

AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE MONÓXIDO DE CARBONO (CO) EM UMA CALDEIRA FLAMOTUBULAR UTILIZANDO GÁS NATURAL

EVALUATION OF EMISSIONS OF CARBON MONOXIDE (CO) IN A FLAMOTUBULAR BOILER USING NATURAL GAS

EVALUACIÓN DE LAS EMISIONES DE MONÓXIDO DE CARBONO EN UN CALDERO DE LLAMA TUBULAR UTILIZANDO GAS NATURAL

Gilmar Geraldo Jorge

Engenheiro Ambiental/ Engenheiro de Segurança do Trabalho UNIFAESP-PR
E-mail: gilmar_gj_@hotmail.com

Angelo Augusto Valles de Sá Mazzarotto

Centro Universitário do Paraná- UNIFAESP.
E-mail: vallesdesa@gmail.com

Maria Carolina Vieira da Rocha

Engenheira de Bioprocessos e Biotecnologia/ UFPR; Bacharel em Ciências Biológicas/ Universidade Positivo; Mestre e Doutora em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental/ UFPR; Professora Adjunta I/UNIFAESP-PR
E-mail: mcarol.dhs@gmail.com

RESUMO

A poluição atmosférica vem aumentando com o crescimento industrial, e o desafio dos países tem sido procurar mecanismos eficientes que controlem adequadamente os níveis destes poluentes. A utilização de caldeiras é comum em muitas indústrias; porém, esses equipamentos são emissores potenciais de poluição atmosférica e devem ter um controle rigoroso na sua operação. Entre estas formas de controle, inclui-se a substituição de matérias-primas utilizadas no processo de queima, por outras de menor potencial poluente, como é o caso do gás natural. Assim, este estudo teve como objetivo avaliar a emissão de monóxido de carbono (CO) em uma caldeira flamotubular alimentada por gás natural, monitorada por um período de três anos de funcionamento. Os resultados obtidos em todas as análises estão de acordo com a norma estabelecida pela Resolução nº 436/ 2011 do CONAMA (Conselho Nacional de Meio Ambiente), confirmando o uso deste combustível como uma alternativa adequada para redução das emissões atmosféricas em sistemas de caldeiras industriais.

Palavras-chave: Caldeira flamotubular, Gás natural, Monóxido de carbono

ABSTRACT

Air pollution has been considerably increased with industrial growth, and the challenge for countries has been to find out efficient mechanisms that adequately control the levels of these pollutants. The use of boilers is common in many industries; however, these equipments are potential emitters of atmospheric pollution, and must have a strict control in their operation. Among

these forms of control, the substitution of raw materials used in the burning process, for others with lower polluting potential, such as natural gas, is included. Thus, this study aimed to evaluate the emission of carbon monoxide (CO) in a flamedubular boiler fueled by natural gas, monitored for a period of three years. The results obtained in all the analyzes were in accordance with the norm established by Resolution No. 436/ 2011 of CONAMA (National Council of the Environment), confirming the use of this fuel as an adequate alternative to reduce atmospheric emissions in industrial boiler systems.

Keywords: Flamedubular boiler, Natural gas, Carbon monoxide

RESÚMEN

La contaminación atmosférica viene aumentando junto con el crecimiento industrial. El desafío de los países ha sido buscar mecanismos eficientes que controlen adecuadamente los niveles de estos contaminantes. El uso de calderas es común en diversas industrias; sin embargo, estos equipos son emisores potenciales de contaminación atmosférica y deben tener un control riguroso en su operación. Entre estas formas de control, se incluye la sustitución de materias primas utilizadas en el proceso de quema, por otras de menor potencial contaminante, como es el caso del gas natural. Así, este estudio tuvo como objetivo principal evaluar la emisión de monóxido de carbono (CO) en una caldera pirotubular alimentada por gas natural, monitoreada em un período de tres años de funcionamiento. Los resultados obtenidos en todos los análisis están de acuerdo con la norma establecida por la Resolución N ° 436/2011 del CONAMA (Consejo Nacional de Medio Ambiente), confirmando el uso de este combustible como una alternativa adecuada para reducción de las emisiones atmosféricas en sistemas de calderas industriales.

Palabras clave: Caldera pirotubular, Gas natural, Monóxido de carbono

INTRODUÇÃO

De acordo com o Conselho Nacional do Meio Ambiente- CONAMA¹, a poluição atmosférica pode ser definida como qualquer forma de matéria, ou energia, que apresente características que possam tornar o ar impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde, ou ainda inconveniente ao bem-estar público, à saúde da fauna, flora ou à vida em comunidade. De fato, os poluentes atmosféricos estão majoritariamente associados ao aumento do efeito estufa; à destruição da camada de ozônio na estratosfera; e à chuva ácida, já tendo sido descritos milhares de compostos gasosos ou particulados que podem prejudicar a saúde humana e ambiental quando presentes no ambiente^{2,3}.

Entre os poluentes primários produzidos durante o processo de combustão, destaca-se o monóxido de carbono (CO), composto gasoso altamente tóxico e produzido a partir da queima incompleta de hidrocarbonetos. Em humanos, devido à falta de especificidade nos sintomas, muitos casos de contaminações com CO não são adequadamente diagnosticados, levando a quadros crônicos que podem culminar em danos cerebrais severos⁴. Além disso, o monóxido de carbono influencia a química da atmosfera, contribuindo para o aquecimento global e a depleção da camada de ozônio^{5,6}.

Uma das principais fontes emissoras de poluentes atmosféricos, mais particularmente monóxido de carbono, são as operações industriais que fazem uso da combustão em seus processos⁷. O uso de caldeiras, por exemplo, visa gerar vapor através de uma troca térmica entre o combustível e a água, o que tem sido amplamente utilizado para a geração de energia elétrica. É importante salientar que, devido ao acúmulo de vapor sob elevadas pressões, estes equipamentos estão sujeitos a rigorosas regulamentações como, por exemplo, a Norma Regulamentadora 13, do

Ministério do Trabalho do Brasil (atualmente integrante do Ministério da Economia), que estabelece características de fabricação e operação de caldeiras e vasos de pressão no país⁸.

A operação inadequada de caldeiras, entretanto, pode levar ao lançamento de grandes quantidades de gases poluentes e material particulado na atmosfera, principalmente quando o combustível utilizado é o carvão, e medidas de controle e monitoramento de emissões atmosféricas são insuficientes³. Assim, visando minimizar os impactos causados pela operação de sistemas de caldeiras, é possível substituir o carvão por combustíveis alternativos que causem menor dano ambiental.

Apesar de ser classificado como um combustível de origem fóssil, por resultar da decomposição da matéria orgânica de animais e plantas pré-históricas, o gás natural é inodoro, incolor e de queima mais limpa que os demais combustíveis⁹. Composto primordialmente pelos gases metano e etano, o gás natural destaca-se ainda pela maior segurança em seu transporte, realizado mediante tubulações; pelo seu elevado rendimento térmico; e pela menor emissão de poluentes atmosféricos, considerando-se que sua queima produz metade do dióxido de carbono (CO₂) quando comparada à queima de carvão, com a vantagem adicional de não lançar compostos sulfurados na atmosfera, pois há reduzida concentração de enxofre em sua composição¹⁰.

Assim, tendo em vista a importância do monitoramento dos poluentes atmosféricos, particularmente o gás monóxido de carbono, dada sua periculosidade à saúde humana e ambiental, o presente estudo teve como objetivo avaliar as emissões de monóxido de carbono (CO) em uma caldeira do tipo flamotubular, alimentada por gás natural. Os valores obtidos foram comparados com os limites estabelecidos pela resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 436, de 22 de dezembro de 2011¹¹, visando avaliar a segurança do uso do gás natural, em relação à emissão de CO, na operação deste equipamento. É importante salientar que, para caldeiras com potência nominal de até 10 MW, neste estudo definidas como caldeiras de pequeno porte, ficou estabelecido pela Resolução CONAMA 436/2011, em seu anexo II, que o órgão ambiental licenciador poderá aceitar a avaliação periódica apenas de monóxido de carbono como indicador dos impactos atmosféricos ocasionados pela operação destes equipamentos.

MATERIAL E MÉTODOS

O equipamento caldeira avaliado neste estudo foi do tipo flamotubular, da marca TANGE, modelo TG 80/10 (Fig. 1), fabricado no ano de 1997, com capacidade de geração de vapor de 1.040 kg/h e potência nominal de 0,91 MW. A caldeira operava 8 horas diárias, cinco vezes na semana, em uma indústria de produção de asfalto, oscilando para períodos de até 12 horas diárias, dependendo da demanda produtiva. Devido às férias coletivas, o equipamento permanecia dois meses por ano inoperante, período utilizado para a realização da sua manutenção.

Caldeiras do tipo flamotubular funcionam realizando a queima do combustível com um maçarico ou combustor. O calor desprendido aquece a tubulação contendo água, e os poluentes gerados através da combustão são direcionados para uma chaminé, ou duto de exaustão, e lançados na atmosfera. Assim, os efluentes atmosféricos gerados no processo de queima do gás natural utilizado como combustível foram monitorados diretamente no duto de exaustão da caldeira (diâmetro de 130 mm), em um orifício localizado a três metros a partir do nível do solo, no período compreendido entre 2012 e 2014, tendo sido realizadas sete amostragens ao todo.

O monitoramento foi realizado utilizando-se um analisador de gases com microprocessador, marca TELEGAN, modelo TEMPEST – 100. A sonda do analisador permaneceu inserida no ponto de monitoramento por 3 minutos, e os dados obtidos foram armazenados na memória interna do equipamento para posterior avaliação. Além do monóxido de carbono, também foram avaliados os seguintes parâmetros: dióxido de enxofre (SO₂); dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrogênio na forma de NO₂, oxigênio molecular (O₂), temperatura dos gases e densidade colorimétrica.

Fig. 1. Caldeira flamotubular alimentada com gás natural, marca Tange, modelo TG 80/10. As emissões atmosféricas foram coletadas em orifício localizado no duto exaustor do equipamento



Fonte: o autor (2014)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As coletas e análises dos gases de combustão da caldeira em estudo foram realizadas em um período de três anos, visando avaliar se o tempo de operação do equipamento poderia influenciar na emissão dos poluentes atmosféricos. Também, o monitoramento foi realizado em períodos de pleno funcionamento e, no mínimo, duas horas após a partida diária da caldeira. De acordo com a Resolução CONAMA 436/2011, para fontes que possuam caráter sazonal ou funcionamento não contínuo ao longo do ano, o atendimento aos limites de emissão estabelecidos deverá ser verificado nas condições que prevaleçam na maioria das horas operadas, comprovadas por meio de registros operacionais.

Durante o monitoramento, a pluma gasosa não era perceptível visualmente, não havendo presença de material particulado ou odor no entorno do lançamento. A temperatura ambiente variou de 30,6 °C a 32 °C, com céu aberto e ventos moderados.

Na Tab. 1 são apresentados os valores obtidos para as análises realizadas. Apesar da avaliação periódica obrigatória para caldeiras com potência de até 10 MW se referir apenas ao monóxido de carbono, este estudo avaliou também outros parâmetros de qualidade do ar, visando estabelecer relações entre os poluentes que possam auxiliar em um diagnóstico mais preciso sobre a operação de caldeiras de pequeno porte, e os possíveis impactos ambientais ocasionados por emissões atmosféricas decorrentes de suas atividades.

De acordo com os resultados, a temperatura média dos gases de combustão produzidos pela caldeira foi igual a 158,8 °C. A temperatura dos gases de combustão, também denominada de temperatura da pilha, é uma medida importante para a verificação da eficiência do equipamento, sendo um reflexo do uso do combustível na caldeira. Estima-se que nesta temperatura, a eficiência da queima do combustível e produção de vapor, considerando-se gás natural, esteja entre 83% e 84%. Temperaturas muito elevadas, como 250°C ou mais, indicam uma redução na eficiência do processo de combustão, que também varia de acordo com o combustível utilizado¹². É importante salientar que a queda da eficiência no processo de combustão gera impactos negativos ao meio ambiente, pois leva ao aumento da demanda de matéria-prima combustível necessária à geração de energia e manutenção da produção⁹.

Tab. 1. Resultados dos parâmetros de qualidade do ar obtidos durante monitoramento dos efluentes atmosféricos lançados no duto de exaustão de caldeira flamotubular alimentada com gás natural

Parâmetro	Unidade	Valores
-----------	---------	---------

		Jan/2012	Jun/2012	Nov/2012	Mai/2013	Out/2013	Mar/2014	Ago/2014
Temperatura dos gases	°C	157	164,4	158,4	154,2	158	162	158
Densidade colorimétrica	%	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20
Monóxido de carbono (CO)	mg/ nm ³	<1	<1	18	26	8	10,5	15,8
Dióxido de enxofre (SO ₂)	mg/ nm ³	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
Óxidos de nitrogênio (NO _x)	mg/ nm ³	<1	110	140	133	95	72	68
Dióxido de carbono (CO ₂)	%	7,3	7,4	8,9	9,2	5,2	5,8	6,2
Oxigênio molecular (O ₂)	%	8,2	7,9	6,8	7	9,4	9,8	8,7

Outro parâmetro monitorado no período foi a densidade colorimétrica, que permitiu avaliar a densidade da fumaça lançada na atmosfera, a partir da comparação com uma escala gráfica, denominada de escala de Ringelmann. Em todo o período de amostragem, a densidade colorimétrica ficou abaixo de 20%, estando de acordo com o que estabelece a Resolução CONAMA nº 08, de 06 de dezembro de 1990¹³ para áreas a serem atmosféricamente preservadas.

O principal parâmetro de interesse avaliado durante o estudo, entretanto, foi o monóxido de carbono (CO), considerando-se sua importância como indicador da poluição atmosférica em caldeiras com baixa potência nominal. Nos períodos referentes às duas primeiras amostragens (janeiro e junho de 2012), a concentração encontrada foi bastante baixa, isto é, inferior a 1 mg/nm³ (ou 1 ppm). Nas demais amostragens, a concentração de CO aumentou, atingindo 26 mg/nm³ em 2013 (Tab. 1). Estes valores podem ser explicados com base na demanda produtiva da indústria. De novembro de 2012 a maio de 2013, a produção de asfalto foi mais elevada, e turnos de 12 horas de operação da caldeira eram comuns no período. Um novo aumento da produção ocorreu entre março e agosto de 2014, coincidindo, também, com concentrações mais elevadas de CO – 10,5 mg/nm³ e 15,8 mg/nm³, respectivamente.

É importante salientar que o aumento do tempo de operação da caldeira não implica, necessariamente, na maior geração de CO. Entretanto, alguns fatores operacionais estão associados ao aumento na produção deste gás, entre eles, a mistura inadequada do ar de combustão com o combustível a ser consumido, e a ausência da combustão completa, devido ao fornecimento insuficiente de ar ao equipamento. Assim, períodos de maior operação demandam ajustes no equipamento visando sua adequada manutenção; entretanto, alguns fatores podem ser subestimados, como por exemplo, o aumento da demanda de ar para resfriamento do sistema, levando à inadequação do fornecimento de ar para a combustão e o conseqüente aumento na produção de CO¹⁴. Entretanto, embora a concentração de CO tenha aumentado em algumas das amostragens realizadas, todos os valores encontrados estiveram de acordo com a Resolução CONAMA nº 436/2011¹¹ (Anexo II, item 3.1), que estabelece o limite máximo de emissão de CO como sendo igual à 80 mg/ nm³ (ou 80 ppm), considerando-se sistemas de geração de calor, a partir da combustão externa de gás natural, com potência nominal de até 10 MW.

A quantidade de poluentes atmosféricos gerados em um sistema de geração de calor está intimamente relacionada com as características do combustível utilizado para a queima⁹. Entre os combustíveis de origem fóssil, o gás natural é aquele cuja combustão apresenta menor produção de poluentes atmosféricos e, portanto, uso mais adequado em sistemas de caldeiras, mesmo aquelas de pequeno porte, como a que foi avaliada durante este estudo. Deve-se ressaltar, entretanto, que a produção de CO não depende apenas do combustível, e a manutenção adequada do sistema, visando uma maior eficiência no processo de combustão e a redução dos efluentes atmosféricos, deve ser levada a efeito, mesmo em sistemas com baixa potência nominal¹².

O dióxido de enxofre (SO₂) não apresentou concentrações significativas ao longo do estudo, mantendo-se sempre abaixo do limite de detecção do equipamento (1 mg/ nm³ ou 1 ppm). Este resultado está de acordo com as características do gás natural, que apresenta menor quantidade de enxofre quando comparado com outros combustíveis fósseis, como o carvão. De fato, de acordo com Coykendall¹⁰, dependendo do *blend*, ou mistura, o carvão pode apresentar até 5% de sua composição em enxofre, que é convertido em óxidos de enxofre durante o processo de combustão. Além de ser um agente danoso ao meio ambiente, originando material particulado na atmosfera e o fenômeno conhecido como chuva ácida, o dióxido de enxofre também contribui para a corrosão e incrustação em caldeiras, reduzindo o tempo de vida útil destes equipamentos¹⁵. Assim, a escolha de combustíveis com reduzida concentração de enxofre torna-se vantajosa tanto do ponto de vista ambiental, quanto operacional.

As concentrações de óxidos de nitrogênio, monitoradas na forma de NO₂ durante o estudo, variaram de abaixo do limite detectável (1 ppm), até o valor máximo de 140 mg/ nm³. Apesar do dióxido de nitrogênio não apresentar limites de emissão para caldeiras de pequeno porte estabelecidos na norma ambiental brasileira, cerca de 40% das emissões de óxidos de nitrogênio oriundas de fontes estacionárias são originárias de caldeiras presentes em usinas elétricas¹⁶. Além disso, quando presente na atmosfera, o dióxido de nitrogênio torna-se altamente reativo, podendo originar ozônio troposférico, o que acarreta diversos riscos à saúde humana e ambiental³. Dessa forma, a minimização da emissão de dióxido de nitrogênio na atmosfera, mesmo em sistemas de geração de calor de pequeno porte, deve ser entendida como um importante mecanismo para a redução da poluição atmosférica em centros urbanos. Uma das formas em se alcançar este objetivo encontra-se na adição de ar excedente para a combustão nas caldeiras, com o controle da temperatura da chama, o que além de minimizar a geração de óxidos de nitrogênio, também leva à redução da produção de CO e material particulado¹².

Outros parâmetros avaliados durante o estudo foram a porcentagem de dióxido de carbono (CO₂) e oxigênio molecular (O₂) presentes no efluente atmosférico. Seu monitoramento reside na importância de que, apesar de não serem diretamente tóxicos ao homem, estes parâmetros podem informar sobre a eficiência da combustão das caldeiras. Para o uso de gás natural como combustível, o teor de CO₂ considerado ótimo no efluente de combustão encontra-se em torno de 10%¹⁷. Entre as amostragens realizadas, aquela cuja concentração de CO₂ mais se aproximou deste valor foi a de maio de 2013, em que foi observado um teor de 9,2% deste gás, período também caracterizado pela maior atividade da caldeira e emissão mais elevada de monóxido de carbono. Assim, para que efetivamente o processo possa unir eficiência à redução da emissão de efluentes atmosféricos tóxicos, o monitoramento do processo deve ser acompanhado de medidas mitigadoras do lançamento destes poluentes. Como visto anteriormente, esta redução está associada, entre outros fatores, ao ar em excesso adicionado ao processo.

O oxigênio presente no efluente de combustão é um parâmetro associado diretamente ao ar em excesso adicionado à combustão, que leva não só à maior eficiência de operação, como também auxilia na redução da emissão de gases poluentes, como o CO. Valores entre 7% e 10% de O₂ no efluente atmosférico indicam eficiência entre 75% e 80%, dependendo da temperatura da pilha¹⁷. Apesar de não serem indicadores diretos da poluição atmosférica, parâmetros relacionados à eficiência da combustão podem ser utilizados na gestão e monitoramento de recursos, reduzindo os impactos ambientais nos diversos setores produtivos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando o crescimento progressivo da poluição atmosférica nos centros urbanos, os países, particularmente aqueles em desenvolvimento como o Brasil, tem como desafio reduzir a quantidade de poluentes lançados na atmosfera sem, entretanto, comprometer o desenvolvimento

econômico e social de suas populações. Para isso, é essencial que sejam estabelecidos mecanismos para a redução dos impactos na atmosfera, monitorados através de normas e legislações específicas.

Durante um período de monitoramento de três anos, foram avaliadas as emissões atmosféricas geradas pela combustão do gás natural em uma caldeira flamotubular, com destaque para o CO gerado no processo. De acordo com a norma ambiental brasileira, este gás é o único parâmetro de emissão a ser monitorado em sistemas de geração de calor de até 10 MW. Entretanto, monitorar os lançamentos de outros gases contaminantes na atmosfera, como SO₂ e NO₂, torna-se uma ferramenta útil para avaliar o impacto ambiental que caldeiras de pequeno porte, bastante comuns em diversos setores produtivos, podem causar.

Dentre as diversas variáveis operacionais, aquela que mais interfere na produção de poluentes atmosféricos é o combustível utilizado na combustão. Considerando-se os combustíveis fósseis, o gás natural apresenta reduzidos impactos ambientais, principalmente quando comparado ao carvão. Durante todo o período de monitoramento realizado neste estudo, as emissões de CO originadas a partir da combustão do gás natural ficaram abaixo do limite máximo estabelecido pela Resolução CONAMA nº 436/2011. O uso de fontes alternativas de combustível é, de fato, uma das medidas indiretas mais eficazes de controle da poluição atmosférica, e deve ser considerada, juntamente com o uso de tecnologias ambientalmente adequadas, para a minimização de efluentes atmosféricos em fontes fixas instaladas no Brasil.

REFERÊNCIAS

1. Brasil. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução CONAMA Nº 491, de 19 de novembro de 2018 (Revoga Resolução CONAMA 03/1990 e modifica Resolução 05/1989). Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=740>. Acesso em: 14 fev. 2019.
2. Tundo, P., Zecchini F. (2007) A mudança do clima global. O efeito estufa e a diminuição da camada de ozônio. Poligrafica Venezia, 48 p. Disponível em: http://www.incaweb.org/publications/pdf/climate_monograph_por.pdf. Acesso em: 27 fev. 2019.
3. Seinfeld, J. H., Pandis, S. N. (2016). Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change. Nova Jersey: John Wiley & Sons, 1152 p.
4. Prockop, L. D., Chichkova, R. I. (2007). Carbon monoxide intoxication: an updated review. Journal of the neurological sciences, v. 262, n.1-2, p. 122-130.
5. Badr, O., Probert, S. D. (1995). Sinks and environmental impacts for atmospheric carbon monoxide. Applied energy, v. 50, n. 4, p. 339-372.
6. Buchmann, B., Hueglin, C., Reimann, S., Vollmer, M. K., Steinbacher, M., Emmenegger, L. (2016). 18 reactive gases, ozone depleting substances and greenhouse gases. In: Weather observations to atmospheric and climate sciences in Switzerland: Celebrating 100 years of the Swiss Society for Meteorology. Zurique: vdf Hochschulverla, 456 p.
7. Zhong, Q., Huang, Y., Shen, H., Chen, Y., Chen, H., Huang, T., *et al.* (2017). Global estimates of carbon monoxide emissions from 1960 to 2013. Environmental Science and Pollution Research, v. 24, n.1, p. 864-873.
8. Associação Brasileira de Normas Técnicas- ABNT. NR 13. Caldeiras e Vasos de Pressão (113.000-5). Rio de Janeiro, 18 p. 2014. Disponível em: <http://www.saude.mt.gov.br/arquivo/1862> Acesso em: 10 fev. 2019.
9. Li, C., Gillum, C., Toupin, K., Park, Y. H., & Donaldson, B. (2016). Environmental performance assessment of utility boiler energy conversion systems. Energy conversion and management, v. 120, p. 135-143.

10. Coykendall, L. H. (1962). Formation and Control of Sulfur Oxides in Boilers. *Journal of the Air Pollution Control Association*, v. 12, n. 12, p. 567-591.
11. Brasil. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução CONAMA N° 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). Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=660> Acesso em: 14 fev. 2019.
12. Cleaver-Brooks, Inc. (2010) Boiler Efficiency Guide. Facts about firetube boilers and boiler efficiency. Thomasville, 22 f. Disponível em: <http://cleaverbrooks.com/reference-center/insights/Boiler%20Efficiency%20Guide.pdf>. Acesso em: 23 fev. 2019.
13. Brasil. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução CONAMA N° 08, de 28 de dezembro de 1990 (Dispõe sobre o estabelecimento de limites máximos de emissão de poluentes no ar para processos de combustão externa de fontes fixas de poluição). Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=105> Acesso em: 20 fev. 2019.
14. Halley, G. (1998) Boiler/ burner combustion air supply requirements and maintenance. *National Board Bulletin*, 5 p. Disponível em: <https://www.nationalboard.org/index.aspx?pageID=164&ID=236>. Acesso em: 24 fev. 2019.
15. Krause, H. H., Vaughan, D. A., Boyd, W. K. (1975). Corrosion and deposits from combustion of solid waste—Part III: effects of sulfur on boiler tube metals. *Journal of Engineering for Power*, v. 97, n.3, p. 448-452.
16. United States Environment Protection Agency- USEPA. Nitrogen Oxides (NO_x), why and how they are controlled. Technical Bulletin, Clean Air Technology Center (MD-12). EPA-456/F-99-006R. 1999, 48 p.
17. Engineering ToolBox (2003). Combustion Efficiency and Excess Air. Disponível em: https://www.engineeringtoolbox.com/boiler-combustion-efficiency-d_271.html. Acesso: 27 fev. 2019.