ISSN: 2594-6153

Metodologia de Cálculo de Emissões Atmosféricas Diretas em um Forno de Processo a Gás

Alexandre Tiago Martins, Aldo Ramos Santos

Universidade Santa Cecília – UNISANTA, Rua Oswaldo Cruz, 277, Santos - SP, CEP 11045-907

E-mail: alexandre.engenharia@yahoo.com

Resumo: Este estudo visa demonstrar uma metodologia de cálculo para as emissões de poluentes além dos estequiométricos (CO, CH_4, N_2O, NO_x, PM, NMHC, THC) em um forno industrial que utiliza gás metano como combustível. O procedimento baseou-se na coleta de dados experimentais de bancos de dados internacionais, combinada com o cálculo dos fatores de emissão estequiométricos de CO_2, SO_2, H_2O e $V_{Gás}$. A partir desses dados, foram obtidos os fatores de emissão tabelados para os poluentes em questão, permitindo a quantificação das emissões totais do forno.

Palavras-chave: Gás natural, emissões de poluentes, forno industrial, metano

Direct Emission Calculation Methodology for a Gas Furnace

Abstract: This study aims to demonstrate a methodology for calculating emissions of pollutants considered beyond stoichiometric ones, which are: CO, CH_4, N_2O, NO_x, PM (Particulate Matter), NMHC (Non-methane Hydrocarbons), THC (Total Hydrocarbons), for a specific process furnace that uses methane gas as fuel. The methodology employed is based on the collection of experimental data from international databases, combined with the calculation of stoichiometric emission factors for CO_2, SO_2, H_2O and V_{Gas}. From these data, the tabulated emission factors for the pollutants in question were obtained, allowing the quantification of the total emissions of the furnace.

Keywords: Natural gas, pollutant emissions, industrial furnace, methane

Introdução

Emissões diretas de um forno referem-se aos poluentes liberados diretamente para a atmosfera durante o processo de combustão ou outras operações do forno. Essas emissões são um ponto crucial a ser considerado, uma vez que podem ter um impacto significativo na qualidade do ar local e global [2].

O gás natural é um dos principais combustíveis utilizados em todo o país. É usado principalmente para gerar energia elétrica industrial e de utilidade pública, produzir vapor e calor para processos industriais e aquecer espaços residenciais e comerciais [3].

O gás natural consiste em uma alta porcentagem de metano (geralmente acima de 85%) e quantidades variáveis de etano, propano, butano e inertes (tipicamente nitrogênio, dióxido de carbono e hélio) [3].

ISSN: 2594-6153

Fornos são equipamentos utilizados para aquecimento do petróleo para a destilação, aquecimento de carga em vários processos e separadores ou tratadores de óleo [3].

Objetivo

O objetivo deste estudo é demonstrar uma metodologia de cálculo de emissões de poluentes considerados além dos estequiométricos que são: CO, CH_4, N_2O, NO_x, PM (Material Particulado), NMHC (Hidrocarbonetos não metano), THC (Hidocarbonetos totais), para um determinado forno de processo que utiliza gás metano como combustível.

Materiais e Métodos

As emissões consideradas neste estudo incluem poluentes que foram hipoteticamente gerados através de reações ou processos que dependem do equipamento, condições termodinâmicas e tipo de combustível (sólido, líquido ou gasoso).

Por isso elas foram quantificadas através de medidas experimentais conhecidas, coletadas ao longo de vários anos, existentes em banco de dados reconhecidos internacionalmente.

Para quantificar as emissões de poluentes da fonte de combustão, o primeiro passo foi calcular os fatores de emissões de CO_2, SO_2, H_2O e $V_{Gás}$ (vazão de gás de combustão por unidade de massa de combustível) estequiométricos de acordo com o combustível queimado e, em seguida, buscou-se em banco de dados os fatores de emissão tabelados de CO, CH_4, N_2O, NO_x, PM, NMHC, classificados por fonte, características específicas da fonte e tipos de combustível.

Como mostrado na Tab. 1 e na Tab. 2, a fonte “forno” possui os fatores de emissões destes poluentes classificados por capacidade térmica do equipamento e tipo de combustível (Óleo Combustível, Diesel, Gás, GLP, Coque e Carvão) [1].

Tabela 1 - Fatores de Emissões dos Poluentes das Caldeiras e Fornos de Grande Capacidade

Fatores de Emissões de Poluentes Caldeiras e Fornos Grande Capacidade > 25,9 MW						
Combustível	NO_x	CO	PM	CH_4	NMHC	N_2O
Gás	3,21E-03	1,42E-03	1,29E-04	3,89E-05	1,47E-04	3,72E-05

Fonte: Protocolos Emissões de Poluentes EPA

ISSN: 2594-6153

Tabela 2 - Fatores de Emissões dos Poluentes das Caldeiras e Fornos de Pequena Capacidade

Fatores de Emissões de Poluentes Caldeiras e Fornos Pequena Capacidade <= 25,9 MW						
Combustível	NO_x	CO	PM	CH_4	NMHC	N_2O
Gás	1,69E-03	1,42E-03	1,29E-04	3,89E-05	1,47E-04	3,72E-05

Fonte: Protocolos Emissões de Poluentes EPA

A unidade de medida utilizada nos fatores para Gás é kg poluente/m^3 (a 0ºC e 1 atm) de combustível úmido.

A fórmula adotada para a quantificação das emissões através de fatores tabelados pelas instituições internacionais, é dada pela eq. (1):

$$M_{Poluente} = F_{Poluente} \times A_{Fonte} \times (1 - \eta_{Abatimento}) \quad (1)$$

Onde:
$M_{Poluente}$: Massa de poluente emitida;
$F_{Poluente}$: Fator de emissão do poluente tabelado;
A_{Fonte} : Atividade da fonte ou dos tipos da fonte;
$\eta_{Abatimento}$: Eficiência do tipo de abatimento adotado para o poluente;

O fator de emissão do hidrocarboneto total (FTHC) é a soma do fator do metano (FCH_4) mais o fator do hidrocarboneto não metano (FHCNM) conforme apresentado na eq. (2):

$$F_{THC} = F_{CH_4} + FHCNM \quad (2)$$

De acordo com a equação (1) podemos escrever para fornos e caldeiras de acordo com a eq. (3):

$$M_{Poluente} = F_{Poluente,capacidade,combustível} \times M_{Combustível} \times (1 - \eta_{Abatimento}) \quad (3)$$

Onde:
$M_{Poluente}$: massa de poluente emitida mensal por massa poluente por mês;
$M_{Combustível}$: Massa de combustível úmido consumida mensalmente, massa de combustível por mês;
$F_{Poluente,capacidade,combustível}$: Fatores de emissões de acordo com o poluente, capacidade do equipamento e tipo de combustível, massa de poluente por massa combustível consumido.

No caso dos combustíveis do tipo gás, os fatores de emissões são dados em massa (kg) de poluente por volume (m^3) de combustível consumido. Por isso os fatores tabelados destes combustíveis deverão ser transformados em kg de poluente por kg combustível consumido da seguinte forma descrita na eq. (4):

ISSN: 2594-6153

$$F_{Poluente,capacidade,combustível} = \frac{F_{Poluente,capacidade,combustível}}{\rho_{Combustível}} \quad (4)$$

Onde:
$F_{Poluente,capacidade,combustível}$= fatores de emissões tabelados de acordo com o poluente, só para os combustíveis óleo, diesel e gás, kg de poluente por m^3 de combustível consumido;
$\rho_{Combustível}$ = densidade do combustível calculada no caso de gases (equação (10.1)), em kg por m^3 de combustível.

A emissão do NO_x em fornos e caldeiras depende do tipo de tiragem, se forçada ou natural, do tipo de queimador, se especialmente projetado para baixas emissões de NO_x ou convencional, do coeficiente de excesso de ar, se menor que 1,2 ou maior e igual a 1,2, do tipo de combustível fluido, se gás ou líquido e da temperatura de entrada do ar de combustão dos fornos e caldeiras. Para o combustível sólido o fator multiplicativo de correção para as emissões de NO_x é igual a 1 [1].

Para a emissão do poluente NO_x a eq. (1), torna-se como descrito na eq. (5):

$$M_{NO_x} = F_{NO_x,capacidade,combustível} \times M_{Combustível} \times FM_{NO_x} \quad (5)$$

Onde:
M_{NO_x} : Massa de poluente emitida;
$F_{NO_x,capacidade,combustível}$: Fator de emissão do poluente tabelado;
FM_{NO_x} : Fator multiplicativo de Correção das emissões de NOx, função da temperatura de saída dos gases de combustão da chaminé do forno ou da caldeira.

O cálculo para FM_{NO_x}é feito segundo o polinômio na eq. (6):

$$FM_{NO_x} = A \times T^5_{Ar\ Combustão} + B \times T^4_{Ar\ Combustão} + C \times T^3_{Ar\ Combustão} + D \times T^2_{Ar\ Combustão} + E \times T_{Ar\ Combustão} + F \quad (6)$$

Onde:
$T_{Ar\ Combustão}$= Temperatura de entrada do ar de combustão na caldeira ou forno;
A, B, C, D, E, F= Coeficientes do polinômio do fator multiplicativo de correção das emissões de Nox;

Os coeficientes do polinômio são função do tipo de combustível, da tiragem dos gases de combustão, do excesso de ar para um Forno, conforme indicado na Tab.3 [1]:

Para combustíveis gasosos, normalmente é informada em análise laboratorial a cromatografia que contém os teores volumétricos de cada composto presente no gás (metano, etano e propano) [1].

A partir destes dados, das massas molares de cada composto e do próprio gás, é possível obter os teores mássicos de carbono e enxofre do gás.

ISSN: 2594-6153

Tabela 3 – Coeficientes do Polinômio do Fator Multiplicativo de Correção das Emissões de Nox_x. Lb=Coeficiente de Excesso de Ar.

COMBUSTÍVEL	TIRAGEM		Coeficientes do Fator Multiplicativo de Correção de NO_x, $FMINO_x$, em Fornos					
			A	B	C	D	E	F
Gás Natural e GLP	Convecção Natural	Lb<1,2	7,19E-12	-4,38E-09	9,96E-07	-1,09E-04	0,006514	9,51E-01
Gás Natural e GLP		Lb>=1,2	6,00E-12	-3,40E-09	7,26E-07	-8,09E-05	0,005816	0,9797
Gás Natural e GLP	Convecção Forçada	Lb<1,2	6,18E-12	-3,76E-09	8,83E-07	-0,0001058	0,007282	0,9585
Gás Natural e GLP		Lb>=1,2	4,27E-12	-2,41E-09	5,51E-07	-7,44E-05	0,006579	0,9859
Gás Natural e GLP	Convecção Natural	Lb<1,2	3,41E-12	-1,92E-09	3,67E-07	-2,65E-05	0,001646	0,5731
Gás Natural e GLP	Baixo NO_x	Lb>=1,2	2,68E-12	-1,35E-09	2,02E-07	-5,27E-06	0,000737	5,84E-01
Gás Natural e GLP	Convecção Forçada	Lb<1,2	5,41E-12	-3,53E-09	8,37E-07	-8,71E-05	0,004612	6,34E-01
Gás Natural e GLP	Baixo NO_x	Lb>=1,2	3,85E-12	-2,47E-09	5,92E-07	-6,68E-05	0,004498	6,53E-01

Fonte: Protocolos Emissões de Poluentes EPA

Resultados e Discussão

Este estudo viabilizou a quantificação das emissões de poluentes além dos estequiométricos, CO, CH_4, N_2O, NO_x, PM, NMHC, THC, em um forno industrial que utiliza gás metano como combustível, através de uma abordagem simples e direta das equações e tabelas com resultados empíricos, coletadas em bancos de dados internacional.

Conclusões

Conclui-se que o método de cálculo contribuiu significativamente ao ser realizado com as premissas empíricas existentes nos bancos de dados internacionais disponíveis, mitigando o excesso de emissões atmosféricas diretas na operação do forno de processo em questão ou mesmo para obtenção de licenciamento ambiental para um novo empreendimento.

Referências

1. US Environmental Protection Agency (EPA). AP 42, Fifth Edition, Volume I Chapter 1: External Combustion Sources. 2024 [internet]. 2024-08-18; citado em 2024-08-18. Disponível em: https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-fifth-edition-volume-i-chapter-1-external-0.
2. Engineering Science. Exhaust Gases from Combustion and Industrial Processes. 1971. EPA, EPA Contract No. EHSD 71-36, Washington, DC.
3. Perry JH. Chemical Engineers Handbook. 1963. McGraw-Hill Book Company, New York, NY.