

SISTEMAS DE CAPTAÇÃO, EXAUSTÃO, LIMPEZA DE GASES E RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA EM PROCESSOS SIDERÚRGICOS COM FILTROS DE MANGAS E TROCADORES DE CALOR*

Joaquim Luiz Monteiro de Barros¹
Fabiana Moreira Costa²

Resumo

Este trabalho tem como objetivo principal apresentar de forma didática e através de exemplo prático, os processos de limpeza de gases de exaustão durante a produção de ferro e aço para atendimento as normas ambientais e a possibilidade da recuperação de energia térmica desses gases captados para aumento da eficiência energética das plantas siderúrgicas.

Palavras-chave: Recuperação de calor; Eficiência; Limpeza de Gases; Depoeiramento.

EXHAUST SYSTEM, GAS CLEANING AND ENERGY RECOVERY SYSTEMS IN STEELMAKING PROCESSES WITH BAG FILTERS AND HEAT EXCHANGERS

Abstract

The purpose of this paper is to present, in a didactic way and with practical example, the cleaning processes of exhaust gases during the production of iron and steel to comply with environmental standards and the possibility of recovering thermal energy of these gases for increased energy efficiency of steelmaking plants.

Keywords: Heat recovery, Efficiency; Clean gas System, Dedusting.

¹ Engenheiro Mecânico, Mestre em Economia com ênfase em Energia, Pós Graduado em Eficiência Energética, Diretor de Desenvolvimento de Negócios, Kuttner do Brasil, BH, MG, Brasil.

² Engenheira Eletricista e Engenheira de Energia PUC-MG, Assistente de Desenvolvimento de Negócios, Kuttner do Brasil, BH, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Em diversas etapas do processo de produção de ferro e aço, tem-se a necessidade de realizar a captação, exaustão e limpeza de gases diversos ou do próprio ar atmosférico com contaminantes, antes de lançá-los na atmosfera.

Estes processos são imprescindíveis para atender as normas ambientais vigentes, de forma a se reduzir ao máximo as emissões atmosféricas, em todas as etapas da produção.

Em diversas situações, temos o gás de captação a uma temperatura consideravelmente elevada e com isto, pode-se recuperar energia térmica, antes de lançar os mesmos na atmosfera. Com esta recuperação de calor, consegue-se uma maior eficiência energética e uma redução do custo operacional.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Principais Componentes de um Sistema de Limpeza de Gases com Filtro de Mangas

2.1.1 Captadores e Coifas

Dispositivos responsáveis pela captação dos gases e/ou ar a serem tratados nos diversos pontos do sistema. A captação se dá pelas diferenças de pressão e a velocidade de sucção. O correto design destes itens é fundamental para que o sistema de exaustão tenha uma eficiência adequada.

2.1.2 Rede de Dutos

A rede de dutos cumpre o papel de interligar cada ponto de captação ao equipamento de limpeza de gases. É de extrema importância o correto dimensionamento de suas seções de escoamento para cada trecho em função de sua velocidade interna. Áreas muito pequenas levam a altas velocidades e a altos desgastes. Áreas muito grandes levam a baixas velocidades e a deposição de material no interior dos dutos. Como velocidade usual em dutos de despoejamento, recomenda-se valores entre 15 e 20 m/s. O cálculo do diâmetro do duto é dado pelas seguintes fórmulas:

$$A = \frac{Q}{V} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

- A = área em m²
- Q = vazão em m³/s
- V = velocidade de fluxo dentro do duto em m/s

Para dutos com seção circular, teremos o diâmetro interno determinado pela fórmula abaixo:

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{\pi V}} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

- D = diâmetro em m
- Q = vazão em m³/s
- V = velocidade de fluxo dentro do duto em m/s

2.1.3 Filtro de Mangas

Equipamento cujo objetivo é separar o material particulado seco do ar e/ou gases. O processo de filtragem se dá através da passagem do fluxo de gás pelas mangas (elementos filtrantes), proporcionando uma alta eficiência de retenção além de uma elevada confiabilidade operacional.

O gás filtrado sai pelo “pleno de gás limpo” em direção a uma chaminé ou para utilização em algum outro processo enquanto que os particulados retidos nas mangas desprendem-se das mesmas por meio do sistema de limpeza do filtro (usualmente por sopro de ar comprimido), são conduzidos à moega de pó e retirados da mesma geralmente por válvulas rotativas precedidas ou não por transportadores helicoidais ou transportadores de arraste.

As alternativas construtivas e características dos filtros de mangas devem ser selecionadas em função da aplicação e da vazão de trabalho. Dessa forma, a informação dos dados de processo (composição dos gases, composição dos particulados, granulometria dos particulados, vazão, temperatura, pressão e umidade dos gases, etc.) é fundamental para o correto dimensionamento e projeto do filtro.

As mangas podem ser fabricadas com diversos tipos de tecidos, formas e dimensões, que devem ser adequadas para atender as aplicações específicas e as condições operacionais. A tabela abaixo apresenta as propriedades dos principais materiais utilizados para fabricação das mangas filtrantes, assim como suas aplicações.

Tabela 1. Características e aplicações dos materiais filtrantes

CARACTERÍSTICA	MATERIAIS FILTRANTES						
	Polipropileno	Poliéster	Acrílico	Aramida	Polifenilsulfeto	Polimida	PTFE
Temperatura de trabalho	90° C	140° C	130° C	200° C	180° C	240° C	250° C
Temperatura máxima	100° C	150° C	135° C	200° C	190° C	240° C	270° C
Abrasão	A	A	A	A	A	A	A
Ácidos	A	NA	A	NA	A	A	A
Alcalinos	A	NA	A	A	A	NA	A
Hidrólise do Calor Úmido	A	NA	A	NA	A	A	A
Oxidantes	A	A	A	A	NA	A	A

A – Aplicável
NA- Não Aplicável.

2.1.4 Exaustor

É o equipamento responsável pelo fornecimento de energia cinética ao gás e/ou ar captado. O dimensionamento do ventilador deve levar em consideração a vazão necessária e a perda de carga do sistema.

2.1.5 Chaminé

Sua função é de conduzir os gases limpos para a atmosfera. Sua altura é determinada para cada tipo de aplicação e de acordo com as normas locais. No dimensionamento do diâmetro da chaminé vale a mesma fórmula utilizada para a rede de dutos, recomenda-se velocidades entre 10 a 15 m/s para se evitar ruídos acima do permitido. Em alguns casos é necessária a instalação de silenciadores ou de isolamento acústico em seu corpo, assim como isolamento térmico.

2.2 Resumo Técnico Teórico sobre Recuperação de Calor

2.2.1 Recuperador de Calor

Recuperador de calor é um dispositivo especificamente projetado para aproveitar a energia residual, em forma de calor, contida nos gases quentes da exaustão de fornos, caldeiras, aquecedores, motores, turbinas, entre outros equipamentos térmicos. O reaproveitamento desta energia, normalmente se dá através do aquecimento do ar, de combustíveis, da água, de fluidos térmicos, da geração de vapor. Desta forma, reintegra-se a energia recuperada ao processo produtivo, aumentando a eficiência global do mesmo.

2.2.2 Cálculo do Calor (Energia) Recuperável

Para se calcular a quantidade de energia recuperável através do aproveitamento do calor dos gases quentes da exaustão de um equipamento térmico, deve-se utilizar a expressão matemática abaixo:

$$Q = \dot{m} \times c_p (t_E - t_S) \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

- Q = quantidade de calor recuperável por unidade de tempo (potência térmica);
- \dot{m} = vazão mássica dos gases quentes;
- c_p = calor específico dos gases quentes;
- t_E = temperatura de entrada dos gases quentes no recuperador de calor;
- t_S = temperatura de saída dos gases quentes no recuperador de calor.

2.2.3 Dimensionamento Básico de Recuperador

De forma geral, nos recuperadores utilizados nos diversos processos industriais, a transferência de calor se dá predominantemente através da condução e convecção. Desta forma, o seu dimensionamento básico é dado pelas expressões a seguir:

$$Q = U \times A \times DTML \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

- Q = quantidade de calor trocado por unidade de tempo;
- U = coeficiente global de transferência de calor;
- A = área de troca térmica necessária;
- $DTML$ = diferença média logarítmica de temperatura.

O coeficiente global de transferência de calor em paredes planas pode ser calculado conforme abaixo:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\Delta x}{K} + \frac{1}{h_2}} \quad (\text{Equação 5})$$

Para um trocador de calor com feixe tubular, a fórmula básica para o cálculo do coeficiente global de calor é apresentada abaixo:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{A \times \ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{2\pi KL} + \frac{A_i}{A_e} \times \frac{1}{h_e}} \quad (\text{Equação 6})$$

Somente com o caráter orientativo, abaixo é apresentado uma tabela com valores práticos dos coeficientes globais de transferência de calor, para algumas aplicações usuais:

Tabela 2. Valores práticos de U.

APLICAÇÕES	$U = \left(\frac{w}{m^2 c} \right)$
Trocador de calor AR-AR	10 – 50
Trocador de calor AR-GAS	10 – 50
Trocador de calor Água-Água	900 – 1400
Trocador de calor Água-Óleo	100 – 400
Trocador de calor Vapor-Óleo	60 – 180

2.2.4 Cálculo do Fator de Correção (IF)

Outro importante ponto que deve ser levado em consideração quando se dimensiona um trocador de calor é que o mesmo durante o seu ciclo operacional pode “sofrer” incrustações em sua área de troca térmica, devido ao contato contínuo com os fluidos de trabalho e que esta camada de incrustação muitas vezes atua como um isolante térmico, reduzindo a capacidade de troca de calor do equipamento.

O fator de incrustação pode ser determinado de forma experimental através da diferença entre os valores do coeficiente global de transferência de calor nas condições iniciais de operação (“trocador limpo”) e após um determinado período operacional onde as superfícies de troca térmica se encontram com algum grau de incrustação oriundo do contato com os fluidos de trabalho. A tabela abaixo retirada da literatura especializada neste tema, apresenta valores normalmente utilizados nos cálculos de trocadores de calor para o fator de incrustação:

Tabela 3. Valores práticos de IF.

Tipo de Fluido	$IF = \left(m^2 \frac{c}{w} \right)$
Ar	0,0004
Vapor	0,00009
Óleo	0,0007
Gás	0,0005

Uma vez determinado o fator de incrustação adequado para a aplicação específica, pode-se então calcular o valor do coeficiente global de transferência de calor do equipamento, conforme expresso abaixo:

$$IF = \frac{1}{U_{SUJO}} - \frac{1}{U_{LIMPO}} \quad (\text{Equação 7})$$

2.2.5 Cálculo aproximado da Economia de Combustível obtida através da Recuperação de Calor

Uma vez calculado a quantidade de calor recuperado no processo, com base na equação 3 e obtendo-se do valor encontrado das perdas específicas de cada sistema, pode-se ter uma ordem de grandeza da redução do consumo de combustível em um forno ou uma caldeira.

A equação abaixo apresenta como calcular a economia de combustível por unidade de tempo.

$$\dot{m} = \frac{Q\text{-perdas}}{PCI} \quad (\text{Equação 8})$$

Onde:

- \dot{m} = quantidade de combustível por unidade de tempo;
- Q = quantidade de calor recuperável por unidade de tempo;
- PCI = poder calorífico inferior do combustível.

2.3 Exemplos de Sistemas com Filtros de Mangas e Recuperação de Calor no Processo de Produção de Ferro e Aço

2.3.1 Forno Cubilô

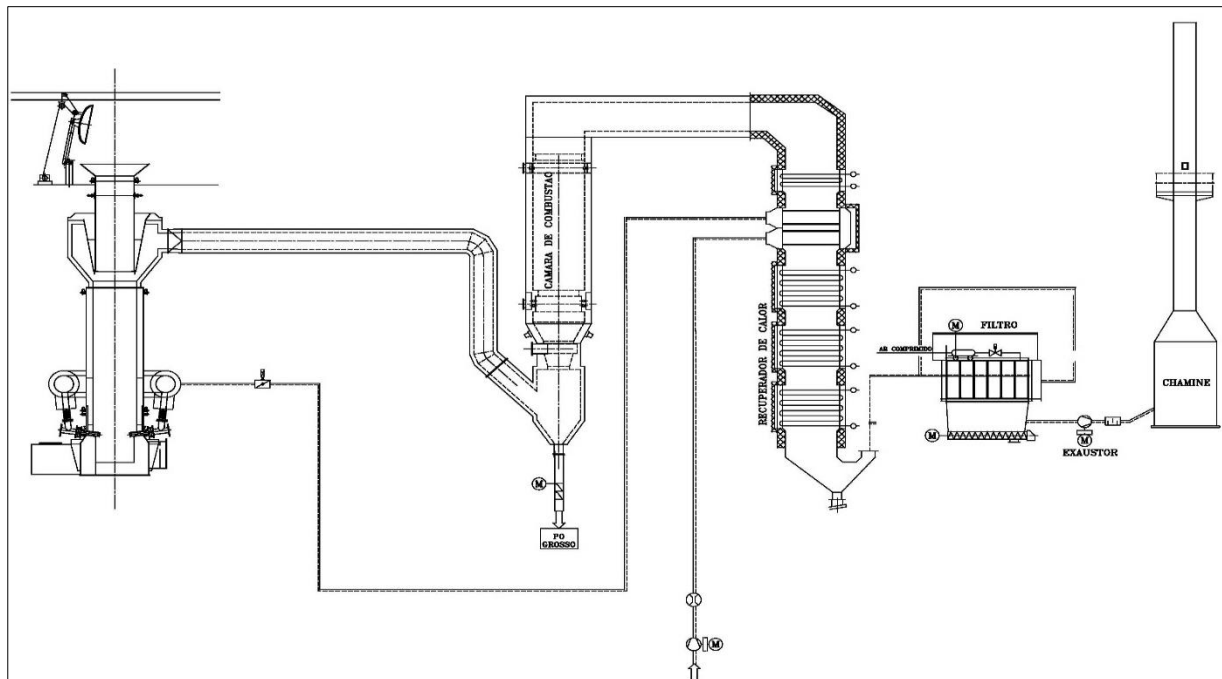


Figura 1. Fluxograma esquemático da aplicação do Heat Pipe

2.3.2 Sinterização

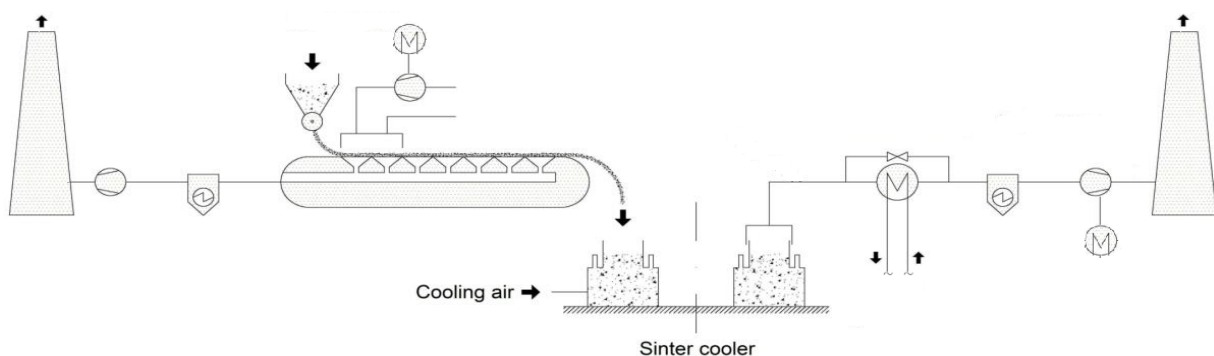


Figura 2. Desenho esquemático da instalação do recuperador de calor no sinter cooler.

2.4 Resultados e Discussão (Caso Real)

Instalação de um sistema de captação, recuperação de calor e despoeiramento no Sinter Cooler, com o objetivo de gerar vapor para o processo e lançar na atmosfera gases limpos, de forma a atender as demandas ambientais.

2.4.1 Dados da Instalação Existente

Tabela 4. Gases de exaustão do sinter cooler

Vazão	320.000 kg/h
Temperatura	350 °C
Particulados	2 g/Nm ³

2.4.2 Dados da Instalação com a Implantação do Recuperador de Calor (Gerador de Vapor)

Tabela 5. Gerador de vapor recuperativo

Vazão dos gases de exaustão	320.000 kg/h
Temperatura de entrada dos gases	350 °C
Temperatura de saída dos gases	169 °C
Capacidade térmica aproximada	16,7 MW
Vazão de vapor gerado	24,3 t/h
Pressão do vapor gerado	12 bar
Temperatura do vapor gerado	250 °C

2.4.3 Fluxograma Orientativo do Sistema de Recuperação de Calor

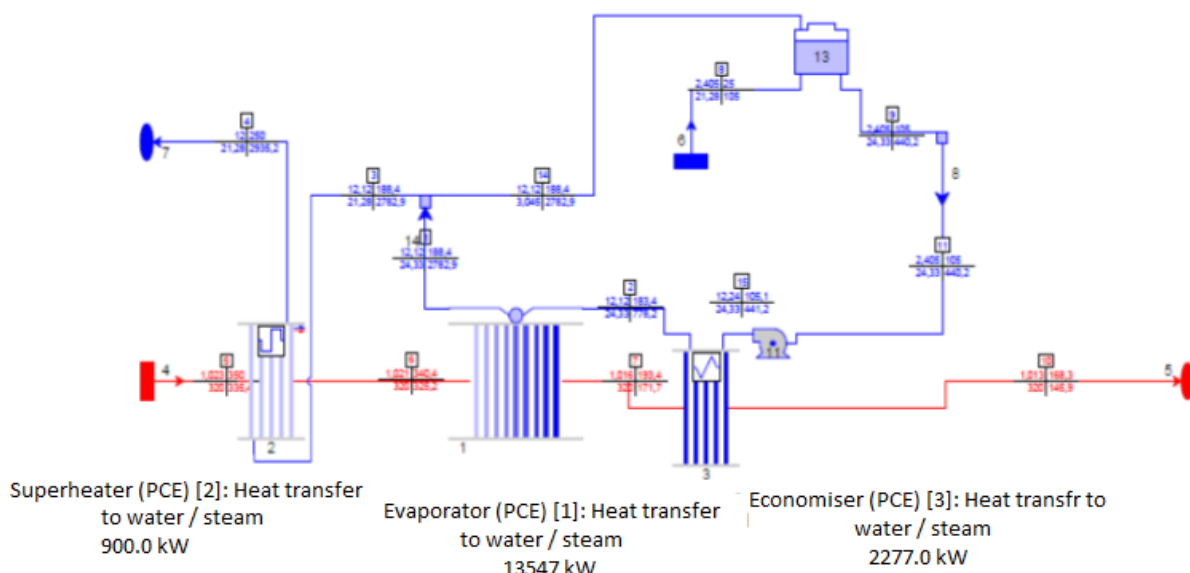


Figura 3. Fluxograma do sistema de recuperação de calor – Produção de vapor.

2.4.4 Dados da Instalação com a Implantação do Sistema de Despoeiramento

2.4.4.1 Filtro de Mangas

Tabela 6. Filtro de Mangas

Vazão dos gases de exaustão	320.000 kg/h
Temperatura de entrada dos gases	169 °C
Concentração de particulados na saída	< 20 mg/Nm ³
Área filtrante	5.192 m ²
Relação ar pano	1,3 m ³ /m ² /min
Material das mangas	Polifenilsulfeto

2.4.4.2 Exaustor

Tabela 7. Exaustor

Vazão dos gases de exaustão	320.000 kg/h
Temperatura de entrada dos gases	144 °C
Pressão estática na entrada	- 400 mmca
Diâmetro do rotor	2.269 mm
Motor elétrico	800 cv - 8p

2.4.4.3 Chaminé

Tabela 8. Chaminé

Vazão dos gases de exaustão	320.000 kg/h
Diâmetro	3.100 mm
Altura	28 m

2.4.5 Fluxograma Orientativo do Sistema de Despoeiramento

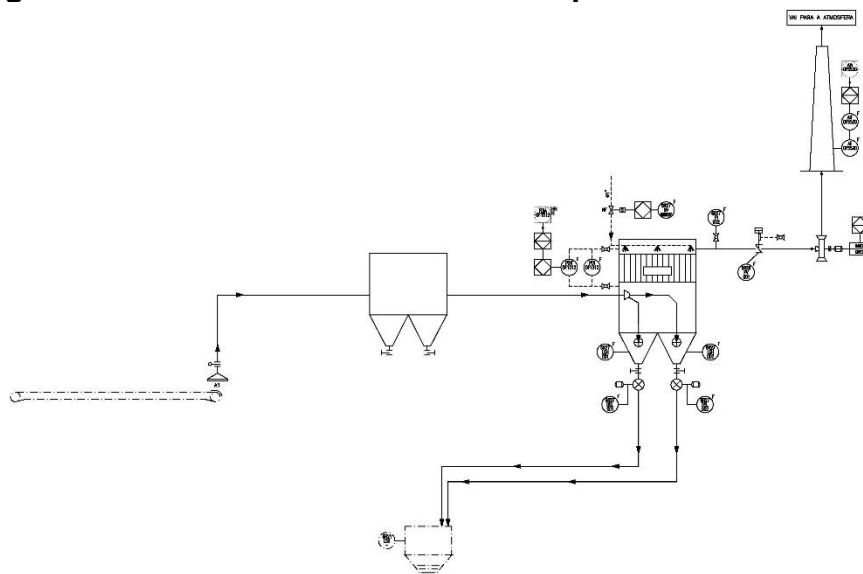


Figura 4. Fluxograma do sistema de Despoeiramento

3 CONCLUSÃO

Em uma planta de produção de ferro e/ou aço existem diversos sistemas em que se faz necessário a captação, exaustão e limpeza / despoejamento dos gases, no intuito de se atender as demandas ambientais. Existindo uma quantidade energia térmica considerável nos gases captados, é possível se recuperar o calor e utilizá-lo em outras etapas do processo, aumentando a eficiência global e reduzindo custos operacionais.

Cabe destacar, a importância do levantamento dos dados de processo e do correto dimensionamento dos sistemas de captação, limpeza e recuperação térmica, pois são pontos fundamentais para o perfeito funcionamento, no intuito de se garantir a maior eficiência possível.

REFERÊNCIAS

- 1 Incropera FP, Dewitt DP. Fundamentals of Heat transfer. New York: John Wiley & Sons; 1981.
- 2 Van Wylen G, Sonntag R, Borgnakke C. Fundamentos da Termodinâmica Clássica. 4ª edição. São Paulo: Edgard Blücher; 1995.
- 3 Barros Jr JLM. Integração de Utilidades, Recuperação de Calor e Cogeração em Sistemas de aquecimento de fluido térmico (pós-graduação). Rio de Janeiro: CEFET; 2002.
- 4 Praeger J. Waste Heat Recovery Systems_Ecostat and Ecoflow. Essen: Kuettner Energy; 2012.
- 5 Barros Jr JLM. Heat Pipe: Uma Alternativa tecnológica operacional no aquecimento de ar e gás. BH: Kuttner do Brasil; 2014.
- 6 Blast Furnace Theory and Practice – Gordon andr Breach Science Publishers – Dwight C. Brown, Terence E. Dancy and Robert L. Stephenson.
- 7 Foundations of Iron and Steel Metallurgy – Elsevier Publishing Co. LTD. - W. H. Dennis.
- 8 Metallurgy and Metallurgical Engineering Series – Mcgraw Hill Book Company – Allison Butts.
- 9 Barros Jr JLM, Patto RP, Gandra PVS. Aumento da Eficiência Energética com o Pré-Aquecimento do Ar e do Gás através da Recuperação do Calor dos Gases de Exaustão dos Regeneradores do Alto Forno. RJ: 36º Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades e 30º Encontro de Produtores de Gases Industriais, parte integrante da ABM Week, 2015.
- 10 Barros Jr JLM, Costa FMC. Sistema de Limpeza de Gases com Filtro de Mangas Horizontais: Uma Alternativa Eficiente e Ambientalmente adequada as Etapas do Processo Siderúrgico. RJ 46º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 17º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 4º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, parte integrante da ABM Week, 2016.
- 11 Margraf R. Separation of gaseous substances by means of fabric filters. Essen: 2º symposium Filtration technology – filtering na eletrostatic particle separation; 2008.
- 12 Barros JLM. Sistemas de Exaustão de Gases e Despoejamento em Fundições; 2015.
- 13 Mc Donald At. Introdução à Mecânica dos Fluidos. Rio de Janeiro. Guanabara dois; 1981.