



XXII CONGRESSO  
BRASILEIRO DE  
ENGENHARIA QUÍMICA  
23 a 26 de Setembro de 2018



XI  
S  
E  
M  
P  
O  
S  
I  
O  
D  
E  
E  
N  
G  
E  
N  
H  
E  
R  
I  
A  
D  
E  
E  
N  
E  
R  
G  
I  
A  
E  
M  
E  
I  
O  
A  
M  
B  
I  
E  
N  
T  
E  
27

# DESENVOLVIMENTO DE UNIDADE PILOTO PARA GERAÇÃO DE GASES APLICADA A ESTUDOS DE DESSULFURIZAÇÃO

PEREIRA A<sup>1</sup>, MAGALHÃES M<sup>1</sup>, NETO B<sup>1</sup>, FERNANDES F<sup>1</sup>,  
GONÇALVES L<sup>1</sup>, OLIVEIRA G<sup>2</sup>, CARTAXO S<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química

<sup>2</sup> UTE Pecém, Brazil

E-mail para contato: andrea.pereira24@gmail.com

*RESUMO – O uso de combustíveis fósseis representa 62% da geração de energia elétrica mundial, sendo o carvão o combustível com a maior participação. No entanto, sua queima produz efluentes gasosos ricos em componentes contaminantes como o SO<sub>x</sub>. O objetivo deste trabalho é projetar e construir um gerador de gás para uma unidade piloto de FGD a partir de um modelo diferencial transiente. Para isso, o gás de combustão foi gerado por meio de um sistema flamotubular cilíndrico, utilizando GPL (Gás Liquefeito de Petróleo) como combustível. Devido à ausência de SO<sub>x</sub> nos gases exaustos da combustão do GPL, quantidades de SO<sub>x</sub> foram adicionadas ao fluxo de gás para simular as condições reais de alimentação do SDA (Spray Dry Absorption). O projeto do gerador foi dividido em duas seções: câmara de combustão e resfriador. Para o resfriador, desenvolveu-se um modelo matemático rigoroso considerando um trocador de calor tipo piscina com água mantida em nível constante no reservatório (casco). Dessa forma, um modelo diferencial foi utilizado para auxiliar na concepção e otimização do sistema, onde as propriedades físicas e coeficiente global foram avaliados localmente. Com este modelo, pode-se prever o comportamento da temperatura do gás ao longo do equipamento e o tempo necessário para atingir o regime estacionário, assim como a vazão de água para compensar a evaporação e manter o nível constante.*

## 1. INTRODUÇÃO

A preocupação com as emissões de compostos de enxofre (SO<sub>x</sub>) na atmosfera tem crescido ao longo dos anos, resultando no desenvolvimento de diversas tecnologias de dessulfurização (FGD) para cumprir a legislação ambiental, que se tornou mais rigorosa nas últimas décadas (IEA, 2017; HEEBINK et al., 2007).

Em usinas a carvão, este problema assume proporções consideráveis, principalmente com o avanço da demanda por energia, conduzindo à necessidade por alternativas e soluções mais eficientes. Pensando nisso, foi realizado um *scale down* para obter taxas de fluxo de massa e calor envolvidos no processo, mantendo propriedades intensivas constantes.

A etapa de geração dos gases pode ser ilustrada pela Figura 1, onde a sequência de equipamentos queimador e resfriador equivale ao gerador de gases de combustão. Essa representação é conveniente para o desenvolvimento dos modelos matemáticos e dimensionamento. Sendo assim, o objetivo deste trabalho é projetar e construir um gerador de gases de combustão para uma unidade piloto de FGD a partir do desenvolvimento de um modelo matemático diferencial transiente.

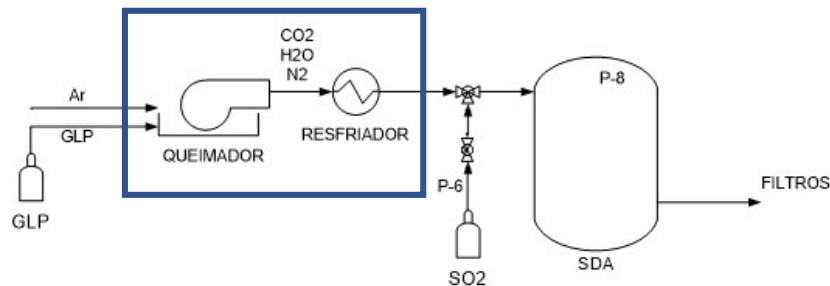


Figura 1 – Diagrama do Processo.

## 2. METODOLOGIA / MODELAGEM

### 2.1. Câmara de combustão

A câmara de combustão foi dimensionada a partir de seu volume, sendo este, calculado pela Equação 1. A carga térmica volumétrica (K) de caldeiras flamotubulares com combustível óleo ou gás variam entre 450 a 1.200 kW/m<sup>3</sup> e o poder calórico inferior (PCI) do GLP é 46.128 kJ/kg. Assim, determinou-se o volume de 0,11 m<sup>3</sup> com razão entre altura e diâmetro de 2:1 (D = 40 cm e H = 80 cm).

$$V_{cc} = \frac{\dot{m}_{cb} \cdot PCI}{K} \quad (1)$$

### 2.2. Resfriador dos gases de combustão

O projeto do trocador de calor foi realizado considerando uma passagem dos gases exaustos nos tubos e água mantida a um nível constante no casco. Devido à transferência de calor entre os fluidos, há geração de vapor. Portanto, injeta-se água a temperatura ambiente na mesma taxa mássica vaporizada. O modelo proposto apoia-se nas hipóteses simplificadoras abaixo, sendo que as propriedades físicas e o coeficiente global são avaliados localmente.

- Propriedades físicas variando com a temperatura;
- Variação unidimensional da temperatura na direção axial;
- Resistência condutiva do metal desprezível;
- Exterior do casco isolado termicamente.

O Quadro 1 traz as equações dos perfis de temperatura dos fluidos e das taxas mássicas de líquido e vapor no casco a partir dos balanços de massa e energia. De acordo com as normas TEMA (*Tubular Exchanger Manufacturers Association*) e com auxílio das simulações, pôde-se definir as dimensões do trocador, mostradas a seguir.

Quadro 1 – Equações dos perfis de temperatura e taxa mássica.

<b>Modelo matemático</b>
$\frac{\partial T_t}{\partial t} = \left( w_t \cdot cp_t \cdot \frac{\partial T_t}{\partial x} + U \cdot N \cdot P \cdot (T_t - T_c) \right) \left( \frac{-1}{\rho_t \cdot cp_t \cdot N \cdot A_t} \right)$
$\frac{\partial T_c}{\partial t} = \left[ \frac{1}{(\rho_{c_l} \cdot cp_{c_l} \cdot (1 - y) + \rho_{c_v} \cdot cp_{c_v} \cdot y) A_c} \right] \left[ -cp_{t_l} \left( w_{c_l} \frac{\partial T_c}{\partial x} + T_c \frac{\partial w_{c_l}}{\partial x} \right) - cp_{t_v} \left( w_{c_v} \frac{\partial T_c}{\partial x} + T_c \frac{\partial w_{c_v}}{\partial x} \right) + U \cdot N \cdot P \cdot (T_t - T_c) \right]$
$\frac{\partial w_{c_l}}{\partial t} = \left( \frac{-w_c}{\rho_{c_l} \cdot A_c} \right) \left( \frac{\partial w_{c_l}}{\partial x} + \frac{U \cdot N \cdot P \cdot (T_t - T_c)}{H_{vap}} \right)$
$\frac{\partial w_{c_v}}{\partial t} = \left( \frac{w_c}{\rho_{c_v} \cdot A_c} \right) \left( -\frac{\partial w_{c_v}}{\partial x} + \frac{U \cdot N \cdot P \cdot (T_t - T_c)}{H_{vap}} \right)$

### 3. RESULTADOS

Todas as condições operacionais da unidade piloto foram baseadas no SDA, devido à imposição de uma taxa mássica pré-estabelecida. O Software livre DWSIM (*Open Source Process Simulator*) foi utilizado para prever as correntes de entrada do gerador de gases, considerando combustão completa. Com estes valores, partiu-se para as simulações do modelo proposto (Figuras 3 e 4) utilizando linguagem de programação Python/Jupyter/IPython Notebook.

Nessas condições, observa-se uma variação muito rápida da temperatura, que após 80 s mantém-se aproximadamente constante e igual a 393 K para os gases exaustos, considerando o comprimento do trocador igual a 1,2 m. No entanto, o estado estacionário é alcançado somente após 25 min (1500 s), quando é formado vapor d'água na saída do trocador e sua temperatura atinge 373 K. A Figura 5 apresenta o projeto conceitual do gerador, contemplando seus elementos construtivos, materiais e acessórios.

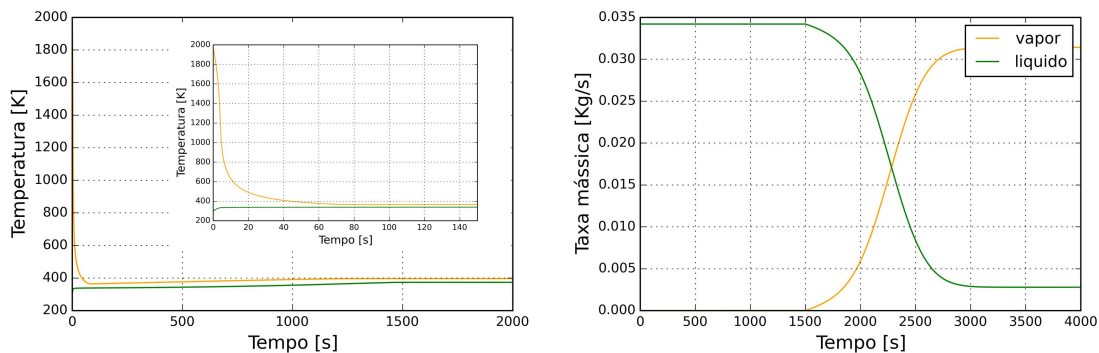


Figura 3 – Perfis das temperaturas e taxas mássicas na saída do trocador ( $x = 1,2$  m).

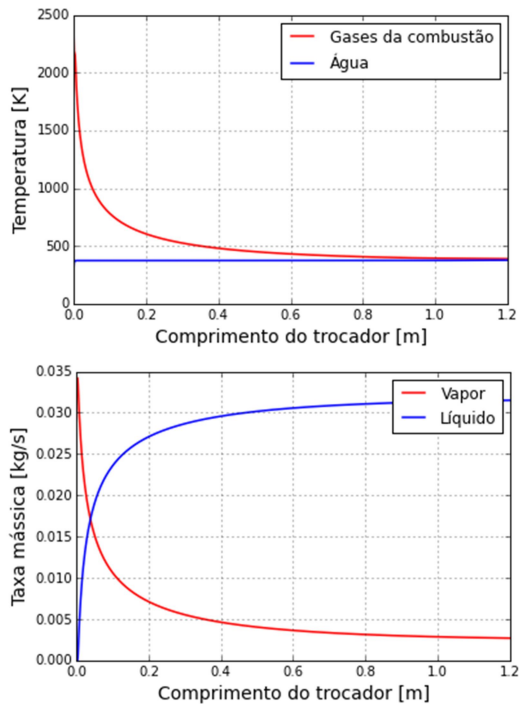


Figura 4 – Perfis das temperaturas e taxas mássicas.

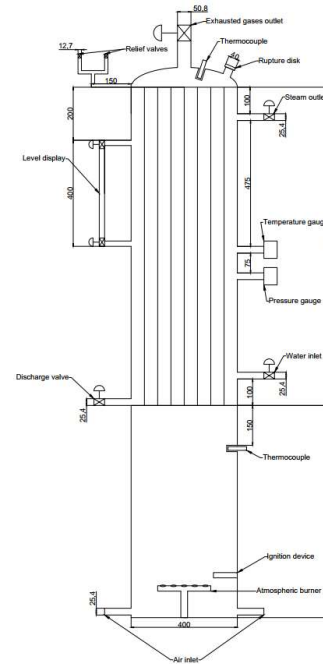


Figura 5 – Projeto do gerador.

## 4. NOMENCLATURA

- $A_t$  área da seção transversal do tubo [m<sup>2</sup>]
- $A_c$  área da seção transversal do casco [m<sup>2</sup>]
- $N$  número de tubos
- $T_c$  temperatura do fluido no casco [K]
- $T_t$  temperatura do fluido nos tubos [K]
- $U$  coeficiente de convecção global no trocador [W/m<sup>2</sup>.K]
- $w_{cl}$  vazão mássica de líquido no casco [Kg/s]
- $w_{cv}$  vazão mássica de vapor no casco [Kg/s]
- $w_t$  vazão mássica do fluido nos tubos [Kg/s]

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro da "Energia Pecém" (EDP/Eneva).

## 6. REFERÊNCIAS

IEA, Renewables 2017: Analysis and Forecasts to 2022-Executive Summary. *Journal for Quality Participation*, 2017.

Heebink L, Buckley T, Hassett D, Erick J, Pflughoeft-hassett D, Dockter B, Current Status of Spray Dryer Absorber Material Characterization and Utilization. *World Coal Ash*, v. Kentucky, no. May 7-10, p. 1-13, 2007.