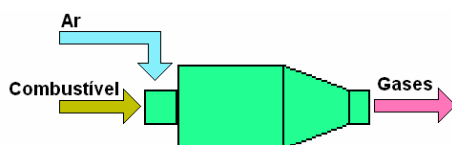


AComb[®] E

Combustão Industrial e suas Emissões Atmosféricas



Guia do Usuário e Referência

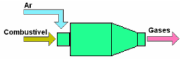
Agosto de 2008

Créditos

Clayton Dimas Ribeiro Fernandes

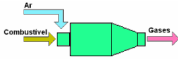
clayton.fernandes@uol.com.br





Sumário

Introdução	3
Instalando o Programa	5
Rodando o Programa	5
A janela do AComb E	6
Começando com dois exemplos	7
Exemplo 1	7
Exemplo 2	8
Base seca ou úmida Teor mássico ou volumétrico	10
Mistura de Combustíveis	12
Exemplo 3	13
Hipóteses para o Exemplo 3	13
Nomenclatura para o Exemplo 3	13
Temperatura adiabática dos gases de combustão	15
Exemplo 4	15
Hipóteses para o Exemplo 4	16
Nomenclatura para o Exemplo 4	16
Emissões Atmosféricas	19
Referência	22
Nomenclatura	22
Hipóteses Gerais	22
Caracterização	23
Limitações	23
Referências bibliográficas	23
Composição típica de alguns gases combustíveis	24



Introdução

O principal objetivo desta versão é fornecer ao usuário uma ferramenta simples e eficaz para o cálculo das emissões atmosféricas provenientes da combustão industrial.

Todos os fatores de emissão, dos poluentes não estequiométricos, estão baseados no FIRE (**F**actor **I**nformation **R**etrieval Data System) publicado pela US EPA em Outubro de 2004. www.epa.gov/ttn/chief/software/fire.

Os fatores de emissão dos poluentes estequiométricos (CO_2 e SO_2) são calculados a partir dos dados do combustível e da combustão (basicamente composição e excesso de ar).

É possível ao usuário determinar as emissões atmosféricas em três unidades:

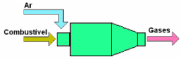
- **Emissão mássica**, por exemplo, em toneladas/mês;
- **Taxa de emissão**, por exemplo, em toneladas/Gcal e,
- **Emissão Volumétrica**, por exemplo, em mg/m^3 .

Gases Efeito Estufa	CO₂	Gás Carbônico
	CH₄	Metano
	N₂O	Óxido Nitroso
Gases Regulados	NO_x	Óxidos de Nitrogênio
	CO	Monóxido de Carbono
	SO₂	Dióxido de Enxofre
	HNM	Hidrocarbonetos não Metanos
	PM	Material Particulado
	VCO	Compostos Orgânicos Voláteis

O aplicativo **AComb E** foi desenvolvido para auxiliar nos cálculos rotineiros relativos à combustão industrial de líquidos, sólidos, gases ou de suas misturas.

Permite rapidamente calcular, entre outros:

- O excesso de ar de combustão a partir do teor de O_2 nos gases de combustão.
- Teor máximo de CO_2 nos gases de combustão.
- A massa de ar estequiométrico.
- A temperatura dos gases de combustão em função do excesso de ar de combustão.
- A composição mássica e volumétrica dos gases de combustão, bem como entalpia, calor específico, densidade e massa molecular. Tanto



AComb E - Combustão Industrial e suas Emissões Atmosféricas

em base seca como em base úmida.

- A vazão mássica, ou volumétrica, dos gases de combustão, secos ou úmidos.
- O poder calorífico, densidade, massa molecular e calor específico de hidrocarbonetos e suas misturas. Tanto para teor volumétrico como para mássico e tanto para base úmida com para base seca.
- O combustível equivalente de uma mistura de combustíveis (seja para sólidos, líquidos ou gases).

Além disto, o **AComb E** implementa uma série de facilidades que permite ao usuário:

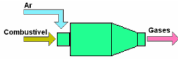
- Manipular combustíveis gasosos em qualquer teor, mássico ou volumétrico. O aplicativo se encarrega de calcular a densidade.
- Trabalhar em qualquer sistema de unidades, sem necessidade de coerência. O próprio aplicativo se encarrega das necessárias transformações.
- Inserir dados tanto em base úmida como em base seca, e teores mássicos ou volumétricos.
- Arquivar, separada ou conjuntamente, os componentes de uma mistura de combustíveis. Isto permite ao usuário montar uma biblioteca de combustíveis de seu interesse.
- Alterar o teor de O_2 no ar de combustão quando se deseja uma combustão com ar enriquecido.
- Trabalhar com *unidades mistas* tais como **kg/h** e **m³/h** ou **kJ/kg** e **kJ/m³**.
- Analisar individualmente os combustíveis componentes de uma mistura de combustíveis.
- Editar valores em forma de expressões. Assim é possível, por exemplo, digitar para a temperatura dos gases o valor de 300 - 273.15 °C (ou seja 26,85 °C).

Esta nova versão incorpora ferramentas que permitem:

- Calcular as Emissões dos Poluentes não estequiométricos
 - CH_4
 - N_2O
 - CO
 - SO_2
 - NO_x
 - Material Particulado, etc.
- Imprimir os dados e resultados de uma simulação.
- Calcular a vazão de combustível para uma dada potência do combustível

O programa considera quatro tipos de combustíveis:

- Óleos, por exemplo, 2A. da Petrobrás
- Misturas gasosas, por exemplo, gás natural.
- Biomassa, por exemplo, bagaço de cana e



AComb E - Combustão Industrial e suas Emissões Atmosféricas

- Carvão mineral.

Permitindo trabalhar com misturas destes combustíveis. Por exemplo, uma caldeira queimando borra de café e óleo 3A simultaneamente.

Instalando o Programa

Ambos **AComb E** e seu programa de instalação são aplicações para Windows 2000 ou compatível.

Para instalar o programa em seu microcomputador basta rodar o programa de instalação **AE122 . EXE** e seguir as instruções apresentadas no programa de instalação.

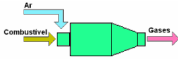
O programa de instalação criará um diretório contendo todos os arquivos necessários para rodar o programa. Criará também um ícone na sua lista de Programas do Menu Iniciar. Caso você não altere as instruções do programa de instalação, este ícone se chamará **AComb E**.

Rodando o Programa

Após a instalação do programa, para rodá-lo basta :

- clicar com o mouse sobre o botão **Iniciar** do Windows 2000
- clicar sobre o ícone **Programas**,
- clicar sobre o ícone **AComb E**,
- clicar, novamente, sobre o ícone **AComb E**
- e, finalmente, digitar a senha do programa.

Você não precisará digitar a senha futuramente. Uma vez digitada corretamente ela não será requerida nas próximas utilizações do programa. Caso você digite a senha errada o programa entrará no modo demonstração com limitadas operações e rodará por apenas alguns minutos.



A janela do AComb E

Todas as informações estão presentes na mesma janela, divididas em seis regiões.

- **Edição dos combustíveis.** À esquerda da janela encontram-se os editores para inserir, atualizar e excluir combustíveis.
- **Combustão.** Onde é possível simular a queima de um combustível em diferentes situações de excesso de ar, vazões, etc.
- **Combustível.** Onde o programa apresenta os parâmetros do combustível para uma dada combustão, como: Ar Estequiométrico, Potência, etc.
- **Ar.** Parâmetros da corrente do Ar de combustão para uma dada situação: Vazão e Potência.
- **Gases de Combustão.** Composição e propriedades dos Gases gerados pela combustão definida pelo usuário.
- **Emissões.** Todas as informações relativas ao cálculo das emissões segundo a EPA.

Propriedades:

H	10,0 %	PCs	40	MJ/kg
C	90,0 %	PCI	37.817	MJ/kg
O	0,0 %	Cp	1	kJ/kgK
N	0,0 %	Densidade	980	kg/m3
S	0,0 %	U bu	0,0 %	
Z	0,0 %			

Combustão

Ensaio: Ensaio 1
 Data: 13/10/2006 10:39:52
 Lb: 1,10
 Tg: 800 °C
 Temp Ar: 20 °C
 Combustível: Óleo 1
 Vazão Comb: 100 kg/h
 Temp Comb: 120 °C

Combustível

Ar Est: 13,903
 PCs: 40 MJ/kg
 Densidade: 980 kg/m3
 Unidade: 0 %
 Cp: 1 kJ/kgK
 Potência: 1114,4 kW
 T Adiabática: 1861,1 °C

Gases de Combustão

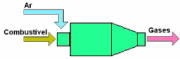
H2O	6,4149	%
O2	1,9587	%
N2	71,387	%
CO2	20,239	%
SO2	0	%
Mol	29,193	
Vazão	1629,3	kg/h
Cp	1,1577	kJ/kgK
Densidade	0,33151	kg/m3
Entalpia	1086,6	kJ/kg
Potência	491,79	kW

Emissões

Process: External Combustion Boilers
 Sector: Industrial
 EPA Fuel Class: Residual Oil
 Properties Process: 10.100 Million Btu/hr
 EPA Source Classification Code: 10200402

Pollutant	Factor	Formula	Quality	Control1	Factor	Form	Unit	Measure
Carbon monoxide	5.000E0		A	UNCONTROLLED	5.000E0		Lb	1000 Gallons
Methane	1.000E0							
Nitrogen oxides (NOx)	5.500E1							
PM, condensable	1.500E0							
PM, filterable	Formula 8.34E0A							

Emissão	Unidade	CO2	CH4	NOx	CO	PM	NMHC	THC	H2O	Gas
Mássica	kg/hrés	2,374E5	8,804	484,2	44,02	13,21	2,465	11,27	7,525E4	1,173E6
Taxa	kg/MJ	0,08244	3,057E-6	0,0001691	1,528E-5	4,585E-6	8,559E-7	3,913E-6	0,02613	0,4073
Volumétrica	mg/L	294,2	0,01091	0,5999	0,05454	0,01636	0,003094	0,01396	93,24	



Começando com dois exemplos

Exemplo 1 Calcular a composição dos gases de combustão em um equipamento queimando óleo 2A da Petrobrás. Vamos supor a seguinte composição mássica, em %, deste óleo:

H: 9,6
C: 87,8
N: 0,7
O: 0,5
S: 1,4
Z: 0

Adicionando um novo combustível

Na Edição dos combustíveis, adicione um novo combustível através do botão + e dê-lhe um nome compreensível, neste caso **Óleo 2A**. Nas propriedades preencha os dados da Análise Elementar, como mostrado:

Propriedades:			
H	9,6 %	PCs	43,4 MJ/kg
C	87,8 %	PCi	41,304 MJ/kg
O	0,5 %	Cp	1,9 kJ/kgK
N	0,7 %	Densidade	980 kg/m3
S	1,4 %	U bu	0,0 %
Z	0,0 %		

Observe que os editores da Análise Elementar permitem calcular a diferença para a totalidade da composição. Dê double click para isto.

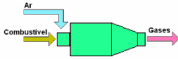
Para efeito do exemplo três, abaixo, entre com o valor do

PCs = 43,4 MJ/kg e

Cp = 1,9 kJ/kg

Criando um Ensaio

Após criar um combustível é possível criar Ensaios utilizando-o. Na janela **Combustão** crie um novo ensaio, com o botão + e escolha o combustível 2A.



AComb E - Combustão Industrial e suas Emissões Atmosféricas

Combustão

Ensaio: Ensaio 2

Data: 13/10/2006 11:53:48

Lb: 1,10

Tg: 800 °C

Temp Ar: 20 °C

Combustível: [selecione]

Vazão Comb: 100 kg/h

Temp Comb: 120 °C

Base Úmida Teor Mássico

Na janela Combustão escolha o combustível 2A.

Combustão

Ensaio: Ensaio 2

Data: 13/10/2006 11:53:48

Lb: 1,10

Tg: 800 °C

Temp Ar: 20 °C

Combustível: **Óleo 2A**

Vazão Comb: 100 kg/h

Temp Comb: 120 °C

Base Úmida Teor Mássico

Combustível		Gases de Combustão	
Ar Est	13,549	H2O	6,3231 %
PCs	39,913 MJ/kg	O2	1,9555 %
Densidade	980 kg/m3	N2	71,317 %
Umidade	0 %	CO2	20,229 %
Cp	1 kJ/kgK	SO2	0,17588 %
Potência	1112 kW	Mal	29,237
T Adiabática	1908,9 °C	Vazão	1590,3 kg/h
		Cp	1,1562 kJ/kgK
Ar		Densidade	0,33202 kg/m3
Vazão	1165 m3/h	Entalpia	1083,1 kJ/kg
Potência	18,679 kW	Potência	478,48 kW

Escolhido o combustível, o programa calcula todos os parâmetros da combustão.

Observe que é possível alterar:

- Base úmida ou seca
- Teor mássico ou volumétrico
- Temperatura dos gases
- Excesso de Ar (**Lb**)
- Teor de O₂ nos gases, etc.



Sempre que pertinente é possível obter os valores calculados referentes à massa ou ao volume. Por exemplo, na edição da vazão de combustível é possível trabalhar com vazão mássica ou volumétrica, segundo a densidade do combustível. Quando tratar-se de gás, esta densidade será calculada, sempre, nas condições normais de temperatura e pressão - CNPT



O **AComb E** considera os gases perfeitos. Portanto o teor molar é o teor volumétrico.

Exemplo 2 Neste exemplo vamos calcular qual o excesso de ar para uma combustão de GLP com teor de O₂, Base Seca Volumétrico, nos gases de combustão igual a 8%.

GLP é formado pela mistura de 50% propano e 50% n-butano, em teor volumétrico.



AComb E - Combustão Industrial e suas Emissões Atmosféricas

Inserindo o Gás GLP.

Componente	T Vol %	T Mas %
Propano	50	43,14
n-Butano	50	56,86

Fórmula	Nome	Mol
H2O	Água	18,0
H3N	Amônia	17,0
CO	Monóxido de Carbono	28,0
CO2	Gás Carbônico	44,0
CH4	Metano	16,0
C2H2	Etino (Acetileno)	26,0
C2H4	Eteno (Etileno)	28,1
C2H6	Etano	30,1
C3H4	Propadieno	40,1
C3H4	Propino (Metilacetileno)	40,1
C3H6	Propeno (Propileno)	42,1
C3H8	Propano	44,1
C4H6	1,2-Butadieno	54,1
C4H6	1-Butino (Etilacetileno)	54,1
C4H6	2-Butino (Dimetilacetileno)	54,1
C4H8	trans-2-Buteno	56,1
C4H8	2-Metilpropeno	56,1
C4H8	Buteno	56,1
C4H8	cis-2-Buteno	56,1
C4H10	2-Metilpropano (Isobutano)	58,1
C4H10	n-Butano	58,1
C5H8	1-Pentino	68,1

Para inserir o gás GLP, vá à paleta Gás na janela dos combustíveis e, com o botão + insira um novo gás. Dê-lhe o nome de GLP.

No campo dos componentes deste gás dê double click para abrir a janela dos Hidrocarbonetos e escolha, com double click os dois componentes:

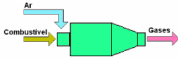
- Propano (C_3H_8) e
- Butano (C_4H_{10})

E, finalmente, insira os teores volumétricos como mostrado acima.

O próximo passo é criar um ensaio e escolher o GLP como combustível.

Componente	T Vol %	T Mas %
Propano	50	43,14
n-Butano	50	56,86

Parâmetro	Valor
Ensaio	Ensaio 3
Data	13/10/2006 12:48:48
Lb	1,10
Tg	800 oC
Temp Ar	20 oC
Combustível	GLP
Vazão Comb	100 kg/h
Temp Comb	120 oC



AComb E - Combustão Industrial e suas Emissões Atmosféricas

Altere a Base para Base Seca e o Teor para Teor Volumétrico e digite a concentração de O₂ sugerida: 8% base seca volumétrica.

O programa calcula o excesso de ar (Lb) igual a 1,57

Combustão	Combustível	Gases de Combustão
Ensaio: Ensaio 3	Ar Est: 15,528	H ₂ O: 12,685 %
Data: 13/10/2006 12:48:48	Mol: 51,111	O ₂ : 8 %
Lb: 1,57	PCs: 49,915 MJ/kg	N ₂ : 83,449 %
T _g : 800 °C	Densidade: 1,5843 kg/m ³	CO ₂ : 8,5514 %
Temp Ar: 20 °C	Umidade: 0 %	SO ₂ : 0 %
Combustível: GLP	C _p : 1,8798 kJ/kgK	Mol: 29,7
Vazão Comb: 100 kg/h	Potência: 1392,8 kW	Vazão: 2378,4 kg/h
Temp Comb: 120 °C	T Adiabática: 1474,5 °C	C _p : 32,945 kJ/kgK
Base Seca	Ar Vazão: 1931,7 m ³ /h	Densidade: 0,33727 kg/m ³
Teor Volumétrico	Potência: 30,85 kW	Entalpia: 1107,2 kJ/kg
		Potência: 787,79 kW



Observe que, para o **AComb E**, o teor Molar é o mesmo que teor Volumétrico, pois estamos considerando os gases ideais.

Propriedades			
H	17,7 %	PCs	49,915 MJ/kg
C	82,3 %	PCi	46,04 MJ/kg
O	0,0 %	C _p	1,5645 kJ/kgK
N	0,0 %	Densidade	2,2803 kg/m ³
S	0,0 %	U _{bu}	0,0 %
Z	0,0 %		

Observe que o programa atualiza, sempre que se altera a composição dos componentes, as propriedades do combustível gás.

Base seca ou úmida Teor mássico ou volumétrico

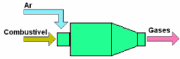
Quando se trabalha com misturas gasosas é possível representar a sua composição, ou umidade, de 4 maneiras equivalentes, porém diferentes:

- Teor mássico base seca
- Teor mássico base úmida
- Teor volumétrico base seca e
- Teor volumétrico base úmida



O **AComb E** considera os gases perfeitos. Portanto o teor **molar** é o teor **volumétrico**.

Para ilustrar as possíveis configurações vamos supor a seguinte mistura de combustível formada por:



AComb E - Combustão Industrial e suas Emissões Atmosféricas

- 40 g de hidrogênio
- 32 g de metano e
- 18 g de água, estado vapor

Vamos considerar, para efeito ilustrativo, as seguintes massas moleculares aproximadas:

- $\text{Mol}_{\text{H}_2} = 2$
- $\text{Mol}_{\text{CH}_4} = 16$ e
- $\text{Mol}_{\text{H}_2\text{O}} = 18$

Para esta mistura teremos:

- 20 moles de hidrogênio (40/2)
- 2 moles de metano (32/16) e
- 1 mol de água (18/18)

Assim podemos calcular a **umidade** da mistura de diversas formas:

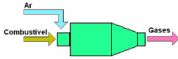
- Umidade mássica em base seca = $18/(40 + 32) = 25 \%$
- Umidade mássica em base úmida = $18/(40 + 32 + 18) = 20 \%$
- Umidade volumétrica em base seca = $1/(20 + 2) = 4,545 \%$
- Umidade volumétrica em base úmida = $1/(20 + 2 + 1) = 4,348 \%$

Todos estes valores representam a **mesma** umidade.

O mesmo vale para os teores dos componentes, por exemplo **o teor de hidrogênio** pode ser dado como:

- Teor mássico em base seca = $40/(40 + 32) = 55,56 \%$
- Teor mássico em base úmida = $40/(40 + 32 + 18) = 44,44 \%$
- Teor volumétrico em base seca = $20/(20 + 2) = 90,91 \%$
- Teor volumétrico em base úmida = $20/(20 + 2 + 1) = 86,96 \%$

Todos estes valores representam o **mesmo** teor de hidrogênio.

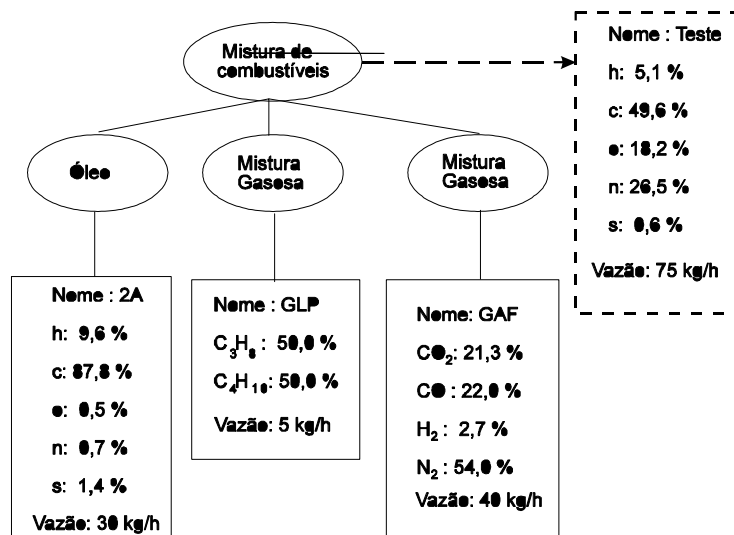


Mistura de Combustíveis

É comum, na indústria, o uso de mais de um tipo de combustível em um mesmo equipamento, por exemplo uma caldeira de vapor queimando Óleo Combustível e borra de café simultaneamente ou um forno queimando Óleo Combustível e Gás de Aciaria.

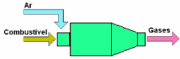
A dificuldade de se trabalhar com misturas de combustíveis, principalmente quando se trata de misturas de óleos e combustíveis gasosos, é a caracterização de ambos. Enquanto óleos combustíveis são caracterizados pela sua composição mássica - análise elementar - os combustíveis gasosos são caracterizados pelos teores volumétricos de seus componentes. É necessário, portanto, normalizar a caracterização dos combustíveis para se trabalhar com suas misturas.

O **AComb E** resolve esta questão criando um combustível equivalente que resulte na mesma combustão, ou seja os mesmos gases de combustão à mesma temperatura.



O **AComb E** sempre trabalha considerando uma mistura de combustíveis. Quando se tem apenas um combustível esta mistura terá apenas um elemento. Suponha um equipamento queimando, simultaneamente, três combustíveis: óleo 2A, GLP e GAF.

O programa cria, a partir das características destes três combustíveis e de suas vazões mássicas (ou volumétricas), um combustível equivalente que resulte na mesma combustão - ou seja os mesmos gases de combustão à mesma temperatura. Assim, o programa criará, internamente, um combustível equivalente, com vazão mássica de 75 kg/h.



Exemplo 3 Como exemplo de uso de misturas de combustíveis vamos estimar a eficiência de um gerador de vapor trabalhando com:

- Óleo 2A : 50 % em massa
- GLP : 50% em massa
- Teor de O₂ dos gases de combustão: 4 %, Base Seca Volumétrico
- Temperatura dos gases de combustão: 400 °C

Com apenas estes dados é possível obter uma boa estimativa da eficiência de um gerador de vapor independente de suas características nominais.

Hipóteses para o Exemplo 3

Como base de cálculo vamos adotar:

- Consumo de combustível = 100 kg/h
- perdas para o ambiente e purga desprezíveis
- temperatura dos combustíveis : 80 °C

Nomenclatura para o Exemplo 3

Vamos adotar a seguinte nomenclatura:

- **P_u**: potência útil (parcela de energia transferida a água por unidade de tempo) [kW]
- **P_g**: potência da corrente gases de combustão [kW]
- **P_c**: potência da corrente combustível [kW]
- **P_a**: potência da corrente ar de combustão [kW]
- **P_t**: soma das potências das correntes ar de combustão e combustível [kW]
- **E_f** : eficiência

Como uma estimativa, podemos escrever:

$$Ef = \frac{P_u}{P_t}$$

$$P_t = P_u + P_g$$

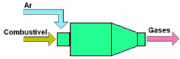
$$P_u = P_t - P_g$$

$$Ef = 1 - \frac{P_g}{P_t}$$

$$Ef = 1 - \frac{P_g}{P_c + P_a}$$

Vamos agora calcular cada um destes termos.

Para iniciar temos que criar um combustível que é a mistura proposta



AComb E - Combustão Industrial e suas Emissões Atmosféricas

Arquivo Emissões Exportar Sobre

Gás Óleo, Biomassa, Carvão Mistura

Nome
Mistura Exemplo

Nome T Mas % Tipo

Óleo 2A	50	Óleo, Biomassa ou
GLP	50	Hidrocarboneto

Combustão

Ensaio Ensaio 4

Data 13/10/2006 14:51:37

Lb 1,10

Tg 800 oC

Temp Ar 20 oC

Combustível Mistura Exemplo

Vazão Comb 100 kg/h

Temp Comb 80 oC

Base Seca Teor Volumétrico

Na paleta **Mistura** dos editores de combustíveis crie uma nova mistura com o botão + e dê a esta mistura o nome **Mistura Exemplo**.

Adicione os dois componentes desta mistura (que são combustíveis já existentes) e entre com os seus respectivos teores mássicos (50 e 50%)

O próximo passo é criar um ensaio com este combustível, como mostrado acima.

Entre com a

- temperatura do combustível = 80 oC,
- temperatura dos gases = 400 oC e
- vazão mássica = 100 kg/h e
- teor de O₂ nos gases de combustão = 4% (bs vol)

Combustão

Ensaio Ensaio 4

Data 13/10/2006 14:51:37

Lb 1,22

Tg 400 oC

Temp Ar 20 oC

Combustível Mistura Exemplo

Vazão Comb 100 kg/h

Temp Comb 80 oC

Base Seca Teor Volumétrico

Combustível

Ar Est 14,471

PCs 46,657 MJ/kg

Densidade 491,14 kg/m³

Umidade 0 %

Cp 1,7323 kJ/kgK

Potência 1299,9 kW

T Adiabática 1842,5 oC

Ar

Vazão 1400,3 m³/h

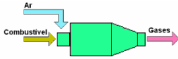
Potência 22,363 kW

Gases de Combustão

H2O	13,417	%
O2	4	%
N2	83,73	%
CO2	12,232	%
SO2	0,037725	%
Mol	30,143	
Vazão	1744,4	kg/h
Cp	31,822	kJ/kgK
Densidade	0,54571	kg/m ³
Entalpia	629,06	kJ/kg
Potência	329,26	kW

Portanto temos:

$$E_f = 1 - 1 - \frac{P_g}{P_c + P_a} = 1 - \frac{329,26}{1299,9 + 22,363} = 75,1 \%$$

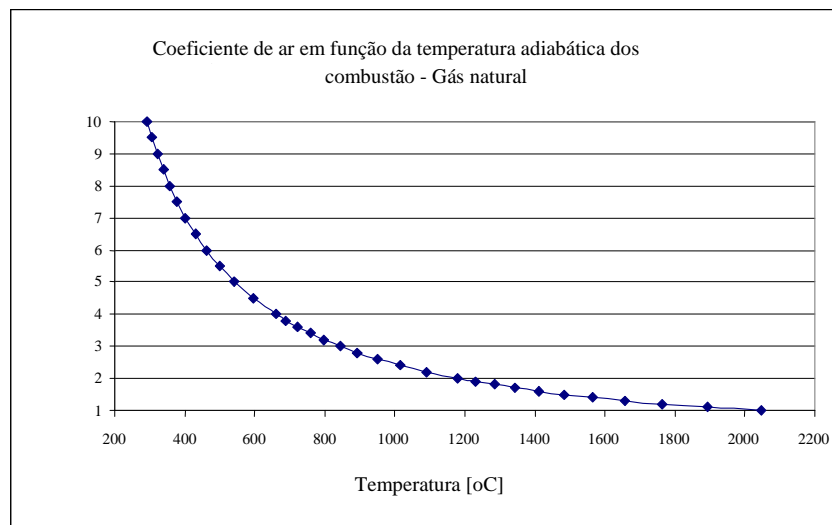


Temperatura adiabática dos gases de combustão

Uma importante função do **AComb E** é o cálculo do excesso de ar em função da temperatura adiabática de chama - $Lb = f(Tg)$.

Dado um combustível, e sua temperatura, e supondo desprezível a troca de calor com o ambiente, é possível determinar a temperatura dos gases de combustão em função do excesso de ar através do balanço de energia entre os insumos e produtos da combustão. O inverso também, conhecendo-se a temperatura dos gases de combustão é possível calcular, para um processo adiabático, o excesso de ar da combustão. O gráfico abaixo mostra esta função para o gás natural.

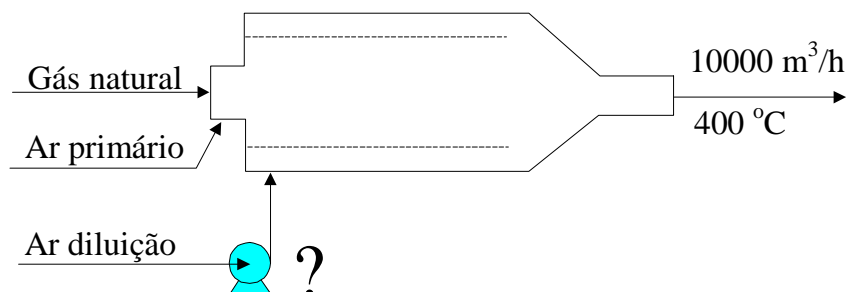
Coefficiente de ar de combustão



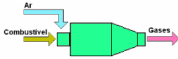
Para ilustrar esta função vamos resolver o seguinte exemplo.

Exemplo 4 Um secador necessita de $10000 \text{ m}^3/\text{h}$ de gases a 400 °C . Para tanto está sendo proposto um gerador de gases quentes para trabalhar com gás natural. Calcule a vazão volumétrica no ventilador de ar de diluição.

Esquema para o Exemplo 4



Para resolver o problema proposto vamos seguir os seguintes passos:



AComb E - Combustão Industrial e suas Emissões Atmosféricas

- Dada a temperatura dos gases desejada , 400 °C, pode-se calcular o excesso total de ar (primário mais diluição).
- Conhecendo-se o excesso de ar total e a vazão de gases desejada, 10000 m³/h, é possível, pelo balanço de massa, calcular a vazão de combustível necessária.
- Finalmente, com a vazão de combustível e admitindo-se um excesso de ar primário recomendado para a queima de gás natural, pode-se calcular a vazão mássica de diluição.

Hipóteses para o Exemplo 4

Como base de cálculo vamos adotar

- Temperatura do ar: 20 °C
- Temperatura do combustível: 25 °C
- Perda para o ambiente desprezível
- Gases perfeitos
- Excesso de ar primário: 10 % (para queima de gás natural)

Nomenclatura para o Exemplo 4

Vamos adotar a seguinte nomenclatura

- **m_c**: vazão mássica de combustível
- **m_g**: vazão mássica de gases de combustão
- **m_{ap}**: vazão mássica de ar primário
- **m_{ad}**: vazão mássica de ar de diluição
- **m_{at}**: vazão mássica de ar total ($m_{at} = m_{ap} + m_{ad}$)
- **Lb_p**: coeficiente de ar primário
- **Lb_t**: coeficiente de ar total
- **ArEst**: massa de ar estequiométrico por unidade de massa de combustível

Podemos escrever, para o balanço de massa do gerador de gás:

$$m_c + m_{at} = m_g$$

da definição do coeficiente de ar temos:

$$m_{at} = m_c * Lb_t * ArEst$$

substituindo o valor de **m_{at}**:

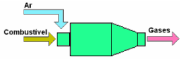
$$m_c * (1 + Lb_t * ArEst) = m_g$$

ou reescrevendo a equação:

$$m_c = \frac{m_g}{(1 + Lb_t * ArEst)}$$

Esta equação nos dá a vazão mássica de combustível em função do coeficiente de ar total - **Lb_t** - e do ar estequiométrico **ArEst**.

Segundo nossas hipóteses, o coeficiente de ar total é função apenas da temperatura dos gases de combustão e, sendo o combustível conhecido - gás natural, o **ArEst** também é conhecido. Vamos calcular, pelo **AComb E**, estes dois fatores.



AComb E - Combustão Industrial e suas Emissões Atmosféricas

O primeiro passo é inserir o gás natural.

Inserção do gás natural



Agora o próximo passo é criar um ensaio e selecionar o combustível acima.

Entre com a temperatura desejada para os gases de combustão (400 °C).

Clique no botão à direita do excesso de ar (**Lb**), como mostrado abaixo. Isto calculará qual deve ser o excesso de ar para uma temperatura de gases igual à 400 °C.

Para o exemplo o programa calculou este excesso igual a **7,06**.

Observe que a temperatura dos gases Tg se igualou à temperatura adiabática.

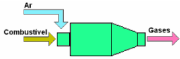
Alteração da temperatura dos gases de combustão



Finalmente, com a densidade também já calculada, podemos calcular a vazão mássica de combustível.

$$m_c = \frac{10000 * 0,51609}{(1 + 7,06 * 16,627)} = 43,6 \text{ kg/h}$$

Com a vazão de combustível é possível calcular as vazões de ar primário e de



AComb E - Combustão Industrial e suas Emissões Atmosféricas

diluição. Assim teremos, para um coeficiente de excesso de ar primário igual a 10 %:

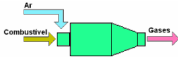
$$m_{ap} = m_c * Lb_p * ArEst = 43,6 * 1,1 * 16,627 = 797,4 \text{ kg/h}$$

Analogamente para o ar de diluição, cujo coeficiente de ar será a diferença entre o coeficiente de ar total e o coeficiente de ar primário, teremos:

$$m_{ad} = m_c * (Lb_t - Lb_p) * ArEst$$

$$m_{ad} = 43,6 * (7,06 - 1,1) * 16,627 = 4320,6 \text{ kg/h}$$

Tomando-se a densidade do ar a 20 °C igual a 1,2 kg/m³ a vazão volumétrica no ventilador de ar de diluição será de 3601 m³/h.



Emissões Atmosféricas

Emissões			Control		Used	Notes & References
Process	External Combustion Boilers		FLUE GAS RECIRCULATIO	False		
Sector	Industrial		LOW NOX BURNERS	False		
EPA Fuel Class	Natural Gas		UNCONTROLLED	True		
Properties Process	> 100 Million Btu/hr					
EPA Source Classification Code	10200601					

Pollutant	Factor	Formula	Quality	Control1	Factor	Formu	Unit	Measure
Carbon monoxide	8.400E1		B	LOW NOX BURNERS	8.400E1		Lb	Million Cubic Fe
Methane	2.300E0		B	LOW NOX BURNERS	8.400E1		Lb	Million Cubic Fe
Nitrogen oxides (NOx)	2.800E2		B	UNCONTROLLED	8.400E1		Lb	Million Cubic Fe
Nitrous oxide	2.200E0							
PM, condensable	5.700E0							

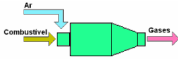
Emissão	Unidade	CO2	CH4	N2O	NOx	CO	PM	THC	H2O	Gas
Mássica	kg/mês	1,942E5	3,357	3,211	408,7	122,6	11,09	16,06	2,349E5	8,526E6
Taxa	kg/MJ	0,05076	8,774E-7	8,393E-7	0,0001068	3,205E-5	2,899E-6	4,196E-6	0,06139	2,228
Volumétrica	mg/L	30,3	0,0005237	0,0005009	0,06375	0,01913	0,00173	0,002504	36,64	

O ACombE calcula as emissões atmosféricas segundo dois critérios:

- Através da estequiometria das reações de combustão para os poluentes:
 - CO2** Gás Carbônico
 - SO2** Dióxido de Enxofre
- Através dos fatores apresentados pela EPA americana para os poluentes (Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume 1: Stationary Point and Area Sources, Fifth Edition, AP-42. U.S. Environmental Protection Agency, EPA. 2000):
 - CH4** Metano
 - N2O** Óxido Nitroso
 - NOx** Óxidos de Nitrogênio
 - CO** Monóxido de Carbono
 - HNM** Hidrocarbonetos não Metanos
 - PM** Material Particulado
 - VCO** Compostos Orgânicos Voláteis

Cada fator da EPA, é calculado segundo:

- O tipo de processo envolvido:
 - External Combustion Boilers
 - Industrial Processes
 - Internal Combustion Engines
 - Stationary Source Fuel Combustion
- O tipo de setor econômico:
 - Commercial/Institutional
 - Electric Generation
 - Industrial



AComb E - Combustão Industrial e suas Emissões Atmosféricas

▪ O tipo de combustível envolvido: Bituminous Coal

- Bituminous/Sub bituminous Coal
- Butane
- Coke
- Diesel
- Digester Gas
- Distillate Oil
- Distillate Oil (Diesel)
- Distillate Oil (No. 1 & 2)
- Distillate Oil (No. 4)
- Gasoline
- Jet Naphtha
- Kerosene
- Liquefied Petroleum Gas (LPG)
- Residual Oil
- Wood
- Sub bituminous Coal
- Residual/Crude Oil
- Residual Oil (No. 5)
- Methanol
- Refuse Derived Fuel
- Propane/Butane
- Propane
- Process Gas
- Natural Gas
- Residual Oil (No. 6)

Como exemplo para o Gás Natural, a EPA define para NOx e CO os fatores abaixo

Table 1.4-1. EMISSION FACTORS FOR NITROGEN OXIDES (NO_x) AND CARBON MONOXIDE (CO) FROM NATURAL GAS COMBUSTION^a

Combusitor Type (MMBtu/hr Heat Input) [SCC]	NO _x ^b		CO	
	Emission Factor (lb/10 ⁶ scf)	Emission Factor Rating	Emission Factor (lb/10 ⁶ scf)	Emission Factor Rating
Large Wall-Fired Boilers (>100) [1-01-006-01, 1-02-006-01, 1-03-006-01]				
Uncontrolled (Pre-NSPS) ^c	280	A	84	B
Uncontrolled (Post-NSPS) ^c	190	A	84	B
Controlled - Low NO _x burners	140	A	84	B
Controlled - Flue gas recirculation	100	D	84	B
Small Boilers (<100) [1-01-006-02, 1-02-006-02, 1-03-006-02, 1-03-006-03]				
Uncontrolled	100	B	84	B
Controlled - Low NO _x burners	50	D	84	B
Controlled - Low NO _x burners/Flue gas recirculation	32	C	84	B
Tangential-Fired Boilers (All Sizes) [1-01-006-04]				
Uncontrolled	170	A	24	C
Controlled - Flue gas recirculation	76	D	98	D
Residential Furnaces (<0.3) [No SCC]				
Uncontrolled	94	B	40	B

^a Reference 11. Units are in pounds of pollutant per million standard cubic feet of natural gas fired. To convert from lb/10⁶ scf to kg/10⁶ m³, multiply by 16. Emission factors are based on an average natural gas higher heating value of 1,020 Btu/scf. To convert from lb/10⁶ scf to lb/MMBtu, divide by 1,020. The emission factors in this table may be converted to other natural gas heating values by multiplying the given emission factor by the ratio of the specified heating value to this average heating value. SCC = Source Classification Code. ND = no data. NA = not applicable.

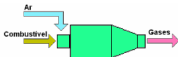
^b Expressed as NO_x. For large and small wall fired boilers with SNCR control, apply a 24 percent reduction to the appropriate NO_x emission factor. For tangential-fired boilers with SNCR control, apply a 13 percent reduction to the appropriate NO_x emission factor.

^c NSPS=New Source Performance Standard as defined in 40 CFR 60 Subparts D and Db. Post-NSPS units are boilers with greater than 250 MMBtu/hr of heat input that commenced construction modification, or reconstruction after August 17, 1971, and units with heat input capacities between 100 and 250 MMBtu/hr that commenced construction modification, or reconstruction after June 19, 1984.

AP 42, Fifth Edition, Volume 1 Supplements A, B, C, D, E, F, Updates 2001, 2002, 2003, 2004 & 2005

Para uma caldeira de grande porte, o fator para NOx é 280 lb para cada milhão de pés cúbicos de Gás natural (280 lb/10⁶ cfs).

Portanto, para o Gás do Exemplo 4, altere a sua vazão como mostrado abaixo.



AComb E - Combustão Industrial e suas Emissões Atmosféricas

Combustão

Ensaio: Ensaio Ex 4

Data: 14/10/2006 12:48:21

Lb: 7,061424

Tg: 400 °C

Temp Ar: 20 °C

Combustível: GN Ex 4

Vazão Comb: 1E6 ft3/s

Temp Comb: 25 °C

Base Úmida Teor Mássico

Nas emissões altere os parâmetros para EPA Source Classification Code (Process, Sector, Fuel Classification and Properties Process) como mostrado abaixo.

Emissões

Process: External Combustion Boilers

Sector: Industrial

EPA Fuel Class: Natural Gas

Properties Process: > 100 Million Btu/hr

EPA Source Classification Code: 10200601

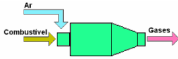
Control	Used
FLUE GAS RECIRCULATIO	False
LOW NOX BURNERS	False
UNCONTROLLED	True

Pollutant	Factor	Formula
Carbon monoxide	8.400E1	
Methane	2.300E0	
Nitrogen oxides (NOx)	2.800E2	
Nitrous oxide	2.200E0	
PM, condensable	5.700E0	

Quality	Control1	Factor	Formu	Unit	Measure
E	LOW NOX BURNERS	6.400E-1		Lb	Million Cubic Fe
E	UNCONTROLLED	2.200E0		Lb	Million Cubic Fe

Emissão	Unidade	CO2	CH4	N2O	NOx	CO	PM	THC	H2O	Gas
Mássica	lb/s	1,331E5	2,3	2,2	280	84	7,6	11	1,609E5	5,841E6
Taxa	kg/MJ	0,05076	8,774E-7	8,393E-7	0,0001068	3,205E-5	2,899E-6	4,196E-6	0,06139	2,228
Volumétrica	mg/L	30,3	0,0005237	0,0005009	0,06375	0,01913	0,00173	0,002504	36,64	

O resultado da emissão mássica para o NOx, na unidade lb/s é exatamente o fator recomendado pela EPA (280 lb/10⁶ cfs).



Referência

Nomenclatura	Ar Est	Ar de combustão estequiométrico. Definido como a massa necessária de ar para a reação estequiométrica por unidade de massa do combustível
	c	teor mássico de carbono no combustível em base seca
	h	teor mássico de hidrogênio no combustível em base seca
	H	entalpia específica dos gases de combustão
	Lb	coeficiente de ar de combustão. É a relação entre a massa atual e a massa estequiométrica de ar de combustão. O excesso de ar pode ser calculado como: $\text{Excesso de Ar} = Lb - 1$
	n	teor mássico de nitrogênio no combustível em base seca
	o	teor mássico de oxigênio no combustível em base seca
	PCi	poder calorífico inferior do combustível
	PCs	poder calorífico superior do combustível
	s	teor mássico de enxofre no combustível em base seca
	T Ar	temperatura do ar de combustão
	Tg	temperatura dos gases de combustão
	TO₂ Ar	teor volumétrico - ou molar - de oxigênio do ar de combustão em base seca
	W Ar	umidade absoluta do ar de combustão em base seca
	z	teor mássico de cinzas no combustível em base seca

Hipóteses Gerais Os combustíveis são formados por átomos de

- C - carbono
- H - hidrogênio
- N - nitrogênio
- O - oxigênio
- S - enxofre

todo carbono é oxidado a CO₂;

todo enxofre é oxidado a SO₂;

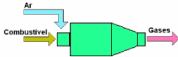
não há formação de NO_x;

os gases de combustão são isento de particulado (combustível não reagido ou cinza)

o ar e os gases de combustão são ideais;

temperatura de referência é 0,01 °C - temperatura do ponto triplo da água;

para o cálculo das entalpias a referência é a água líquida saturada à temperatura de 0,01 °C;



Caracterização Para os combustíveis óleo, biomassa e carvão mineral a caracterização se dá pela análise elementar (teores mássicos dos átomos constituintes).

Para os combustíveis gasosos hidrocarbonetos a caracterização se dá pela composição volumétrica - ou molar - de seus componentes.

Limitações A temperatura máxima para os gases de combustão é de 2500,0 °C

O coeficiente de ar - **Lb** - é sempre maior ou igual a 1,0.

Para o cálculo do coeficiente de ar - **Lb** - a partir da temperatura dos gases de combustão - **Tg** - o valor de **Lb** é limitado a 50,0.

Referências bibliográficas

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, *Manual de Recomendações e Conservação de energia na indústria de celulose e papel*, São Paulo, 1985

Perry, Robert H. et al. *Chemical Engineers' Handbook*, McGraw-Hill, New York, 1963.

Szargut, Jan et al. *Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes*, Hemisphere P. C., New York, 1988

Geerssen, Theo M., *Physical properties of natural gases*, N. V. Nederdandse Gasunie, Groningen, 1980.

Reid, Robert C et al. *The properties of gases & liquids*, 4 edition, McGraw-Hill, New York, 1987

EPA. 2000. *Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume 1: Stationary Point and Area Sources, Fifth Edition, AP-42*. U.S. Environmental Protection Agency.

EPA. 1993. Section 1.1, Bituminous and Subbituminous Coal Combustion. In: *Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume 1: Stationary Point and Area Sources, Fourth Edition, AP-42*. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards. Research Triangle Park, North Carolina.

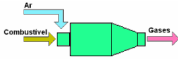
EPA. 1995. Section 1.4, Natural Gas Combustion. In: *Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume 1: Stationary Point and Area Sources, Fifth Edition, AP-42*. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards. Research Triangle Park, North Carolina.

EPA. 1995. Section 1.5, Liquefied Petroleum Gas Combustion. In: *Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume 1: Stationary Point and Area Sources, Fifth Edition, AP-42*. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards. Research Triangle Park, North Carolina.

EPA. 1995. Section 3.2, Heavy Duty Natural Gas Fired Pipeline Compressor Engines. In: *Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume 1: Stationary Point and Area Sources, Fifth Edition, AP-42*. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards. Research Triangle Park, North Carolina.

EPA. 1995. Section 3.3, Gasoline and Diesel Industrial Engines. In: *Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume 1: Stationary Point and Area Sources, Fifth Edition, AP-42*. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards. Research Triangle Park, North Carolina.

EPA. 1996. Section 3.4, Large Stationary Diesel and all Stationary Dual-fuel Engines. In: *Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume 1: Stationary Point and Area Sources, Fifth Edition, AP-42*. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning



AComb E - Combustão Industrial e suas Emissões Atmosféricas

and Standards. Research Triangle Park, North Carolina.

- EPA. 2000. Section 3.1, Stationary Gas Turbines for Electricity Generation. In: Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume 1: Stationary Point and Area Sources, Fifth Edition, AP-42. U.S. Environmental Protection Agency.
- EPA. 2000. Section 3.2, Natural Gas-fired Reciprocating Engines. In: Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume 1: Stationary Point and Area Sources, Fifth Edition, AP-42. U.S. Environmental Protection Agency
- EPA. March, 1998. Section 1.4, Natural Gas Combustion. In: Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume 1: Stationary Point and Area Sources, Fifth Edition, AP-42, Supplement D. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards. Research Triangle Park, North Carolina.
- EPA. October 1996. Section 3.3, Gasoline and Diesel Industrial Engines. In: Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume 1: Stationary Point and Area Sources, Fifth Edition, AP-42. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards. Research Triangle Park, North Carolina.
- EPA. October, 1996 Section 1.5, Liquefied Petroleum Gas Combustion. In: Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume 1: Stationary Point and Area Sources, Fifth Edition, AP-42. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards. Research Triangle Park, North Carolina.
- EPA. September, 1998. Section 1.1, Bituminous and Subbituminous Coal Combustion. In: Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume 1: Stationary Point and Area Sources, Fifth Edition, AP-42, Supplement E. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards. Research Triangle Park, North Carolina.

Composição típica de alguns gases combustíveis

	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	CO	CO ₂	O ₂	N ₂
Gás Natural		89,35	8,03	0,78	0,07	0,01		0,48		1,28
GLP				50,0	50,0					
Gás de Refinaria	13,5	37,3	32,7	2	0,9					13,6
Gás de Nafta	43,2	32,8				0,6	2,5	20,9		
Gás de Alto Forno	2,7						22,0	21,3		54,0
Gás de Coqueria	62,2	27,7	2,7				5,8	1,3	0,2	0,1
Gás de Aciaria	0,3						66,0	17,1	1,0	15,6