

Comb T

Combustão Industrial

Guia do Usuário e Referência - versão 5.23

Agosto de 2008

Térmica

Automação e Algoritmos

TermicaAutomacao@uol.com.br

Créditos

Clayton Fernandes

clayton.fernandes@uol.com.br



Sumário

Introdução	2
Instalando o Programa	3
Rodando o Programa	3
Começando com dois exemplos	4
Exemplo 1	4
Interpretando os resultados	8
Exemplo 2	9
Base seca ou úmida & Teor mássico ou volumétrico	14
Mistura de Combustíveis	16
Exemplo 3	17
Hipóteses para o Exemplo 3	17
Nomenclatura para o Exemplo 3	17
Temperatura adiabática dos gases de combustão	21
Exemplo 4	21
Hipóteses para o Exemplo 4	22
Nomenclatura para o Exemplo 4	22
Bancos de Dados	26
Critérios para inserção e atualização no banco de combustíveis	26
Critérios para inserção e atualização no banco de hidrocarbonetos	27
Referência	28
Nomenclatura	28
Hipóteses Gerais	29
Caracterização	29
Limitações	29
Referências bibliográficas	29
Composição típica de alguns gases combustíveis	30

Introdução

O aplicativo **CombT** 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 (ou CO_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 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, calor específico e índice de Wobbe 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 **CombT** 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:

- Utilizar os gases de exaustão de uma Turbina a Gás como comburente de uma combustão.
- Configurar uma Turbina a Gás e calcular os gases de exaustão para ser usado como comburente em uma outro combustão
- Imprimir os dados e resultados de uma simulação
- Calcular a taxa de emissão (massa de CO2 produzida por energia disponível no combustível)
- 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
- Carvão mineral.

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

Instalando o Programa

Ambos **CombT** 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 AC . 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 **CombT**.

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 **CombT**,
- clicar, novamente, sobre o ícone **CombT**
- e, finalmente, digitar a senha do programa.

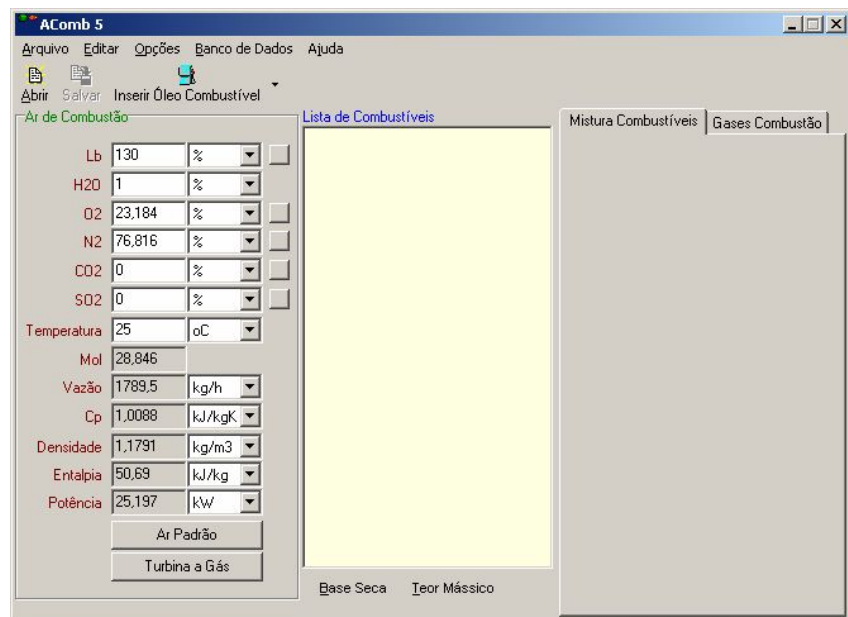
Você não precisará digitar a senha futuramente. Uma vez digitada corretamente ela não será requerida nas próximas utilizações do programa. Caso você digite a senha errada o programa entrará no modo demonstração com limitadas operações e rodará por apenas alguns minutos.

Começando com dois exemplos

Através de dois exemplos iniciais vamos ver como é simples e rápido utilizar o **CombT** nos cálculos rotineiros de quem trabalha com combustão industrial.

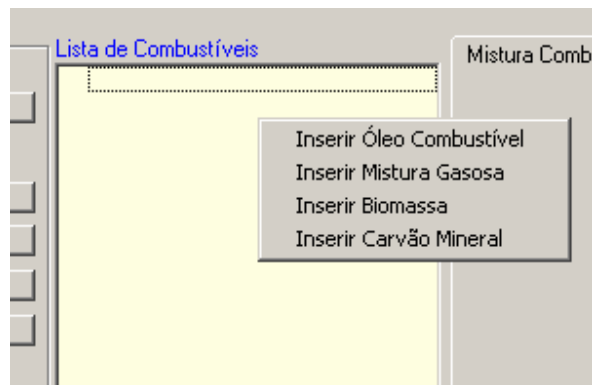
Exemplo 1 Calcular a composição dos gases de combustão em um equipamento queimando óleo 2A da Petrobrás.

Figura 1
A janela principal do
CombT



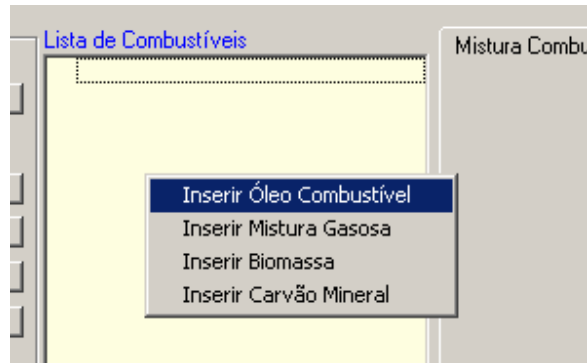
A Figura 1 apresenta a janela principal do **CombT**. É através dela que inserimos os dados e calculamos os parâmetros da combustão.

Figura 2
Lista de combustíveis
vazia



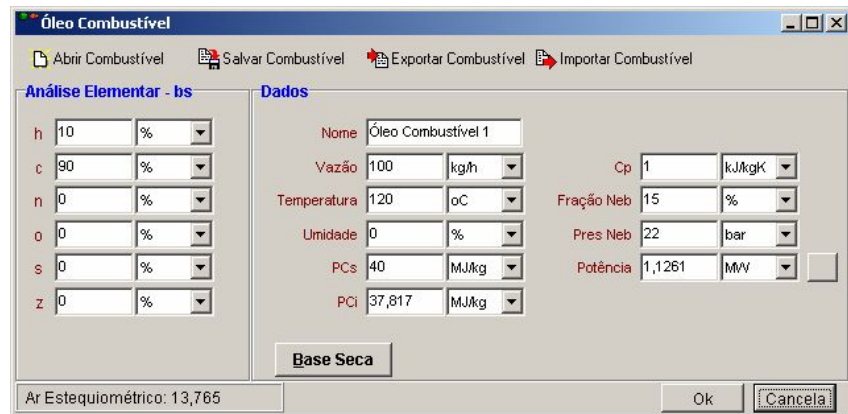
O primeiro passo para iniciar qualquer trabalho é inserir um combustível. Clique com o botão **direito** do mouse sobre a lista de combustíveis.

Figura 3
Menu dos tipos de combustíveis



No menu dos tipos de combustíveis clique, com o mouse, sobre **Inserir Óleo Combustível**.

Figura 4
Janela do Óleo Combustível com combustível genérico



A Figura 4 apresenta a janela para a inserção e atualização dos dados relativos a Óleo Combustível. Observe que ela já vem preenchida com um óleo genérico chamado **Óleo Combustível 1**. Não é o óleo 2A do nosso exemplo, portanto temos que alterá-lo. Podemos digitar os valores corretos para o nosso óleo ou, de uma maneira mais fácil, podemos importar estes dados do Banco de Dados de Combustível.

Figura 5
Barra de comando da janela de Óleo Combustível



Para importar os dados de um óleo do banco de combustíveis basta clicar sobre o botão de comando **Importar Combustíveis**.

Figura 6
Banco de Dados de Combustíveis

Nome	h (%)	c (%)	o (%)	n (%)	s (%)	z (%)	u (%)	PCs	Cp	Tipo
Óleo 9B	11	87,3	0	0,8	0,9	0	0	43,3	1,9	Óleo Combustível
Óleo 8B	10,4	86,6	1,4	0,9	0,7	0	0	43,6	1,9	Óleo Combustível
Óleo 8A	9,7	85,9	1,4	1,2	1,8	0	0	42,1	1,9	Óleo Combustível
Óleo 7B	11,1	87	0	0,9	1	0	0	43,2	1,9	Óleo Combustível
Óleo 7A	10,2	87	0	0	2,8	0	0	41,8	1,9	Óleo Combustível
Óleo 4A	10,4	86,8	0	0	2,8	0	0	41,8	1,9	Óleo Combustível
Óleo 3A	9,6	87,8	0,5	0,7	1,4	0	0	41,6	1,9	Óleo Combustível
Óleo 2B	11,5	86,9	0	0,7	0,9	0	0	43,5	1,9	Óleo Combustível
Óleo 2A	9,6	87,8	0,5	0,7	1,4	0	0	43,4	1,9	Óleo Combustível
Óleo 1A	10,5	87	0	0	2,5	0	0	42	1,9	Óleo Combustível
Diesel	13,1	86	0	0	0,9	0	0	45	1,7	Óleo Combustível

No banco de combustíveis selecione, com o mouse, o combustível desejado, no nosso caso o óleo 2A. Então clique sobre o botão de comando exportar. Você também poderá dar dois cliques sobre o combustível desejado.

Figura 7
Janela do Óleo
Combustível com
óleo 2A

Observe que, uma vez importados os dados de um combustível, o programa calcula o Ar Estequiométrico para este combustível. No nosso exemplo, óleo 2A, são necessários 13,414 kg de ar seco por kg de combustível, ou 13,548 kg de ar úmido por kg de combustível.

Você pode alterar os dados do combustível segundo suas necessidades e então aceitá-los clicando o botão **Ok**.

Figura 8
Lista de combustíveis com
óleo 2A

Observe que, agora, você está trabalhando com um combustível relacionado na Lista de combustíveis, Figura 8.

Sempre que houver algum combustível nesta lista o programa apresentará, na página **Gases Combustão**, as propriedades dos gases de combustão, Figura 9. Estas propriedades poderão ser apresentadas em base seca ou úmida e em teor

mássico ou volumétrico.

Baseado no Coeficiente de Ar – Lb - o **CombT** recalcula, sempre que necessário, os parâmetros afins (Teores de O₂ e CO₂ nos gases de combustão).



Sempre que pertinente é possível obter os valores calculados referentes à massa ou ao volume. Por exemplo, na Figura 9, pode-se alterar a unidade da vazão dos gases de combustão de **1355,6 kg/h** para **6186 m³/h**. O programa faz esta conversão segundo a densidade do gás **0,21914 kg/m³**. Note que esta densidade é função da temperatura dos gases de combustão, no exemplo **800 °C**.

Figura 9
Teores dos gases de combustão para o óleo 2A

Mistura Combustíveis	Gases Combustão	
H2O	11,293	%
O2	5,0173	%
N2	82,329	%
CO2	12,579	%
SO2	0,075135	%
Mol	30,253	
Vazão	1758,1	kg/h
Cp	1,0915	kJ/kgK
Densidade	0,34355	kg/m3
PCI/Gas	2349,4	kJ/kg
Entalpia	1153,4	kJ/kg
Potência	563,25	kW
T Adiabática	1782,3	oC
Tg	800	oC

Seco Volumétrico

Observe que a composição apresentada na página **Gases Combustão**, Figura 9, é a composição volumétrica em base seca. O **CombT** permite que você altere a apresentação tanto para o teor mássico como para a base úmida.

Figura 10
Opções para a base e teor

Base Seca Teor Volumétrico S

Para alterar tanto a base como o teor basta clicar sobre as opções correspondentes.



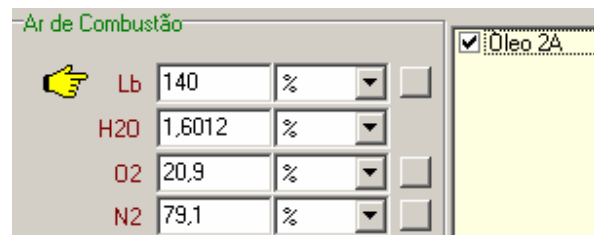
O **CombT** considera os gases perfeitos. Portanto o teor molar é o teor volumétrico.

Interpretando os resultados

Os teores dos gases de combustão, apresentados nas Figura 8 e 9, referem-se a uma combustão estequiométrica, pois o valor da variável **Lb** (coeficiente de ar) é igual a 1 (ou 100 %). Também, é importante notar, que estes dados referem-se à temperatura de 800 °C (valor da variável **Tg**). Além disto, tais valores são função das variáveis **Base** (seca ou úmida) e **Teor** (mássico ou volumétrico).

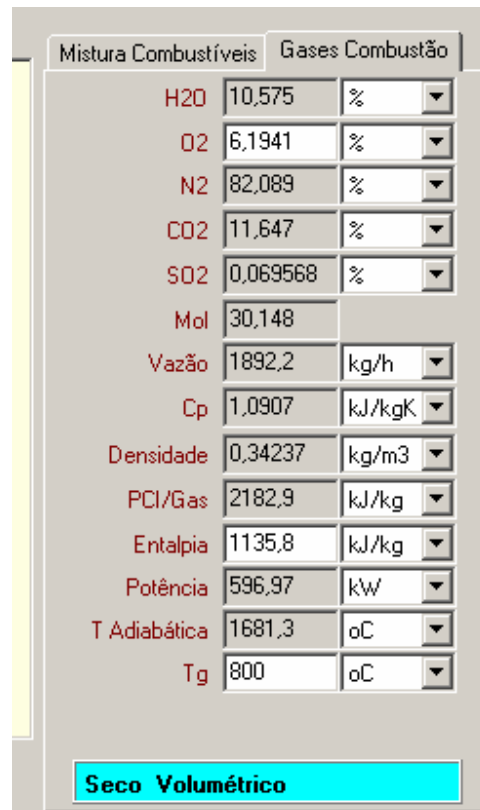
Alterando-se o valor de qualquer uma destas variáveis (**Lb**, **Tg**, **Base** ou **Teor**) altera-se os valores apresentados na Figura 9.

Figura 11
Alterando os dados do ar de combustão



Sempre é possível alterar os dados de entrada para uma outra situação. Experimente alterar o coeficiente de ar - Lb - para 140%. Ou seja excesso de ar de 40%. O programa recalculará os novos teores para os gases de combustão, como mostrado na Figura 12.

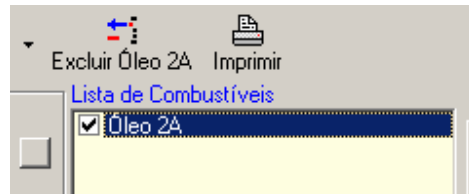
Figura 12
Teores volumétricos, ou molares, em base seca para os gases de combustão com excesso de 40%



Exemplo 2 Neste exemplo vamos calcular qual o excesso de ar para uma combustão de GLP com teor de O_2 , Base Seca Volumétrico, nos gases de combustão igual a 8%.

O primeiro passo é limpar a lista de combustíveis. Para isto você pode acionar a opção **Arquivo|Novo** do menu principal ou utilizar o botão de comando **Excluir** combustível da barra de tarefas, como mostrado na Figura 13.

Figura 13
Barra de tarefas da janela principal.

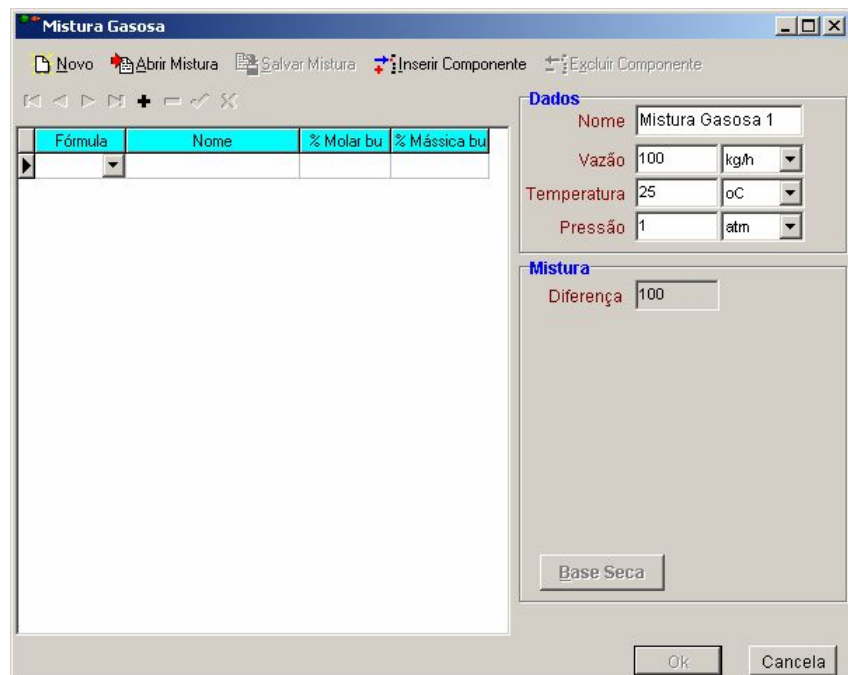


O próximo passo é inserir o combustível desejado. No nosso exemplo vamos usar o GLP formado pela mistura de 50% propano e 50% n-butano, em teor volumétrico.

Para introduzir o novo combustível siga os passos iniciais apresentados no Exemplo 1:

- clique com o botão direito do mouse sobre a lista de combustíveis
- clique sobre o tipo de combustível desejado, no nosso caso: **mistura gasosa**.

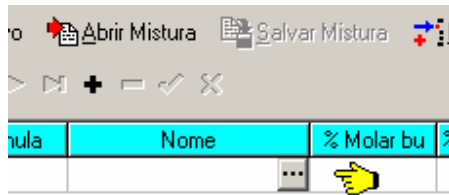
Figura 14
Janela de Mistura Gasosa



A Figura 14 apresenta a janela de inserção e atualização de dados de combustíveis formados por misturas de gases. O **CombT** fornece ao usuários todas as facilidades para estas operações, tornando-as simples e rápidas.

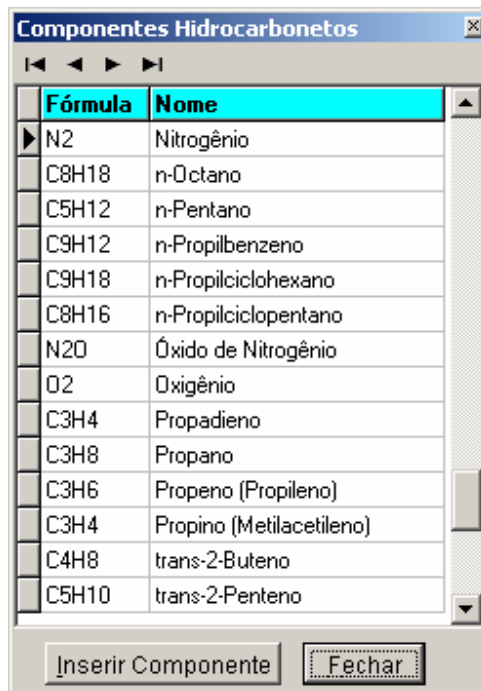
O GLP é formado por dois hidrocarbonetos: **propano** e **n-butano**. Temos, portanto de inseri-los na lista de componentes da mistura.

Figura 15
Botão para acessar o banco de componentes gasosos



Clique sobre o botão **Inserir Componente** na barra de tarefas, Figura 15. O **CombT** apresentará o banco de dados dos hidrocarbonetos, como mostra a Figura 16.

Figura 16
Banco de dados de hidrocarbonetos



Selecione o componente desejado, no nosso caso vamos selecionar o **propano** (C_3H_8). Então, através do botão de comando **Inserir Componentes** - Figura 17, insira os dados relativos ao **propano e butano** para a lista de componentes da mistura gasosa.

Figura 17
Barra de tarefas do banco de hidrocarbonetos

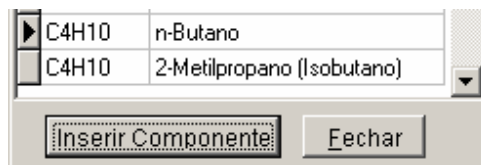


Figura 18
Lista de componentes gasosos com o componente propano

Fórmula	Nome	% Molar bu	% Mássica bu
C3H8	Propano		
C4H10	n-Butano		

Após a importação dos dados relativos ao propano e ao butano a lista de componentes se apresentará como mostra a Figura 18.



Observe que, para o **CombT**, o teor Molar é o mesmo que teor volumétrico, pois estamos considerando os gases ideais.

Agora é necessário apenas digitar as frações molares (ou mássicas). No nosso exemplo temos as frações molares de 50% para ambos

Figura 19
Lista de componentes gasosos para o GLP

Fórmula	Nome	% Molar bu	% Mássica bu
C3H8	Propano	50	43,14
C4H10	n-Butano	50	56,86

Figura 20
Propriedades da mistura gasosa

Diferença	0	
Mol	51,111	
PCs	49,915	MJ/kg
PCi	46,04	MJ/kg
Cp	1,6248	kJ/kgK
Densidade	2,0891	kg/m ³
Wobbe	0,0	MJ/kg
Potência	1,3876	MW

Base Seca

Observe que o programa atualiza, sempre que se altera a composição dos componentes, as propriedades da mistura, como mostra a Figura 20. As propriedades da mistura apresentadas são:

Diferença: é a diferença entre o somatório dos teores e a unidade

Mol : massa molecular da mistura

PCs : poder calorífico superior da mistura

Pci: poder calorífico inferior da mistura

Cp: calor específico da mistura

Densidade: massa por unidade de volume da mistura

Wobbe: índice de Wobbe da mistura.

O **CombT** permite alterar as unidades destas propriedades, assim é possível calcular, por exemplo, qual o poder calorífico da mistura em base volumétrica. Para isto basta alterar a unidade do **PCs** para, por exemplo, **MJ/m³**, como mostra a Figura 21.

Figura 21
Propriedades da mistura
gasosa

Propriedade	Valor	Unidade
Diferença	0	
Mol	51,111	
PCs	104,28	MJ/m ³
PCI	46,04	MJ/kg
Cp	1,6248	kJ/kgK
Densidade	2,0891	kg/m ³
Wobbe	0,0	MJ/kg
Potência	1,3876	MW

Base Seca

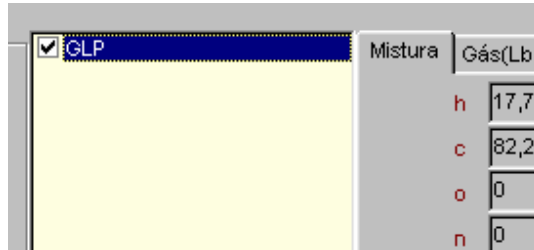


Lembre-se que o **CombT** utiliza a densidade para transformar as unidades mistas (por exemplo de **kJ/kg** para **kJ/m³**). A densidade é função da temperatura (no nosso exemplo a temperatura da mistura é de **25 °C**), portanto a transformação de unidade que envolve mudança de massa para volume depende da temperatura.

Antes de encerrar a inserção do combustível GLP vamos salvá-lo em um arquivo. Este procedimento é recomendável pois voltaremos a utilizar este mesmo combustível. Para tanto altere o **Nome** da mistura para **GLP** e clique no botão **Salvar Mistura** da barra de ferramentas.

Para prosseguir, com o exemplo, clique no botão **Ok** e volte à janela principal, onde a lista de combustíveis deve estar como mostra a Figura 22.

Figura 22
Lista de combustíveis com o gás GLP



Em nosso exemplo queremos calcular o excesso de ar, para o **GLP**, com o teor de O₂, Base Seca Volumétrica, nos gases de combustão igual a 8%. Portanto o próximo passo é entrar com este dado, como mostra a Figura 23.

Figura 23
Entrada de dados para os gases de combustão

Gás de Combustão

Tg 800 °C

Teor O₂ 8 %

Teor CO₂ 8,5518 %

H 2000 kJ/kg

Figura 24
Cálculo dos parâmetros da combustão

Ar de Combustão

Lb 156,94 %

H₂O 1,6012 %

O₂ 20,9 %

N₂ 79,1 %

CO₂ 0 %

SO₂ 0 %

Temperatura 25 °C

Mol 28,846

Vazão 2436,9 kg/h

Cp 1,0088 kJ/kgK

Densidade 1,1791 kg/m³

Entalpia 50,69 kJ/kg

Potência 34,313 kW

Gás de Combustão

GLP

Tg 1493,4 °C

Teor O₂ 8 %

Teor CO₂ 8,5518 %

O final do nosso exemplo 2 é um excesso de ar de 56,94 %

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 CombT 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:

- 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:

- $Mol_{H_2} = 2$
- $Mol_{CH_4} = 16$ e
- $Mol_{H_2O} = 18$

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.

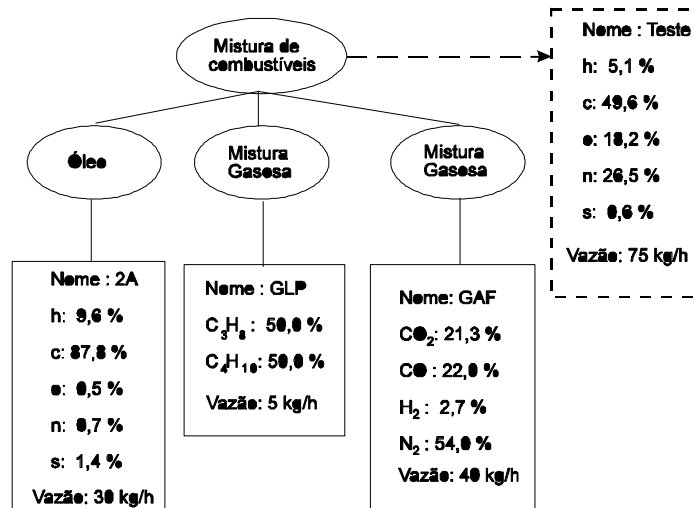
Mistura de Combustíveis

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

Figura 26
Como o CombT vê os combustíveis



O CombT sempre trabalha considerando uma mistura de combustíveis. Quando se tem apenas um combustível esta mistura terá apenas um elemento. A Figura 26 ilustra como o programa manipula esta mistura. 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, para a Figura 26, 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 Valumétrico
- 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 = 1 kg/s
- perdas para o ambiente e purga desprezíveis
- temperatura dos combustíveis :
 - Óleo 2A, 120 °C
 - GLP, 25 °C

Nomenclatura para o Exemplo 3

Vamos adotar a seguinte nomenclatura:

- **V_g**: vazão mássica dos gases de combustão em base úmida [kg/s]
- **H_g**: entalpia específica dos gases em base úmida [kJ/kg]
- **M_c**: vazão mássica do combustível em base úmida [kg/s]
- **PCi**: poder calorífico inferior do combustível em base úmida [kJ/kg]
- **P_u**: potência útil (parcela de energia transferida a água por unidade de tempo) [kW]
- **P_t**: potência total (total de energia contida no combustível por unidade de tempo) [kW]
- **Ef**: eficiência

Como uma estimativa, podemos escrever:

$$P_u = P_t - V_g * H_g$$

$$P_t = M_c * PCi$$

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

$$Ef = 1 - \frac{V_g * H_g}{M_c * PCi}$$

Vamos agora calcular cada um destes termos.

Para iniciar temos de inserir, como mostrado nos Exemplos 1 e 2, o óleo 2A e o gás GLP.

Observe, durante a inserção dos combustíveis:

- alterar as vazões mássicas de cada combustível para 0,5 kg/s
- não é necessário recompor o GLP, uma vez que, como sugerido no

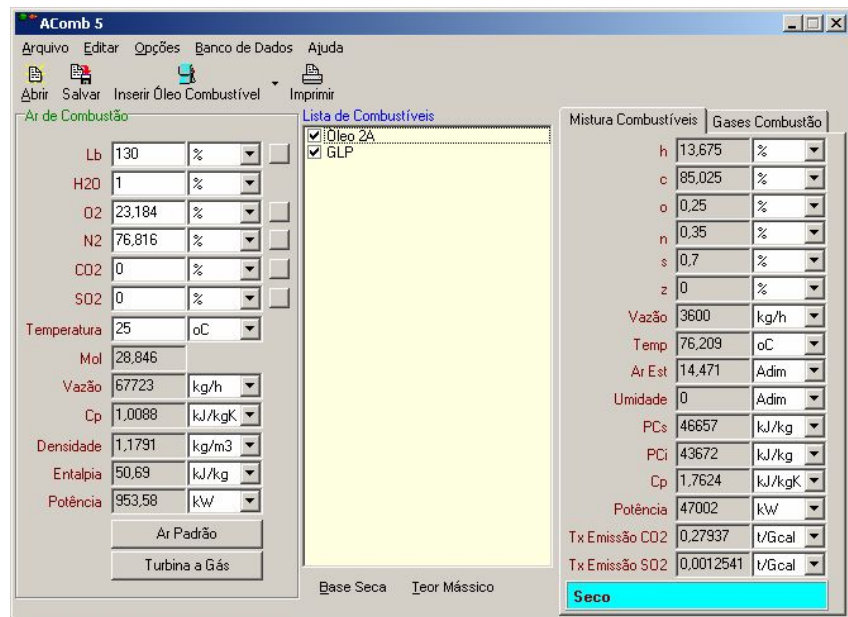
Exemplo 2, ele está salvo em arquivo. Portanto basta abri-lo.

Após a inserção dos combustíveis a janela principal deve estar como mostra a Figura 27.

Na página **Mistura Combustíveis**, da janela principal, é apresentado o combustível equivalente e aqui já temos dois valores que precisamos:

- $M_e = 1,0 \text{ kg/s}$, nossa hipótese e,
- $PC_i = 43,672 \text{ MJ/kg}$.

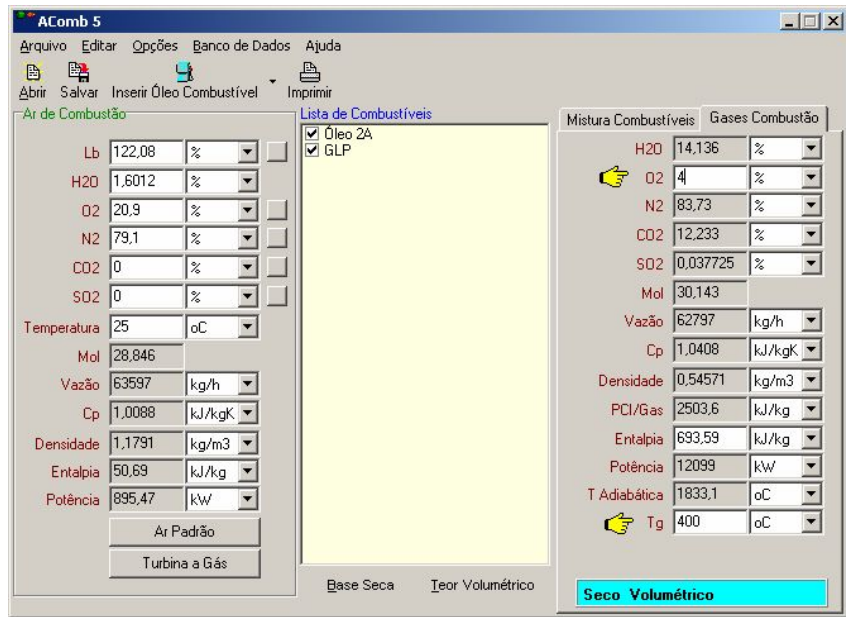
Figura 27
Janela principal do
Exemplo 3



É possível, quando se tem mais de um combustível na mistura de combustíveis, desabilitar um ou mais combustíveis desta mistura clicando com o mouse sobre o pequeno quadro à esquerda do nome do combustível. Assim é possível obter rapidamente os parâmetros para a combustão individual de cada combustível componente de uma mistura.

Para calcular os outros valores, relativos aos gases de combustão, temos antes de calcular o excesso de ar da combustão. Para isto vamos utilizar os dados do problema: teor de O_2 nos gases de combustão igual a 4% e temperatura de $400 \text{ }^\circ\text{C}$. Digite-os nos quadros apropriados como mostrado na Figura 28.

Figura 28
 Dado de teor de O_2 e temperatura dos gases de combustão do Exemplo 3





Automaticamente o **CombT** calcula o Excesso de Ar relativo aos dados digitados. Veja Figura 29.

Figura 29
 Cálculo do excesso de ar do Exemplo 3



Altere a base para Úmida e o Teor para Mássico e vá à página **Gases Combustão** como mostrado na Figura 31.

Figura 31
Vazão e Entalpia dos
gases de combustão para
o Exemplo 3

Mistura Combustíveis		Gases Combustão	
H2O	14,136	%	▼
O2	4	%	▼
N2	83,73	%	▼
CO2	12,233	%	▼
SO2	0,037725	%	▼
Mol	30,143		
 Vazão	62797	kg/h	▼
Cp	1,0408	kJ/kgK	▼
Densidade	0,54571	kg/m3	▼
PCI/Gas	2503,6	kJ/kg	▼
 Entalpia	693,59	kJ/kg	▼
Potência	12099	kW	▼
T Adiabática	1833,1	oC	▼
Tg	400	oC	▼

Seco Volumétrico

Portanto temos:

- $V_g = 62797 \text{ kg/h} = 18,917 \text{ kg/s}$ e
- $H_g = 693,56 \text{ kJ/kg}$

e, finalmente, podemos calcular a eficiência:

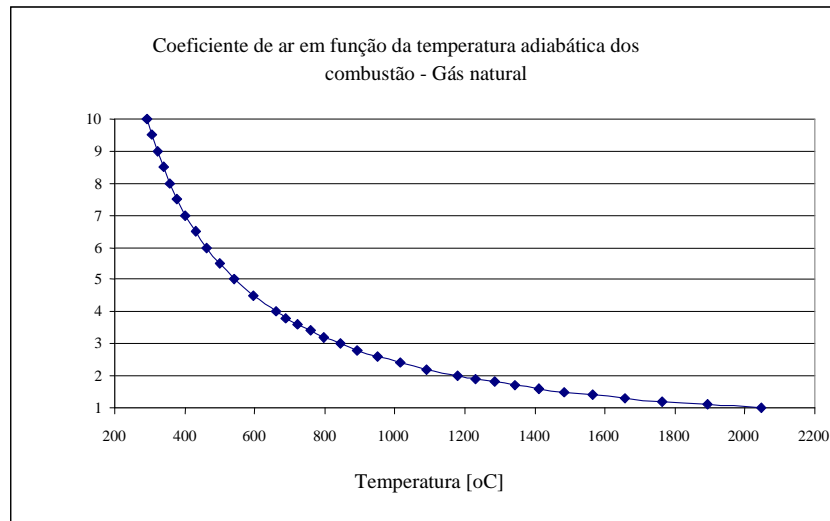
$$E_f = 1 - \frac{V_g * H_g}{M_c * PCI} = 1 - \frac{18,917 * 629,53}{1,0 * 43672} = 0,73 = 73\%$$

Temperatura adiabática dos gases de combustão

Uma importante função do **CombT** 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 da Figura 33 mostra esta função para o gás natural.

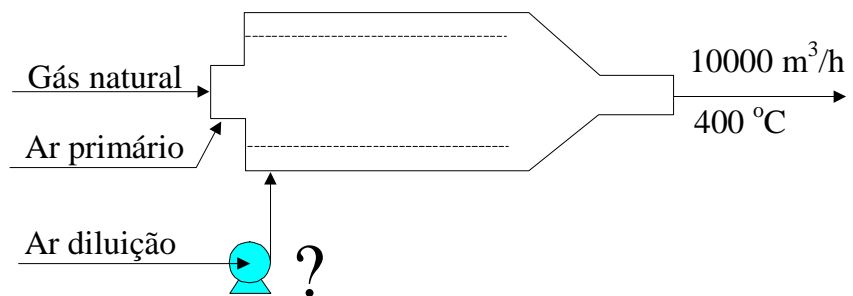
Figura 33
Coeficiente de ar de combustão



Para ilustrar esta função vamos resolver o seguinte exemplo.

Exemplo 4 Um secador necessita de **10000 m³/h** de gases a **400 °C**. Para tanto está sendo proposto um gerador de gases quentes para trabalhar com gás natural, Figura 32. Calcule a vazão volumétrica no ventilador de ar de diluição.

Figura 32
Esquema para o Exemplo 4



Para resolver o problema proposto vamos seguir os seguintes passos:

- 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:

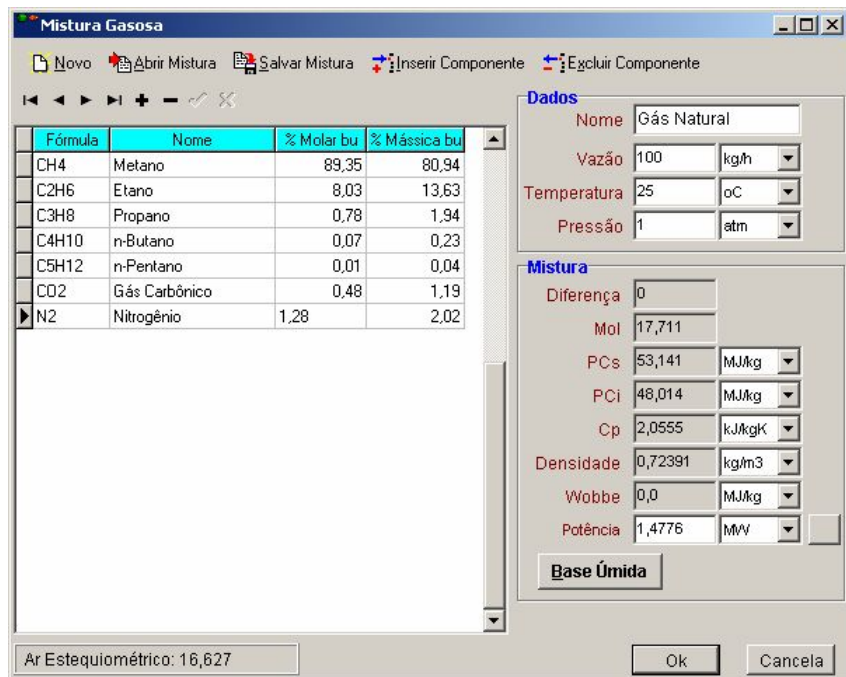
$$m_c = \frac{m_g}{(1 + Lb_t * ArEst)}$$

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 **CombT**, estes dois fatores.

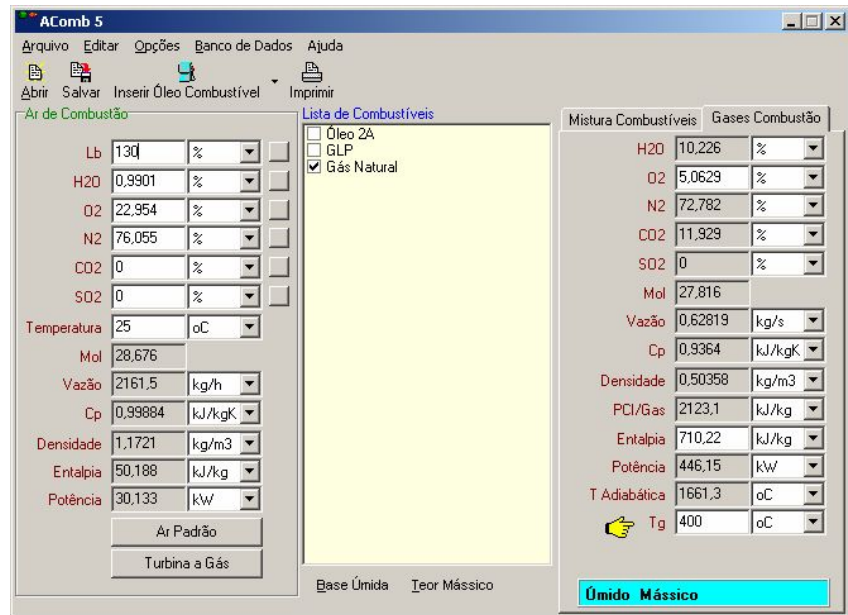
O primeiro passo é inserir o gás natural, como mostrado na Figura 34. Não se preocupe com a vazão, pois esta nós ainda vamos calcular. Aqui o importante é o ar estequiométrico em base úmida - **$ArEst = 16,627$**

Figura 34
Inserção do gás natural



Agora o próximo passo é calcular o coeficiente de excesso de ar. Vá para a janela principal do programa, Figura 35, e altere o valor da temperatura dos gases de combustão para 400 °C.

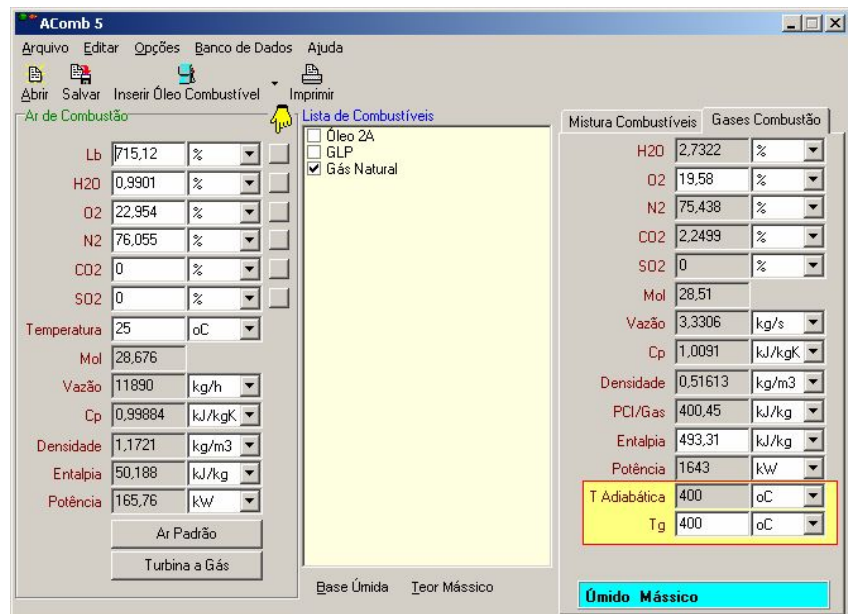
Figura 35
Alteração da temperatura dos gases de combustão



Para calcular o excesso de ar relativo à temperatura adiabática de 400 °C basta clicar sobre o botão ao lado da variável Lb. Veja Figura 36.

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

Figura 36
Cálculo do coeficiente de excesso de ar



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

$$m_c = \frac{10000 * 0,51613}{(1 + 7,1512 * 16,627)} = 43,0 \text{ kg/h}$$

Com a vazão de combustível é possível calcular as vazões de ar primário e de diluição. Assim teremos, para um coeficiente de excesso de ar primário igual a 10 %:

$$m_{ap} = m_c * Lb_p * ArEst = 43,0 * 1,1 * 16,627 = 787,3 \text{ kg/h}$$

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:

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

$$m_{ad} = 43,0 * (7,1528 - 1,1) * 16,627 = 4327,5 \text{ kg/h}$$

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 3606 m³/h.

Bancos de Dados

O CombT trabalha acoplado a dois bancos de dados assim divididos:

- Banco de **Combustíveis**, para combustíveis líquidos e sólidos, onde a caracterização se dá pela composição mássica elementar, como, por exemplo, todos os óleos da Petrobrás, madeira, borra de café, carvão, etc.
- Banco de **Hidrocarbonetos**, para os componentes dos combustíveis gasosos, onde a caracterização se dá pelo teor volumétrico destes componentes, como por exemplo, metano, propano, CO, etc.

Os bancos podem ser atualizados segundo a necessidade do usuário. Para tanto basta abrir a janela correspondente via menu **Banco de Dados** da janela principal.

Para inserir ou atualizar os dados destes bancos é necessário seguir alguns critérios.

Figura 38
Banco de dados dos combustíveis

Nome	H	C	O	N	S	Z	U	PCs	Cp	Tipo
Bagaco de Cana	6,7	48,4	44,8	0	0,1	0	0	18,9	1	Biomassa
Carvão Vegetal	4,4	93	0		2,5	0	0	18,7	1	Biomassa
Cavaco Eucaliptos	5,8	48,6	45,2	0,6	0,1	0	0	19,6	1	Biomassa
Diesel	13,1	86	0	0	0,9	0	0	45	1	Óleo Combustível
Óleo 2A	9,6	87,8	0,5	0,7	1,4	0	0	43,4	1	Óleo Combustível
Óleo 2B	11,5	86,9	0	0,7	0,9	0	0	43,5	1	Óleo Combustível
Óleo 7B	11,1	87		0,9	1	0	0	43,2	1	Óleo Combustível

Critérios para inserção e atualização no banco de combustíveis

Para inserir ou atualizar dados no banco de combustíveis observe que:

- todos os dados são em base seca
- os teores elementares são mássicos e em porcentagem,
- a unidade para o PCs, poder calorífico superior, é a unidade escolhida na barra de tarefas, Figura 33.
- a unidade para o C_p , calor específico, é a unidade escolhida na barra de tarefas, Figura 39.

Figura 39
Barra de tarefas do banco de combustíveis

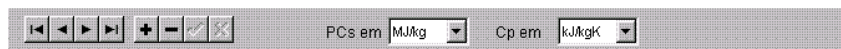
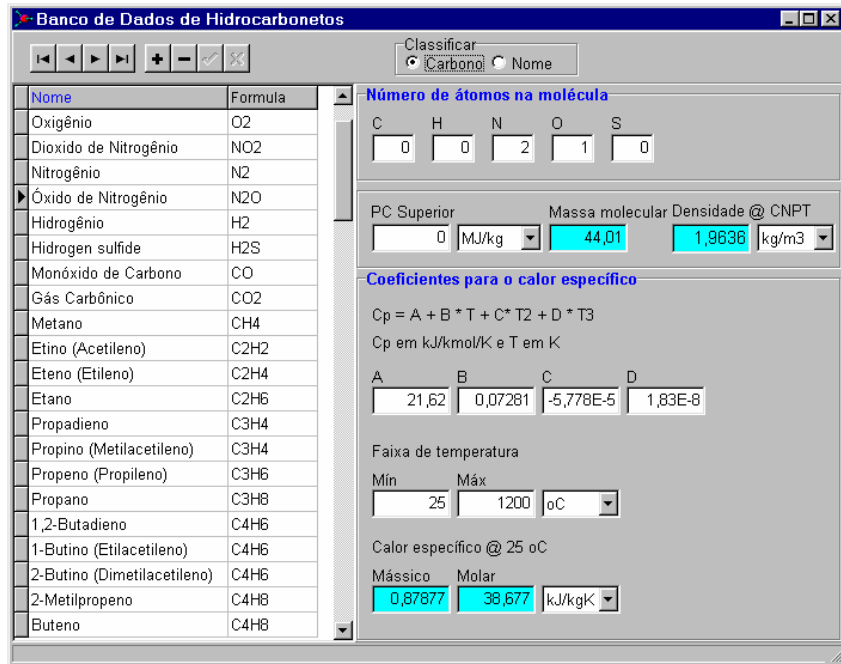


Figura 40
Banco de dados dos hidrocarbonetos



Crítérios para inserção e atualização no banco de hidrocarbonetos

Para inserir dados no banco de hidrocarbonetos observe que:

- todos os dados são em base seca,
- a caracterização se dá pelo número de átomos do elemento no componente, por exemplo o metano, CH₄, será inserido como C = 1 e H = 4,
- a unidade para PCs, poder calorífico superior, é a unidade escolhida na barra de tarefas, Figura 40. Quando a unidade do poder calorífico superior for em base volumétrica, o programa considera que o componente está a **1 atm e 0 °C (CNPT)**.

- O Cp, calor específico do componente, é dado em termos de parâmetros do polinômio:

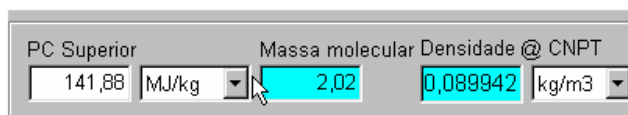
$$C_p = A + B * T + C * T^2 + D * T^3$$

para Cp em **J/mol/K** e T em **K**.

Uma excelente fonte bibliográfica para esta propriedade é o livro de Robert C. Reid, veja nas referências bibliográficas.

- As temperaturas mínima e máxima (Min e Máx) são utilizadas para o cálculo do Cp da seguinte forma:
 - para uma temperatura T entre o intervalo Min e Máx Cp = Cp(T)
 - para uma temperatura T menor que Min Cp = Cp(Min)
 - para uma temperatura T maior que Max Cp = Cp(Max)

Figura 41
Barra de tarefas do banco de hidrocarbonetos



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
	PCi/Vol	coeficiente para os gases de combustão. É a relação entre o poder calorífico inferior do combustível e o volume - ou massa - de gases de combustão formado. É função do excesso de ar.
	PCs	poder calorífico superior do combustível
	Ro	densidade
	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
	Wobbe	índice de Wobbe, definido para misturas gasosas de combustíveis hidrocarbonetos como a relação: $Wobbe = \frac{PC_i}{\sqrt{\frac{\rho}{\rho_{ar}}}}$
		onde
		<ul style="list-style-type: none"> • PCi: poder calorífico inferior da mistura , • ρ: densidade da mistura @ 25 °C • ρ_{ar} : densidade do ar @ CNPT
	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 CO_2 ;

todo enxofre é oxidado a SO_2 ;

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 $0,01\text{ }^\circ\text{C}$ - temperatura do ponto triplo da água;

para o cálculo das entalpias a referência é a água líquida saturada à temperatura de $0,01\text{ }^\circ\text{C}$;

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 $2500,0\text{ }^\circ\text{C}$

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 all. *Chemical Engineers' Handbook*, McGraw-Hill, New York, 1963.
- Szargut, Jan et all. *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 all. *The properties of gases & liquids*, 4 edition, McGraw-Hill, New York, 1987

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