

6 Conclusões e Recomendações

No presente trabalho, ensaios experimentais de um motor Diesel consumindo etanol hidratado ou gás natural em substituição parcial ao óleo diesel foram realizados. Os objetivos principais foram verificar as influências dos combustíveis alternativos e avaliar as técnicas do avanço da injeção do diesel e da restrição parcial do ar de admissão, em relação aos parâmetros característicos da combustão, desempenho e emissões.

Com base nos dados do diagrama pressão-ângulo de virabrequim foi possível analisar determinados parâmetros característicos da combustão, tais como o início da combustão, a máxima taxa de elevação de pressão e o pico de pressão.

Influências do combustível alternativo:

Nos ensaios bicomcombustível, durante a fase de admissão, a presença do etanol hidratado ou gás natural introduzido juntamente com o ar promoveu uma ligeira redução da pressão no cilindro (e conseqüente redução da temperatura), pouco antes do final da fase de compressão, resultando em níveis ligeiramente inferiores se comparada à compressão do ar no modo Diesel original. Esse efeito é diretamente relacionado às diferenças existentes entre as propriedades termo-físicas dos combustíveis alternativos e o ar, tais como o calor latente de vaporização (elevado no caso do álcool), calor específico, condutividade térmica, densidade, entre outras. Por sua vez, a diminuição da temperatura no interior do cilindro, no instante da injeção do óleo diesel, tendeu a aumentar ligeiramente o atraso da ignição na operação bicomcombustível (entre 1 e 2 graus a mais, em comparação ao atraso original), sendo que esse aumento foi mais notável nos ensaios Diesel/etanol com altas taxas de substituição.

No modo Diesel/etanol, a progressiva taxa de substituição fez com que a máxima taxa de elevação de pressão e o pico de pressão aumentassem nas distintas cargas avaliadas, porém, somente a 30% da plena carga, e a partir de certo valor de substituição, uma tendência de queda foi observada. No modo

Diesel/gás ocorreu um fato semelhante, porém os parâmetros analisados aumentaram em um percentual mais baixo que o do modo Diesel/etanol e o aumento do pico de pressão aconteceu apenas nas cargas elevadas (75 e 100% da plena carga). De modo geral, os incrementos na máxima taxa da pressão e o pico da pressão, obtidos nas cargas elevadas da operação bicombustível, são um indicativo da participação de uma parte da mistura admitida (ar-etanol ou ar-gás) na fase de combustão rápida, resultando em uma maior liberação de energia.

Efeitos do avanço da injeção do óleo diesel:

Nos ensaios bicombustível foram avaliados os efeitos de um e dois graus a mais (i.e., $P1$ e $P2$), na regulagem original do avanço da injeção do óleo diesel ($P0$). Além disso, no modo Diesel/etanol foram realizados testes com avanço $P4$.

O avanço da injeção antecipou a ignição e aumentou os níveis da máxima taxa de elevação de pressão e do pico de pressão na combustão. Nas distintas cargas imposta ao motor, a operação bicombustível com avanço $P1$ foi suficiente para antecipar a combustão em até 3 graus, em relação à ignição no modo Diesel original. Na operação Diesel/etanol, o avanço $P4$ ocasionou uma ignição excessivamente adiantada, posicionada entre 8 e 10 graus antes do ângulo da ignição original.

A máxima taxa de elevação da pressão e o pico de pressão aumentaram moderadamente nas operações bicombustível, ao usar avanços $P1$ e $P2$. Já o avanço $P4$, no modo Diesel/etanol, tornou-se uma condição de funcionamento inadequada, devido aos aumentos significativos na taxa de elevação de pressão e pico de pressão, com consequentes incrementos no ruído do motor ensaiado.

Efeitos da restrição do ar:

Nas distintas condições de avanço da injeção, a restrição parcial do ar teve pouco impacto sobre o início da combustão do modo Diesel/gás. Na maioria dos casos, a máxima taxa de aumento de pressão e o pico de pressão foram ligeiramente reduzidos nos ensaios com restrição do ar, sendo que esse efeito foi mais acentuado nas baixas cargas impostas ao motor. Apenas na operação com avanço $P2$ e máxima taxa de substituição diesel/gás, a propagação da chama em

uma mistura rica (gerada pela restrição do ar) seria a responsável pelo aumento expressivo na máxima taxa de elevação de pressão.

No que tange aos parâmetros do desempenho e emissões do motor, foram analisados o rendimento térmico e as concentrações de monóxido de carbono, hidrocarbonetos, material particulado e óxidos de nitrogênio.

Rendimento térmico:

Operando a cargas elevadas, o consumo simultâneo de óleo diesel e etanol hidratado produziu um ligeiro acréscimo no rendimento térmico do motor, em relação ao valor conseguido no modo Diesel original. Já na menor carga avaliada (30% da plena carga), esse parâmetro de desempenho diminuiu significativamente com os percentuais crescentes da taxa de substituição. No caso do modo Diesel/gás, operando a 75 e 100% da plena carga, o rendimento térmico inicialmente tendeu a diminuir com a substituição progressiva do óleo diesel pelo gás natural e, posteriormente, ao atingir uma determinada taxa de substituição, aumentou até níveis próximos daqueles obtidos no funcionamento original. Possivelmente, para elevadas cargas, aumentando-se a taxa de substituição, obter-se-iam rendimentos ainda mais elevados. Porém, abaixo de 50% da máxima carga, o pior desempenho do motor ficou cada vez mais evidenciado pelo maior fornecimento do combustível gasoso e seu menor aproveitamento de energia.

Nos ensaios bicomcombustível, os avanços de injeção *P1* e *P2* promoveram um pequeno aumento no rendimento térmico, em comparação à operação bicomcombustível com avanço original. O avanço *P4*, avaliado no modo Diesel/etanol, ocasionou uma queda significativa no rendimento do motor.

No modo Diesel/gás, a restrição parcial do ar e as altas taxas de substituição geraram pequenos ganhos no rendimento, parecidos com os observados na tendência do avanço da injeção, utilizando os ajustes *P1* e *P2*.

Emissões de CO:

As emissões de monóxido de carbono nos ensaios bicomcombustível foram consideravelmente superiores quando comparadas ao modo Diesel original. As máximas concentrações de CO do motor, ao consumir parcialmente etanol hidratado ou gás natural, estiveram ao redor de 2.100 ppm, enquanto consumindo apenas óleo diesel estas foram inferiores a 400 ppm.

Usando os avanços de injeção *P1* e *P2* foi possível diminuir notoriamente o CO expelido pela operação bicomustível, sendo que tais reduções foram mais significativas no modo Diesel/gás, empregando altas taxas de substituição, onde foram alcançadas reduções na ordem de 50%. Foi verificado também que na maioria das variações de carga no modo Diesel/etanol, a operação com avanço *P4* acompanhou essa tendência, exceto na condição correspondente a 30% da plena carga, onde foram registrados maiores acréscimos do CO, em relação àquelas procedentes da operação Diesel/etanol com avanço original.

A técnica da restrição parcial do ar, utilizada no modo Diesel/gás, também contribuiu na redução do CO, diminuindo ainda mais os níveis alcançados pela técnica do avanço. Do mesmo modo, os resultados preliminares da restrição do ar, avaliada nas baixas cargas do modo Diesel/etanol, confirmaram também modestas reduções de CO com simultâneo aumento de NO_x.

Emissões de HC:

No modo Diesel/etanol, as emissões de hidrocarbonetos aumentaram com a taxa de substituição, sendo que essa tendência foi mais significativa nas baixas cargas do motor. As operações Diesel/etanol com variação do ponto de injeção do óleo diesel mostraram tendências semelhantes. Porém, tais resultados são apenas considerados como indicadores qualitativos, devido à elevada incerteza associada ao valor medido.

Emissões de MP:

Ensaio bicomustível mostraram uma queda notável na emissão de MP com o aumento da taxa de substituição. Além disso, as operações com o avanço da injeção do óleo diesel e altos percentuais de substituição contribuíram para uma redução adicional dos particulados.

No modo Diesel/gás, os resultados a 50% da plena carga mostraram que a restrição parcial do ar inicialmente aumenta a emissão de MP, diminuindo após atingir certa taxa de substituição, para valores inferiores aos obtidos no modo Diesel original.

Emissões de NO_x:

Sob condições de 75 e 100% da plena carga, as emissões de óxidos de nitrogênio da operação bicomustível aumentaram ao se substituir gradualmente o diesel pelo combustível alternativo. Nos testes Diesel/etanol, operando em carga máxima e com taxas de substituição de até 40%, registraram-se aumentos de cerca de 7% nas concentrações de NO_x, enquanto na plena carga Diesel/gás, onde foram conseguidas taxas de substituição de até 83%, esse aumento foi da ordem de 80%. Por sua vez, nas menores cargas, o NO_x emitido pelo motor mostrou uma queda favorável ao se aumentar a taxa de substituição Diesel/etanol ou Diesel/gás, atingindo, em ambos os modos de operação, reduções de até 17%, em relação ao modo Diesel original.

Em toda a faixa de carga, rotação e taxa de substituição avaliada, as emissões de NO_x tenderam a ser mais expressivas à medida que foi avançado o ponto de injeção do diesel. Desse modo, nos testes Diesel/etanol, a operação com avanço *P4* provocou os maiores percentuais de aumento dos óxidos de nitrogênio (ao redor de 230%, quando comparado ao modo Diesel original).

No modo Diesel/gás, a restrição parcial do ar acarretou, nas distintas operações com avanço da injeção, um ligeiro aumento nas concentrações de NO_x.

De forma geral, no presente trabalho constatou-se que os maiores níveis de temperatura na combustão, gerados pelo maior avanço da injeção do óleo diesel, e a maior riqueza da mistura ar-etanol ou ar-gás, devido à restrição parcial do ar, favoreceram a melhor decomposição e oxidação do combustível alternativo, refletindo-se favoravelmente em menores emissões de CO e MP, além de um pequeno aumento no rendimento térmico do motor. No entanto, as técnicas avaliadas também aumentaram as emissões de NO_x e, no caso específico do avanço da injeção, acarretaram em um maior ruído do motor.

Pelos resultados obtidos através dos dados da pressão no cilindro, recomenda-se que a conversão de um motor Diesel para o modo bicomustível, usando as técnicas de otimização, considere as limitações máximas na taxa de aumento da pressão e no pico de pressão da combustão, com base nos valores concebidos no projeto original do motor, a fim de reduzir o estresse térmico e mecânico na máquina térmica. Também, uma análise detalhada das variações dos ciclos de pressão deverá ser efetuada.

Sugere-se que, em trabalhos futuros, sejam utilizados motores Diesel com injeção eletrônica para avaliar a operação bicomcombustível. Os motores eletrônicos hoje comercializados no Brasil são sujeitos a uma legislação mais severa quanto as suas emissões (EURO III) do que aqueles com injeção mecânica (EURO II, caso dos MWM 4.10 TCA). Portanto, existiriam exigências mais severas quanto aos níveis de emissões em eventuais conversões bicomcombustível da nova geração de motores. Por outro lado, utilizando-se tais motores eletrônicos também existirá oportunidade para uma melhor adoção das técnicas avaliadas no presente trabalho de tese (além de outras técnicas como a injeção “multiponto” do combustível alternativo).

Trabalhos futuros também deverão incluir: instrumentações adequadas para medir o instante dinâmico do início do débito de óleo diesel, a medição da pressão nos diferentes cilindros do motor, a medição da posição angular usando *encoders* de alta resolução, além de equipamentos homologados para medição de poluentes em motores de combustão interna, entre outros. Com relação às emissões no modo bicomcombustível, seria interessante avaliar as concentrações de metano e dos hidrocarbonetos não metanos, além de outros poluentes não legislados nos motores Diesel, como o formaldeído e acetaldeído (aldeídos produzidos nas reações de oxidação do etanol e metano).

Finalmente, acredita-se que o Brasil, com sua atual matriz energética e também considerando as perspectivas do incremento da produção de etanol e gás natural, deve continuar investindo em pesquisas na operação bicomcombustível em motores do ciclo Diesel.