

INSTITUTO FEDERAL
MINAS GERAIS

Mestrado Profissional em Sustentabilidade e Tecnologia Ambiental - IFMG

Produto Técnico

Combustão dos Gases do Alto Forno na Fornalha da Caldeira

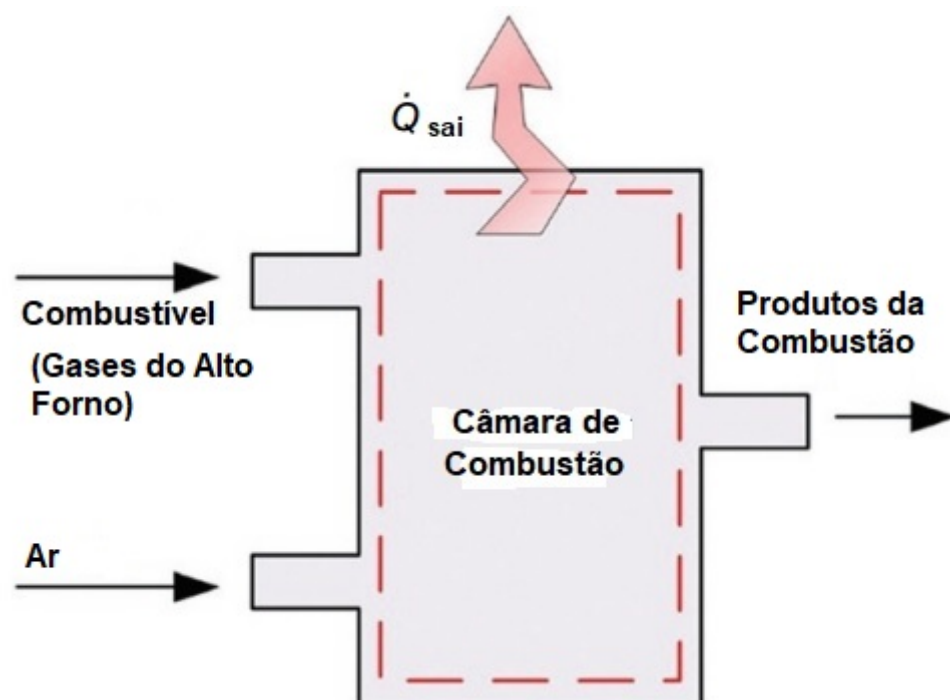
Indústria Siderúrgica

Mestrando: Moises Teles Fernandes

Orientador: Prof. Dr. Ricardo C. Carpio

Co-orientador: Prof. Dr. Rogério José da Silva

(Cogeração em uma Indústria Siderúrgica). Realizar um balanço térmico para um sistema de cogeração em uma indústria siderúrgica Não integrada. (Utilizando o programa COOLPROP para o cálculo das entalpias).



```
In [1]: import numpy as np
import pandas as pd
from CoolProp.CoolProp import PropsSI
import matplotlib.pyplot as plt
```

DADOS DE ENTRADA

Tabela de Composição dos Gases do Alto Forno (AF):

Composição do Gás do Alto Forno						
	CO	H ₂	H ₂ O	CH ₄	N ₂	CO ₂
(% em Peso)	22,15	5,46	9,88	1,02	46,73	14,76
Massa Molar (MM)	28	2	18	16	28	44

```
In [2]: df = pd.read_excel("composicao.xlsx")
display (df)
```

	Unnamed: 0	CO	H2	H2O	CH4	N2	CO2
0	(% em Peso)	22.15	5.46	9.88	1.02	46.73	14.76
1	Massa Molar (MM)	28.00	2.00	18.00	16.00	28.00	44.00

Dados Referentes ao combustível que entra na Caldeira:

- Vazão do gás do alto forno $\longrightarrow V_{azao} = 16363Nm^3/h = 4,54Nm^3/s$
- Vazão do gás do alto forno $\longrightarrow V_{azao} = 20318,04kg/h = 5,64kg/s$
- Temperatura do gás do alto forno $\longrightarrow T_{emp} = 95^{\circ}C = 368,15K$

In [3]:

```
#Dados de entrada:

#Dados de entrada:

##### VAZÃO DO COMBSUTÍVEL DO ALTO FORNO #####

NM3          = 5.64      # Kg/s

#### PORCENTAGEM EM PESO DE CADA ELEMENTO #####

CO  = 22.15  # %
H2  = 5.46   # %
H2O = 9.88   # %
CH4 = 1.02   # %
N2  = 46.73  # %
CO2 = 14.76  # %

#### MASSA MOLAR DE CADA ELEMENTO #####

MMCO  = 28      # Kg/Kmol
MMH2  = 2       # Kg/Kmol
MMH2O = 18      # Kg/Kmol
MMCH4 = 16      # Kg/Kmol
MMN2  = 28      # Kg/Kmol
MMCO2 = 44      # Kg/Kmol
```

EQUAÇÃO ESTEQUIOMÉTRICA

Equação de Balanço de Massa - EBM

Escrevendo a equação estequiométrica (100\% de ar teórico).

$$CO + H_2 + H_2O + CH_4 + N_2 + CO_2(AF) + (a)(O_2 + 3,76N_2) \longrightarrow \dots$$
$$\dots \longrightarrow (X)CO_2(Combustível) + CO_2(AF) + (Y)H_2O + (Z)N_2$$

Cálculo do Número de Moles de Cada elemento do Gás de Alto Forno (GAF)

$$N_{mol} = \frac{Qtd_{comb} \times \%_{elemento}}{MM_{elemento}}$$

In [4]:

```
df = pd.read_excel("calculo.xlsx")
display (df)
```

	Elemento	MM	Nmol
0	NaN	kg/kmol	kmol/s
1	CO	28	0.044616
2	H2	2	0.153972
3	H2O	18	0.030957
4	CH4	16	0.003596
5	N2	28	0.094128
6	CO2	44	0.01892

Equação estequiométrica com seus coeficientes:

$$0,0446CO + 0,1540H_2 + 0,0310H_2O + 0,0036CH_4 + 0,0941N_2 + 0,0189CO_2(AF) + \dots$$
$$\dots (a)(O_2 + 3,76N_2) \longrightarrow (X)CO_2(Combustível) + CO_2(AF) + (Y)H_2O + (Z)N_2$$

In [5]:

```
# Balanço de Massa de cada elemento

NCO = df.iat[1,2]
NH2 = df.iat[2,2]
NH2O = df.iat[3,2]
NCH4 = df.iat[4,2]
NN2 = df.iat[5,2]
NCO2AF = df.iat[6,2]
```

```
# Para o carbono:
X = NCO + NCH4

# Para o Hidrogênio:
Y = NH2 + NH2O + 2*NCH4

# Para o Oxigênio:
a = (0.5*X + Y - NCO - NH2O)/0.5

# Para o Nitrogênio:
Z = NN2 + 3.76*a

print('O valor para X = ' "{0:.4f}".format(X))
print('O valor para Y = ' "{0:.4f}".format(Y))
print('O valor para a = ' "{0:.4f}".format(a))
print('O valor para Z = ' "{0:.4f}".format(Z))
print('O valor para NN2 = ' "{0:.4f}".format(NN2))
print('O valor para CO2_AF.= ' "{0:.4f}".format(NCO2AF))
```

O valor para X = 0.0482
O valor para Y = 0.1921
O valor para a = 0.2813
O valor para Z = 1.1518
O valor para NN2 = 0.0941
O valor para CO2_AF.= 0.0189

Realizando o Balanço de Massa, para cada elemento:

$C : X = 0,0446 + 0,0036 \implies X = 0,0482$

$H_2 : Y = 0,1540 + 0,0310 + 2 \times 0,0036 \implies Y = 0,1921$

$O : 0,0446 + 0,0310 + 0,5a = 0,5X = Y \implies a = 0,2813$

$N_2 : Z = 0,0941 + 3,76a \implies Z = 1,1518$

Equação estequiométrica com seus coeficientes:

$$0,0446CO + 0,1540H_2 + 0,0310H_2O + 0,0036CH_4 + 0,0941N_2 + 0,0189CO_2(AF) + \dots$$

$$\dots 0,2813(O_2 + 3,76N_2) \longrightarrow (0,0482)CO_2(Comb.) + 0,0189CO_2(AF) + (0,1921)H_2O + (1,1518)N_2$$

CÁLCULO DE O₂ LIVRE (EM BASE SECA)

BALANÇO DE MASSA E ENERGIA:

$$\%O_2livre = \frac{O_2livre}{V_{gc} + 4,76O_2livre} \tag{1}$$

Dados:

$$\%O_2livre = 10\% \tag{2}$$

V_{gc} = Volume dos gases de combustão em base seca

Cálculo do Volume de Gases de Combustão (V_{gc})

$$V_{gc} = (0,0482)CO_2(Comb.) + (0,0189)CO_2(AF) + (1,1518)N_2 = 1,2189Kmol/s$$

Sustituindo os valores para calcular o O₂ livre:

$$0,1 = \frac{O_2livre}{(0,0482 + 0,0189 + 1,1518) + 4,76O_2livre} \tag{3}$$

$$O_2livre = 0,2326kmol/s \tag{4}$$

```
In [6]: # Cálculo do volume de gases de combustão

Vgc = X + NCO2AF + Z
print('O Volume de gases de combustão V_gc = ' "{0:.4f}".format(Vgc), 'kmol/s')
```

O Volume de gases de combustão V_gc = 1.2190 kmol/s

```
In [7]: # Cálculo do O2 Livre

O2_livre = 0.2326 #kmol/s
print('O valor para O2 livre = ' "{0:.4f}".format(O2_livre), 'kmol/s')
```

```
0 valor para O2 livre = 0.2326 kmol/s

In [8]:
O2 = O2_livre + a
print('O Novo valor para o Oxigênio = ' "{0:.4f}".format(O2), 'kmol/s')

O Novo valor para o Oxigênio = 0.5139 kmol/s

In [9]:
N2 = 3.76 * O2 + NN2
print('O Novo valor para o Nitrogênio = ' "{0:.4f}".format(N2), 'kmol/s')

O Novo valor para o Nitrogênio = 2.0264 kmol/s
```

Valores de O_2 e N_2 para a equação de reação considerando $O_2 livre$

$$O_2 = O_{2livre} + O_{2estequimétrico} = 0,5139 kmol/s \tag{5}$$

$$N_2 = 3,76 \times O_{2livre} + N_{2estequiométrico} = 2,0264 kmol/s \tag{6}$$

Equação de reação considerando - O2 livre

Equação de reação:

$$0,0446CO + 0,1540H_2 + 0,0310H_2O + 0,0036CH_4 + 0,0941N_2 + 0,0189CO_2(AF) + \dots$$

$$\dots 0,5139(O_2 + 3,76N_2) \longrightarrow (0,0482)CO_2(Comb.) + 0,0189CO_2(AF) + (0,1921)H_2O + (2,0264)N_2 + 0,2326O_2 \longrightarrow Eq.1$$

Cálculo do Excesso de Ar

Equação para calcular o execsso de Ar:

$$\%excesso - de - ar = \frac{Ar_{real}}{Ar_{teórico}}$$

```
In [10]:
Ex_ar = O2/a
print("A Eficiência da Turbina = ", "{0:.3f}".format(Ex_ar-1),)
print("A Eficiência da Turbina = ", "{0:.1f}".format((Ex_ar-1)*100), '%')

A Eficiência da Turbina = 0.827
A Eficiência da Turbina = 82.7 %
```

Excesso de Ar será:

$$\%excesso - de - ar = 82,7\%$$

Análise Energético - Equação de Balanço de Energia - EBE

Temperatura Adiabática da Chama dentro da Fornalha

EBE:

$$\sum_{reagentes} \dot{n}_i [\bar{h}_f^o + \bar{h}_T - \bar{h}_{Tref}]_r = \sum_{produtos} \dot{n}_i [\bar{h}_f^o + \bar{h}_T - \bar{h}_{Tref}]_p$$

$$\sum_{reagentes} \dot{n}_i [\bar{h}_f^o + \bar{h}(T) - \bar{h}(T)_{ref}]_r = \sum_{produtos} \dot{n}_i [\bar{h}_f^o + \bar{h}(T) - \bar{h}(T)_{ref}]_p \longrightarrow Eq.2$$

Os valores de calor de formação \bar{h}_f^o e valores da entalpia a temperatura de referência \bar{h}_{Tref} . Tabela A-23 - Moran.

substância	\bar{h}_f^o (kJ/kmol)	$\bar{h}(T)_{ref}$ (kJ/kmol)
CO	-110530	-
CH ₄	-74850	-
O ₂	0	10809
N ₂	0	10763

substância	\bar{h}_f^o (kJ/kmol)	$\bar{h}(T)_{ref}$ (kJ/kmol)
CO_2	-393520	12148
H_2O	-241820	12331

Aplicando a Eq.2 a cada elemento da Eq. 1:

$$\begin{aligned} &0,0446[\bar{h}_f^o + \bar{h}_T - \bar{h}_{Tref}]_{CO} + 0,0036[\bar{h}_f^o + \bar{h}_T - \bar{h}_{Tref}]_{CH_4} = \\ &\dots + 0,0482[\bar{h}_f^o + \bar{h}_T - \bar{h}_{Tref}]_{CO_2} \\ &\dots + 0,1921[\bar{h}_f^o + \bar{h}_T - \bar{h}_{Tref}]_{H_2O} \\ &\dots + 2,0264[\bar{h}_f^o + \bar{h}_T - \bar{h}_{Tref}]_{N_2} \\ &\dots + 0,2326[\bar{h}_f^o + \bar{h}_T - \bar{h}_{Tref}]_{O_2} \end{aligned}$$

In [11]:

```
# Valores de calor de Formação:

hfCO      = -110530 # kJ/kmol
hfCH4     = -74850  # kJ/kmol
hfO2      = 0       # kJ/kmol
hfN2      = 0       # kJ/kmol
hfCO2     = -393520 # kJ/kmol
hfH2O     = -241820 # kJ/kmol

# Valores de temperatura de Referência

TrCO      = 0       # kJ/kmol
TrCH4     = 0       # kJ/kmol
TrO2      = 10809   # kJ/kmol
TrN2      = 10763   # kJ/kmol
TrCO2     = 12148   # kJ/kmol
TrH2O     = 12331   # kJ/kmol
```

Substituindo os valores da tabela, aplicando a Eq.2 a cada elemento da Eq. 1:

$$\begin{aligned} &0,0446 \times (-110530) + 0,0036 \times (-74850) = 0,0482 \times [-393520 - (\bar{h}_{CO_2}(T) - 12148)] + \dots \\ &\dots + 0,1921 \times [-241820 - (\bar{h}_{H_2O}(T) - 12331)] + 2,0264 \times [0 + (\bar{h}_{N_2}(T) - 10763)] + 0,2326 \times [0 + (\bar{h}_{O_2}(T) - 10809)] \end{aligned}$$

In [12]:

```
reagente = 0.0446*(hfCO) + 0.1540*(hfCH4)
produtos = 0.0482*(hfCO2 - TrCO2) + 0.1921*(hfH2O - TrH2O) + 2.0264*(-TrN2) + 0.2326*(-TrO2)
RP = reagente - produtos
print("O valor dos reagentes = ", "{0:.2f}".format(reagente), 'kJ/kmol')
print("O valor dos produtos = %.3f kJ/kmol" %produtos)
print("O valor dos reagentes menos produtos será = %.3f kJ/kmol" %RP)
```

O valor dos reagentes = -16456.54 kJ/kmol
O valor dos produtos = -92699.921 kJ/kmol
O valor dos reagentes menos produtos será = 76243.383 kJ/kmol

Podendo ser também:

$$0,0482 \times \bar{h}_{CO_2}(T) + 0,1921 \times \bar{h}_{H_2O}(T) + 2,0264 \times \bar{h}_{N_2}(T) + 0,2326 \times \bar{h}_{O_2}(T) = 76243,383(kJ/kmol)$$

Iteração 1: Assumindo T = 1000 K

Substituindo os valores do lado esquerdo para 1000 K. E verificando os valores da Tabela A-23 (Moran), obtemos:

$$0,0482 \times \bar{h}_{CO_2}(1000) + 0,1921 \times \bar{h}_{H_2O}(1000) + 2,0264 \times \bar{h}_{N_2}(1000) + 0,2326 \times \bar{h}_{O_2}(1000) = 76243,383$$

$$\begin{aligned} &0,0482 \times \bar{h}_{CO_2}(42769) + 0,1921 \times \bar{h}_{H_2O}(35882) + 2,0264 \times \bar{h}_{N_2}(30129) + \dots \\ &\dots + 0,2326 \times \bar{h}_{O_2}(31389) = 76243,383 \end{aligned}$$

$$77308,89 > 76243,383$$

In [13]:

```
LE1 = 0.0482*42769 + 0.1921*35882 + 2.0264*30129 + 0.2326*31389
print("O valor do lado Esquerdo = ", "{0:.2f}".format(LE1), 'kJ/kmol')
```

O valor do lado Esquerdo = 77308.89 kJ/kmol

Iteração 2: Assumindo T = 800 K

Substituindo os valores do lado esquerdo para 800 K. E verificando os valores da Tabela A-23 (Moran), obtemos:

$$0,0482 \times \bar{h}_{CO_2}(800) + 0,1921 \times \bar{h}_{H_2O}(800) + 2,0264 \times \bar{h}_{N_2}(800) + 0,2326 \times \bar{h}_{O_2}(800) = 76243,383$$

$$0,0482 \times \bar{h}_{CO_2}(32179) + 0,1921 \times \bar{h}_{H_2O}(27896) + 2,0264 \times \bar{h}_{N_2}(23714) + \dots$$
$$\dots + 0,2326 \times \bar{h}_{O_2}(24523) = 76243,383$$

$$60667,95 < 76243,383$$

In [14]:

LE2 = 0.0482*32179 + 0.1921*27896 + 2.0264*23714 + 0.2326*24523
print("O valor do lado Esquerdo = ", "{0:.2f}".format(LE2), 'kJ/kmol')

O valor do lado Esquerdo = 60667.95 kJ/kmol

Interpolando entre T = 1000 K e T = 800 K:

<i>h</i>	T(K)
60667,95	800
76243,383	<i>T</i>
77308,89	1000

Obtemos a temperatura Adiabática de Chama.

T = 987,19 K