque e rendimento mostram que o ponto de injeção -8° PMS apresentou a melhor performance, corroborando com os resultados obtidos no Teste D3. O baixo desempenho apresentado nos Testes D1, D2 e D3 foi influenciado pelas alterações significativas a que o cabeçote do motor foi submetido. A introdução de novos injetores alterou a geometria da câmara de combustão, causando o aumento na taxa de compressão. E as modificações da posição do injetor, do ângulo de injeção e da pressão de injeção geraram transformações importantes na “abertura do jato de diesel”, no poder de penetração e no tamanho das partículas pulverizadas.

Apesar da estrutura externa do motor modificado não ser diferente do original, a configuração interna mostra que, na prática, trata-se de um novo motor. A troca dos parâmetros que influenciam diretamente na queima do combustível criou uma nova condição de injeção e, conseqüentemente, provocou a combustão deficiente do diesel no motor modificado.

Outras intervenções no motor modificado deveriam ser executadas para alcançar uma combustão adequada. A substituição do pistão plano (original) por um pistão côncavo, por exemplo, aumentaria a capacidade cúbica da câmara de combustão e poderia resgatar a taxa de compressão original. Entretanto, o estudo para melhorar a rendimento da combustão no motor modificado operando apenas com óleo diesel não é objeto deste trabalho. E, portanto, o tempo destinado à

pesquisa foi investido na análise do desempenho do motor modificado operando com dupla (diesel e etanol) injeção direta, apresentado a seguir.

A partir dos resultados do Teste D foram definidos os seguintes parâmetros de funcionamento:

- A rotação de operação seria de 1600 rpm, pois em testes com rotação superior ocorreram muitas quebras.
- A pressão no sistema de injeção diesel deveria ficar entre 300 e 600 bar. Acima de 600 bar, o *common rail* do sistema de injeção de diesel poderia se romper e, abaixo de 300 bar, os resultados eram inconstantes.
- A pressão no sistema de injeção de etanol deveria ficar entre 100 e 130 bar. Acima de 130 bar, os *o' rings* do *common rail* de etanol se rompiam e, abaixo de 100 bar, os resultados eram inconstantes.
- O ponto de injeção do diesel deveria ser -8° PMS, porque os resultados mostraram que neste ponto o motor modificado alcançou a melhor rendimento.

8.3

Resultado dos Testes com o Motor Modificado Operando com Diesel e Etanol – Teste DE, ED e EDE

8.3.1

Resultados do Teste DE

Os experimentos do Teste DE foram realizados no motor modificado e se caracterizam pela dupla injeção direta: diesel a -8° PMS e etanol a +4° PMS.

Observando os resultados do Teste DE, expostos na Tabela 8.6, verifica-se que as combinações de vazões de diesel/etanol, utilizadas nos experimentos 1, 2 e 3 não foram suficientes para o motor funcionar com autonomia. Somente a partir do experimento 4 é que o motor modificado gerou potência com valor significativo. A Tabela 8.7 mostra os dados do motor original funcionando a 1600 rpm. Essas informações foram utilizadas como base de comparação em relação aos resultados obtidos nos experimentos 4, 5 e 6 do motor modificado.

Confrontando os resultados expostos nas Tabelas 8.6 e 8.7, nota-se que o motor modificado apresenta desempenho inferior em todas os experimentos do Teste DE.

Tabela 8.6: Resultados do Teste DE (Motor Modificado)

EXPERIMENTO	VAZÃO DE DIESEL (kg/h)	VAZÃO DE ETANOL (kg/h)	TORQUE (N.m)	POTÊNCIA (kW)	ENERGIA TOTAL (kJ/h)	RENDIMENTO (%)	TAXA DE SUBSTITUIÇÃO (%)
1	0,15	0,10	-	-	9.041	-	-
2	0,15	0,14	-	-	10.149	-	-
3	0,15	0,25	-	-	13.086	-	-
4	0,15	0,37	4,5	0,74	16.388	16,3	37,5
5	0,15	0,43	5,7	0,92	17.918	18,6	48,3
6	0,15	0,60	6,4	1,05	22.338	17,0	51,6

Tabela 8.7: Extrato 1 dos Resultados dos testes com Motor Original

EXPERIMENTO	VAZÃO DE DIESEL (kg/h)	TORQUE (N.m)	POTÊNCIA (kW)	ENERGIA TOTAL (kJ/h)	RENDIMENTO (%)
4	0,24	4,4	0,74	10.200	26,1
5	0,29	5,4	0,92	12.325	26,3
6	0,31	6,4	1,05	13.175	28,7

No Experimento 5 do motor modificado, 17.918 kJ/h de energia foi empregada a partir da combinação das vazões de diesel (0,15 kg/h) e de etanol (0,43 kg/h). Nessas condições o motor modificado gerou 0,92 kW de potência e alcançou o rendimento de 16,3%. Para atingir esta mesma potência, o motor original precisou de apenas 12.325 kJ/h de energia, conseguindo o rendimento de 26,3%. A Figura 8.4 compara a energia empregada e a potência produzida nos motores original e modificado nos experimentos 4, 5 e 6.

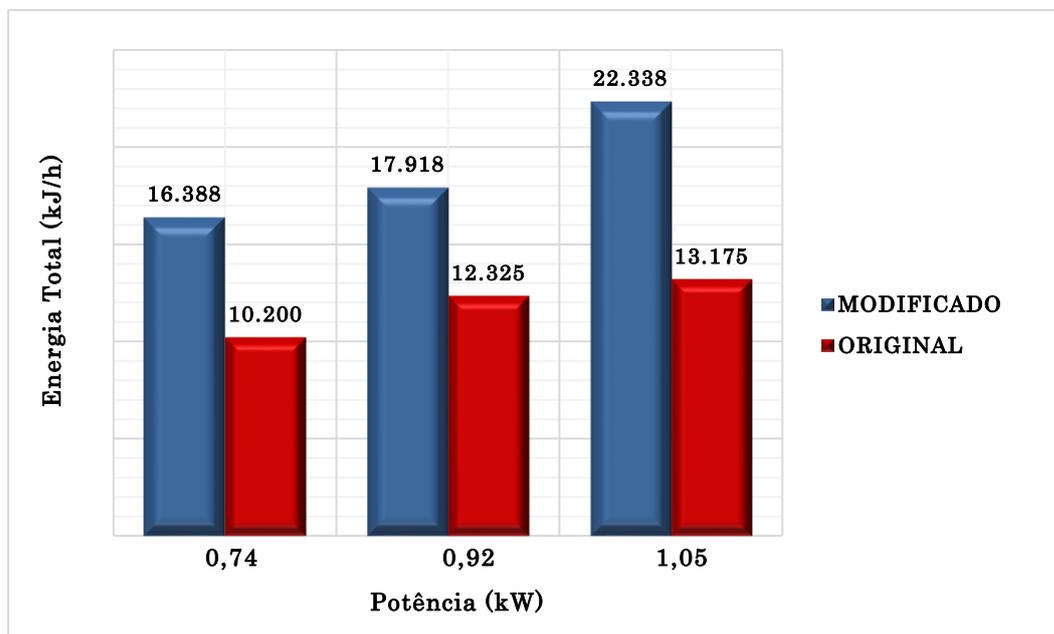


Figura 8.4: Resultados de energia e de potência dos motores original e modificado obtidos nos experimentos 4, 5 e 6 – Teste DE

Observando a Figura 8.4, nota-se que tanto no motor original quanto no modificado a potência cresceu à medida que a energia empregada aumentou. Entretanto, em todos os experimentos, o motor modificado precisou de maior quantidade de energia do que o motor original para gerar a mesma potência.

Em relação ao rendimento, o maior valor alcançado pelo motor modificado foi de 18,6% (experimento 5). Em contrapartida o motor original obteve máximo rendimento de 28,7% (experimento 6), conforme pode ser observado na Figura 8.5.

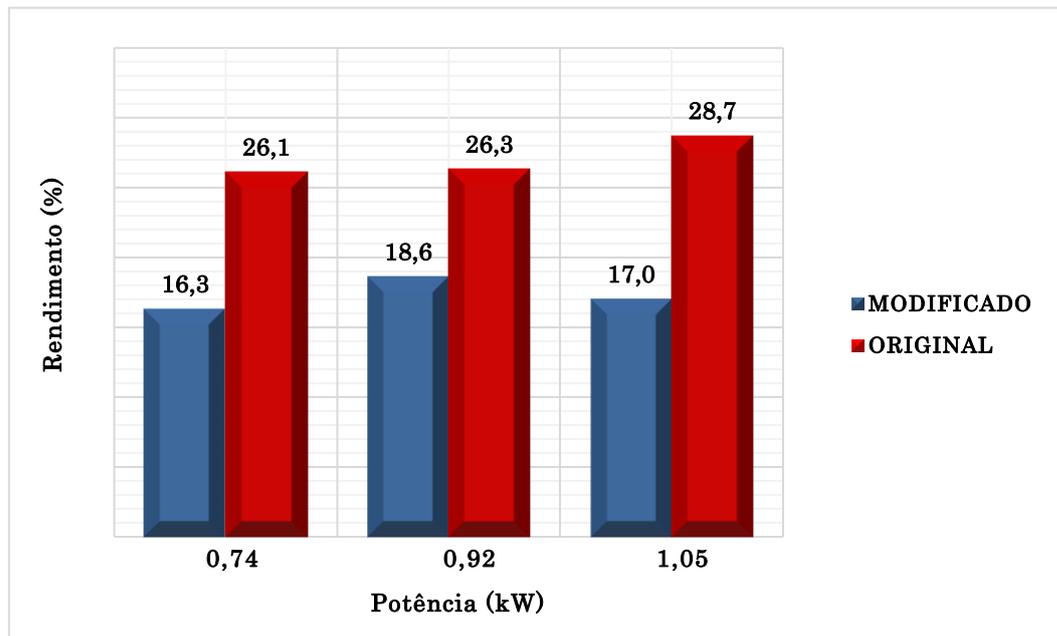


Figura 8.5: Rendimento dos motores original e modificado nos experimentos 4, 5 e 6 – Teste DE

No motor original a potência e o rendimento aumentaram à medida que maior quantidade de energia foi empregada. No motor modificado a potência aumentou, mas o rendimento não acompanhou o crescimento: no experimento 6 apresentou decréscimo de 18,6 para 17%. Isso indica que o aumento na quantidade de etanol injetado gerou excesso de combustível que não entrou em combustão, já que a vazão de diesel é fixa.

Portanto, o emprego da estratégia de dupla injeção direta de diesel -8° PMS e de etanol +4° PMS tem restrições de funcionamento por conta da combustão ineficiente do combustível. Conseqüentemente, a taxa de substituição de diesel por etanol é limitada pelo rendimento. No Teste DE a maior taxa de substituição de diesel pelo etanol foi de 51,6 % (experimentos 6).

A Figura 8.6 mostra o calor aparente liberado nos experimentos 4, 5 e 6 do Teste DE. Pode ser observado que esse parâmetro cresceu com o aumento da vazão de etanol injetado a +4° PMS. O máximo valor registrado foi de 225,9 J, no experimento 6, a +82° PMS.

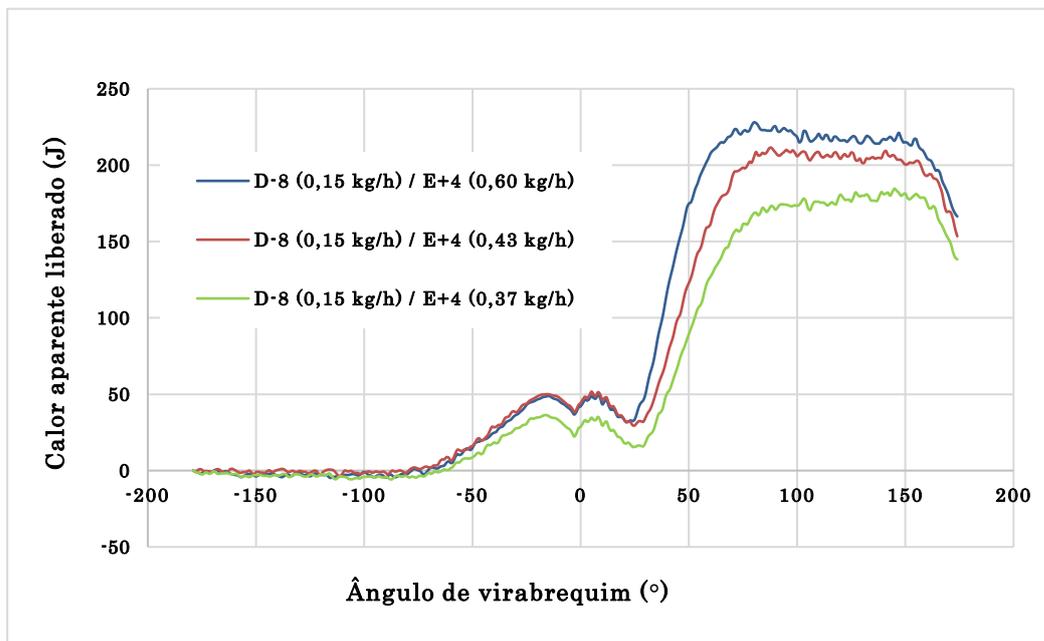


Figura 8.6: Calor aparente liberado dos experimentos 4, 5 e 6 – Teste DE.

No experimento 4 do motor modificado 16.388 kJ/h de energia foi empregada a partir da combinação das vazões de diesel D-8 (0,15kg/h) e etanol E+4 (0,37 kg/h), gerando 0,74 kW de potência e calor aparente liberado de 183,22J a +146° PMS. Para produzir potência, nessa mesma ordem de grandeza (0,76kW), foi empregada no motor original 10.625 J/h de energia, produzindo calor aparente liberado de 201,9 J a +83° PMS. Esses resultados revelam que foi empregada no motor original 64% da energia do motor modificado, mas o calor aparente liberado foi 10,02% maior.

Essa discrepância entre os valores de energia e de calor aparente liberado entre os motores original e modificado pode estar relacionada com a vaporização precária da do etanol injetado a +4° PMS. Nesse ponto de injeção, o pistão está em movimento descendente a pressão no interior do cilindro está diminuindo, deixando o cilindro com parâmetros impróprios para ocorrer a vaporização adequada e a combustão eficiente.

A Figura 8.7 que apresenta o comportamento da pressão nos experimentos 4, 5 e 6 do Teste DE. As curvas são quase coincidentes, apresentando variações relevantes apenas entre 27 e 90 ° depois do PMS.

O início da combustão nos experimentos 4, 5 e 6 ocorrem, respectivamente, em: -1° , $+1^\circ$ e $+2^\circ$ em relação ao PMS.

As pressões máximas nos experimentos 4, 5 e 6 foram respectivamente, 90,2 bar, 89,8 bar e 90,0 bar.

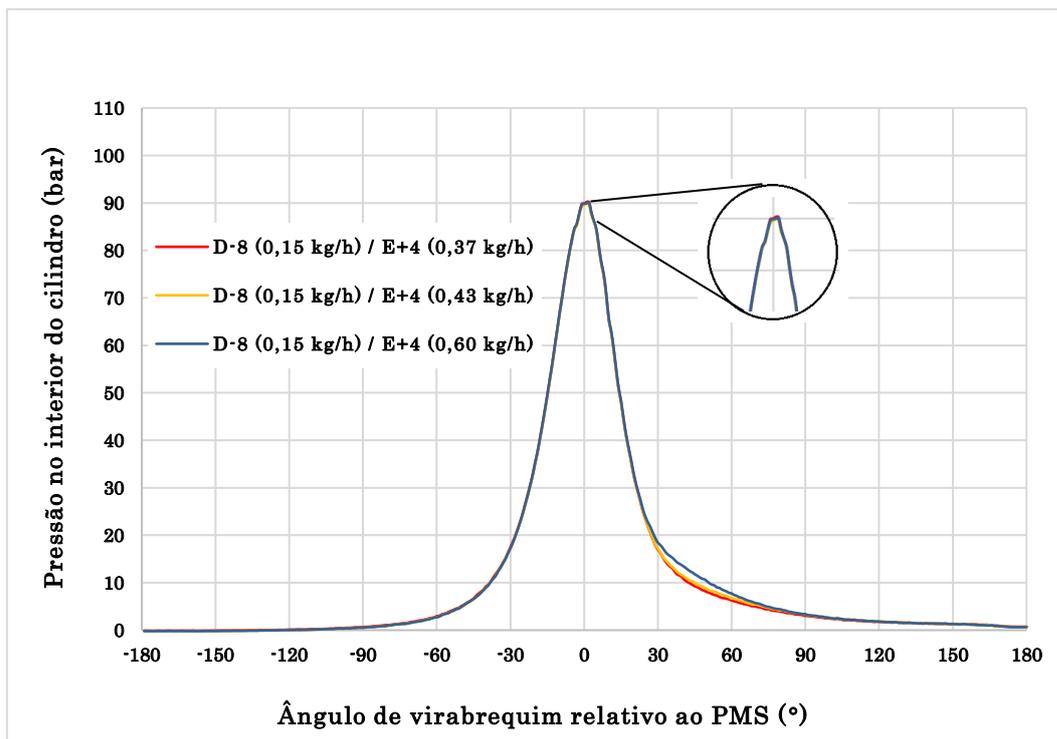


Figura 8.7: Pressão no cilindro dos experimentos 4, 5 e 6 – Teste DE

As curvas de pressões quase coincidentes, sugerem que a injeção de etanol a $+4^\circ$ PMS não tem influência relevante no aumento da pressão no interior do cilindro.

Portanto, o risco de danificar a bancada experimental é pequeno se a injeção de etanol for adiantada com a intenção de verificar se o desempenho do motor progride.

8.3.2 Resultados do Teste ED

Os experimentos do Teste ED foram realizados no motor modificado e se caracterizam pela dupla injeção direta: etanol a -170° PMS e diesel a -8° PMS. O início da combustão em todos os experimentos ocorreu em -3° em relação ao PMS

Comparado ao motor original o motor modificado apresentou rendimento da mesma ordem de grandeza nos experimentos 1 e 4. Entretanto, nos experimentos 2 e 3, obteve rendimento superior, alcançando o valor máximo de 34,8%, conforme pode ser observado na Figura 8.8.

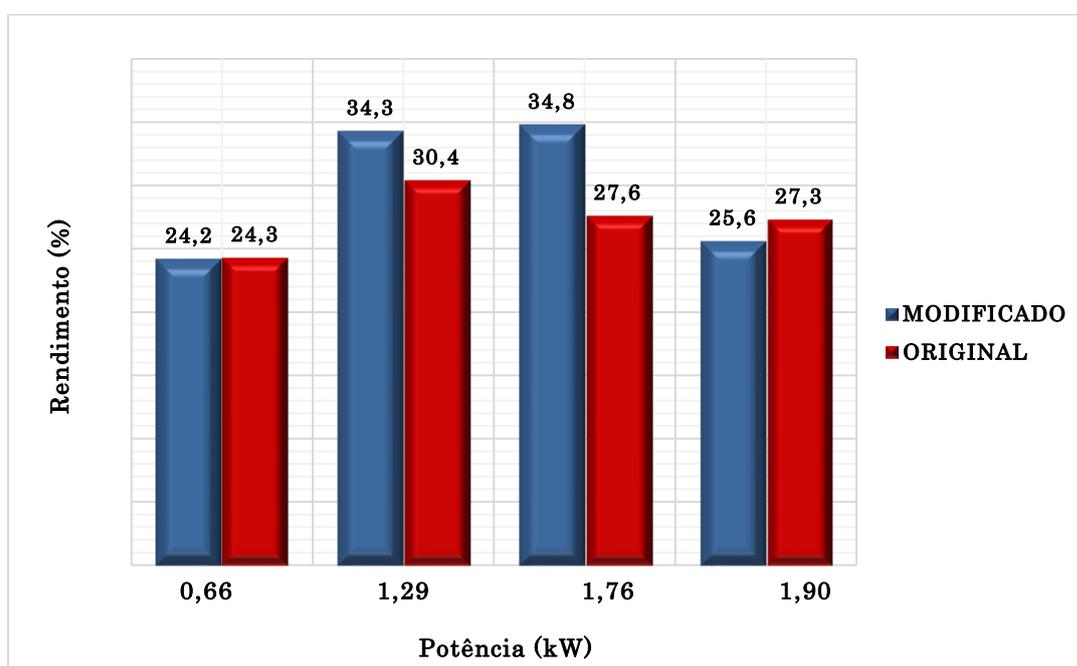


Figura 8.8: Rendimento dos motores original e modificado – Teste ED

As Tabelas 8.7 e 8.8 apresentam, respectivamente, os resultados dos experimentos realizados no Teste ED nos motores modificado e original funcionando a 1600 rpm.

Tabela 8.8 Resultados do Teste ED (Motor Modificado)

EXPERIMENTO	*VAZÃO DE ETANOL (kg/h)	VAZÃO DE DIESEL (kg/h)	TORQUE (N.m)	POTÊNCIA (kW)	ENERGIA TOTAL (kJ/h)	RENDIMENTO (%)	TAXA DE SUBSTITUIÇÃO (%)
1	0,10	0,15	4,0	0,66	9.163	24,2	34,8
2	0,25	0,15	7,9	1,29	13.129	34,3	58,3
3	0,43	0,15	10,7	1,76	17.910	34,8	72,2
4	0,53	0,15	11,4	1,90	20.678	25,6	74,6

Tabela 8.9 Extrato 2 dos Resultados do Teste 0 (Motor Original)

EXPERIMENTO	VAZÃO DE DIESEL (kg/h)	TORQUE (N.m)	POTÊNCIA (kW)	ENERGIA TOTAL (kJ/h)	RENDIMENTO (%)
1	0,23	3,9	0,66	9.775	24,3
2	0,36	7,7	1,29	15.300	30,4
3	0,54	10,5	1,76	22.959	27,6
4	0,59	11,3	1,90	25.057	27,3

Em relação à energia, pode ser observado na Figura 8.9 que, em todos os experimentos, o motor modificado empregou menor quantidade de energia para produzir a mesma potência que o motor original.

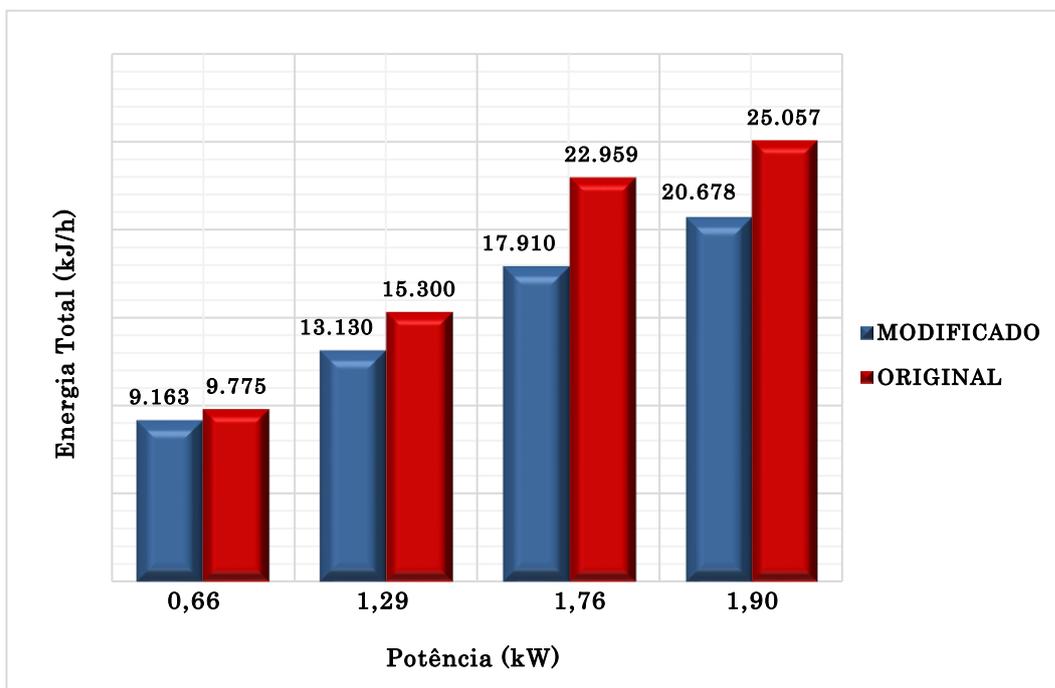


Figura 8.9: Energia total empregada e a potência produzida nos motores original e modificado nos experimentos – Teste ED.

Analisando as informações contidas nas Tabelas 8.7 e 8.8 e nas Figuras 8.8 e 8.9, observa-se que o motor modificado apresenta desempenho semelhante e, às vezes, superior, quando comparado ao motor original. No Experimento 3 do motor modificado, por exemplo, foi empregada 17.910 kJ/h de energia, que gerou uma potência de 1,76 kW e alcançou um rendimento de 34,8%. Para atingir esta mesma potência, o motor original precisou de 22.959 kJ/h de energia o que resultou no rendimento de 27,6%.

Com a estratégia de injeção empregado no Teste ED o motor modificado atingiu 74,6 % de taxa de substituição do combustível diesel pelo etanol. Entretanto, comparando os resultados dos experimentos 3 e 4 do motor modificado, verifica-se que o aumento de 72,2 para 74,6% na taxa de substituição foi acompanhado pelo decréscimo do rendimento de 34,8 para 25,6%.

Observando os dados de rendimento, energia e calor aparente contidos na Tabela 8.10 verifica-se que a perda de energia passou de 20% (experimento 3) para 21% (experimento 4). Índícios de que a combustão do etanol injetado no experimento 4 (0,59kg/h) está ocorrendo em proporção semelhante ao do experimento 3. Portanto, a perda de rendimento no experimento 4 pode estar relacionada com a maneira abrupta que a combustão ocorreu nos experimentos do Teste ED.

Tabela 8.10 Extratos dos Resultados do Teste ED (Motor Modificado)

EXPERIMENTO	RENDIMENTO (%)	ENERGIA TOTAL POR CICLO (J)	CALOR APARENTE LIBERADO (J)	ENERGIA PERDIDA NA COMBUSTÃO (%)
3	34,8	373	295	0,20
4	25,6	430	338	0,21

Os vestígios que levam a crer que a detonação ocorreu podem ser observados na Figura 8.10, que expõe os valores do calor aparente liberado nos experimentos do Teste ED.

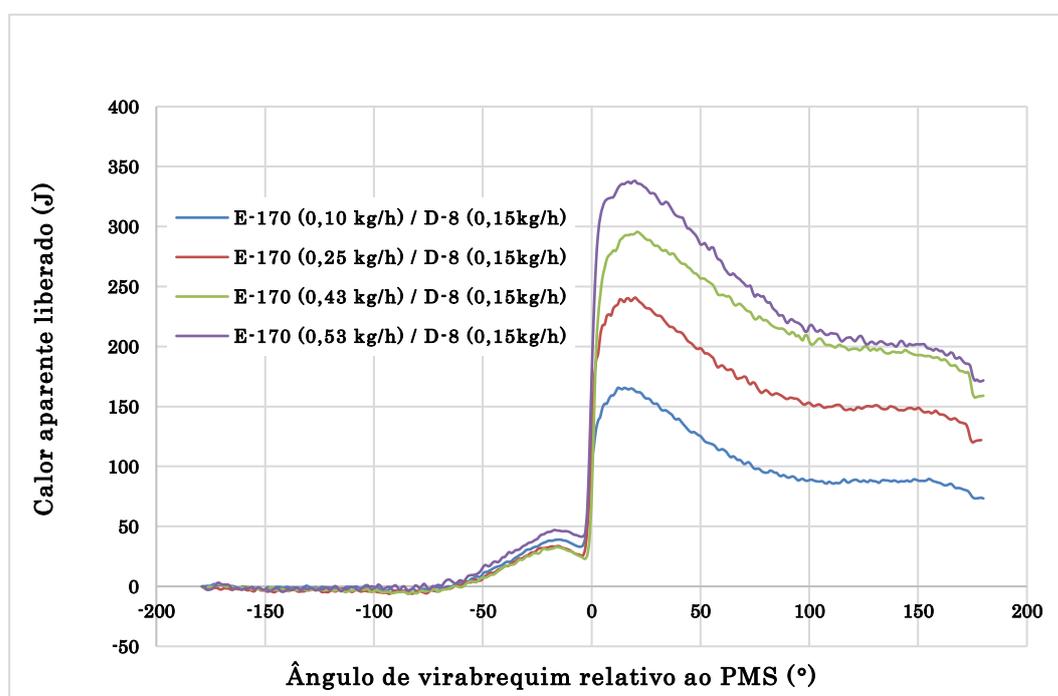


Figura 8.10: Calor aparente liberado – Teste ED

As curvas mostram que os máximos valores de calor aparente liberado foram registrados entre 18 e 20° PMS. No experimento 4, por exemplo, o máximo calor aparente foi de 338,0 J e ocorreu em +20° PMS. No motor original os máximos valores de calor aparente liberado ocorreram depois de +70° PMS, caracterizando uma combustão lenta que é típica dos motores IC. Outro indicativo que houve detonação está nos picos de pressão registrados no Teste ED que ficaram entre 108 e 136 bar, conforme mostra a Figura 8.11. Muito superior se comparado ao motor original cujos picos de pressão não passam de 80 bar.

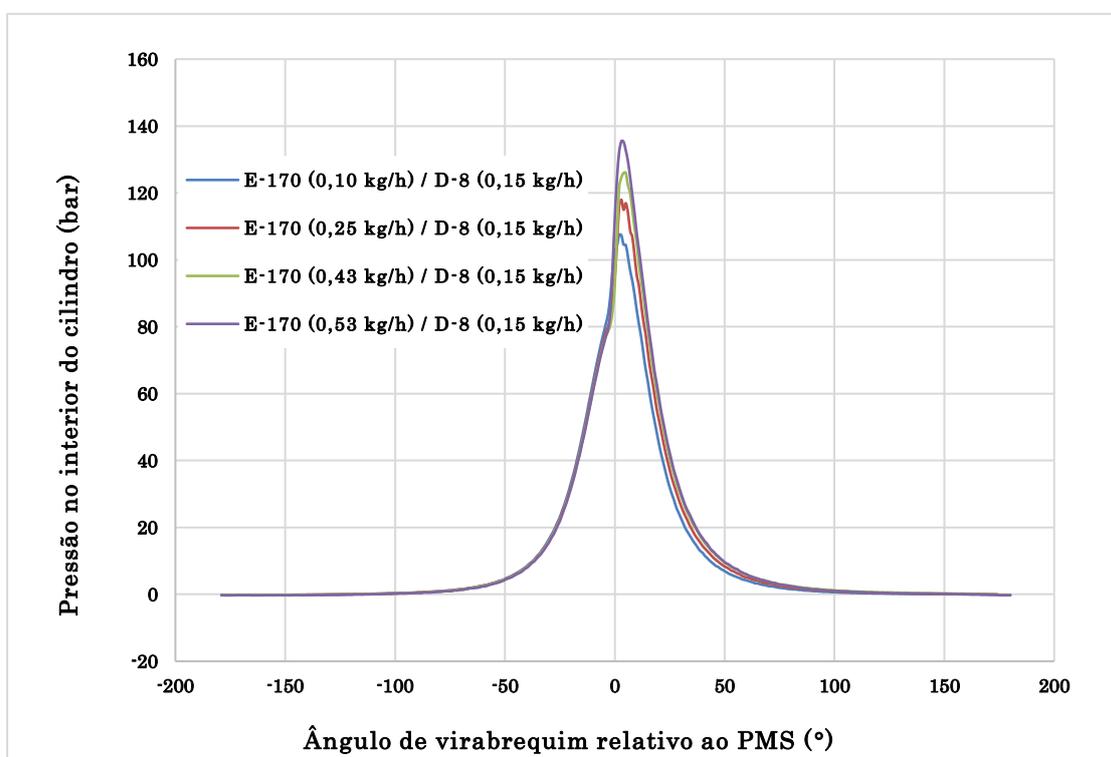


Figura 8.11: Pressão no interior do cilindro – Teste ED

As curvas de pressão, correspondentes aos experimentos do Teste ED, são praticamente coincidentes até o início da combustão. O afastamento ocorre próximo aos pontos máximos de pressão.

A injeção de etanol potencializa o atraso da ignição, diminuindo o tempo para ocorrer a combustão. Além disso, com aumento da vazão de etanol a oferta de energia no cilindro do motor é mais abundante. Nesse cenário, se a combustão for bem-sucedida, a consequência é a detonação severa. W. Tutak *et al.* (2018) também

encontrou efeitos semelhantes no trabalho que investigou os efeitos da dupla injeção de (diesel/bioetanol) sobre o desempenho do motor diesel.

O barulho, popularmente conhecido como “*batida de pino*”, observado durante os experimentos com o motor modificado, é outro fator que corrobora a hipótese de ter ocorrido detonação no Teste ED. A possibilidade de ocorrer combustão abrupta, por conta do aumento da quantidade de etanol injetado antes do PMS, restringe a utilização da estratégia de injeção empregada no Teste ED. Pois, a detonação causa danos no cabeçote e diminui significativamente a vida útil do motor. O funcionamento contínuo do motor com a detonação do combustível é impraticável. D.Z. Zhou *et al.* (2015), investigou a aplicação da abordagem da cinética química na detecção de “*batidas de pino*” no motor RCCI operando com biodiesel/metanol e também verificou maior tendências de ocorrer este fenômeno com o aumento da quantidade de metanol injetada.

8.3.3 Resultados do Teste EDE

Os experimentos do Teste EDE foram realizados com motor modificado operando a 1600 rpm com tripla injeção direta: etanol a -170° (vazão fixa) PMS, diesel a -8° PMS (vazão fixa) e etanol a $+4^\circ$ PMS (vazão variável). Com emprego da estratégia de tripla injeção direta foi possível evitar a ocorrência de detonações durante o funcionamento do motor modificado. A metodologia consistiu em particionar a injeção de etanol em duas: a primeira a -170° (vazão fixa) e a segunda a $+4^\circ$ PMS (vazão variável). Essa modificação permitiu aumentar a quantidade injetada de etanol e, conseqüentemente, gerar maiores potências. A Tabela 8.11 mostra os resultados dos 5 experimentos que compõem o Teste EDE e a Tabela 8.12 apresenta os dados do motor original funcionando a 1600 rpm.

Tabela 8.11 Resultados do Teste EDE (Motor Modificado)

EXPERIMENTO	VAZÃO DE DIESEL (kg/h)	*VAZÃO TOTAL ETANOL (kg/h)	TORQUE (N.m)	POTÊNCIA (kW)	ENERGIA (kJ/h)	RENDIMENTO (%)	TAXA DE SUBSTITUIÇÃO (%)
1	0,15	0,37	8,5	1,40	16.366	30,8	61,5
2	0,15	0,43	10,1	1,67	18.156	33,0	70,5
3	0,15	0,53	10,7	1,77	20.552	30,9	72,2
4	0,15	0,60	10,8	1,79	22.754	28,2	72,2
5	0,15	0,72	11,0	1,81	25.881	25,2	74,5

* Vazão total de etanol: resultado da soma das injeções.

Tabela 8.12 Extrato 3 dos Resultados do Teste 0 (Motor Original)

EXPERIMENTO	VAZÃO DE DIESEL (kg/h)	TORQUE (N.m)	POTÊNCIA (kW)	ENERGIA TOTAL (kJ/h)	RENDIMENTO (%)
1	0,39	8,3	1,39	16.575	30,2
2	0,51	10,0	1,67	21.675	27,7
3	0,54	10,7	1,77	22.950	27,8
4	0,54	10,7	1,79	22.950	28,1
5	0,59	11,0	1,81	25,075	26,0

Pode ser observado na Figura 8.12 que o motor modificado apresentou maior rendimento em quase todos os experimentos, exceto no experimento 5.

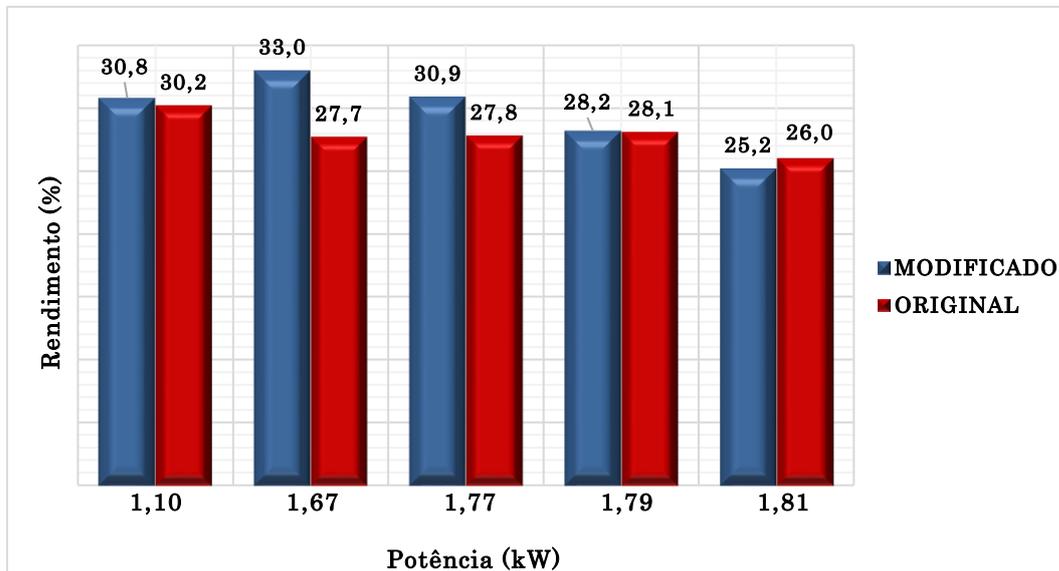


Figura 8.12: Rendimento e potência dos motores original e modificado – Teste EDE

A Figura 8.13 mostra que o motor modificado empregou menor quantidade de energia para produzir a mesma potência que o motor original. A exceção acontece apenas no experimento 5.

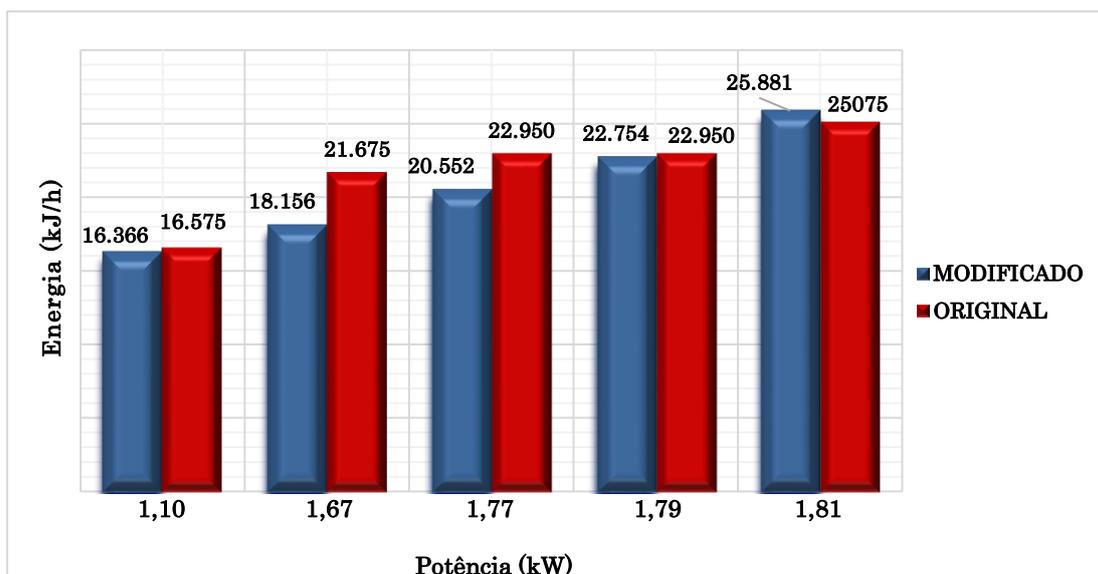


Figura 8.13: Energia e potência dos motores original e modificado – Teste EDE

No Experimento 2 (motor modificado), por exemplo, o emprego de 18.156 kJ/h de energia, gerou uma potência de 1,67 kW e alcançou rendimento de 33,0%. Para atingir esta mesma potência, o motor original precisou de 21.675 kJ/h de energia o que resultou num rendimento de 27,7%.

A Figura 8.14 mostra os resultados do calor aparente dos experimentos que compõem o Teste EDE. A legenda “ V_{etanol} ” indica a soma das vazões do etanol injetado em -170° e em $+4^\circ$ PMS. O valor máximo de calor aparente alcançado foi de 288,6 J, no experimento 5, em que a soma das vazões de etanol (E-170) e (E+4) totalizam 0,72 kg/h.

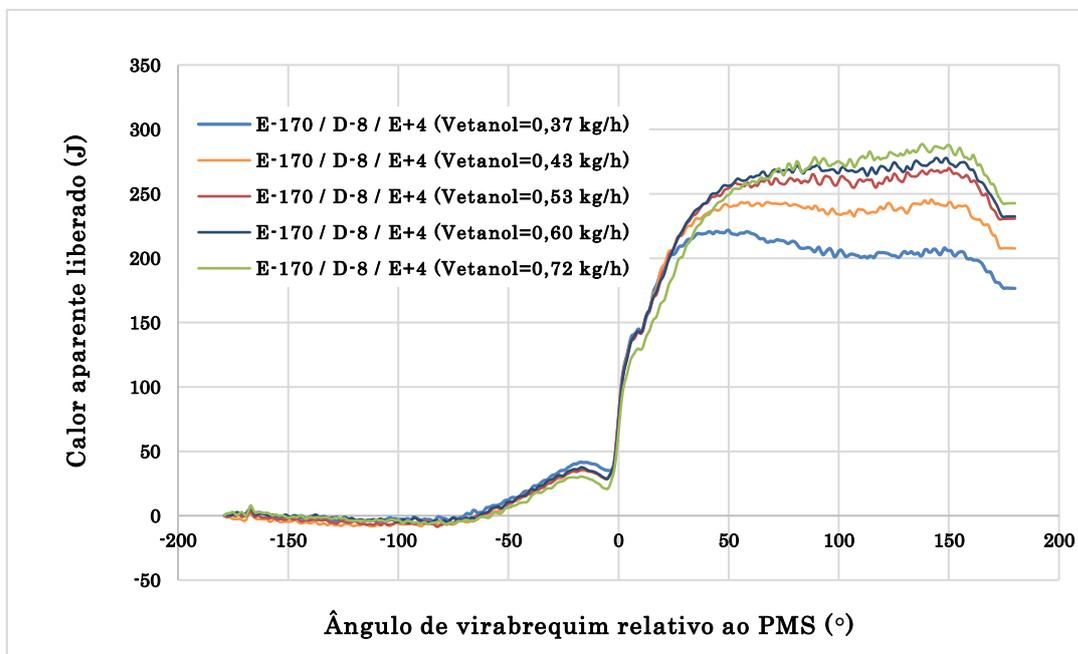


Figura 8.14: Calor aparente liberado – Teste EDE

Verifica-se que o formato das curvas de calor aparente liberado do Teste EDE é semelhante ao formato das curvas do motor original. Isso ocorreu porque a quantidade de etanol injetado antes do PMS foi corrigida para que não houvesse detonação. Este procedimento tornou a queima dos combustíveis semelhante à do motor, sendo determinante para que os valores máximos de calor aparente liberado fossem registrados depois do ponto $+140^\circ$ PMS.

No Teste EDE, a segunda injeção de etanol (E+4) pode ser apontada como o agente que teve maior ingerência nos parâmetros de desempenho do motor modificado, como por exemplo: a potência, o calor aparente liberado e o rendimento. Essa hipótese se baseia no fato de que a primeira injeção de etanol (E-170) e a injeção de diesel (D-8) foram realizadas com vazões fixas. A partir dessa ideia pode se considerar que, nos experimentos com motor modificado do Teste EDE, o acréscimo na potência e no calor aparente liberado, foi devido ao aumento da quantidade de etanol injetado em +4° PMS.

A Tabela 8.10 mostra os resultados da energia empregada por ciclo, do calor aparente liberado, e da energia perdida na combustão dos experimentos 3, 4 e 5.

Tabela 8.10 Extratos dos Resultados do Teste EDE (Motor Modificado)

EXPERIMENTO	RENDIMENTO (%)	ENERGIA TOTAL POR CICLO (J)	CALOR APARENTE LIBERADO (J)	ENERGIA PERDIDA NA COMBUSTÃO (%)
3	30,9	428	269	37
4	28,2	474	277	42
5	25,2	539	294	45

Analisando os resultados expostos na Tabela 8.10, verifica-se que a quantidade de energia perdida na combustão cresceu a medida que a vazão de etanol injetado em +4° PMS, aumentou. O decréscimo que ocorreu no rendimento dos experimentos 4 e 5 é consequência direta da perda de energia na combustão. E isso está associado ao excesso de etanol que não entrou em combustão.

A tendência de queda no rendimento com o aumento da vazão de etanol injetado a +4°PMS pode ser evitada modificando alguns parâmetros:

- Adiantar a segunda injeção de etanol;
- Aumentar a quantidade de etanol injetado antes do PMS (-170°) até o limite máximo antes da ocorrência da detonação.

Comparadas ao Teste ED, as pressões máximas obtidas no Teste EDE são cerca de 25 % menor, fato que reforça a ideia de combustão sem detonação. A Figura 8.15 mostra o comportamento da pressão Teste EDE. As curvas são quase coincidentes, diferenciando-se na região de máxima pressão.

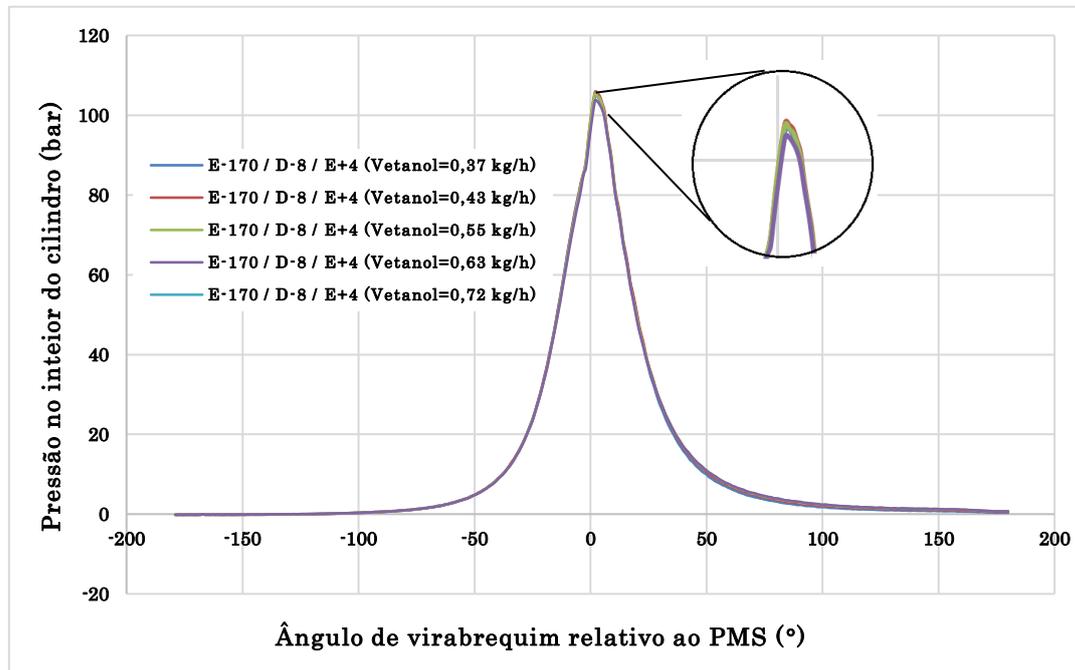


Figura 8.15: Pressão no interior do cilindro – Teste EDE

O início da combustão ocorreu em -3° PMS em todos os experimentos do Teste EDE e do Teste ED. Houve aumento de 1° , se comparado ao motor diesel original cujo início da combustão aconteceu em -4° PMS. O atraso da ignição está associado ao número de cetano do combustível (NC). Quanto maior o NC de um combustível, menor é o atraso entre a sua injeção e o início da combustão. O número de cetano do etanol é muito inferior se comparado com diesel (Egúsquiza, 2014), por isso maior atraso da ignição do motor modificado funcionando com diesel e etanol já era esperado.