

# Emissão de material particulado (MP) na queima de óleo combustível nacional

*Emission of particulate material (PM) in the burning of Brazilian fuel oil*

Renato Vergnhanini Filho<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Laboratório de Engenharia Térmica, Centro de Tecnologia Mecânica, Naval e Elétrica, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

\*E-mail: vergnhan@ipt.br

**Palavras-chave:**  
material particulado (MP);  
óleo combustível nacional;  
combustão industrial; poluição atmosférica.

**Keywords:**  
*Particulate matter (PM); Brazilian fuel oil; industrial combustion; air pollution.*

## Resumo

Os óleos combustíveis utilizados no Brasil são comumente chamados de "ultraviscosos" devido ao fato de possuírem viscosidade bem superior aos utilizados em outros países. O emprego desses óleos em equipamentos de combustão convencionais (fornos e caldeiras) tem alta propensão à emissão de poluentes atmosféricos, em particular, de material particulado (MP). O MP emitido é, basicamente, orgânico e constitui-se de uma parcela menor de partículas de pequeno diâmetro (inferior a 1 µm), denominadas de "fuligem ou soot" e de uma parcela preponderante de partículas maiores (de até 100 µm, aproximadamente), denominadas de "coque ou coke". O MP na atmosfera é prejudicial ao meio ambiente, podendo causar no homem doenças respiratórias. Os órgãos ambientais nacionais possuem estações de monitoramento atmosférico e legislações que estabelecem padrões de qualidade do ar e de emissão para esse poluente. A emissão de MP pode ser reduzida, empregando-se sistemas de limpeza de gases (separadores centrifugos, filtros, lavadores, precipitadores eletrostáticos) ou atuando-se no processo de modo a minimizar a sua formação (ajuste do excesso de ar de combustão, melhora da nebulização do óleo e de sua mistura com o ar na câmara de combustão, emprego de óleo emulsionado, uso de aditivos de combustão - catalisadores e dispersantes de asfaltenos). Essas últimas, podendo ser muito efetivas, vêm sendo investigadas há vários anos pelo Laboratório de Engenharia Térmica (LET) do IPT. Já foram realizados extensos trabalhos experimentais utilizando as fornalhas de testes e a bancada de nebulização do Laboratório. Além disso, a equipe do LET tem ido regularmente às indústrias com sua unidade móvel para levantamento das emissões de MP e demais variáveis do processo de combustão para, em seguida, recomendar e eventualmente implantar medidas que levem à sua redução.

## Abstract

The fuel oils used in Brazil are commonly called "ultra-viscous" due to the fact that they have viscosity well above those used in other countries. The use of these oils in conventional combustion equipment (furnaces and boilers) has a high propensity to emit atmospheric pollutants, particularly particulate matter (PM). The emitted PM is basically organic and consists of a smaller portion of small particles (less than 1  $\mu\text{m}$ ), called "soot" and a preponderant portion of larger particles (up to about 100  $\mu\text{m}$ ), called "coke". PM in the atmosphere is harmful to the environment and can cause respiratory illness in humans. National environmental agencies have atmospheric monitoring stations and legislation that establish air quality and emission standards for this pollutant. PM emission can be reduced by using gas cleaning systems (centrifugal separators, filters, scrubbers, electrostatic precipitators) or by acting on the process in order to minimize its formation (adjustment of excess combustion air, improved in the nebulization of the oil, improved in the mixing of the oil with the air in the combustion chamber, use of emulsified oil, use of combustion additives - catalysts and asphaltene dispersants). These last ones, being very effective, have been investigated for several years by the Thermal Engineering Laboratory of Institute for Technological Research of the State of São Paulo. Extensive experimental work has already been carried out using the test furnaces and the laboratory nebulization bench. In addition, the Laboratory team has regularly gone to the industries with its mobile unit to survey PM emissions and other variables of the combustion process and then recommend and eventually implement measures that lead to its reduction.

## 1 Óleos combustíveis nacionais (GARCIA, 2013)

O petróleo no processo de refino é fracionado, sequencialmente, em unidades de destilação atmosférica e a vácuo, gerando como produto de fundo o denominado resíduo de vácuo (RESVAC). O RESVAC submetido a um processo de desasfaltação gera, entre outros, o denominado resíduo asfáltico (RASf). O RESVAC e o RASf, eventualmente diluídos com frações mais leves, constituem os óleos combustíveis nacionais. Tais óleos são classificados, desde 1987, de acordo com o teor de enxofre (tipo A - teor de enxofre superior a 1 % e tipo B - teor de enxofre inferior ou igual a 1 %) e a viscosidade (tipos 1 a 9, em ordem crescente de viscosidade - **Tabela 1**). Em 30.04.1999, a Agência Nacional de Petróleo (1999) estabeleceu especificação formal para quatro desses tipos de óleos (**Tabela 2**).

A participação dos óleos nacionais no consumo de energia pela indústria é significativa, embora venha caindo nos últimos anos - 2,6 % em 2015, contra quase o dobro há dez anos (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2016), devido à crescente participação de outros combustíveis. Os óleos de maior teor de enxofre e viscosidade são os de menor preço, porém têm maiores custos operacionais - armazenagem, manuseio e queima (GARCIA; BERNARDES, 1992; SHELL, 2007).

Os óleos nacionais são comumente denominados de "ultraviscosos", pois possuem viscosidade bastante superior aos geralmente utilizados em outros países - por exemplo, o óleo mais "pesado" utilizado nos Estados Unidos tem a denominação "number 6" (ou "RFO - residual fuel oil" ou "bunker

6") e na sua especificação consta viscosidade máxima de 330 SSF a 50 °C (*AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS*, 1976), ou seja, ele é mais "leve" do que o óleo nacional menos viscoso (o de nº 1). Tal característica traz como consequência na sua queima, elevada propensão à emissão de produtos da combustão incompleta, em particular, de material particulado (MP), poluente que tem sido objeto de controle cada vez maior dos órgãos ambientais.

**Tabela 1 – Viscosidade dos óleos combustíveis nacionais**

Tipo (A ou B)	Viscosidade Saybolt Furol (SSF) a 50 °C (s) – $\mu$
1	$< 600$
2	$600 \leq \mu < 900$
3	$900 \leq \mu < 2.400$
4	$2.400 \leq \mu < 10.000$
5	$10.000 \leq \mu < 30.000$
6	$30.000 \leq \mu < 80.000$
7	$80.000 \leq \mu < 300.000$
8	$300.000 \leq \mu < 1.000.000$
9	$\geq 1.000.000$

**Tabela 2 – Especificação dos óleos combustíveis nacionais**

Característica	Unidade	Tipo A1	Tipo A2	Tipo B1	Tipo B2
Viscosidade cinemática a 60 °C, máx.	mm <sup>2</sup> /s (cSt)	620	960	620	960
Viscosidade SSF a 50 °C, máx.	s	600	900	600	900
Enxofre, máx.	% em massa	2,5	2,5	1,0	1,1
Água e sedimentos, máx.	% em volume	2,0			
Ponto de fulgor, mín.	°C	66			
Vanádio, máx.	mg/kg	200			
Ponto de fluidez superior, máx.	°C	Entre 15 e 27, dependendo do estado brasileiro e da época do ano			

## 2 Material particulado na atmosfera (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2016; 2017)

O material particulado presente na atmosfera provém de fontes móveis (veículos em geral) e fixas (processos industriais, ressuspensão de partículas do solo, aerossóis formados na atmosfera) e seu potencial de causar mal à saúde do homem está diretamente associado ao seu tamanho - quanto

menores as partículas maiores os efeitos provocados. As partículas cujo diâmetro aerodinâmico é menor ou igual a  $10\ \mu\text{m}$  ( $\text{MP}_{10}$ ), denominadas "partículas inaláveis", tendem a ficar retidas na parte superior do sistema respiratório ou penetrar mais profundamente, alcançando os alvéolos pulmonares. Dessa parcela, as de diâmetro menor ou igual a  $2,5\ \mu\text{m}$  ( $\text{MP}_{2,5}$ ), denominadas "partículas inaláveis finas", são as que têm maior probabilidade de se alojarem no pulmão.

No Estado de São Paulo, a CETESB, com suas estações móveis e fixas de monitoramento ambiental, tem acompanhado as concentrações de MP na atmosfera e constatado que, graças às suas ações de controle, vem caindo o número de vezes que os padrões de qualidade do ar são superados.

### 3 Legislação ambiental

A emissão de MP pela indústria é regulamentada na grande maioria dos países. Os Estados Unidos, por exemplo, têm uma legislação bastante completa e abrangente (*UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY*, 1999).

A legislação brasileira é mais recente e não engloba a totalidade dos combustíveis e processos. As fontes fixas de combustão que entraram em operação a partir de 02.01.2007 devem obedecer à resolução CONAMA nº 382 (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2006), enquanto que para as "antigas" (anteriores a 02.01.2007) vale a CONAMA nº 436 (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2011). Por exemplo, para um equipamento industrial "novo" ou "antigo" e no qual não há contato direto dos produtos da combustão com o material ou produto processado (caldeiras e fornos petroquímicos, por exemplo) são fixados limites de emissão de MP na queima de óleo combustível (padrões de emissão) em função do seu porte (**Tabela 3**).

Há estados no Brasil que fixam padrões de emissão mais restritivos, considerando a localização da fonte ou a qualidade do ar no seu entorno. Outros preferem não estabelecer padrões estaduais, mais exigem que seja implantada a "melhor tecnologia de controle disponível" (*BACT - Best Available Control Technology*).

**Tabela 3 – Padrões de emissão de MP na queima de óleo combustível.**

Potência térmica nominal (MW)*	MP (mg/Nm <sup>3</sup> , base seca, referido a 3,0 % de O <sub>2</sub> nos gases)
Menor que 10	300
Entre 10 e 70	250
Maior que 70	100

\* Obtida pela multiplicação da quantidade de óleo combustível queimado por unidade de tempo (vazão) pelo seu poder calorífico inferior (PCI); o PCI do óleo é da ordem de (39 a 40) MJ/kg.

## 4 Formação e emissão de MP na queima de óleos combustíveis nacionais (BLAS, 1998; CARVALHO JÚNIOR; LACAVA, 2003; VERGNHANINI FILHO, 1986)

Na queima de combustíveis líquidos, é usual a presença nos gases de combustão de MP proveniente de três possíveis fontes:

- material orgânico resultante da coqueificação das gotas ("coque - coke" ou "cenosfera - cenosphere");
- material orgânico formado a partir de frações evaporadas das gotas ("fuligem - soot") e
- material inorgânico presente no combustível ("cinzas - ash").

A combustão de líquidos em equipamentos industriais convencionais (fornos, caldeiras) é precedida pela sua nebulização imediatamente a jusante do bocal do queimador (gotas de (10 a 100)  $\mu\text{m}$ ). A **Figura 1** ilustra o mecanismo de combustão de uma gota de líquido (MESSIAS, 1986).

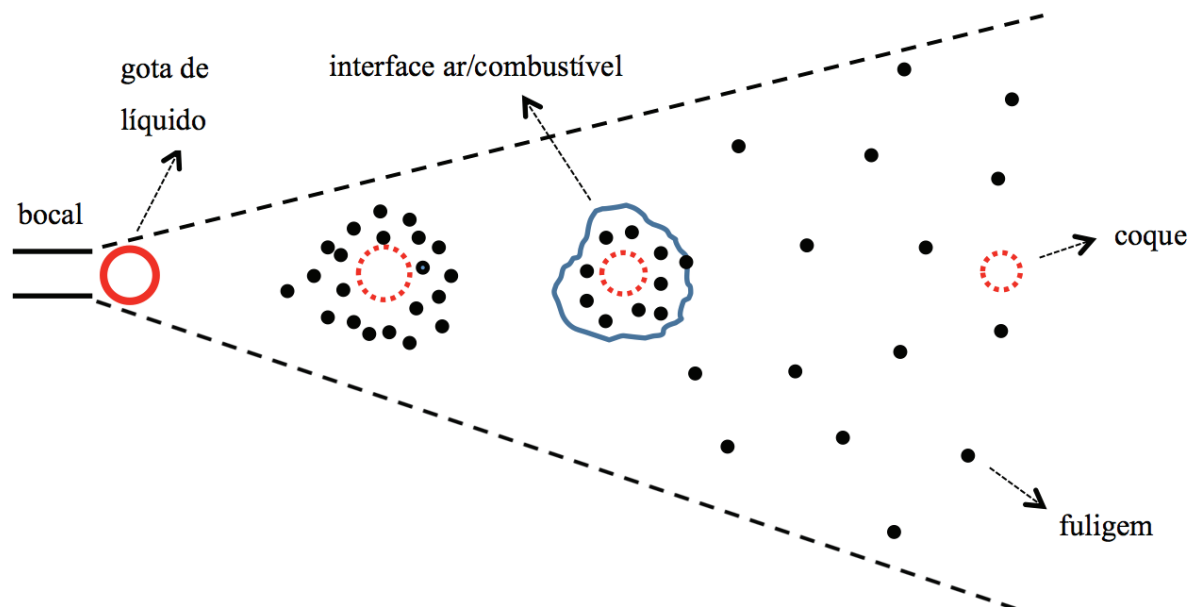


Figura 1 - Mecanismo de combustão de uma gota de líquido.  
Fonte: Messias (1986).

Cada gota, desprezando-se o efeito das demais, à medida que se desloca no interior da câmara de combustão e atravessa regiões de temperaturas crescentes, vai se aquecendo e se evaporando, de tal forma que vai se formando à sua volta uma camada de mistura ar primário/gases de combustão/vapor do líquido. Num dado ponto, de temperatura e de concentração da mistura adequadas, se dá a ignição da mistura gasosa. A partir daí se estabelece uma chama em torno da partícula, a qual passará a fornecer calor para que a gota continue evaporando. Após a ignição, na medida em que a gota se evapora, entre a zona de reação (interface  $O_2$ /combustível de alta temperatura, que se estabelece ao redor da gota) e a própria gota, parte das moléculas do combustível no estado vapor, encontrando condições propícias (alta temperatura e deficiência de  $O_2$ ) sofrem craqueamento e polimerização simultânea, dando origem às partículas de fuligem.

Tais partículas, de diâmetro inferior a 20 Å, tendem a acompanhar as linhas de corrente no interior da câmara de combustão, sofrendo, simultaneamente, processos de oxidação, coagulação e crescimento superficial até serem emitidas, via gases de combustão, individualmente (esferoides de diâmetro inferior a 1  $\mu\text{m}$ ) ou agregadas a inorgânicos ou a partículas de coque.

As gotas, em seu deslocamento pela câmara de combustão, vão tomando forma de cenosferas, com composição se aproximando à do coque (elevada relação C/H) e mantendo ainda relativamente altos teores de enxofre e metais. Ao final da câmara de combustão, gotas não totalmente oxidadas, serão emitidas na forma de partículas esféricas ocas, geralmente denominadas "coque" ou "cenosfera", de diâmetro na faixa de (1 a 100)  $\mu\text{m}$  e em cujas cavidades poderão estar alojados fuligem e inorgânicos.

Quanto aos inorgânicos do combustível, em sua maioria são oxidados na chama, formando muitas vezes compostos complexos resultantes da interação de óxidos e sulfatos. Esse material, na fase vapor, líquido ou sólido, é "arrastado" pelos gases indo se depositar no interior do equipamento de combustão por efeito de impacto ou de difusão, ou é emitido, em sua maioria, na forma de partículas sólidas, relativamente pequenas, muitas vezes agregadas ao material orgânico efluente do processo, denominadas genericamente de "cinzas".

Portanto, quando se fala em emissão de MP por fontes estacionárias de combustão via gases, está se referindo à emissão de partículas de fuligem, de coque e de cinzas, individualmente ou agregadas.

No caso da combustão dos óleos nacionais, trabalhos experimentais reportados em literatura, e principalmente naqueles feitos pelo IPT, mostraram que as partículas de coque são as preponderantes entre o material sólido emitido. Partículas de fuligem se formam em abundância no interior das chamas, porém, em condições usuais de operação de processos de combustão, são em sua maioria completamente oxidadas. Partículas de inorgânicos também contribuem minoritariamente com o total de MP emitido, dado que o teor de inorgânicos do óleo é relativamente baixo (tipicamente, bem inferior a 0,1 %). A **Figura 2** mostra fotos ampliadas típicas de MP coletado em gases efluentes da queima de óleos combustíveis nacionais.

## 5 Técnicas de controle das emissões de MP (VERGNHANINI FILHO, 1986)

As técnicas de controle das emissões de MP em processos de combustão industrial se dividem em dois grupos: as aplicadas ao processo e as aplicadas aos gases de combustão. Essas últimas consistem na instalação na chaminé de sistemas que removam parte do MP presente nos gases; destacam-se o emprego de separadores centrífugos (ciclones e multiciclones), filtros de manga, câmaras inerciais, lavadores tipo Venturi, lavadores tipo *spray* e precipitadores eletrostáticos (STRAUSS, 1975; MALVISI, 2010). Tais técnicas são bastante efetivas, porém do ponto de vista econômico são menos atraentes do que as primeiras.

A formação de MP na combustão pode ser reduzida pelo emprego dos seguintes artificios:

- ajuste do excesso de ar de combustão;
- melhora da nebulização - modificações na geometria do bocal e ajuste de variáveis operacionais (viscosidade, quantidade e tipo de fluido de nebulização);
- melhora da mistura entre o ar e o combustível;
- uso de emulsões água-óleo e óleo-água; e
- uso de aditivos de combustão - catalisadores e dispersantes de asfaltenos.

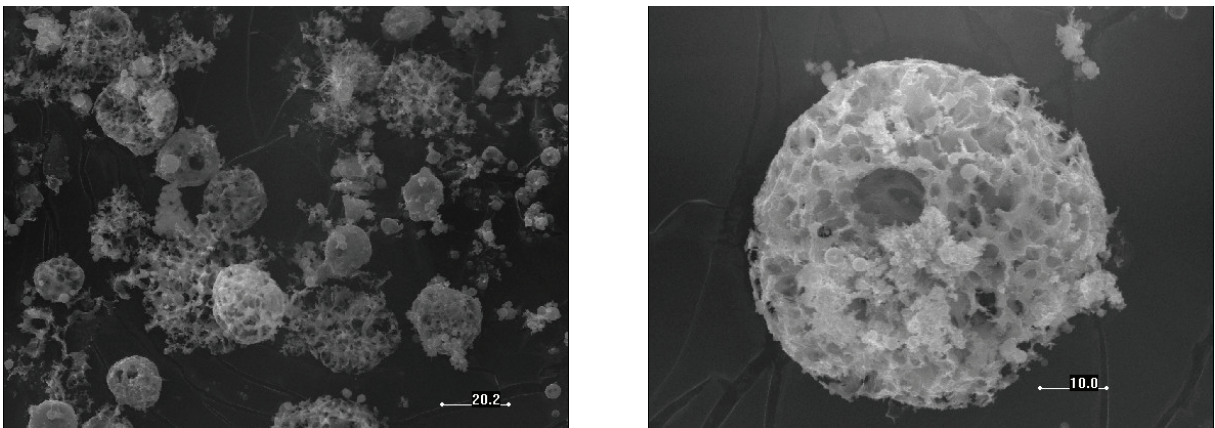


Figura 2 – Fotos ampliadas de MP coletado em gases efluentes da queima de óleos nacionais.  
Fonte: elaboração própria.

## 6 Atuação do IPT

### 6.1 Ajuste do excesso de ar de equipamentos de combustão

A equipe do LET tem ido regularmente às indústrias com sua unidade móvel (**Figura 3**) (VERGNHANINI FILHO; ANDRADE; BRITO, 2013) equipada com instrumentação adequada para a medição da composição dos gases de combustão de seus equipamentos. As medições visam levantar o excesso de ar "ideal" para cada equipamento, operando com um dado combustível e numa dada condição operacional (potência, ajuste de queimador etc.). O excesso "ideal" é definido como um valor abaixo do qual as taxas de emissão de produtos da combustão incompleta do combustível (MP e monóxido de carbono, principalmente) se tornam bastante elevadas e acima do qual pouco se alteram, implicando, porém, num maior consumo de combustível. A curva típica de excesso de ar versus taxa de emissão de produtos da combustão incompleta é mostrada na **Figura 4**.



Figura 3 - Equipe do LET na indústria.  
Fonte: elaboração própria.

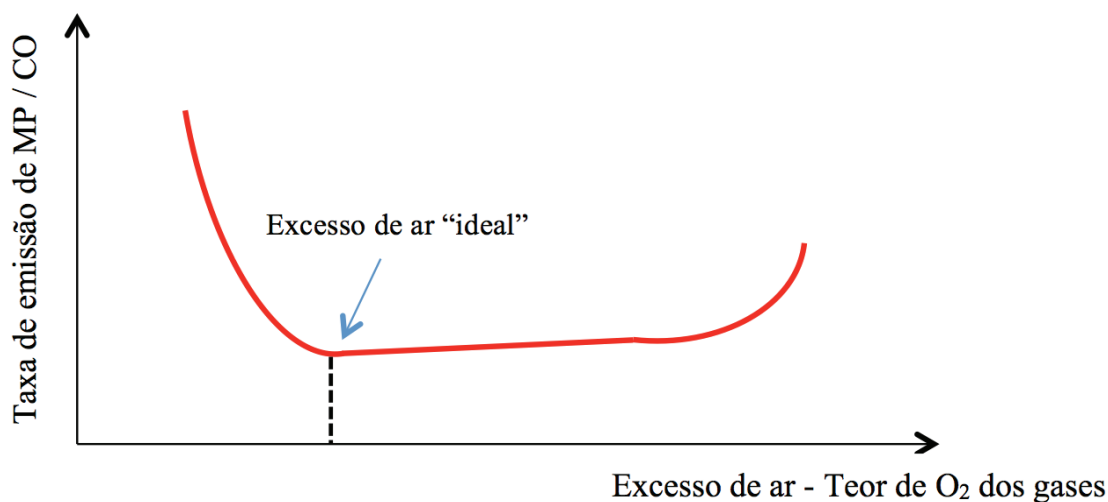


Figura 4 - Curva típica de excesso de ar versus taxa de emissão de produtos da combustão incompleta.  
Fonte: elaboração própria.

## 6.2 Melhora da nebulização (MESSIAS, 2006)

O processo de nebulização de líquidos vem sendo investigado experimentalmente pelo LET há vários anos, basicamente desde a montagem em 1998, em parceria com a Petrobras, de uma instalação a laser destinada à caracterização de sprays combustíveis, com ênfase nos óleos combustíveis nacionais (Figura 5).

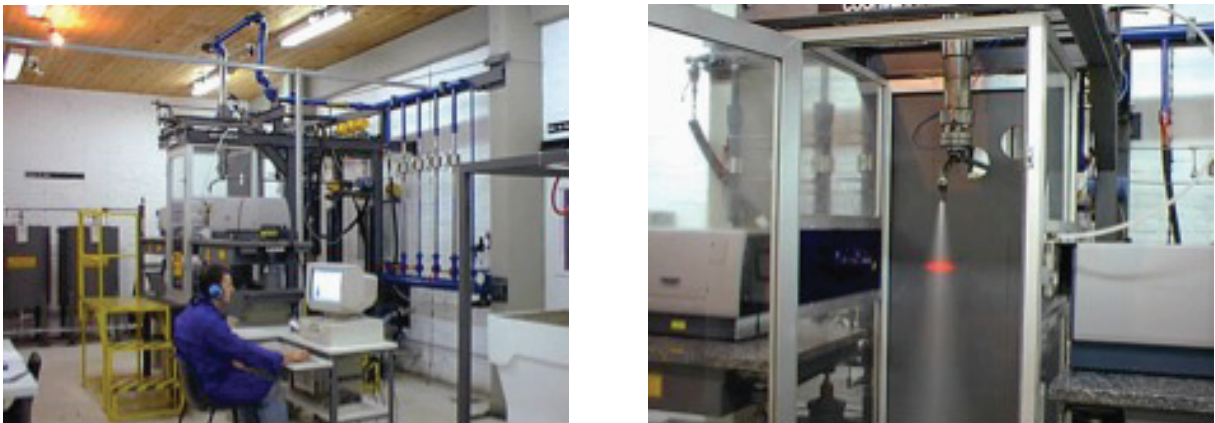


Figura 5 – Estação de avaliação de bocais nebulizadores do IPT.

Fonte: elaboração própria.

A bancada de nebulização permite a medição da distribuição granulométrica e do diâmetro médio das gotas do *spray* obtido, e tem sido utilizada na avaliação do desempenho de bocais nebulizadores existentes, podendo operar com bocais em escala real, com vazões de óleo de até 5.000 kg/h. Ela tem sido empregada, também, no desenvolvimento de novos bocais, na avaliação da vida útil de bocais e nas investigações relativas à influência de parâmetros operacionais (viscosidade, quantidade e tipo de fluido de nebulização) na qualidade da nebulização.

## 6.3 Uso de emulsões água-óleo / óleo-água

Quando o óleo e a água são misturados na presença de um agente emulsionante, pode ocorrer dois tipos de emulsão: quando o óleo fica disperso se forma a emulsão óleo em água (O/W) e se a fase aquosa for a dispersa será a emulsão água em óleo (W/O). O procedimento tem vários objetivos, porém o principal é a melhora da nebulização do óleo. Por exemplo, uma emulsão O/W com 30 % de água em massa, leva, devido à imediata evaporação da água na câmara de combustão, a uma liberação de partículas de combustível com diâmetros sete a oito vezes menores do que as partículas de emulsão geradas na nebulização.

Um dos primeiros trabalhos realizados pelo IPT envolvendo emulsões foi financiado pela Petrobras e constou de um conjunto de experimentos na fornalha de testes do LET operando com emulsão de resíduo asfáltico em água e com óleo combustível não emulsionado. O trabalho foi apresentado num *workshop* de combustão e propulsão (MESSIAS et al., 1989).

## 6.4 Uso de aditivos de combustão

Os aditivos misturados ao óleo atuam diretamente sobre sua queima com o objetivo de torná-la mais eficiente e, como consequência, menos propensa à emissão de MP. Há, basicamente, dois tipos de aditivos, denominados respectivamente de "dispersantes de asfaltenos" e de "catalisadores de combustão".

Os asfaltenos compõem uma "família" de hidrocarbonetos presentes nos óleos, de cadeia fechada, sobretudo aromáticos, de altíssima massa molecular e de alta propensão a se aglomerarem, dificultando sua combustão completa. Os "dispersantes de asfaltenos" são hidrocarbonetos solúveis no óleo que agem no sentido de inibir a formação desses aglomerados, tornando os asfaltenos mais dispersos nas gotas formadas na nebulização do óleo, facilitando a sua abordagem pelas moléculas de oxigênio.

Os "catalisadores de combustão" são organometálicos, ou seja, compostos que contêm pelo menos uma ligação carbono-metal e é atribuída a eles atividade catalítica nas reações heterogêneas de oxidação das partículas de coque. Há poucas referências na literatura sobre os organometálicos utilizados; há algumas menções ao uso dos ferrocenos -  $\text{Fe}(\text{C}_5\text{H}_5)_2$  e seus derivados.

Desde 1990, já se falava no Brasil sobre o uso de aditivos de combustão, porém o descrédito da indústria era grande, pois os fornecedores não apresentavam garantias de sua eficácia para óleos da natureza dos nossos, bem mais "pesados" do que os utilizados na Europa e Estados Unidos. Dentro desse contexto, por meio de projetos internos (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO, 1992-1993; 1996; 1998), o IPT desenvolveu metodologia para a avaliação de aditivos para óleo combustível e mostrou que o emprego deles poderia levar a bons resultados. A **Figura 6** mostra uma instalação típica montada pelo LET para a avaliação de aditivos.

Seguiu-se a esse desenvolvimento, a realização de vários projetos para a Shell que culminaram no lançamento pela empresa do denominado "*OC-Plus*" - óleo combustível aditivado com promessa de redução de até 75 % na emissão de MP.

Posteriormente, surgiu o interesse da Petrobras. Os fabricantes de aditivos interessados em serem fornecedores da Petrobras deveriam, preliminarmente, submeter seu produto a ensaio de desempenho no IPT. Na oportunidade, após terem sido queimadas toneladas de óleo na fornalha de testes do LET, aditivadas com produtos de diferentes fornecedores, nacionais e estrangeiros, a Petrobras selecionou uma das empresas e lançou seu óleo combustível aditivado, o denominado "*Add Cleaner*", com desempenho semelhante ao "*OC-Plus*".

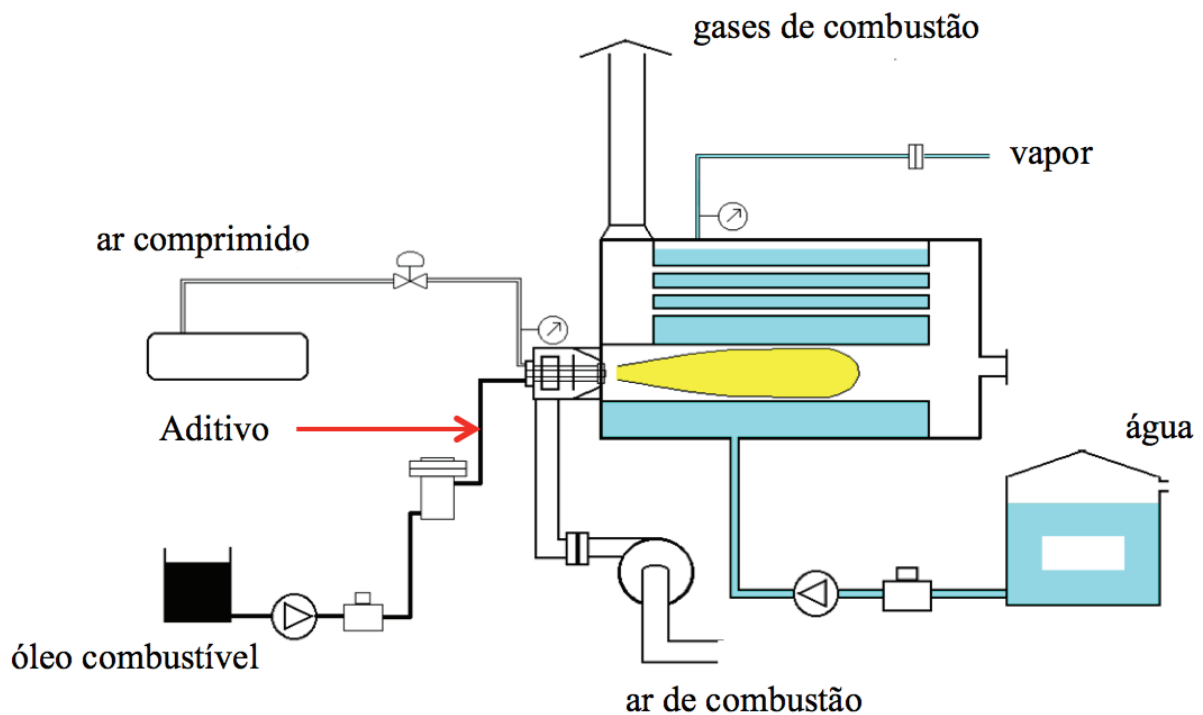


Figura 6 - Instalação do LET para a avaliação de aditivos.

Fonte: elaboração própria.

Ensaio com aditivos foram realizados, também, para a Oryxe, multinacional sediada na Califórnia (EUA) e, mais recentemente, no final de 2010, para a Lubrizol. Esse último, nas instalações de terceiro, previamente preparadas pelo LET para os testes.

Os resultados satisfatórios obtidos nos trabalhos com aditivos de combustão permitiram sua divulgação nos meios nacional e internacional de maior relevância da área de engenharia térmica/combustão (VERGNHANINI FILHO; SOUSA; MESSIAS; SANTOS, 1999; VERGNHANINI FILHO; SOUSA; SABINO; LASSEN, 2003a; VERGNHANINI FILHO; SOUSA; SABINO; LASSEN, 2003b; VERGNHANINI FILHO; HUA; MIGUEL JÚNIOR; FACINI, 2008).

## 6.5 Disseminação de conhecimento

A difusão do conhecimento que vem sendo adquirido pela equipe do LET tem sido feita por meio da publicação de artigos, da participação em eventos e, principalmente, da apresentação do tema no curso "Combustão Industrial", que vem sendo ministrado regularmente pelo IPT desde 1986 nas modalidades aberta e *in-company* (VERGNHANINI FILHO, 1986).

## 7 Referências

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO. Portaria no 80, 30 de abril de 1999. Estabelece o Regulamento Técnico ANP nº 003/99, anexo a esta Portaria, que especifica os óleos combustíveis de origem nacional ou importados a serem comercializados em todo o território nacional. **Diário Oficial da União**, Brasília, 3 maio 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ANSI/ASTM D 396 – 76**: Standard specification for fuel oils. West Conshohocken: ASTM, 1976.

BLAS, L. S. M. **Pollutant formation and interaction in the combustion of heavy liquid fuels**. 1998. 266 f. Thesis (Doctor of philosophy) - University of London, London, 1998.

CARVALHO JÚNIOR, J. A.; LACAVA, P. T. **Emissões em processo de combustão**. 1.ed. São Paulo: UNESP, 2003. 135 p.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Qualidade do ar no Estado de São Paulo 2015**. São Paulo: CETESB, 2016. (Série Relatórios).

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Poluentes**. Disponível em: <<http://ar.cetesb.sp.gov.br/poluentes>>. Acesso em: 14 mar. 2017.

GARCIA, R. **Combustíveis e combustão industrial**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2013. 340 p.

GARCIA, R.; BERNARDES, H. J. **Manual de utilização de óleos combustíveis ultraviscosos**. 2. ed. Belo Horizonte, 1992. 141 p.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Determinação experimental da relação entre o excesso de ar e a emissão de material particulado na combustão de óleos ultraviscosos**. São Paulo: IPT, 1992 - 1993. (Relatórios nos 30.876, 31.381 e 31.502).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Estudo dos efeitos do emprego de aditivos a óleos combustíveis pesados nas taxas de emissão de materiais particulados resultantes da combustão desses óleos**. São Paulo: IPT, 1996. (Relatório IPT no 33.841).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Verificação experimental da eficácia do uso de aditivo na redução da emissão de material particulado na queima de óleo combustível**. São Paulo: IPT, 1998. (Relatório IPT no 38.096).

MALVISI, F. **Estudo da poluição atmosférica causada pela queima de óleo combustível em caldeira e seleção de equipamento de abatimento de material particulado em caldeira flamotubular a óleo combustível nacional como estudo de caso**. 2010. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2010.

MESSIAS, L. S. **Combustão de líquidos**. São Paulo: IPT, 1986, 116 p. (Apostila do Curso Combustão Industrial).

MESSIAS, L. S. **Análise experimental de bocais nebulizadores visando reduzir emissões atmosféricas na combustão de óleos ultraviscosos**. 2006. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2006.

MESSIAS, L. S.; SANTOS, M. M.; SOUSA, F. D. A.; KUNERT, R. Comparação do comportamento entre chama de emulsão de resíduo asfáltico em água e chama de óleo combustível residual. In: WORKSHOP DE COMBUSTÃO E PROPULSÃO, 3., 1989, Lorena. **Anais...** São José dos Campos: Instituto de Pesquisas Espaciais, Laboratório Associado de Combustão e Propulsão, 1989.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 382, de 26 de dezembro de 2006. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2 jan. 2007. p. 131.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução no 436, de 22 de dezembro de 2011. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas instaladas ou com pedido de licença de instalação anteriores a 02 de janeiro de 2007. **Diário Oficial da União**, Brasília, 26 dez. 2011.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional (BEN) 2016 (ano base 2015)**. Rio de Janeiro, junho 2016.

SHELL BRASIL **Óleos combustíveis – entrega, armazenagem e manuseio**. [S.I.]: Gerência Técnica de Combustíveis – Mercado comercial, 2007. 59 p.

STRAUSS, W. **Industrial Gas Cleaning**. 2. ed. Oxford: Pergamon Press, 1975.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Part 60 - Standards of performance for new stationary sources. **The Code of Federal Regulations (CFR)**, Title 40 - Protection of Environmental, Chapter I - Environmental Protection Agency, Subchapter C - Air Programs. Washington: EPA, 1999. Disponível em: <[http://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?tpl=/ecfrbrowse/Title40/40cfr60\\_main\\_02.tpl](http://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?tpl=/ecfrbrowse/Title40/40cfr60_main_02.tpl)>. Acesso em: 13 maio 2016.

VERGNHANINI FILHO, R.; ANDRADE, L. A.; BRITO, H. B. Unidade móvel para avaliação do consumo de energia e da emissão de poluentes atmosféricos de equipamentos industriais de combustão. In: SEMINÁRIO DE BALANÇOS ENERGÉTICOS GLOBAIS E UTILIDADES, 34., / ENCONTRO DE PRODUTORES E CONSUMIDORES DE GASES INDUSTRIAIS, 28., 2013, Vitória. **Anais...** São Paulo: ABM, 2013.

VERGNHANINI FILHO, R., HUA, D.; MIGUEL JÚNIOR, J.; FACINI, S. R. P. Avaliação experimental da eficácia de aditivo de combustão na redução da emissão de material particulado na queima de óleo combustível. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, XVII., 2008, Recife. **Anais...** São Paulo: ABEQ, 2008.

VERGNHANINI FILHO, R. **Formação de poluentes em processos industriais de combustão: material particulado.** São Paulo: IPT, 1986, 28 p. (Apostila do Curso Combustão Industrial).

VERGNHANINI FILHO, R.; SOUSA, F. D. A.; MESSIAS, L. S.; SANTOS, M. M. Experimental investigation of efficacy of fuel additives on the emission of atmospheric pollutants from burning ultra-viscous oils. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMBUSTION TECHNOLOGIES FOR A CLEAN ENVIRONMENT, 5., 1999, Lisbon. **Proceedings...** Lisboa: Instituto Superior Técnico, 1999.

VERGNHANINI FILHO, R.; SOUSA, F. D. A.; SABINO, L. F.; LASSEN, M. Experimental investigation of fuel oil additives efficacy on reducing the emission of atmospheric pollutants from ultra-viscous oils. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGY FOR A CLEAN ENVIRONMENT, 7., 2003, Lisbon. **Proceedings...** Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2003a.

VERGNHANINI FILHO, R., SOUSA, F. D. A.; SABINO, L. F.; LASSEN, M. Experimental investigation of fuel oil additives efficacy on reducing the emission of atmospheric pollutants from ultra-viscous oils. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 17., 2003, São Paulo. **Proceedings...** Rio de Janeiro: ABCM, 2003b.