

## **X-007 - MONITORAMENTO DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS DE CALDEIRAS DE PROJETOS DISTINTOS**

**Thiago Morais de Castro<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Ambiental pela UNESP, Engenheiro de Segurança do Trabalho e Mestre em Engenharia Urbana pela UEM, Doutorando em Engenharia Agrícola pela UNIOESTE. Professor da UTFPR de Campo Mourão – PR.

**Henrique Bettoni Kawás<sup>(2)</sup>**

Engenheiro Ambiental pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Câmpus Campo Mourão.

**Guilherme Almendra Lourenço Inês<sup>(3)</sup>**

Engenheiro Ambiental pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Câmpus Campo Mourão.

**Eudes José Arantes<sup>(4)</sup>**

Engenheiro Civil, Mestre e Doutor em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (USP). Professor na UTFPR, Câmpus Campo Mourão.

**Maricir Cristina Parreira de Souza<sup>(5)</sup>**

Engenheira Química, Mestre e Doutora em Engenharia Química pela UEM.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Via Rosalina Maria dos Santos, 1233 – Área Urbanizada – Campo Mourão - PR - CEP: 87301-899 - Brasil - Tel: (44) 3518-1434 - e-mail: thiagocastro@utfpr.edu.br

### **RESUMO**

O objetivo deste trabalho foi monitorar as emissões de caldeiras de projetos distintos de duas lavanderias industriais, situadas no município de Cianorte, Estado do Paraná, analisando a emissão de gases poluentes e comparando os padrões de lançamento definidos pela Resolução SEMA-PR nº 016/14. O desenvolvimento consistiu em coletar os dados por meio do monitoramento utilizando um analisador de gases durante quatro meses, sendo realizada uma amostragem a cada mês. Foram medidas as concentrações de monóxido de carbono (CO), de óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e de dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>). Além disso, foi realizado o monitoramento da densidade aparente da fumaça com auxílio da Escala de Ringelmann. Os resultados obtidos mostram que tanto a caldeira convencional quanto a caldeira automatizada, apresentaram maiores concentrações de monóxido de carbono no 3º mês, resultando em 2.346 mg Nm<sup>-3</sup> e 939 mg Nm<sup>-3</sup>, respectivamente. Com a utilização da Escala de Ringelmann observou-se que em nenhum momento as concentrações ultrapassaram o limite estabelecido, Padrão 1. Por fim, pode-se concluir que a caldeira automatizada e dotada de pré-aquecedores, sistemas de controle de admissão de ar e tiragem de gases integrados à caldeira, gera maior eficiência de combustão do que a caldeira convencional.

**PALAVRAS-CHAVE:** Escala de Ringelmann, Gases de combustão, Caldeira convencional, Caldeira automatizada.

### **INTRODUÇÃO**

Nas indústrias o equipamento bastante comum utilizado para geração de vapor d'água é a caldeira, que trabalhando com pressão superior a pressão atmosférica, produz vapor a partir da energia térmica liberada pela combustão de uma fonte qualquer. A caldeira é composta por uma câmara de combustão (fornalha) e um trocador de calor, além de diversos equipamentos integrados, permitindo assim, a obtenção do maior rendimento possível e maior segurança (TORREIRA, 1995).

Segundo Caetano e Duarte Junior (2004) a combustão é uma reação química na qual, na presença de oxigênio, ocorre, simultaneamente, uma intensa liberação de energia em forma de calor e luz, resultando, em especial, no desprendimento de calor, denominam-se fumos os produtos resultantes da combustão. A característica mais importante dos combustíveis é o poder calorífico, que é a quantidade de energia desprendida na combustão completa de uma unidade de massa ou volume, à pressão constante.

Um dos combustíveis mais utilizados nas caldeiras é a biomassa constituída de madeiras em geral. A lenha apresenta em sua composição elementar carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e quantidade variável de água (CAETANO; DUARTE JUNIOR, 2004). Durante o processo de combustão da lenha, existe uma grande produção de material volátil, tornando-o vantajoso em relação aos demais combustíveis. Porém, na combustão da madeira há geração de gases poluidores para a atmosfera, e estes podem aumentar o efeito estufa, pois possuem a capacidade de absorver parte da radiação infravermelha emitida pela Terra.

Nos dias atuais, há uma grande preocupação com as indústrias que são consideradas potencialmente poluidoras. Essas atividades estão crescendo a cada dia e podem resultar em sérios problemas ao meio ambiente e aos seres humanos quando são desenvolvidas de maneira ilegal e inadequada. Segundo Nascimento et al. (2006), estudos comprovam que a poluição atmosférica aumenta o risco de morte e doenças em crianças, na gravidez, e em idosos. Isto se dá principalmente pela emissão de dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), ozônio (O<sub>3</sub>) e material particulado.

Devido aos impactos ambientais causados pela poluição do ar por indústrias significativamente poluidoras no estado do Paraná, foi aprovada, dentre outros requisitos legais, a Resolução SEMA nº 016 de 26 de março de 2014, com a finalidade de estabelecer padrões de controle da poluição atmosférica no estado. Esta pesquisa visou monitorar poluentes atmosféricos de duas caldeiras instaladas em lavanderias industriais que utilizam lenha como combustível. As caldeiras possuem projetos de fabricação distintos e foram analisadas as emissões atmosféricas comparando-as com as exigências previstas na Resolução SEMA-PR nº 016/14.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste trabalho foram monitoradas as concentrações dos poluentes de duas caldeiras, realizada uma medição a cada mês, totalizando quatro medições. As duas caldeiras de lavanderias industriais que foram avaliadas situam-se no município de Cianorte, estado do Paraná, localizadas na rodovia PR-082 que dá acesso ao município de Terra Boa-PR.

Para o monitoramento dos gases foi utilizado o equipamento da marca Telegan Gás Monitoring, modelo Tempest 100 (Figura 1), que oferece medições básicas de O<sub>2</sub> (%), CO (mg Nm<sup>-3</sup>), NO<sub>x</sub> (mg Nm<sup>-3</sup>), SO<sub>2</sub> (mg Nm<sup>-3</sup>), Pressão atmosférica, Temperatura (°C) e CO<sub>2</sub> (%), além da eficiência da combustão (%) sendo que já vem acoplada uma impressora ao corpo do analisador. Foram realizadas medições de emissões atmosféricas nestas caldeiras, com doze amostragens em cada coleta de gases, com intervalo de um minuto a cada amostragem. A unidade de medida mg Nm<sup>-3</sup> refere-se às concentrações corrigidas para as condições normais de temperatura e pressão, correção esta que o aparelho realiza de forma automática.



**Figura 1:** Aparelho eletrônico marca Telegan Gás Monitoring, modelo Tempest 100.

Fonte: Manual de instruções Tempest 100

A medição foi realizada no duto de saída dos gases (chaminé), em um ponto localizado a uma distância de 3 metros após o duto de interligação do exaustor com a chaminé na caldeira automatizada. O ponto de amostragem da medição dos gases da caldeira convencional está situado num trecho reto do duto de interligação da caldeira com o exaustor. O duto possuía uma seção quadrada de dimensões 0,40 m x 0,40 m e um diâmetro equivalente de 0,45 m. O orifício através do qual se realizou a amostragem possuía um diâmetro de 10 mm e estava localizado a uma distância de 1,20 m após a curva do duto de saída dos gases da caldeira.

Os dados técnicos da caldeira convencional foram disponibilizados pelo engenheiro químico responsável técnico pelas lavadeiras industriais. Os dados técnicos da caldeira automatizada foram obtidos através do manual da caldeira, requerido na lavanderia industrial.

Após a obtenção das concentrações dos poluentes, foi feito o cálculo de concentração corrigida para condições referenciais de Oxigênio, que é de 11% conforme a Resolução SEMA-PR nº 016/2014. A Equação 1 representa a fórmula para corrigir a concentração medida para condição referencial de Oxigênio utilizada.

$$C_R = \frac{(21 - O_R)}{(21 - O_M)} \times C_M \quad (\text{Equação 1})$$

onde:

CR= concentração corrigida para condições referenciais em mg Nm<sup>-3</sup>

OR = concentração referencial de Oxigênio em % por volume

OM= concentração medida de Oxigênio em % por volume

CM= concentração medida em mg m<sup>-3</sup>

O monitoramento das caldeiras durou quatro meses (Tabela 1), sendo realizado um monitoramento por mês para cada caldeira. Foram realizadas 12 amostragens em cada medição com intervalos de 1 minuto cada.

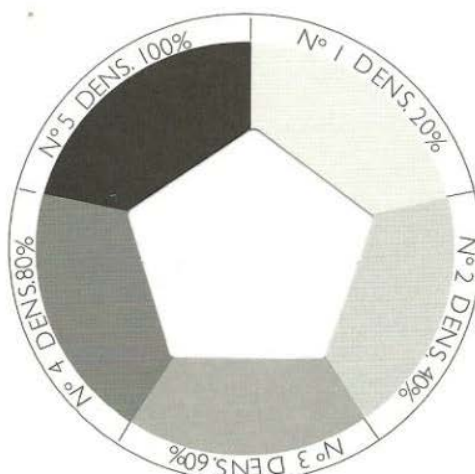
**Tabela 1: Distribuição de datas e horários dos monitoramentos das caldeiras.**

Período	Caldeira Convencional		Caldeira Automatizada	
	Início	Término	Início	Término
1º mês	09:10:04	09:21:04	08:04:04	08:15:05
2º mês	09:09:04	09:20:04	07:49:04	08:00:04
3º mês	15:47:04	15:58:05	07:36:05	07:47:05
4º mês	15:19:05	15:30:04	08:17:05	08:28:04

Além do aparelho eletrônico, foi analisada a densidade aparente da fumaça emitida pelas chaminés das caldeiras com o auxílio da Escala de Ringelmann (Figura 2). Este método simplificado mede a qualidade do ar através de uma escala gráfica, utilizando uma avaliação colorimétrica, constituída de cinco padrões com variação uniforme de tonalidade entre o branco e o preto.

A caldeira convencional analisada era da marca CHAMAS, modelo FTH, nº de série 037, com capacidade nominal de 2.000 kg h<sup>-1</sup> e potência térmica nominal de 1,92 MW. Como a potência da caldeira era superior a 0,5 MW e inferior a 2 MW, de acordo com a Resolução SEMA-PR 016/14, o limite exigido para lançamento de CO é de 3.000 mg Nm<sup>-3</sup>. Era dotada de um projeto de fornalha simples tipo capela, poucos recursos tecnológicos (projeto comum), ou seja, composto apenas por uma fornalha, trocador de calor, exaustor e chaminé. Não era equipada com pré-aquecedores de ar (recuperador de calor), além de não possuir admissão de ar secundário. Disponha apenas de dois passes em seu fluxo de gases e automatização simples e parcial de controle operacional (sistema *on/off*).

A caldeira automatizada era da marca Biochamm, modelo BGV-3000L, nº de série 2161, fabricada em 2009, com capacidade nominal de 3.000 kg h<sup>-1</sup> e potência térmica nominal de 2,88 MW. Desse modo, por situar-se entre 2 MW e 10 MW, de acordo com a Resolução SEMA-PR 016/14, o limite exigido para lançamento de CO é de 2.500 mg Nm<sup>-3</sup>. Possuía um projeto otimizado desenvolvido pelo próprio fabricante (Biochamm Caldeiras), dotada de pré-aquecedores de ar para recuperação de calor dos gases de combustão e de sistema de controle de poluição atmosférica para retenção de material particulado do tipo multiciclone. Além disso, tinha admissão de ar secundário pra auxiliar na queima de CO e três passes no fluxo dos gases no interior da caldeira.



**Figura 2:** Escala de Ringelmann utilizada para visualizar a densidade aparente da fumaça

Os dados obtidos no monitoramento foram confrontados com os padrões vigentes da Resolução nº 016/14 SEMA-PR, com a geração de tabelas das medições, além disso, foram comparadas as concentrações medidas entre as caldeiras e o atendimento da legislação vigente.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

As médias das concentrações das emissões atmosféricas que foram obtidas na combustão da lenha na caldeira convencional encontram-se na Tabela 2.

**Tabela 2: Médias dos monitoramentos realizados na Caldeira Convencional.**

Período	Caldeira Convencional						
	Temperaturas		Resultados com correção (O <sub>2</sub> Ref. 11%)				
	Ambiente (°C)	Gases (°C)	O <sub>2</sub> (% v/v)	Fator de correção	NOx (mg Nm <sup>-3</sup> )	SOx (mg Nm <sup>-3</sup> )	CO (mg Nm <sup>-3</sup> )
1º mês	30	149	16,0	2,0000	44	14	<b>1.120</b>
2º mês	30	157	14,7	1,5873	51	144	<b>2.346</b>
3º mês	26	158	15,1	1,6949	42	47	<b>832</b>
4º mês	26	162	13,9	1,4085	75	185	<b>1.917</b>
<b>Límite</b>					NA	NA	<b>3.000</b>

NA = não aplicável

A partir da Tabela 2, pode-se observar que as temperaturas dos gases apresentaram valores elevados e, tal fato, conciliado com a vazão excessiva de tiragem dos gases através do exaustor, resulta na perda de grande quantidade de calor, o qual poderia estar sendo recuperado, caso as instalações fossem dotada de um pré-aquecedor de ar (recuperador de calor).

Observa-se no 1º mês que o fator de correção para oxigênio de referência foi de 2,0, sendo o mais elevado dentre todos os meses, isso ocorreu pelo fato de que a média da porcentagem de oxigênio medida, nesse mês, ter sido alta, isto é, o volume de oxigênio presente no ar atmosférico foi de 16%. Isso ocorreu por tratar-se de uma caldeira mais antiga e sem uma vedação adequada para o controle da entrada de ar sob as grelhas da fornalha. Esse aumento de entrada do ar resultou ainda em um maior consumo de combustíveis, pois, gera grande perda de calor nos gases de combustão e reduz a eficiência na geração de vapor.

Os resultados com correção para oxigênio referencial de 11%, como exigido pela Resolução SEMA-PR Nº 016/14, resultaram em altos valores de concentração de CO, entretanto, todos os valores médios para o

monóxido de carbono estão em conformidade com a legislação vigente, que determina o valor máximo estabelecido para 3.000 mg Nm<sup>-3</sup>.

Os parâmetros NO<sub>x</sub> e SO<sub>x</sub> não se aplicam para o porte do equipamento em questão, segundo a Resolução SEMA-PR N° 016/14, não sendo definidos valores limites para lançamento na atmosfera, pois ambas as caldeiras possuem potência térmica nominal abaixo de 10 MW. Em termos de comparação, para caldeiras com potência térmica nominal entre 10 e 50 MW, a Resolução SEMA-PR n° 016/14 estabelece o limite máximo para NO<sub>x</sub> de 500 mg Nm<sup>-3</sup>, e todos os valores monitorados foram inferiores.

O parâmetro SO<sub>x</sub> não é exigido para caldeiras que utilizam derivados de madeira como combustível. De acordo com Pinheiro e Valle (1995), os óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) são produzidos durante a combustão a partir do nitrogênio do ar (NO<sub>x</sub> térmico) ou do nitrogênio do combustível (NO<sub>x</sub> combustível), que não é o caso em questão.

A temperatura e o teor de O<sub>2</sub> e N<sub>2</sub> nos produtos da combustão são os principais fatores para a formação de NO<sub>x</sub>, e são controlados pelo excesso de ar. Assim, além da influência na eficiência da combustão, o percentual de excesso de ar determina os níveis de emissão de NO<sub>x</sub> e CO. Pequenos excessos de ar geram altas temperaturas de chama e baixos teores de O<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>, enquanto altos valores, o inverso. Nesse caso o excesso de ar pode ter provocado o aumento nas concentrações de NO<sub>x</sub> verificadas na caldeira automatizada.

O monitoramento no 3° mês apresentou concentrações com valores menores quando comparado aos outros meses. Tal motivo explica-se, principalmente, pela qualidade do combustível utilizado, com baixa umidade e também que, nesse mês a lavanderia estava realizando uma produção, tal que exigia da caldeira convencional uma produção de vapor próxima a sua capacidade nominal de projeto.

Foi constatado também na operação da caldeira convencional uma maior oscilação na taxa de emissão de CO, principalmente, nos períodos de alimentação da caldeira, em função das vazões de ar admitido para combustão e da tiragem dos gases serem mantidos através de regulagem fixa.

Além da utilização do analisador de gases para se obter as concentrações dos poluentes, foi utilizado também a Escala de Ringelmann como instrumento durante os monitoramentos para visualização da densidade colorimétrica dos gases gerados. Em todos os monitoramentos realizados, em nenhum momento a densidade da fumaça ultrapassou os 20% estabelecidos pela Resolução SEMA-PR n° 016/14, que equivale ao Padrão 1 da Escala de Ringelmann.

As médias das concentrações das emissões atmosféricas que foram obtidas na combustão da lenha na caldeira automatizada encontram-se na Tabela 3.

**Tabela 3: Médias dos monitoramentos realizados na Caldeira Automatizada**

Período	Caldeira Automatizada						
	Temperatura		Resultados com correção (O <sub>2</sub> Ref. 11%)				
	Ambiente (°C)	Gases (°C)	O <sub>2</sub> (%v/v)	Fator de correção	NO <sub>x</sub> (mg Nm <sup>-3</sup> )	SO <sub>x</sub> (mg Nm <sup>-3</sup> )	CO (mg Nm <sup>-3</sup> )
1° mês	28	92	15,4	1,7857	100	2	<b>521</b>
2° mês	29	91	15,4	1,7857	96	13	<b>939</b>
3° mês	26	86	16,3	2,1277	74	0	<b>187</b>
4° mês	25	89	14,9	1,6393	54	46	<b>692</b>
<b>Limite</b>					NA	NA	<b>2.500</b>

NA = não aplicável

Observa-se na Tabela 3 que os resultados médios para a temperatura dos gases são inferiores quando comparados com a caldeira convencional, isso ocorreu principalmente pelo fato da mesma possuir, em suas instalações, um pré-aquecedor de ar que promove a recuperação de parte do calor ainda contido nos gases, pré-

aquecendo o ar ambiente (ar primário) até 140°C e também a instalação de um ventilador de ar secundário, introduzido na parte superior da fornalha especificamente para auxiliar na combustão completa do carbono.

Os óxidos de enxofre ( $\text{SO}_x$ ) resultaram em uma baixa concentração, tanto que no mês de maio a média das concentrações foi de 0  $\text{mg Nm}^{-3}$ . As baixas emissões de  $\text{SO}_x$  estão relacionadas com as baixas concentrações de enxofre presente no combustível (lenha). Todavia, os óxidos de nitrogênio obtiveram um valor elevado, sendo muitas vezes, superior quando comparado com a caldeira convencional. Os valores encontrados para CO estiveram abaixo do limite máximo estabelecido pela legislação, limitado em 2.500  $\text{mg Nm}^{-3}$ .

A caldeira automatizada possui um projeto de fornalha mais adequado, ou seja, a combustão é processada em um maior tempo de retenção, o que favoreceu a reação mais completa do combustível (lenha) e dos voláteis gerados, e conseqüentemente, uma redução das taxas de emissão de CO.

As concentrações de monóxido de carbono (CO) medidas foram inferiores à caldeira convencional, devido ao fato da caldeira automatizada possuir diversos equipamentos integrados de controle, como o pré-aquecedor de ar, multiciclone e admissão de ar secundário, os quais proporcionam condições mais adequadas e que favorecem a reação de combustão de modo que a mesma seja processada de forma mais completa. Dentre eles destacaram-se o controle da vazão de ar admitido para a combustão e o controle da vazão de exaustão dos gases gerados.

Além desses parâmetros importantes, destaca-se também a presença do pré-aquecedor de ar, que promove a recuperação de parte do calor ainda contido nos gases, pré-aquecendo o ar admitido para a combustão (ar primário). No 2º mês, o monitoramento da caldeira automatizada teve um desempenho aceitável, porém, no término do período monitorado observou-se um pico na taxa de emissão de CO por um período inferior a um minuto, retornando ao valor médio em seguida. Uma das razões que pode justificar este fato é que a lenha quando introduzida na fornalha, de forma aleatória, na maioria das vezes, formou uma estrutura engaiolada com vários espaços. No decorrer do processo de combustão, pode ocorrer um rearranjo súbito da lenha em combustão, o que provoca a liberação de grande quantidade de voláteis gerados em curto espaço de tempo, fato que aumenta a emissão de CO momentaneamente, mas retorna aos níveis normais logo em seguida.

Um aspecto importante observado nas instalações da caldeira automatizada comparada com a convencional foi o dimensionamento do sistema de isolamento térmico, o qual possuía espessura superior, proporcionando melhor isolamento e menores perdas de calor por irradiação térmica, fato que contribuiu na manutenção da temperatura adequada na fornalha, além de favorecer o rendimento térmico da caldeira e reduzir o consumo de combustível. Na caldeira convencional foi notável a perda de calor do interior de sua estrutura metálica e, isso se deu, pela deficiência no material de isolamento térmico instalado.

Durante o monitoramento da caldeira automatizada em nenhum momento a densidade da fumaça ultrapassou os 20% estabelecidos pela Resolução SEMA-PR nº 016/14, que equivale ao Padrão 1 da Escala de Ringelmann.

## CONCLUSÕES

Com base no trabalho realizado, concluiu-se que:

Por meio da potência térmica nominal e de acordo com o combustível utilizado, foi possível verificar os padrões de lançamento do parâmetro atmosférico monóxido de carbono (CO), 3.000  $\text{mg Nm}^{-3}$  para a caldeira convencional e 2.500  $\text{mg Nm}^{-3}$  para a caldeira automatizada e as frequências de amostragem, semestral e anual respectivamente, de acordo com a Resolução SEMA-PR 016/14.

A partir dos monitoramentos realizados nas caldeiras, foram adquiridas as concentrações dos poluentes, como monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ) e dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ). A maior média da concentração de CO entre os monitoramentos da caldeira convencional foi de 2.346  $\text{mg Nm}^{-3}$  sendo superior quando comparada com a caldeira automatizada que resultou em 939  $\text{mg Nm}^{-3}$ , em que todas as concentrações estavam em conformidades com a legislação vigente.



Além do analisador de gases também foi utilizado a Escala de Ringelman, e em nenhum momento as concentrações ultrapassaram o limite estabelecido, Padrão 1.

Pode-se concluir que a caldeira automatizada e dotada de pré-aquecedores, sistemas de controle de admissão de ar e tiragem de gases integrados à caldeira, gera maior eficiência de combustão do que a caldeira convencional.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CAETANO, Laércio; DUARTE JUNIOR, Luiz Antonio. Estudo comparativo da queima de óleo B.P.F e lenha em caldeiras – Estudo de caso. Journal Article, 2004. Disponível em: <[http://www.abcm.org.br/xi\\_creem/resumos/TE/CRE04-TE01.pdf](http://www.abcm.org.br/xi_creem/resumos/TE/CRE04-TE01.pdf)>.
2. NASCIMENTO, Luiz F. C. et al. Efeitos da poluição atmosférica na saúde infantil em São José dos Campos, SP. Revista Saúde Pública, São Paulo , v. 40, n. 1, Jan/Fev. 2006. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0034-89102006000100013&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0034-89102006000100013&script=sci_arttext)>.
3. PARANÁ. Resolução SEMA nº 016, de 26 de março de 2014. Diário Oficial. Curitiba, PR, 27 dez. 2014. Disponível em: <[http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/Legislacao\\_ambiental/Legislacao\\_estadual/RESOLUCOES/RESOLUCAO\\_SEMA\\_16\\_2014.pdf](http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/Legislacao_ambiental/Legislacao_estadual/RESOLUCOES/RESOLUCAO_SEMA_16_2014.pdf)>.
4. PINHEIRO, P. C. C.; VALLE, R. M. Controle de Combustão: Otimização do Excesso de Ar. In: II Congresso de Equipamentos e Automação da Indústria Química e Petroquímica, 1995, Rio de Janeiro. Anais do II Congresso de Equipamentos e Automação da Indústria Química e Petroquímica. Rio de Janeiro, RJ : ABIQUIM, 1995. v. 1. p. 157-162.
5. TEMPEST 100. Manual de instruções. São Paulo, 2011. 23 p.
6. TORREIRA, Raul P. Geradores de Vapor. Editora Libris, São Paulo, 1995.