

ANÁLISE DA APLICAÇÃO DE MISTURAS DE DIESEL S10 E ÓLEO PIROLÍTICO DE PNEUS INSERVÍVEIS EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA POR COMPRESSÃO

**G. M. Pinto¹, T. A. Z. Souza²,
C. J. R. Coronado³, L. F. V. Flóres⁴**

1-Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS 1303, Pinheirinho, Itajubá, MG, Brasil.
gabrielmarquespinto@gmail.com

2-Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS 1303, Pinheirinho, Itajubá, MG, Brasil.
tulio_zucareli@hotmail.com

3-Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS 1303, Pinheirinho, Itajubá, MG, Brasil.
christian@unifei.edu.br

4-Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS 1303, Pinheirinho, Itajubá, MG, Brasil.
valadao@unifei.edu.br

Palavras-chave: motor Diesel, pneus inservíveis, óleo pirolítico de pneus, emissões em motores.

Resumo

A busca pelo atendimento à demanda energética tem feito com que cada vez mais combustíveis sejam testados como fontes de energia, a fim de suprir as mais diferentes necessidades em termos de transporte, eletricidade e geração de potência em geral. Neste contexto, substâncias produzidas a partir de fontes renováveis (como etanol e biodiesel) ou a partir de resíduos (como combustíveis produzidos por meio de pneus inservíveis) apresentam-se não apenas como possíveis soluções energéticas, mas também como uma alternativa para problemas ambientais. A aplicação de pneus para tal fim representa, em adição, uma opção para os problemas relacionados à destinação deste produto.

Em muitos países, como é o caso do Brasil, a preocupação com a destinação de pneus inservíveis relaciona-se não somente à questão ambiental, mas também a aspectos legais. De fato, desde os anos 90 existem legislações brasileiras que visam prevenir e regulamentar a geração de resíduos no país. Em resposta à necessidade de reaproveitamento destes resíduos, alternativas como reuso de material e valorização energética devem ser aplicadas. É nesta situação que a pirólise de pneus – processo termoquímico sem presença de oxidante que produz, dentre outros componentes, um óleo de poder calorífico próximo ao do diesel – entra como alternativa. A análise da viabilização deste processo, todavia, deve passar pela verificação da aplicabilidade deste óleo como combustível, sendo fundamental o conhecimento do padrão de emissões e do desempenho associados à queima desta substância.

Esta pesquisa tem por objetivo a análise da viabilidade de aplicação de misturas contendo óleo pirolítico de pneus e diesel S10 em motores Diesel, tanto em termos de desempenho como em termo de emissões. Para tal, misturas foram preparadas e utilizadas como combustível em um motor monocilíndrico diesel disponível no Laboratório de Máquinas Térmicas da Universidade Federal de Itajubá, Brasil. A potência é controlada por meio de freio hidráulico e dinamômetro, e a medição das emissões foi realizada mediante a utilização do analisador de gases LANCOM III. Foram realizadas oito medições para cada

rotação, variando 100 rpm de 1400 a 2300 rpm, sempre seguindo a norma brasileira para motores alternativos de combustão interna não veiculares, ABNT NBR 6396:1976. Em seguida, foram levantados gráficos a fim de comparar emissões e performance para cada tipo de mistura. Por fim, as emissões registradas foram comparadas com valores teóricos, que podem ser estimados por meio da composição de cada combustível.

1. Introdução

A crescente demanda por energia nos mais diversos setores tem feito com que cada vez mais alternativas e processos sejam estudados, a fim de buscar opções viáveis capazes de suprir as necessidades em geral. No que se refere à energia proveniente de combustíveis, as fontes derivadas de petróleo – como gasolina e óleo diesel – são as mais comuns. Todavia, o fato de estas substâncias serem provenientes de uma fonte sabidamente esgotável, além de apresentarem níveis significativos de emissões, faz com que opções renováveis e/ou ambientalmente corretas sejam buscadas. A partir deste ponto, é possível buscar alternativas em duas linhas: utilizar combustíveis renováveis, que resultem em redução de emissões e atendam a condições mínimas em termos de viabilidade de produção; ou utilizar combustíveis provenientes de resíduos em geral, associando solução energética à questão de disposição de material pós-consumo.

No caso de combustíveis que são produzidos a partir de resíduos, a escolha do processo deve incluir uma comparação detalhada da aplicabilidade de outras alternativas de destinação, incluindo opções de reaproveitamento de material e valorização energética. Para efeito de estudo da viabilidade da aplicação de um combustível em si, todavia, é razoável que seja feita uma análise da sua queima, tanto em termos de capacidade de geração de energia/potência como no que se refere ao perfil de emissões do processo.

Neste contexto, propõe-se o estudo da aplicação de um destes combustíveis – o óleo pirolítico de pneus inservíveis – em motores de combustão interna ciclo Diesel, em forma de misturas com óleo diesel tradicional. Serão estudadas misturas em proporções variáveis, contendo 2%, 5% e 10% em massa de óleo pirolítico.

É importante ressaltar que, além de se apresentar como uma solução energética em potencial, a pirólise de pneus representa uma alternativa de destinação de pneus inservíveis, contornando não apenas o aspecto ambiental, como também requisitos fundamentados em legislação de muitos países.

2. Descarte de pneus, normas e legislação brasileira

Com a rápida evolução tecnológica, crescimento populacional e a necessidade de novas tecnologias para fabricação de produtos com ciclo de vida reduzido, é natural o aumento no descarte. Esta situação reflete diretamente no volume de resíduos destinado para aterros, na demanda por recursos naturais e energia, na poluição do ar e das águas, no aumento dos custos do processo de coleta e destinação de resíduos e no esgotamento dos aterros próximos aos pontos de maior geração. Neste contexto vêm sendo definidas políticas nas esferas federal, estadual e municipal, além de mudanças na postura das empresas quanto ao projeto de produtos e sua disposição final [1].

As primeiras regulamentações associadas aos pneumáticos no Brasil surgiram nos anos 90, na forma de normas voltadas a prevenir a geração de resíduos de pneus. No ano de 1991, foi proibida a importação de bens de consumo usados, incluindo os pneus [2].

No ano de 1999, foi aprovada a resolução CONAMA nº 258/99 que determina que “As empresas fabricantes e as importadoras de pneumáticos ficam obrigadas a coletar e dar destinação final, ambientalmente adequada, aos pneus inservíveis” [3].

Em 2000, determinou-se que não seriam deferidas licenças de importação de pneumáticos recauchutados e usados, tanto como bem de consumo quanto como matéria prima^[4]. A base de tal decreto seria o argumento de que estes pneus entrariam no país com vida útil curta e logo transformar-se-iam em passivos ambientais [2].

Em 2002, a resolução CONAMA nº 258/99 foi complementada pela Instrução Normativa Nº 08/02, do IBAMA, e teve alguns pontos alterados pela resolução CONAMA nº 301/02. Ainda nesse ano passou-se a permitir importações de pneus remoldados provenientes de países do Mercosul, devido a uma decisão do Tribunal Arbitral do Mercosul [2].

No ano de 2009, as resoluções CONAMA nº 258/99 e nº 301/02 foram revogadas pela resolução nº 416/09. Esta resolução, ainda válida, mantém os pontos principais das resoluções anteriores e coloca como desafio a obrigação de dar destino a todos os pneus que entram no mercado de reposição, de modo que fabricantes e importadores de pneus novos devem elaborar planos de gerenciamento de coleta, armazenamento e destinação final dos pneus inservíveis [1]. O procedimento a ser seguido pelos fabricantes e importadores foi regulamentado em 2010, por meio da Instrução Normativa nº 01/2010, do IBAMA.

2.1. Logística reversa

O conceito de logística reversa já existe há certo tempo. Em 1970, definições semelhantes, como “canais reversos” e “fluxo reverso”, apareceram na literatura científica, porém referindo-se apenas à reciclagem. No Brasil, a logística reversa constitui um novo conceito da logística empresarial, que surgiu nos anos 90, quando se reconheceu que matérias-primas, componentes e suprimentos representavam custos significativos e que deviam ser administrados corretamente no pós-venda ou pós-consumo. A primeira definição conhecida de logística reversa foi publicada pelo *Council of Logistics Management (CLM)*, em 1993. Segundo este conceito inicial, a logística reversa seria um termo geral relacionado às habilidades e atividades associadas ao gerenciamento de redução, movimentação e disposição de resíduos de produtos e embalagens. Desde então, definições semelhantes foram sugeridas, como a proposta do *Council of Supplier Chain Management Professionals (CSCMP)*, de 2010, que classifica a logística reversa como o segmento da logística voltado à movimentação e gerenciamento de produtos e recursos pós-venda, incluindo retorno para reparos ou créditos [1].

No Brasil, conforme a legislação, o sistema de retorno de produtos envolve responsabilidade de fabricantes e importadores, sendo um sistema próximo ao que é utilizado por países da Comunidade Europeia. A configuração da logística reversa de pneus inservíveis é baseada em concordância com as resoluções CONAMA, respeitando a PNRS e o controle por parte do IBAMA [1].

3. Alternativas para destinação de pneus

Algumas alternativas para a utilização de pneus inservíveis que já foram desenvolvidas e que ainda estão em fase de estudo e desenvolvimento são apresentadas na Tabela 1 [5].

Tabela 1. Principais alternativas para reaproveitamento de pneus.

Técnica	Demanda por Pneus	Principais Vantagens	Principais Desvantagens
Co-processamento em cimenteiras	Muito Alta	Diminuição da emissão de poluentes	Suprimento da Demanda
		Não gera resíduo	
		Não necessita de controle extra de emissões	Adaptação dos Fornos
Co-processamento em indústrias de papel e celulose	Média	Diminuição da emissão de poluentes	Valor dos produtos pouco competitivos frente aos combustíveis tradicionais
			Necessidade de pré-tratamento
Co-processamento em termelétricas	Baixa	Combustão completa dos pneus	Suprimento da Demanda
		Diminuição do nível de emissão de poluentes gasosos	Alto investimento de capital
Pirólise	Atualmente é desprezível	Geração de produtos mais valorizados	Falta de Normalização do produto
		Alto potencial mercadológico do produto	Recuperação da energia entre 75 e 82%
		Tratamento de grandes pneus	
Artefatos/Recifes/ Quebra Ondas/ Barreiras	Muito Baixa	Sem efeitos adversos ao ambiente	Suprimento da Demanda
			Alto custo de disposição por pneu
			Necessidade de pré-tratamento
Agricultura	Desprezível	Sem efeitos adversos ao ambiente	Baixa Demanda
Indústria civil	Muito Alta	Sem efeitos adversos ao ambiente	Suprimento da Demanda
		Melhora das propriedades dos asfalto ou concreto	Necessidade de pré-tratamento
Desvulcanização	Baixa	Recuperação parcial das propriedades da borracha	Pior propriedade dos produtos
			Alto investimento de capital
		Sem efeitos adversos ao ambiente	Falta de Normalização do produto

4. Processo de pirólise como alternativa para valorização energética de pneus inservíveis

A pirólise é o processo no qual um combustível sólido sofre degradação térmica na ausência do agente oxidante, de modo que nenhum processo de gaseificação ocorra extensivamente. Este processo ocorre a temperaturas relativamente altas (500 a 1000°C) e apresenta como produtos gases, líquidos e sólidos, sendo que a fração de cada um deles é função da temperatura de operação, do tempo e da pressão de operação [6]. A escolha de tais parâmetros influi não só no resultado final, mas também é base para classificação do processo de pirólise, que pode ser convencional (lenta), rápida (ou ultrarrápida) ou a vácuo. Estas classificações e algumas de suas características são apresentadas na Tabela 2 [7].

Tabela 2. Parâmetros de operação de cada tipo de pirólise.

Tipo de pirólise	Parâmetros			
	Temperatura (°C)	Tempo de residência (s)	Tamanho das partículas (mm)	Pressão (kPa)
Convencional (lenta)	300-450	300-3600	5-50	100-500
Rápida ou ultrarrápida	450-750	0,5-10	<1	100-500
A vácuo	450-750	10-300	5-50	<25

A pirólise consiste na quebra de cadeias químicas orgânicas por aquecimento, por meio da degradação térmica pela ausência de oxigênio, e é utilizada para transformar pneus pela utilização de seus elementos químicos em outros produtos como gás, óleo e aço [8].

O processo de pirólise para a reciclagem de pneus já está consolidado e vem sendo amplamente utilizado em países da Europa. Esse processo é adequado, pois é possível reaproveitar mais de 90% dos materiais que compõem o pneu. Além disso, os processos não emitem poluentes atmosféricos ou efluente líquidos, nem resíduos sólidos nocivos [9].

A reciclagem por pirólise trata de um processo ajustável a diferentes quantidades de demanda. As plantas são bastante compactas, não necessitando de grandes áreas para a instalação de seus reatores pirolíticos. Pode ser adotado um sistema *just in time*, triturando e reciclando o pneu logo que este chegar no destino, o que resultaria em um espaço reduzido de armazenamento dos pneus e de seus materiais reciclados [9].

Todavia, segundo relatório do IBAMA sobre pneumáticos, referente ao ano de 2014, não houve registro de pneus destinados ao processo de pirólise no Brasil [10].

A utilização de resíduos de pneus também produz gases e hidrocarbonetos líquidos, provenientes do craqueamento térmico de borrachas e tecidos e quebra ou vaporização de aditivos orgânicos. Além destes produtos, os pneus podem gerar resíduos sólidos ricos em carbono e aço, dependendo do tipo de pneu [11]. A Figura 1 [11] apresenta a esquematização de um processo de pirólise simplificado.

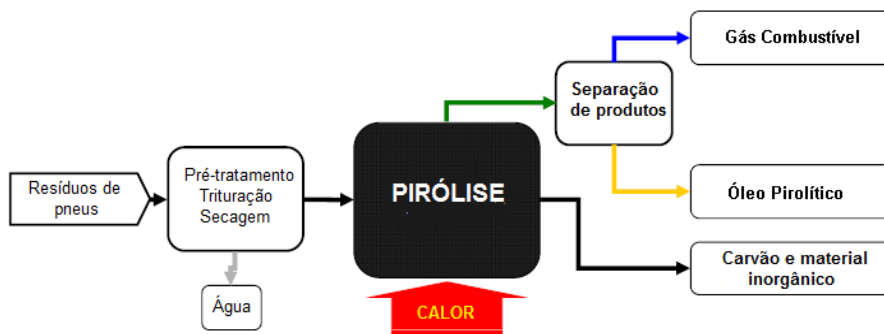


Figura 1. Esquema simplificado do processo de pirólise de pneus.

5. Caracterização do óleo pirolítico de pneu usado – OPPU-UNIFEI

Através do projeto de pesquisa CNPq N° 2050/2014-3 e FAPEMIG N° TEC - APQ-01947-14^[12], foi realizada pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), no laboratório de combustíveis e lubrificantes, a caracterização do óleo pirolítico utilizado no experimento (OPPU - UNIFEI) deste trabalho. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Caracterização do óleo pirolítico utilizado no experimento (OPPU – UNIFEI).

Propriedade	Resultados
C (% massa)	87,1
H (% massa)	9,65
N (% massa)	0,6
S (% massa)	0,89
O (% massa)	1,76
Massa Específica (g/mL)	0,9207
Viscosidade cinemática (cSt)	5,153
Tensão superficial (dina/cm)	28,091
PCI (kJ/kg)	39890

6. Bancada de ensaios

A bancada de ensaios de motores de combustão interna utilizada para realizar os experimentos deste trabalho está localizada no Laboratório de Máquinas Térmicas (LMT), do Instituto de Engenharia Mecânica da UNIFEI, Brasil. Esta bancada é composta por um motor monocilíndrico da marca YANMAR NSB 75 R que tem seu eixo acoplado a um freio hidráulico, que aplica ao motor uma determinada carga variada pela válvula de controle de força. Durante todos os ensaios foi mantida, no freio, a carga constante de 0,6 kgf.

Foi utilizado um medidor volumétrico para estimar o consumo de combustível do motor. Todos os equipamentos que compõem a bancada de ensaios são apresentados pela Figura 2 conforme sua disposição no Laboratório de Máquinas Térmicas – UNIFEI.

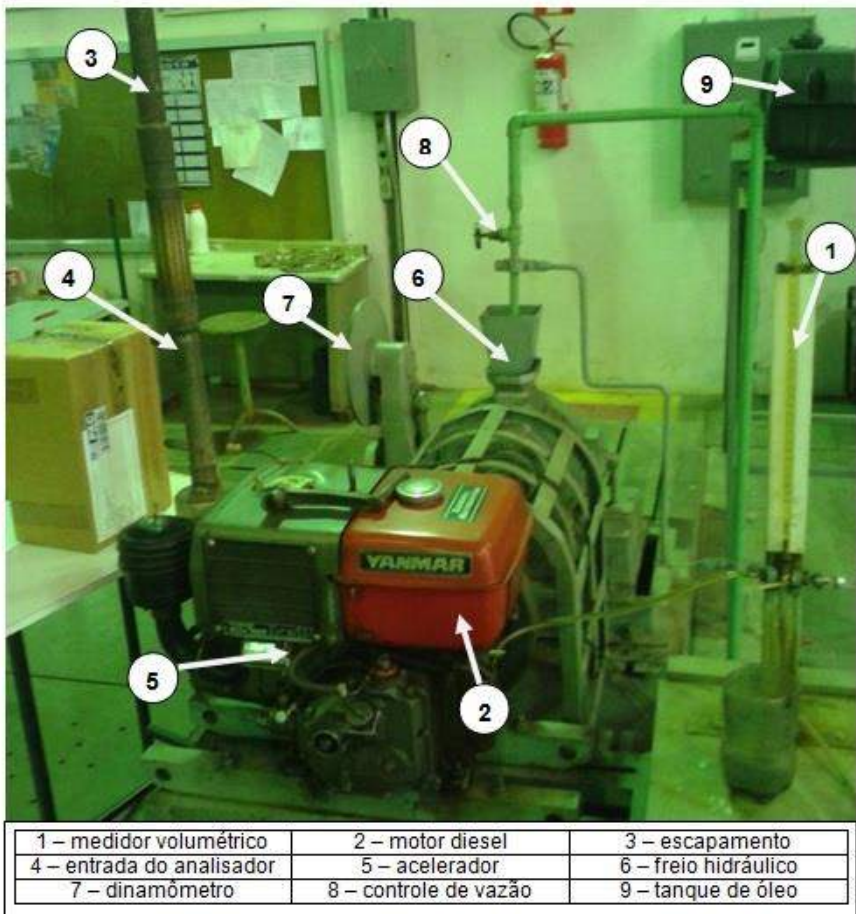


Figura 2. Disposição dos equipamentos na bancada de ensaios.

O motor ensaiado tem suas características apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4. Características do motor utilizado no ensaio.

Motor Diesel	
Marca	YANMAR NSB 75 R
Tipo	Alternativo
Características	4 Tempos
	1 Cilindro
	Refrigerado a água
Diâmetro do Cilindro	8,0 cm
Curso do Pistão	8,5 cm
Rotação	1800 a 2400 rpm
Potência	5,5 a 7,5 CV
Taxa de Compressão	21:1

Para efetuar as medidas das emissões dos gases de escape foi utilizado o medidor LANCOM III, da marca LAND. Para tal, foi introduzido o tubo da sonda em um orifício no escapamento do motor, e um cone de vedação foi utilizado para evitar que os gases vazassem. Os gases admitidos pela sonda fluíam até o analisador de emissões para que os resultados fossem processados e exibidos pelo equipamento. Esta configuração é apresentada pela Figura 3.

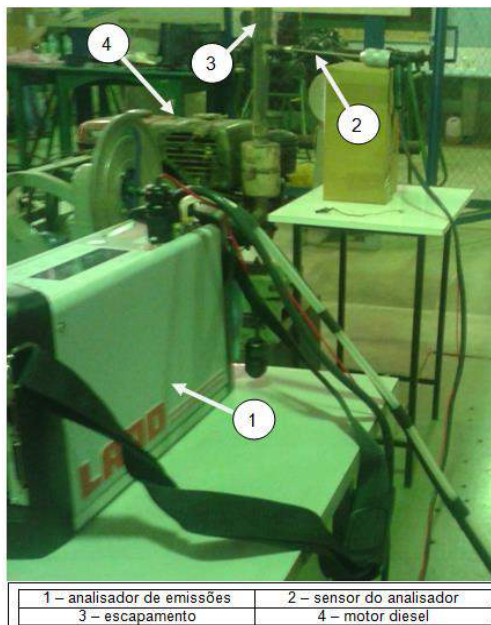


Figura 3. Disposição do analisador de gases na bancada experimental.

7. Misturas combustíveis

As misturas utilizadas consistem em combinações de óleo diesel S10 e óleo pirolítico de pneus usados (OPPU-UNIFEI). A Tabela 5 apresenta as composições, a massa específica e o poder calorífico inferior (PCI) das misturas utilizadas.

Tabela 5. Características dos combustíveis utilizados no experimento.

Nome da mistura	Óleo diesel S10 (% massa)	OPPU-UNIFEI (% massa)	Massa específica (kg/m ³)	PCI (kcal/kg)
Diesel S10	100	0	827,018	10100,00
OPPU-UNIFEI 2	98	2	828,707	10088,61
OPPU-UNIFEI 5	95	5	831,252	10071,63
OPPU-UNIFEI 10	90	10	834,780	10043,25

8. Dados experimentais do ensaio

Apesar de terem sido realizadas oito medições por rotação, foram descartados os três primeiros valores referentes a cada condição. Esta opção se deve ao fato de que a NBR 6396 – apesar de não determinar um tempo de estabilização específico – define um tempo mínimo de dez minutos a cada mudança de rotação. Uma vez que a estabilização do motor não é totalmente definida pela norma, fez-se a opção de realizar medições durante o tempo mínimo de estabilização, premeditando posterior descarte das mesmas e com o intuito de acompanhar a variação dos dados ao longo do tempo. A análise do comportamento destes valores permite que seja observado a partir de que momento ocorre certa constância nos valores, representando uma estabilização satisfatória para efeito desta pesquisa.

Por se tratar de um ensaio com carga parcial, a norma determina, ainda, que sejam descartados valores referentes ao tempo de consumo que apresentem variação maior que 5% referente à média para cada condição. Descartados estes dados, devem restar ao menos dois valores por rotação para que a análise seja válida – daí a opção por uma margem segura de oito medidas.

Pelo mesmo motivo já descrito, os valores de emissões também respeitaram o procedimento de descarte das três primeiras medidas por rotação. Estes valores, todavia, passaram por análise estatística segundo método de Thompson, visando remoção dos outliers – valores significativamente diferentes do padrão observado para cada condição.

Ainda acerca da análise de emissões, os valores apresentados pelo analisador de gases – inicialmente fornecidos em via seca e em unidades de ppm ou porcentagem – foram corrigidos para fluxo mássico por componente em via úmida, seguindo todo o procedimento de cálculo determinado pela NBR ISO 8178-1. Em seguida, os fluxos calculados foram divididos pela potência reduzida de cada condição, resultando em gráficos de emissões específicas (fluxo mássico por unidade de potência).

8.1 Consumo específico e desempenho do motor

Para cada faixa de rotação, durante os experimentos, foram medidos valores de volume consumido, tempo de consumo, rotação real e força exercida sobre o dinamômetro (valor fixado em 0,6 kfg). Parâmetros como consumo específico, potência mecânica e rendimento mecânico podem ser calculados a partir dos dados observados em ensaio, seguindo o procedimento de cálculo descrito pela NBR 6396. Os valores calculados são apresentados pelos Gráficos 1 e 2.

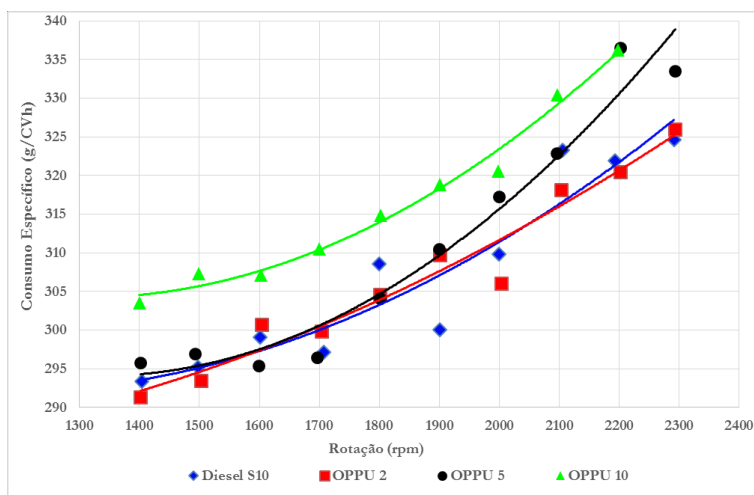


Gráfico 1. Consumo específico x rotação.

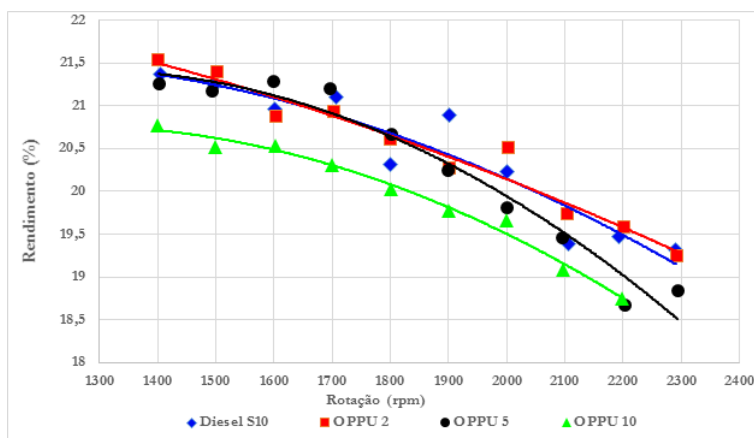


Gráfico 2. Rendimento x rotação.

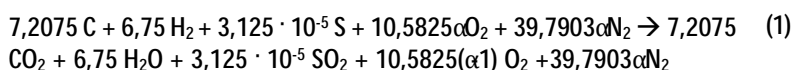
8.2. Emissões teóricas

A composição do diesel é uma tanto complexa devido à grande quantidade de hidrocarbonetos que dele fazem parte. A composição em porcentagem de massa de carbono e hidrogênio utilizada neste trabalho é obtida através da norma ABNT NBR ISO 8178-1. A parcela de enxofre utilizada segue o limite máximo de 10 ppm permitido pela legislação brasileira para diesel S10. A Tabela 6 apresenta a composição mássica do diesel S10.

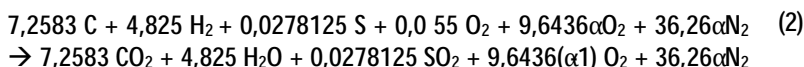
Tabela 6. Composição mássica do diesel S10

C(%)	H(%)	S(%)
86,499	13,5	0,001

Desta forma, a reação para o diesel, supondo um excesso de ar genérico alfa, será:



E para o óleo pirolítico puro, tem-se:



Sabe-se que motores diesel trabalham sempre com excesso de ar para completar as reações de combustão e reduzir as emissões. Para a determinação deste fator alfa, que representa o excesso de ar, foi utilizada a reação estequiométrica do combustível e os resultados de emissões obtidos através do analisador de gases para as emissões de oxigênio. Desta forma é possível estimar a quantidade de ar em excesso na combustão para cada rotação do motor.

Tabela 7. Emissões teóricas dos combustíveis utilizados.

n	Diesel S10			OPPU-UNIFEI 2			OPPU-UNIFEI 5			OPPU-UNIFEI 10			α
	O ₂	CO ₂	SO ₂	O ₂	CO ₂	SO ₂	O ₂	CO ₂	SO ₂	O ₂	CO ₂	SO ₂	
rpm	%	%	ppm	%	%	ppm	%	%	ppm	%	%	ppm	-
2.300	16,612	2,806	0,1217	16,613	2,812	2,488	16,614	2,820	6,171	16,616	2,835	12,216	5,03
2.200	17,814	2,039	0,0884	17,815	2,043	1,807	17,815	2,049	4,455	17,817	2,060	8,820	6,95
2.100	17,982	1,932	0,0838	17,982	1,936	1,711	17,983	1,942	4,217	17,985	1,951	8,349	7,34
2.000	17,770	2,067	0,0896	17,771	2,071	1,831	17,771	2,078	4,517	17,773	2,088	8,943	6,85
1.900	18,167	1,814	0,0786	18,167	1,818	1,607	18,168	1,823	3,955	18,169	1,832	7,831	7,82
1.800	18,344	1,701	0,0737	18,344	1,704	1,506	18,345	1,709	3,705	18,346	1,718	7,336	8,35
1.700	18,045	1,891	0,0820	18,046	1,895	1,675	18,047	1,901	4,127	18,048	1,910	8,171	7,50
1.600	18,466	1,623	0,0704	18,466	1,626	1,437	18,467	1,631	3,534	18,468	1,639	6,996	8,75
1.500	18,488	1,609	0,0698	18,488	1,612	1,425	18,489	1,617	3,502	18,490	1,625	6,934	8,83
1.400	17,660	2,137	0,0927	17,661	2,142	1,894	17,662	2,148	4,674	17,663	2,159	9,252	6,63

Por meio das equações 1 e 2, estima-se a proporção com a qual alguns componentes se apresentam no produto final da combustão através da composição em porcentagem da quantidade de cada componente na mistura. Devido ao fato de a análise teórica em questão ser incapaz de prever o quão completa será a queima, impedindo a previsão de emissões de hidrocarbonetos e óxidos resultantes de queima incompleta, serão comparados apenas os níveis de O_2 , CO_2 e SO_2 . Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 7.

8.3 Emissões experimentais

A seguir, as emissões experimentais, cujos valores foram mensurados por meio do analisador de gases LANCOM III, são apresentadas pelos Gráficos 3 a 6.

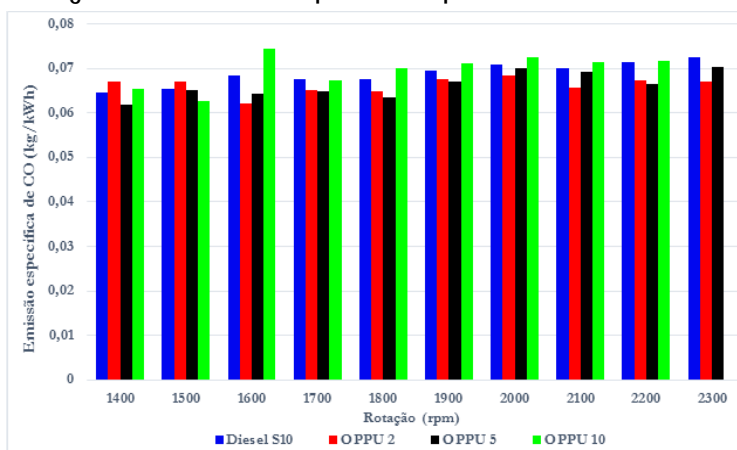


Gráfico 3. Emissões de CO em kg/kWh.

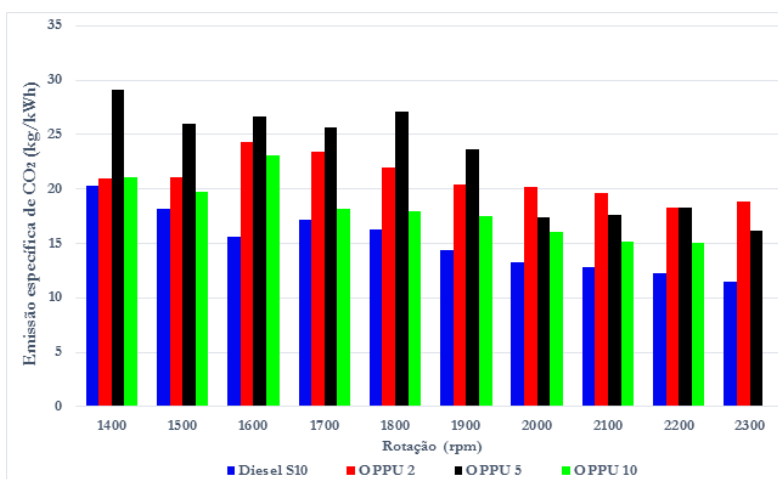


Gráfico 4. Emissões de CO2 em kg/kWh.

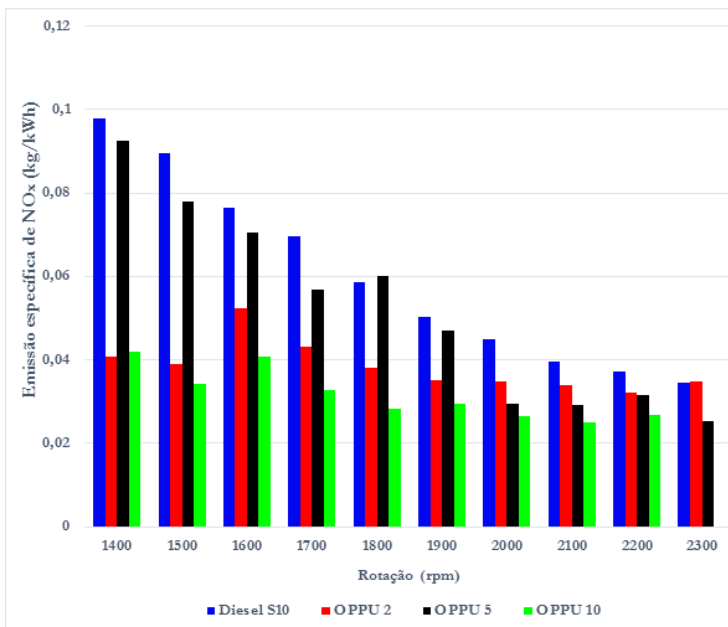


Gráfico 5. Emissões de NOx em kg/kWh.

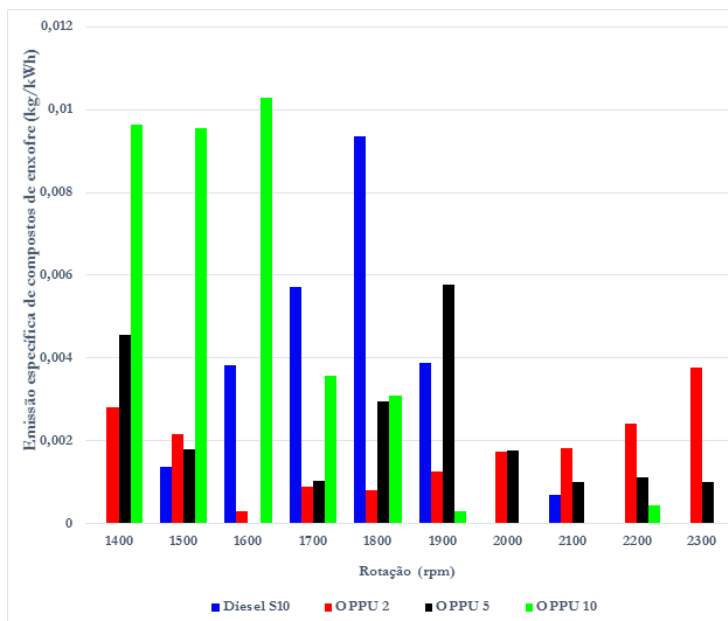


Gráfico 6. Emissões de compostos de enxofre (SO₂ e H₂S) em kg/kWh.

9. Conclusões

Os valores levantados para consumo específico e rendimento total demonstram a proximidade de desempenho entre a mistura OPPU-UNIFEI 2 e o diesel S10. A pequena variação se deve ao fato de essa mistura conter uma parcela muito pequena de óleo pirolítico, variando pouco a queima em relação à aplicação de diesel tradicional. Ao aumentar a porcentagem de OPPU – como ocorre na mistura OPPU-UNIFEI 5 -, há um maior aumento de consumo específico, em especial para altas e baixas rotações. O mesmo efeito é observado para o OPPU-UNIFEI 10 que, com uma quantidade ainda maior de óleo pirolítico, apresentou – com margem significativa – a curva de maior consumo específico e o menor rendimento.

Em alguns pontos da curva, o OPPU-UNIFEI 2 apresentou melhor desempenho em relação ao diesel S10, todavia é possível que esta informação não seja observada quando da aplicação das mesmas misturas em motores diferentes. A combustão é um fenômeno complexo, cujos resultados dependem de uma série de fatores, assim como é variável o funcionamento de máquinas que se utilizam deste processo como forma de conversão de energia, especialmente se tratando de equipamentos antigos e de uso frequente como o motor utilizado nesta pesquisa. A sutil sobreposição entre as curvas de óleo diesel e OPPU-UNIFEI 2 pode relacionar-se a fatores como efeitos da utilização de valores médios para as condições ambientais e o mau desempenho do bico injetor de combustível devido ao desgaste. Em adição, o OPPU-UNIFEI se trata de um óleo ao qual não foi aplicada filtração ou destilação, fazendo com que fosse observada elevada quantidade de decantação de material sólido no fundo do recipiente de armazenagem de combustível – fator que compromete a homogeneidade deste óleo enquanto combustível.

Quanto ao aspecto operacional, foi observado que o OPPU-UNIFEI é um óleo mais pesado que o diesel, representando maior atraso de ignição. De fato, o OPPU-UNIFEI 10 não foi capaz de atingir estabilidade na rotação de 2300 rpm. Esta mesma mistura, por sua vez, apresentou estabilização mais rápida nas rotações mais baixas em relação ao diesel S10.

O perfil de emissões apresenta análise complexa e é função de uma série de fatores que se contrapõem na determinação da quantidade de cada poluente a ser formado no processo de combustão, o que pode ser exemplificado pelos resultados dos níveis de CO e NOx. Apesar de o OPPU-UNIFEI possuir maior porcentagem de carbono e ser esperada uma queima menos completa devido ao fato de se tratar de um óleo mais pesado, as misturas contendo 2 e 5% de óleo pirolítico registraram, em linhas gerais, níveis de CO menores que aqueles observados no diesel S10, em especial para as rotações médias e altas. Responsável por tal fato pode ser a parcela de oxigênio contida nas moléculas de OPPU-UNIFEI, o que funciona como fonte de oxidante e facilita a combustão completa, em especial a rotações mais elevadas, devido ao menor tempo de reação ocasionado pela maior velocidade do pistão. Em adição, a maior viscosidade das misturas contendo OPPU-UNIFEI em relação ao diesel S10 contribui para que o combustível atinja maior distância na câmara de combustão após ser introduzido através do bico do injetor. A maior quantidade de CO observada no OPPU-UNIFEI 10 pode dever-se ao maior teor de carbono e maior atraso de ignição, causados pela maior porção de OPPU-UNIFEI na mistura.

É possível observar ainda um aumento nas emissões de dióxido de carbono frente ao diesel. O CO₂ é obtido pela combustão completa do combustível, e os valores para as misturas com 2 e 5% apresentaram valores maior deste produto. Isso reforça que a presença de oxigênio no combustível influi nas emissões do CO e CO₂. Já a mistura contendo 10% de

OPPU apresentou uma quantidade deste poluente superior à do diesel, porém inferior às observadas nas demais misturas. Uma provável justificativa a esta constatação é o fato de a combustão ser mais incompleta para o OPPU-UNIFEI 10, possivelmente pela quantidade relativamente alta de OPPU-UNIFEI na mistura – implicando atraso na ignição e menor tempo disponível para que ocorra a oxidação do monóxido de carbono. Essa combustão incompleta reflete ainda na curva de consumo específico, que apresentou elevados valores para esta mistura.

Os fatores de formação de NO_x são bastante complexos. Estes dependem da temperatura da câmara de combustão e da presença de nitrogênio no combustível. Outro fator significativo na formação deste poluente é a estequiometria, de modo que uma mistura mais pobre tende a emitir menor quantidade de óxidos de nitrogênio. Apesar de as misturas contendo OPPU-UNIFEI e diesel apresentarem nitrogênio em sua composição, foram observados – em linhas gerais – menores emissões de NO_x . Para o diesel, é plausível que os altos níveis de emissões sejam resultantes de temperaturas mais elevadas na câmara de combustão, proveniente da queima mais completa e de um poder calorífico mais elevado. Aliado a este fator, a menor viscosidade do diesel S10 limita o alcance do spray de combustível na câmara de combustão e faz com que a mistura aconteça em uma região menor que a que pode ser atingida por óleos mais viscosos, aproximando a reação da estequiometria e elevando a geração de NO_x . Os valores mais baixos de óxidos de nitrogênio foram observados para o OPPU-10, o que provavelmente é ocasionado pelo menor poder calorífico, resultando em uma chama com temperatura inferior em relação às demais e reduzindo a formação de NO_x . A partir de 1800 rpm, a quantidade de NO_x no OPPU-UNIFEI 5 aumentou em comparação com outras misturas contendo OPPU, o que pode se dever a uma soma de efeitos – com maior porção de nitrogênio frente ao OPPU-UNIFEI 2 e uma temperatura da câmara superior ao OPPU-UNIFEI 10.

É esperado que a presença de enxofre nos produtos da combustão esteja diretamente associada à composição dos combustíveis, o que resultaria em emissões de enxofre significativamente maiores para as misturas com OPPU-UNIFEI, conforme demonstrado pelos valores teóricos de SO_2 da Tabela 7. Este resultado, todavia, mostrou-se bastante variável, apresentando inclusive emissões de compostos sulfurados mais elevadas para diesel frente aos demais combustíveis. Esta constatação pode ter ocorrido em decorrência de o analisador de gases registrar apenas dois destes compostos – SO_2 e H_2S -, de modo que eventuais quantidades de substâncias como SO_3 e H_2SO_4 podem ter se formado antes do sensor sem serem mensuradas pelo equipamento. Estas transformações podem ocorrer caso a temperatura seja baixa o suficiente – o que é mais suscetível de ocorrer nas misturas que contêm OPPU-UNIFEI devido ao seu menor poder calorífico.

Em comparação com os resultados práticos, os valores teóricos apresentaram valores de CO_2 menores, enquanto as emissões de SO_2 apresentaram resultados variáveis. Para os resultados com diesel e OPPU 2, os resultados de enxofre teóricos foram maiores que os práticos, enquanto para os outros dois combustíveis o resultado foi inverso. Essa diferença se dá basicamente por que a composição do diesel não é exata, isto é, o diesel não é composto necessariamente de 10 mg/kg de enxofre, esse é apenas um valor máximo determinado por norma. Outro fator que influi tanto na emissão de CO_2 quanto na emissão de SO_2 é que a concentração do gás de exaustão depende de todos os produtos da combustão, e no resultado teórico este valor acaba sendo maior, pois se considera uma queima completa, e alguns produtos (como O_2 e NO_2) apresentam valores maiores do que

aqueles obtidos na prática, o que altera o resultado da concentração volumétrica (em ppm).

Por fim, a análise da aplicação de misturas contendo pequenas proporções de OPPU-UNIFEI de diesel S10 em motor ciclo Diesel monocilíndrico mostrou-se viável sob análise restrita ao desempenho e perfil de emissões. A aplicação de porcentagens tão grandes como 10% eleva significativamente o consumo específico e restringe a rotação máxima de operação da máquina. Uma conclusão definitiva sobre a real aplicabilidade destas substâncias enquanto combustíveis teria que incluir uma avaliação complexa de questão econômicas, logísticas e ambientais, não apenas do óleo pirolítico em si, mas de seu processo produtivo – incluindo custos e impactos ambientais – e comparação com demais alternativas para destinação pós-consumo de pneus inservíveis.

Algumas sugestões para trabalhos futuros consistem no aumento da quantidade de óleo pirolítico de pneus inservíveis na mistura – apesar de o motor ensaiado não ter funcionado de maneira adequado com a mistura com 10% de OPPU, seria interessante verificar o funcionamento para quantidade maiores deste óleo em motores com capacidade de trabalhar com combustíveis mais pesados. Outra sugestão consiste na adição de outros combustíveis na mistura como, por exemplo, biodiesel, que deve ter a função de reduzir as emissões, ou combustíveis com número de cetano maiores que o do diesel como, por exemplo, dimetil éter e dietil éter, de modo a facilitar a combustão. Pode-se ainda verificar viabilidade da utilização de OPPU em misturas com diesel para queima em caldeiras, bem como avaliar a possibilidade de tratamentos pós-pirólise que sejam capazes de reduzir parâmetros como viscosidade e teor de enxofre deste combustível.

10. Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem o auxílio e suporte financeiro da CAPES, do CNPq (Proc. N° 4205/2014-3) e FAPEMIG (Proc. N° TEC - APQ-01947-14).

11. Referências

- [1] LAGARINHOS, C. A. F.; TENÓRIO, J. A. S. "Logística Reversa dos Pneus Usados no Brasil". Polimeros, p 49-58, n. 1, 2013.
- [2] ALMEIDA JÚNIOR, A. F. D. "Reaproveitamento de pneus inservíveis: determinação em laboratório das características do asfalto modificado SBS comparadas às do pó de asfalto com pó de borracha". Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Bauru. 2012.
- [3] CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. "Resolução N° 258, de 26 de agosto de 1999". Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res99/res25899.html>>. Acesso em 8 de maio de 2016.
- [4] SECRETARIA DE COMÉRCIO EXTERIOR - SECEX. Sistema de Informações Jurídico-tributárias. "Portaria N° 8 de 25/09/2000, 2000". Disponível em: <[http://sijut.fazenda.gov.br/netacgi/nph-brs?s1=P0000000082000092501\\$.CHAT.%20E%20SECEX.ORG.%20E%2020000927.DDOU.&l=0&p=1&u=/netahtml/sijut/Pesquisa.htm&r=0&f=S&d=SIAT&SECT1=SIATW3](http://sijut.fazenda.gov.br/netacgi/nph-brs?s1=P0000000082000092501$.CHAT.%20E%20SECEX.ORG.%20E%2020000927.DDOU.&l=0&p=1&u=/netahtml/sijut/Pesquisa.htm&r=0&f=S&d=SIAT&SECT1=SIATW3)>. Acesso em: 8 de maio de 2016.

- [5] CAPPI, D. M. "Recuperação Ambiental de Áreas Erodidas como Alternativa de Destino Final de Pneus Inservíveis". Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 60. 2004.
- [6] SANTOS, D.; GULYURLU, I.; CABRITA, I. "Materiais e Energia. Conversão Termoquímica de Combustíveis". Corros. Prot. Mater., v. 29, p 78-90, n. nº 3, 2010.
- [7] LANTEIGNE, J.-R. et al. "Predictive Kinetics Model for an Industrial Waste Tire Pyrolysis Process". Energy & Fuels, v. 27, p. 1040-1049, janeiro 2013.
- [8] RODRIGUES, M. R. P. "Caracterização e Utilização do Resíduo da Borracha de Pneus Inservíveis em Compósitos Aplicáveis na Construção Civil". Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 252. 2008.
- [9] RESENDE, E. L. "Canal de Distribuição Reverso na Reciclagem de Pneus: Estudo de Caso". Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 120. 2004.
- [10] INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS - IBAMA. "Relatório de Pneumáticos - Resolução CONAMA nº 416/09". Ibama. [S.l.]. 2014.
- [11] LEE, K. L. "Design of Waste Tyre Pyrolysis Process. Hong Kong University of Science and Technology". Hong Kong. 2009.
- [12] CORONADO, C. J. R. Projeto CNPq Proc. Número 442050/2014-3, "Estudo da Atomização e Caracterização de Injetores Utilizando Óleo Pirolítico de Pneus usados e em Misturas com Diesel Convencional e/ou Biodiesel de Óleo de Soja". Universidade Federal de Itajubá. Itajubá. 2015.

