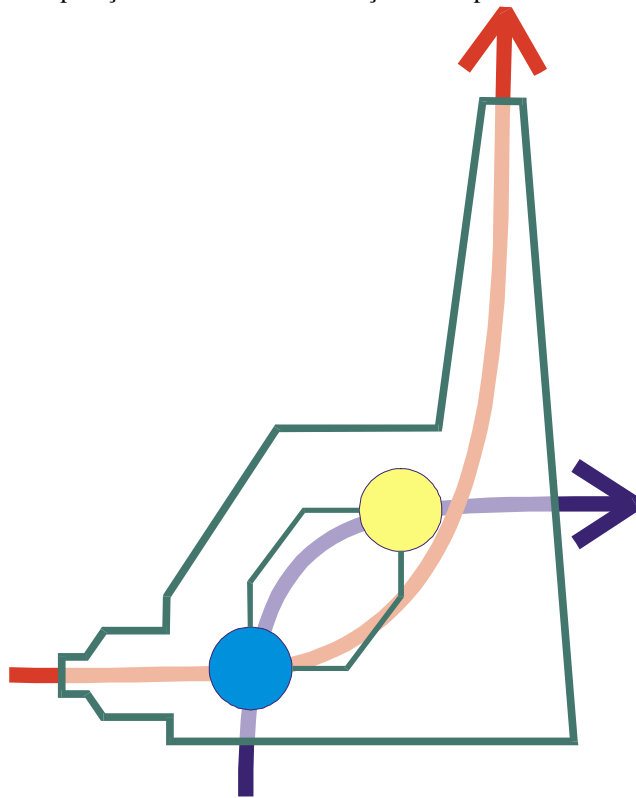


Caldeira 5

Recuperação e Eficiência na Geração de Vapor



Guia do Usuário e Referência - versão 5.05

Fevereiro de 2008

Térmica

Automação e Algoritmos

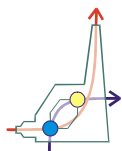
TermicaAutomacao@uol.com.br

Créditos

Clayton Fernandes

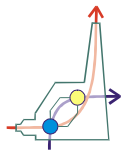
clayton.fernandes@uol.com.br





Sumário

Introdução	1
Instalando o Programa	3
Conhecendo o Caldeira	3
Começando com um exemplo	7
Exemplo 1	8
Turbina a Gás	16
Pré aquecimento do ar	19
Edição dos dados	20
Calculadora	20
Unidades	21
Combustível	22
Alterando as características do combustível	23
Combustíveis gasosos	25
Ar de Combustão	28
Água	29
Nebulização	30
Vapor	31
Gases de Combustão	32
Dados psicrométricos dos gases de combustão	33
Purga	34
Caldeira	35
Dados para o cálculo das Perdas	36
Eficiências	36
Potências	37
Cálculo das Eficiências	37
Base seca ou úmida & Teor mássico ou volumétrico	37
Mistura de Combustíveis	38
Exemplo 2	39
Bancos de Dados	43
Critérios para inserção e atualização no banco de combustíveis	43
Critérios para inserção e atualização no banco de hidrocarbonetos	44
Impressão	44
Referências	47
Nomenclatura	47
Hipóteses Gerais	48
Caracterização	48
Limitações	49
Referências bibliográficas	49
Composição típica de alguns combustíveis	49



Introdução

O aplicativo **Caldeira** foi desenvolvido para auxiliar nos cálculos rotineiros relativos à operação de geração de vapor através da queima de combustíveis líquidos, sólidos, gasosos ou de suas misturas. Nesta nova versão também se inclui a geração de vapor através dos gases de exaustão de uma **Turbina a Gás**, onde o usuário pode:

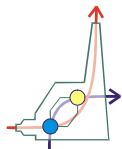
- Definir o Gás da Turbina através da composição de seus constituintes
- Definir a temperatura de saída dos gases de exaustão ou
- Definir o excesso de ar na alimentação da Turbina
- Definir a potência elétrica desejada e calcular o consumo de gás combustível ou
- Definir a potência desejada nos gases de exaustão e calcular o consumo de combustível.

O **Caldeira** rapidamente calcula, entre outros:

- As eficiências, pelo método direto e indireto, tanto em base PCs como Pci.
- O balanço de massa e energia da Caldeira.
- As potências total, útil e perdida ao ambiente.
- O excesso de ar de combustão a partir do teor de O₂ (ou CO₂) no gás de combustão, ou os teores de O₂ (ou CO₂) a partir do excesso de ar.
- A massa de ar estequiométrico do combustível ou de suas misturas,
- Dados psicrométricos dos gases de combustão, temperatura de orvalho, entalpia e a umidade do gás de combustão,
- 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 como para base seca.

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

- Calcular as eficiências de uma caldeira com um mínimo de dados, o programa contém valores padrões para todas as entradas de dados.
- Forçar o ajuste do balanço de energia através do cálculo do consumo de combustível ou da produção de vapor.
- 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.
- Imprimir os dados ou exportá-los para uma planilha padrão **Excel** ou para um editor de textos.
- Exportar, como figura tipo **bitmap**, o fluxograma das entradas e saídas.
- Configurar o fluxograma das entradas e saídas, alterando os dados a serem apresentados, unidades e cores.
- Arquivar, separada ou conjuntamente, os componentes de uma mistura de combustíveis. Isto permite ao usuário montar uma biblioteca de combustíveis de seu interesse.
- 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



Caldeira 5.0 - Recuperação e Eficiência na Geração de Vapor

combustíveis.

Editar valores em forma de equações aritméticas. Assim é possível, por exemplo, digitar para a temperatura dos gases o valor de $900/1.38$ °C (ou seja $652,17$ °C).

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.

Também é possível gerar vapor através da recuperação de gases de exaustão de uma Turbina a Gás.

Instalando o Programa

Ambos **Caldeira** e seu programa de instalação são aplicações desenvolvidas para o sistema operacional Windows 2000 ou compatível.

Para instalar o programa em seu microcomputador basta executar o arquivo **Cal5.exe**.

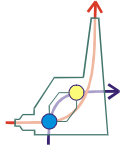
O programa de instalação criará um diretório contendo todos os arquivos necessários para rodar o programa. Criará também um ícone na sua tela principal - *Desktop*. Caso você não altere as instruções do programa de instalação, este ícone se chamará **Caldeira 5**.

Conhecendo o Caldeira

A melhor maneira de se familiarizar com o **Caldeira** é rodá-lo. Após a instalação do programa, para rodá-lo basta :

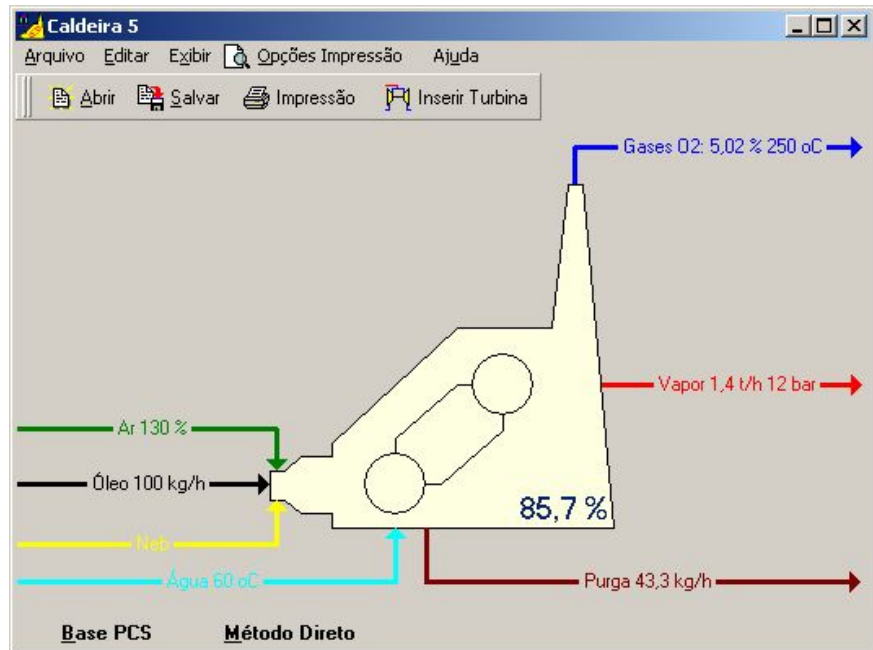
Clicar, como mouse, sobre o ícone **Caldeira 5** no Desktop.

Aparecerá um tela solicitando a senha do programa. Você não precisará digitar a senha futuramente. Uma vez digitada corretamente ela não será solicitada nas próximas utilizações do programa. Caso você digite a senha errada o programa entrará no modo demonstração com limitadas operações.



Caldeira 5.0 - Recuperação e Eficiência na Geração de Vapor

A tela principal do
Caldeira

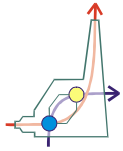


Quando você carrega pela primeira vez o **Caldeira** ele já virá com todos os dados preenchidos. São dados **padrões** do programa. A você caberá modificar estes dados segundo as suas necessidades. A medida que você altera um dado o programa automaticamente recalculará as eficiências da caldeira e os parâmetros relativos ao cálculo destas eficiências.

Esta tela representa o **fluxograma** da caldeira. Cada corrente contém informações resumidas que a caracterizam. Por exemplo, **Vapor 1,4 t/h 12 bar** significa a corrente **vapor** com vazão de **1,4 t/h** e pressão absoluta de **12 bar**.

Observe que a forma do **mouse** se modifica quando ele passa sobre as correntes do fluxograma. Isto indica que, clicando-se duas vezes com o **mouse** esquerdo abrirá uma janela da edição de dados correspondente à corrente selecionada.

Vá com o mouse sobre a corrente **Vapor** e clique duas vezes.



Caldeira 5.0 - Recuperação e Eficiência na Geração de Vapor

Edição dos dados da corrente Vapor

Editar

Gases de Combustão		Purga		Caldeira	
Combustível	Ar de Combustao	Vapor	Água	Nebulização	
<input checked="" type="checkbox"/> Nome	Vapor				
<input checked="" type="checkbox"/> V	1,4	t/h	<input type="checkbox"/>		
<input checked="" type="checkbox"/> P	12	bar			
<input type="checkbox"/> T	187,91	oC			
<input type="checkbox"/> Super	0	oC	Estado <input type="radio"/> Superaquecido <input checked="" type="radio"/> Saturado @ P <input type="radio"/> Saturado @ T		
<input type="checkbox"/> Pot	1082,8	kW			
<input type="checkbox"/> Per	86,566	%			
Cor	Red				

Ar Estequiométrico: 13,903
Produção Específica: 14

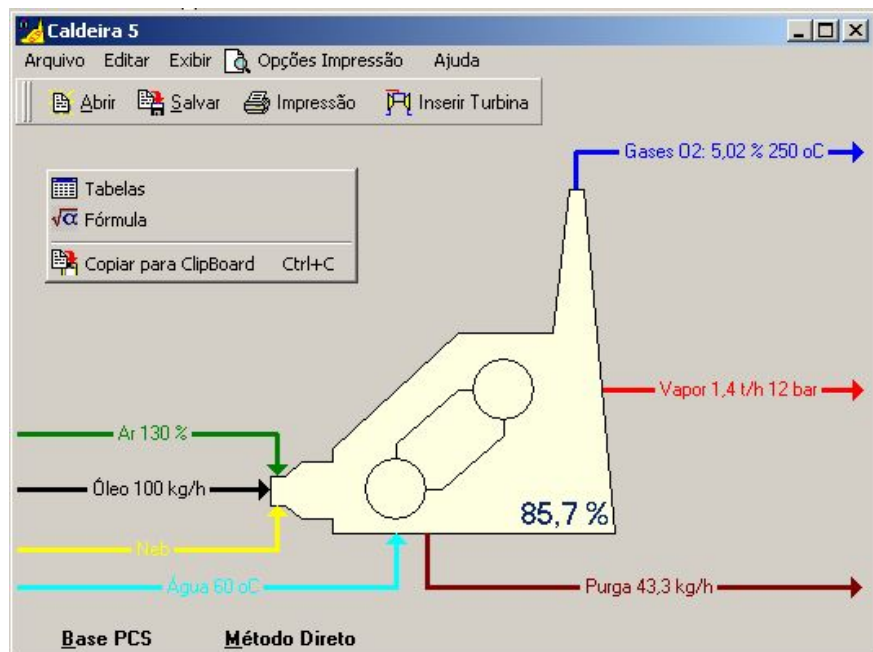
OK Cancel

Aqui você altera os dados relativos ao **vapor**. Observe que à esquerda desta janela estão selecionados os dados que aparecerão sobre a corrente no **fluxograma** da caldeira. Uma vez alterado algum valor clique sobre o botão **Ok** para aceitá-lo ou sobre o botão **Cancel** para desistir. O **Caldeira** automaticamente recalcula todos os parâmetros relativos ao cálculo das eficiências.

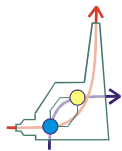


Observe que no **Caldeira** não existe nenhum comando para a execução dos cálculos. Uma vez atualizado algum dado, todos os cálculos relativos às eficiências são feitos automaticamente.

Menu de opções para o fluxograma



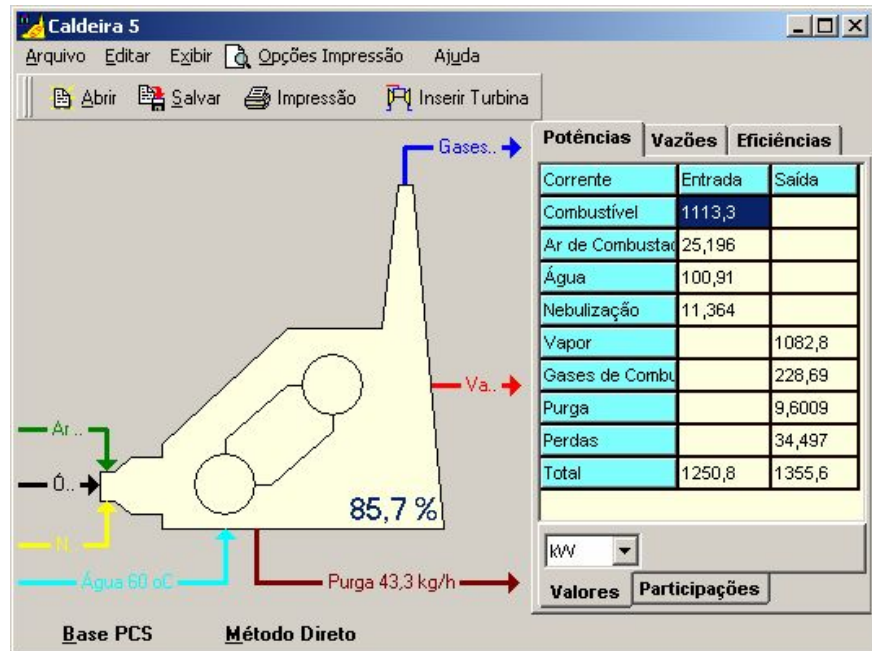
Através do botão direito do **mouse** é possível ativar o **menu** de opções para o



Caldeira 5.0 - Recuperação e Eficiência na Geração de Vapor

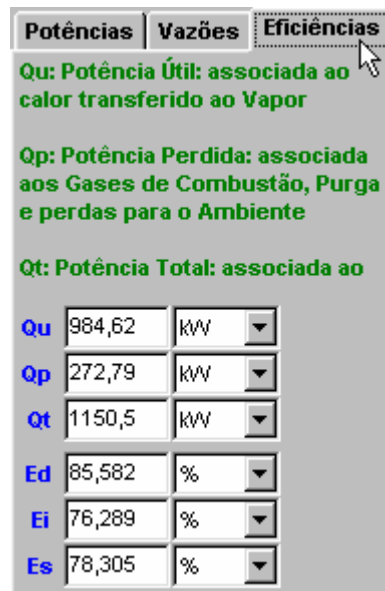
fluxograma. Por exemplo a apresentação das tabelas resumos

Tabelas de resumos de balanço de energia, balanço de massa e eficiências



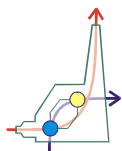
Os balanços de energia e massa poderão ser visualizados tanto através de seus valores como em participação.

Tabela das eficiências



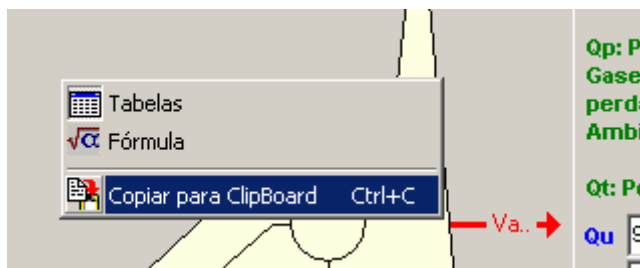
São apresentadas as três eficiências possíveis de serem calculadas:

- Ed:** pelo método **direto**
- Ei:** pelo métodos **indireto** e
- Es:** pelo método das **saídas**



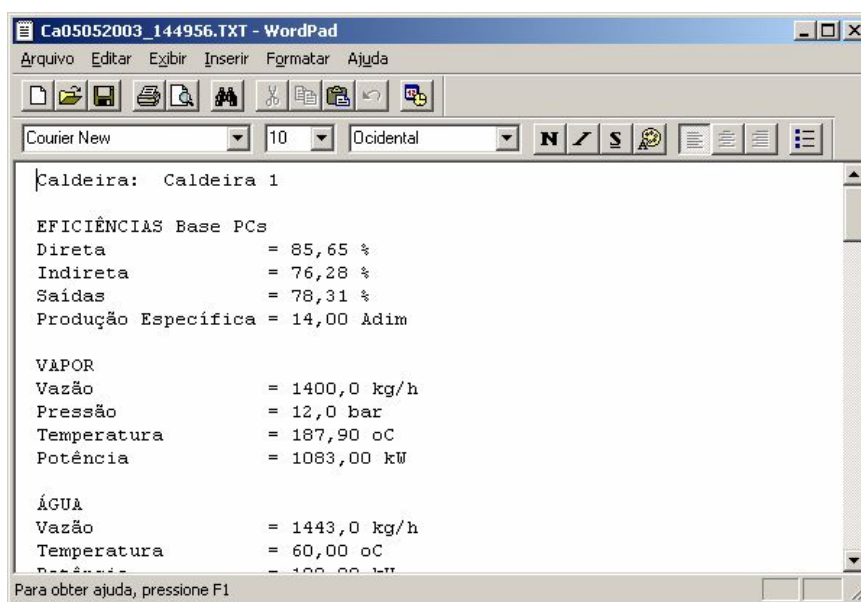
Caldeira 5.0 - Recuperação e Eficiência na Geração de Vapor

Copiar a figura do fluxograma, em formato BMP, para a área de transferência - Clipboard



É possível copiar para a área de transferência – Clipboard do Windows – o desenho do fluxograma da caldeira, através do **menu** de opções da janela principal. Uma vez copiada para o Clipboard, esta figura pode ser inserida em outros aplicativos do **Windows**, como exemplo o **Word**, através do comando **Editar|Colar** deste editor.

Impressão



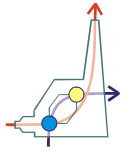
O **Caldeira** permite a impressão dos resultados através do comando **Arquivo|Imprimir** do **menu** principal.

Também é possível exportar estes dados para o **Clipboard** do **Windows** e posteriormente importá-los na planilha **Excel**.

O formato para exportação é compatível com a planilha **Excel**, possibilitando ao usuário manusear os dados de forma lógica dentro da planilha.

Começando com um exemplo

Através de um exemplo inicial vamos ver como é simples e rápido utilizar o **Caldeira** nos cálculos rotineiros de quem trabalha com geração de vapor.



Caldeira 5.0 - Recuperação e Eficiência na Geração de Vapor

Exemplo 1 Calcular as eficiências de uma caldeira conhecendo-se os seguintes dados:

Combustível: **óleo 2A**, vazão de **700 kg/h**

Vapor: vazão de **10 t/h**, a **22 bar** e **30 °C** de superaquecimento

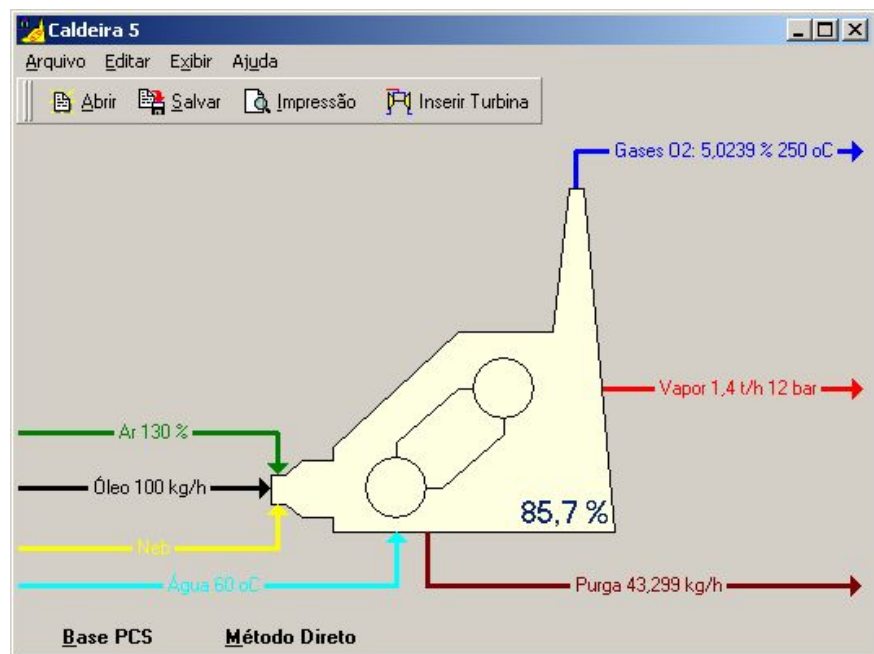
Chaminé: Teor de O₂ de **5 %** e temperatura de **220 °C**

Portanto, para calcular as eficiências deste exemplo teremos de fazer, pelo menos, 5 alterações nos dados do programa.

Observe que, neste exemplo nada foi dito sobre a temperatura da água de alimentação, nem sobre as perdas para o ambiente. Para estes dados, e outros não mencionados, vamos deixar os valores padrões do programa.

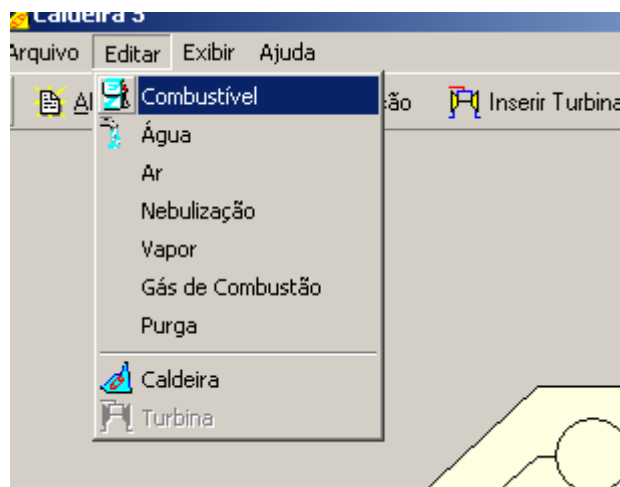
Vamos começar alterando os dados do combustível.

A janela principal do
Caldeira

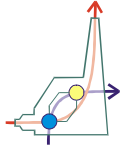


A figura acima apresenta a janela principal do **Caldeira**. É através dela que inserimos os dados e calculamos os parâmetros da geração de vapor. Para alterar os dados do combustível posicione o *mouse* sobre a corrente do combustível, e clique duas vezes com o botão esquerdo do *mouse*.

Também é possível usar o
menu principal



Também é possível usar o menu principal **Editar|Combustível** para acessar a

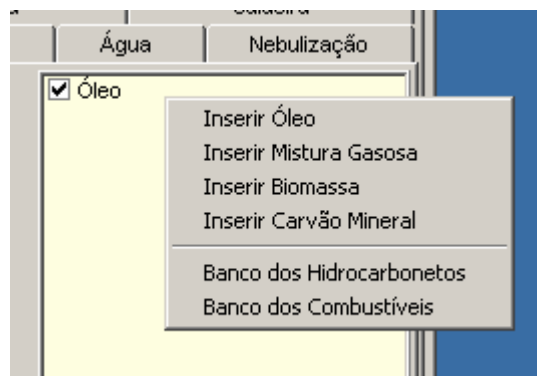


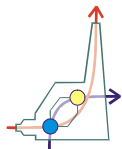
janela de atualização do combustível.

A figura acima apresenta a janela para a atualização do combustível. O combustível atual é um combustível genérico, padrão do programa, e deverá ser alterado para o combustível **Óleo 2A**, segundo o enunciado do exemplo.

Selecione, com o *mouse*, o combustível atual, e clique com o botão da *direita* para acessar o *menu* dos combustíveis. Selecione a opção **Atualizar Óleo**, como mostrado na figura abaixo.

Menu de opções dos combustíveis





Caldeira 5.0 - Recuperação e Eficiência na Geração de Vapor

Janela de edição das características do combustível

No exemplo que estamos seguindo o combustível é o Óleo 2A, portanto agora deveríamos digitar, na janela acima, as características deste óleo. Contudo o **Caldeira** mantém um banco de dados com vários óleos comuns da Petrobrás. Para acessar o banco de dados dos combustíveis clique sobre o botão de comando **Importar Combustível**.

Banco de dados dos principais combustíveis da Petrobrás

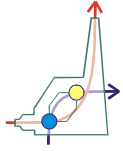
Nome	h (%)	c (%)	o (%)	n (%)	s (%)	z (%)	u (%)	PCs	Cp	Tipo
Diesel	13,1	86	0	0	0,9	0	0	45000	1,7	Óleo Combustível
Óleo	10	90	0	0	0	0	0	40000	1	Óleo Combustível
Óleo 1A	10,5	87	0	0	2,5	0	0	42000	1,9	Óleo Combustível
Óleo 2A	9,6	87,8	0,5	0,7	1,4	0	0	43400	1,9	Óleo Combustível
Óleo 2B	11,5	86,9	0	0,7	0,9	0	0	43500	1,9	Óleo Combustível
Óleo 3A	9,6	87,8	0,5	0,7	1,4	0	0	41600	1,9	Óleo Combustível
Óleo 4A	10,4	86,8	0	0	2,8	0	0	41800	1,9	Óleo Combustível
Óleo 7A	10,2	87	0	0	2,8	0	0	41800	1,9	Óleo Combustível
Óleo 7B	11,1	87	0	0,9	1	0	0	43200	1,9	Óleo Combustível
Óleo 8A	9,7	85,9	1,4	1,2	1,8	0	0	42100	1,9	Óleo Combustível
Óleo 8B	10,4	86,6	1,4	0,9	0,7	0	0	43600	1,9	Óleo Combustível

Selecione o **Óleo 2A** e clique sobre o botão **Exportar**. Ou clique duas vezes sobre o **Óleo 2A**. Os dados característicos deste combustíveis serão transferidos para a janela anterior, como mostra a figura abaixo.

O próximo passo é alterar a vazão do combustível para **700 kg/h**, e aceitar as alterações clicando sobre o botão **Ok**.

Com isto já alteramos os dados para o combustível.

Seguindo o exemplo agora vamos alterar os dados do **vapor**. Para acessar a janela dos dados do vapor siga os mesmos passos já mostrados para o



combustível.

Janela de edição dos dados do vapor

Gases de Combustão		Purga		Caldeira	
Combustível	Ar de Combustao	Vapor	Água	Nebulização	
<input checked="" type="checkbox"/> Nome	Vapor				
<input checked="" type="checkbox"/> V	10	t/h			
<input checked="" type="checkbox"/> P	22	bar			
<input type="checkbox"/> T	247,06	°C			
<input type="checkbox"/> Super	30	°C			
<input type="checkbox"/> Pot	8046	kW			
<input type="checkbox"/> Per	85,86	%			
Cor	Red				

Ar Estequiométrico: 13,548

OK Cancel

Na janela de edição dos dados do **vapor**, figura acima, altere o valor da vazão para **10 t/h**, da pressão para **22 bar** e do superaquecimento para **30 °C**.

Observe que

o programa **sempre** trabalha com pressão **absoluta**

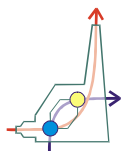
não foi necessário digitar a temperatura do vapor, pois a partir da pressão e do superaquecimento o programa calculou esta temperatura, 247,06 °C .

Finalmente, vamos alterar os dados dos gases de combustão, chaminé.

Gases de Combustão		Purga		Caldeira	
Combustível	Ar de Combustao	Vapor	Água	Nebulização	
<input checked="" type="checkbox"/> Nome	Gases				
<input checked="" type="checkbox"/> Tg	220	°C			
<input checked="" type="checkbox"/> O2	5,0	%			
<input type="checkbox"/> CO2	12,593	%			
<input type="checkbox"/> Lb	129,86	%			
<input type="checkbox"/> Pot	1434,2	kW			
<input type="checkbox"/> Per	15,305	%			
Cor	Blue				

Ar Estequiométrico: 13,548
Produção Específica: 14,286

OK Cancel



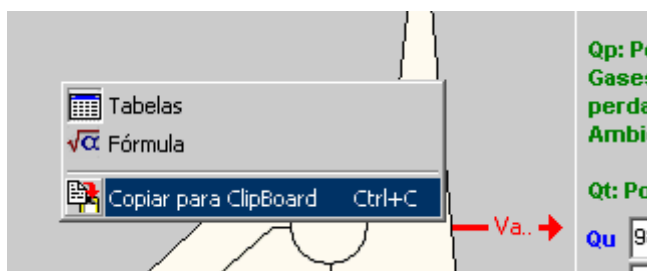
Caldeira 5.0 - Recuperação e Eficiência na Geração de Vapor

O exemplo pede: temperatura de **220 °C** e teor de O_2 **5 %**.

Observe que tanto o teor de CO_2 como o novo excesso de ar foram recalculados pelo programa.

Aceite as alterações no gás de combustão clicando o botão **Ok**.

A eficiência, pelo método **direto** e base **PCS**, é apresentada na janela principal, como mostra a figura abaixo.



É possível ver os detalhes deste exemplo, abrindo as tabelas de balanços de massa e energia através do *menu* das opções.

	Potências	Vazões	Eficiências
	Corrente	Entrada	Saída
	Combustível	90,37	
	Ar de Combustão	1,0893	
	Água	7,6921	
	Nebulização	0,84887	
	Vapor		83,018
	Gases de Combustão		15,305
	Purga		0,85305
	Perdas		2,7692
	Total	100	101,95

20 °C →

22 bar →

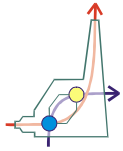
→ %

Valores Participações

A tabela do balanço das potências mostra que há uma pequena incoerência nos dados deste exemplo, pois para cada 100 unidades de energia que entram no sistema há uma saída de 102 unidades.

Estas incoerências são comuns nos cálculos dos balanços de massa e energia em geradores de vapor. Elas advêm dos erros e das incertezas nas medições das grandezas envolvidas (vazões, temperaturas, etc.). Exatamente por isto é comum calcular a eficiência tanto pelo método **direto** como pelo método **indireto**.

A tabela das eficiências, figura abaixo, mostra os valores das diversas eficiências.



Caldeira 5.0 - Recuperação e Eficiência na Geração de Vapor

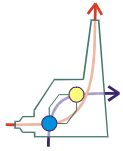
Tabela das Potências Totais e das Eficiências

	Potências	Vazões	Eficiências
$^{\circ}\text{C}$ →	Qu: Potência Útil: associada ao calor transferido ao Vapor		
	Qp: Potência Perdida: associada aos Gases de Combustão, Purga e perdas para o Ambiente		
	Qt: Potência Total: associada ao		
bar →	Qu	7080,3 kW	
	Qp	1773,6 kW	
	Qt	8650,1 kW	
	Ed	81,853 %	
	Ei	79,496 %	
→	Es	79,968 %	

Observe que há uma diferença entre as eficiências calculadas pelo método **direto** e **indireto**. Esta diferença advém da incoerência do balanço da potência no sistema.

Método das saídas

Apesar de não ser usual, o **Caldeira** também calcula, e apresenta, a eficiência pelo método das **saídas**. Este método tem seu significado em operações onde a medição da vazão de combustível é muito incerta, como é o caso de caldeiras operando com bagaço de cana.



Caldeira 5.0 - Recuperação e Eficiência na Geração de Vapor

Impressão
dos resultados

Imprimir Dados da Caldeira

Data: 28/02/2003 Hora: 10:18:18

Caldeira 1

Combustível: Óleo

Vazão	700	kg/h
Temperatura	80	oC
PCs	43,4	MJ/kg
PCi	41,3	MJ/kg
Ar Esteq	13,55	
Umidade	0	%
Potência	8,468	MW

Análise Elementar

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

Ar

Vazão	1,232E4	kg/h
Temperatura	60	oC
Umidade	0,9901	%

Unidades

- Vazão: kg/h
- Temperatura: oC
- Pressão: bar
- Entalpia: MJ/kg
- Teor: %
- Potência: MW

Após completados os cálculos é possível imprimir os resultados através do menu principal **Arquivo|Imprimir**.

Balço de Massa e
Energia

Potências | Vazões | Eficiências

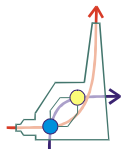
Corrente	Entrada	Saída
Combustível	8468,4	
Ar de Combustao	102,08	
Água	720,82	
Nebulização	79,547	
Vapor		7779,5
Gases de Combustê		1434,2
Purga		79,938
Perdas		259,5
Total	9370,9	9553,2

Unidade: kW

Valores | Participações

Com os dados do exemplo, verifica-se, na tabela de valores das potências, que o balanço de energia não fica satisfeito. Isto devido aos erros e às incertezas nas medições das grandezas envolvidas (vazões, temperaturas, etc.).

O **Caldeira** possibilita ao usuário acertar esta balanço de energia de duas



Caldeira 5.0 - Recuperação e Eficiência na Geração de Vapor

maneiras:

- Pelas entradas, alterando o valor da vazão de combustível ou
- Pelas saídas, alterando o valor da vazão de vapor.

Vamos, no nosso exemplo, acertar o balanço de energia alterando o valor da vazão de vapor. Vá à janela de dados e clique o botão ao lado da vazão de vapor. O programa calculará a nova vazão de vapor, para a qual o balanço de energia seja satisfeito.

Editar

Gases de Combustão Purga Caldeira

Combustível Ar de Combustao Vapor Água Nebulização

Nome Vapor

V 9,7457 t/h

P 22 bar

Calcular a Vazão para Fechar o Balanço de Potência

Superaquecido

Esta mesma operação pode ser feita para a vazão de combustível.

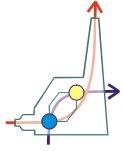
Corrente	Entrada	Saída
Combustível	90,547	
Ar de Combustao	1,0915	
Água	7,5112	
Nebulização	0,85054	
Vapor		81,066
Gases de Combustão		15,335
Purga		0,83298
Perdas		2,7747
Total	100	100,01

%

Valores Participações

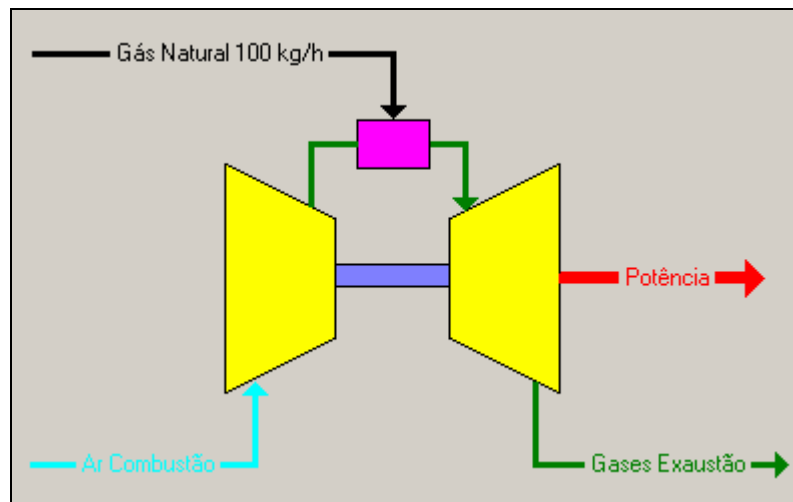
Os novos valores para o balanço de energia podem ser observados na tabela de potências.

Observe que, com o balanço de energia satisfeito, as diversas eficiências (Direta, Indireta e Saídas) se aproximam:



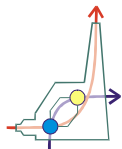
Potências	Vazões	Eficiências
Qu: Potência Útil: associada ao calor transferido ao Vapor		
Qp: Potência Perdida: associada aos Gases de Combustão, Purga e perdas para o Ambiente		
Qt: Potência Total: associada ao Combustível, Ar de Combustão e Vapor de		
Qu	6900,3	kW
Qp	1771,6	kW
Qt	8650,1	kW
Ed	79,772	%
Ei	79,519	%
Es	79,571	%

Turbina a Gás



A Turbina a Gás, acoplada a um gerador elétrico, gera potência elétrica através da queima de um gás. Como subproduto também gera gases quentes que podem ser aproveitados, por exemplo, para gerar vapor. Isto é o que nos interessa, portanto o foco do programa está na determinação desta corrente de gases quentes. Queremos determinar a sua:

- Vazão mássica,
- Composição,
- Umidade,
- Temperatura,
- Entalpia e



Caldeira 5.0 - Recuperação e Eficiência na Geração de Vapor

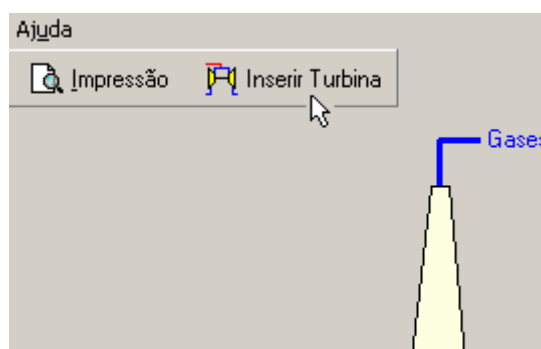
- Potência.

Uma vez determinado o Gás de Exaustão poderemos usá-lo para a geração de vapor e calcular os balanços de massa e energia na Caldeira de Recuperação.

O uso de turbina a gás tem várias limitações. Para nós interessam duas delas:

- A temperatura dos gases de exaustão não pode ultrapassar a faixa de 450 °C. Para efeito de projeto devemos utilizar a temperatura de 400 °C para os gases de exaustão.
- A eficiência entálpica máxima de um turbo gerador é da ordem de 35 %. Para efeito de projeto devemos utilizar a eficiência de 30 % para a geração de potência elétrica. Tratando-se de produção de energia elétrica esta eficiência é economicamente viável.

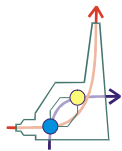
Para inserir a Turbina a Gás basta clicar com o mouse sobre o botão Inserir Turbina:



Uma nova corrente será adicionada ao fluxograma da Caldeira.



Observe que agora os Gases de Exaustão da Turbina fazem parte do balanço de massa e energia da Geração de Vapor:



Caldeira 5.0 - Recuperação e Eficiência na Geração de Vapor

	Potências	
	Vazões	Eficiências
	Entrada	Saída
Corrente		
Combustível	1113,3	
Ar de Combustão	25,197	
Água	100,91	
Nebulização	11,364	
Vapor		1082,8
Gases de Combustão		655,97
Purga		9,601
Perdas		34,497
Exaustão Turbina	1066,7	
Total	2317,5	1782,8

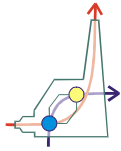
kW
 Valores Participações

Para alterar os dados da corrente dos Gases de Exaustão basta clicar duas vezes sobre a corrente.

Janela Principal da Turbina a Gás

Esta janela dispõe de várias ferramentas que possibilitam:

1. Alterar a **Temperatura dos Gases de Exaustão** da Turbina. Quando esta temperatura é alterada o programa recalcula o novo excesso de ar, a nova composição dos Gases de Exaustão e as novas potências.
2. Alterar a **Potência dos Gases de Exaustão**. Quando esta potência é alterada o programa recalcula a nova vazão de Combustível, e consequentemente a nova potência da Turbina.



Caldeira 5.0 - Recuperação e Eficiência na Geração de Vapor

3. Alterar a **Eficiência da Turbina**. Quando esta eficiência é alterada o programa recalcula a nova temperatura dos Gases de Exaustão e as novas potências.
4. Alterar a **Potência da Turbina**. Quando esta potência é alterada o programa recalcula a nova vazão de Combustível, e conseqüentemente a nova potência dos Gases de Exaustão
5. Alterar o **Coefficiente de Ar**. Quando esta variável é alterada o programa recalcula a nova temperatura e composição dos Gases de Exaustão e as novas potências.

Também é possível alterar o combustível, clicando-se o botão Gás Combustível ou sobre a corrente de Gás Combustível.



Pré aquecimento do ar

No cálculo dos balanços de massa e energia e das eficiências numa caldeira é necessário definir com precisão qual o **volume de controle** que será utilizado. Principalmente quando a caldeira possuir algum equipamento acessório, como o **pré aquecedor** de ar de combustão.

Para o caso específico do **pré aquecedor** há apenas duas possibilidades, como mostra a figura abaixo: Ou se considera o **pré aquecedor** dentro do volume de controle (volume **A**) ou fora deste (volume **B**).

O que muda são as temperaturas do Ar e dos Gases:

para o volume A

Temperatura do Ar : 25 °C

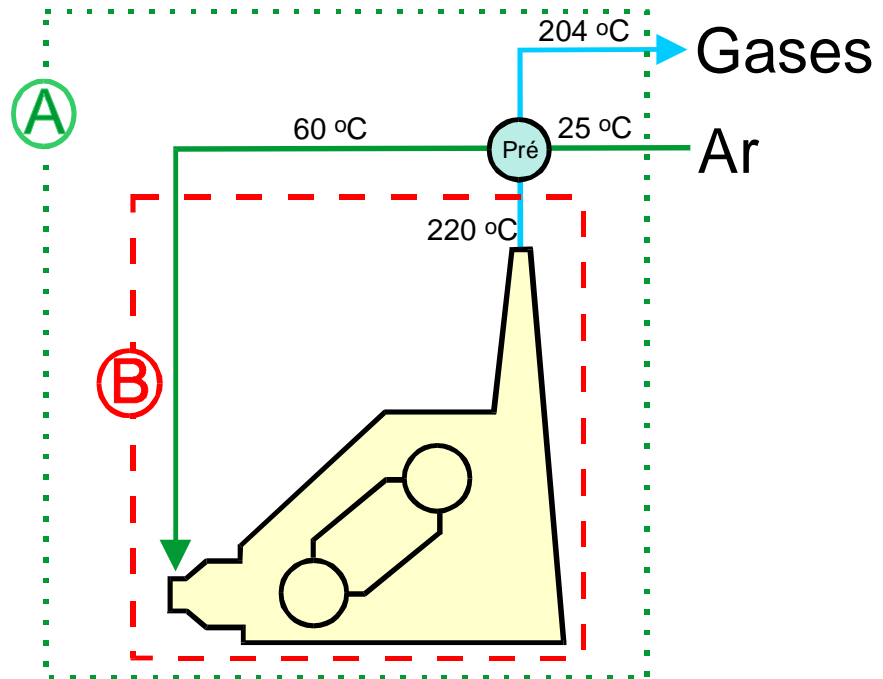
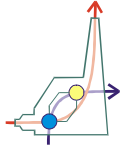
Temperatura dos Gases: 204 °C

para o volume B

Temperatura do Ar : 60 °C

Temperatura dos Gases: 220 °C

O mais usual é considerar o **pré aquecedor** como parte integrante da caldeira (volume **A**), e as eficiências calculadas para o conjunto.



Edição dos dados

O **Caldeira** contém uma grande variedade de ferramentas para auxiliar o usuário na edição de dados. Alguns dados estão relacionados, como por exemplo, a vazão de vapor e de água. Assim, sempre que o usuário alterar a vazão de vapor, o programa recalcula a vazão de água, e vice-versa, segundo o critério da porcentagem de purga.

Outros dados também estão relacionados, como por exemplo as vazões de combustível, ar e gases, estão relacionadas com o valor do excesso de ar.

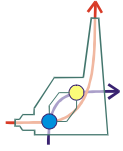
Em todas as janelas de edição de dados, o programa apresenta a potência relativa à corrente que está sendo editada e a participação percentual desta potência em relação à potência total que entra no sistema.

As seguir são apresentadas todas as ferramentas para a edição dos dados

Calculadora

 V

É possível, em todos os dados, entrar com valor em forma de expressão aritmética, como mostra a figura acima.



Caldeira 5.0 - Recuperação e Eficiência na Geração de Vapor

Unidades

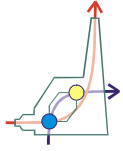


Qualquer valor relacionado a uma grandeza física pode ter sua unidade alterada através da lista à sua direita.

Há duas maneiras de se alterar a unidade:

Com o botão **Esquerdo** do *mouse*. Altera-se o valor numérico da grandeza física e mantém-se a coerência com a nova unidade. Por exemplo alterando uma Temperatura de 100 °C para 373,15 K. O valor numérico se alterou, mas o valor da grandeza permanece o mesmo.

Com o botão **Direito** do *mouse*. Não altera-se o valor numérico da grandeza física e não mantém-se a coerência com a nova unidade. Por exemplo alterando uma Temperatura de 100 °C para 100 K. O valor numérico não se alterou, mas o valor da grandeza foi alterado.



Combustível

The screenshot shows the 'Editar' window for the 'Combustível' tab. The window has a title bar 'Editar' and a menu bar with 'Gases de Combustão', 'Purga', and 'Caldeira'. Below the menu bar are tabs for 'Combustível', 'Ar de Combustao', 'Vapor', 'Água', and 'Nebulização'. The 'Combustível' tab is active, showing the following fields:

- Nome: Óleo
- V: 100 kg/h
- T: 80 °C
- Pot: 1113,3 kW
- Per: 88,967 %
- Cor: Black

On the right side, there is a list of selected fuels with a checkmark next to 'Óleo'. At the bottom of the window, the following values are displayed:

- Ar Estequiométrico: 13,903
- Produção Específica: 14

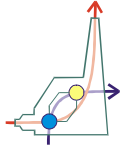
Buttons for 'OK' and 'Cancel' are located at the bottom right of the window.

A figura acima apresenta a janela do combustível. Os dados necessários são:

Vazão. Quando se altera a vazão do combustível o programa altera a vazão do ar de combustão, segundo o excesso de ar atual, e altera, também a vazão dos gases de combustão, que é a soma destes.

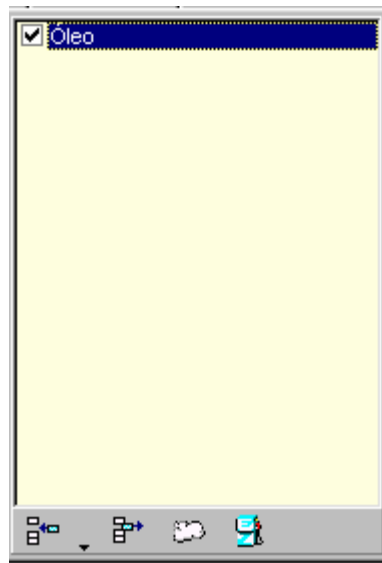
Temperatura. Quando se tem mais de um combustível, por exemplo Gás Natural e Óleo 2A, o **Caldeira** calcula esta temperatura baseado na no calor específico médio da mistura de combustíveis. Neste caso, quando se altera esta temperatura o programa atualiza as temperaturas individuais dos combustíveis.

Características do combustível. O **Caldeira** permite o uso de qualquer combustível (líquidos, sólidos ou misturas gasosas). Permite também que se trabalhe com dois ou mais combustíveis simultaneamente. Abaixo é descrito como se manipula os combustíveis.



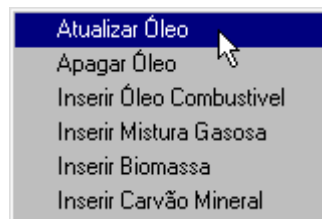
Caldeira 5.0 - Recuperação e Eficiência na Geração de Vapor

Alterando as características do combustível



A lista dos combustíveis apresenta os combustíveis atualmente em uso, na figura acima apenas um combustível. Na parte inferior desta lista existem 4 comandos:

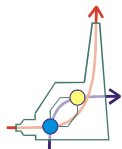
- Inserir combustível
- Apagar combustível
- Banco de dados dos componentes para combustíveis gasosos
- Banco de dados dos combustíveis óleos, biomassa e carvão mineral.



Para atualizar as características de um combustível selecione-o e clique com o mouse esquerdo. No menu da lista de combustível, figura acima, escolha **Atualizar**.

Janela do óleo combustível com combustível genérico

Janela para a inserção e atualização dos dados relativos a óleo combustível. Pode-se digitar os novos valores ou pode-se **importar** um outro combustível do banco de dados.



Caldeira 5.0 - Recuperação e Eficiência na Geração de Vapor

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**.

Banco de dados de Combustíveis

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

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

Janela do óleo combustível com óleo 2 A

Análise Elementar - bs		Dados	
h	9,6 %	Nome	Óleo 2A
c	87,8 %	Vazão	69,295 kg/h
n	0,7 %	Temperatura	80 °C
o	0,5 %	Umidade	0 %
s	1,4 %	PCs	43,4 MJ/kg
z	0 %	PCI	41,304 MJ/kg
		Cp	1,9 kJ/kgK
		Fração Neb	15 %
		Pres Neb	2 bar
		Potência	0,84613 MW
Ar Estequiométrico: 13,548		Base Úmida	

Observe que, uma vez importados os dados de um combustível, o programa calcula o **Ar Estequiométrico** para este combustível.

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

Observe que:

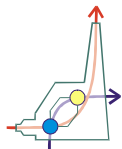
Os dados estão em base **úmida**. Sobre conceito de **base** leia o capítulo **Base seca ou úmida & Teor mássico ou volumétrico**.

Alterando-se o poder calorífico superior (**PCs**), o programa calcula o poder calorífico inferior (**PCI**) e vice-versa.

Alterando-se a **análise elementar** ou a **umidade** do combustível é necessário redigitar o poder calorífico (superior ou inferior), uma vez que os poderes caloríficos estão relacionados segundo a análise elementar e a umidade do combustível.

Para o cálculo do **Ar Estequiométrico** o programa utiliza a **umidade padrão do ar**: 1kg de água por 100 kg de ar seco.

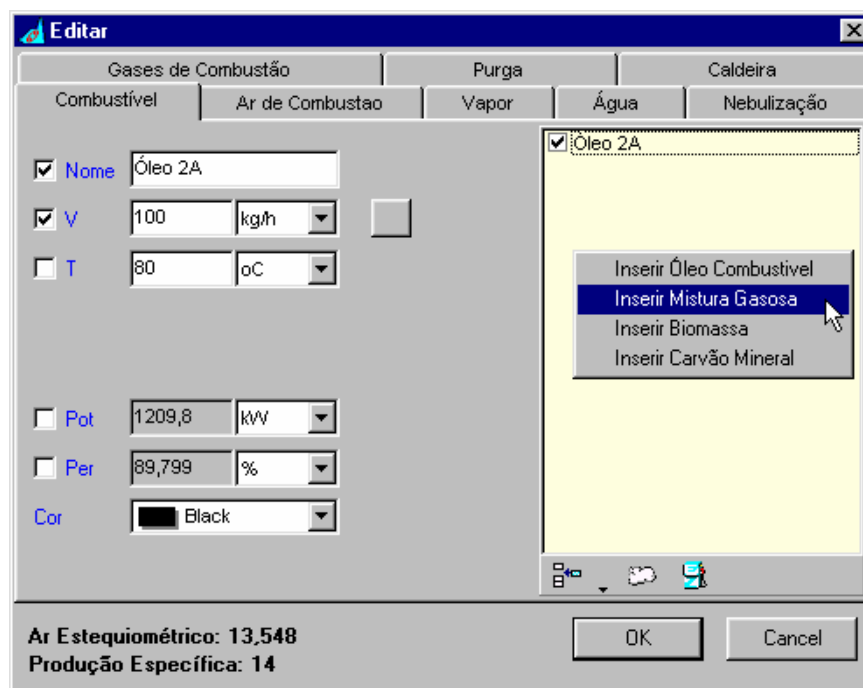
Para o cálculo do calor específico do combustível úmido - **Cp**, o programa utiliza o calor específico da água, segundo a temperatura deste.



Caldeira 5.0 - Recuperação e Eficiência na Geração de Vapor

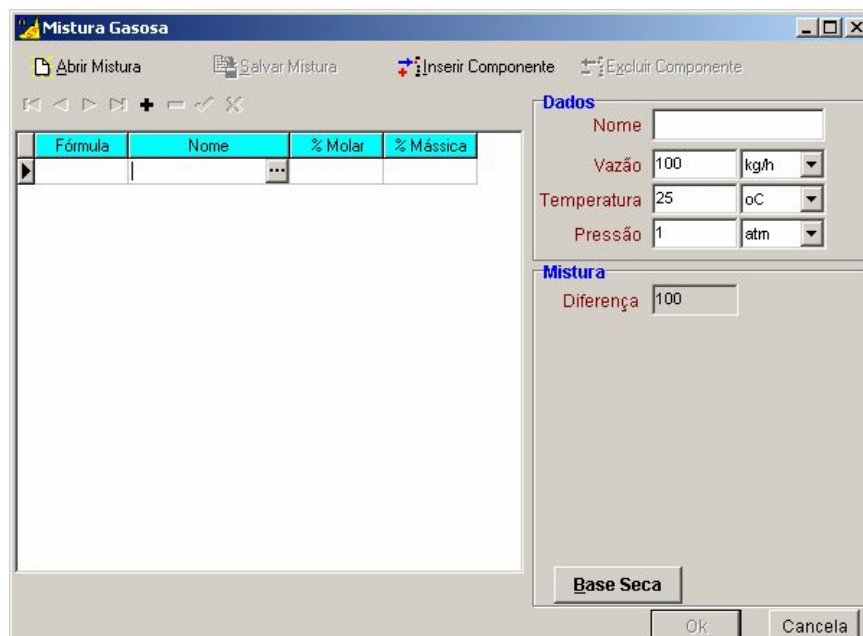
Combustíveis gasosos

Combustíveis gasosos são misturas de hidrocarbonetos, tais como o **GLP** ou o **Gás Natural**. O **Caldeira** tem um banco de dados dos componentes mais usuais para se criar uma mistura de hidrocarbonetos.



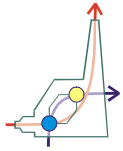
Para inserir um combustível gasoso clique com o mouse da esquerda sobre a lista de combustíveis e, em seguida, escolha a opção **Inserir Mistura Gasosa**.

Janela do combustível gasoso



O **Caldeira** fornece ao usuário todas as facilidades para a criação ou atualização de combustíveis gasosos.

Tais combustíveis são formados por mistura de hidrocarbonetos, por exemplo, o GLP é formado por *propano* e *n-butano*. Temos, portanto de inserir estes



Caldeira 5.0 - Recuperação e Eficiência na Geração de Vapor

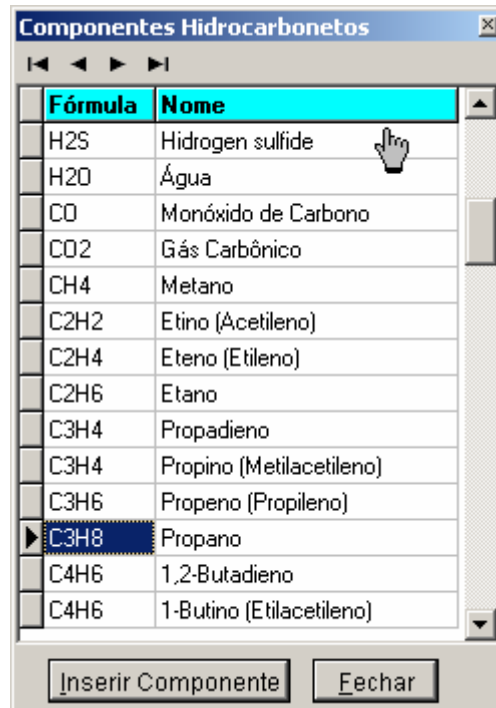
componentes na mistura.

Barra de tarefas da janela de mistura gasosa



Clique sobre o botão **Inserir Componente** na barra de tarefas, figura acima. O programa apresentará o banco de dados dos hidrocarbonetos, como mostra a figura abaixo.

Banco de dados de hidrocarbonetos



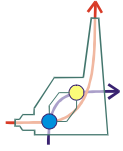
Selecione o componente desejado, por exemplo o **propano** (C_3H_8) e clique sobre o botão Inserir Componente. Repita esta operação até completar os componentes da Mistura Gasosa.

Lista de componentes gasosos

Fórmula	Nome	% Molar	% Mássica
C3H8	Propano		
CH4	Metano		
CO	Monóxido de Carbono		

Após a importação a lista de componentes se apresentará como mostra a figura acima. O próximo passo é digitar as frações molares ou mássicas dos componentes (sempre em **base úmida**).

Fórmula	Nome	% Molar	% Mássica
C3H8	Propano	30	49,27
CH4	Metano	50	29,87
CO	Monóxido de Carbono	20	20,86



Caldeira 5.0 - Recuperação e Eficiência na Geração de Vapor

Propriedades da mistura gasosa

Mistura			
Diferença	0		
Mol	26,853		
PCs	43,521	MJ/kg	▼
PCi	39,915	MJ/kg	▼
Cp	1,6603	kJ/kgK	▼
Densidade	1,0976	kg/m ³	▼
Wobbe	0,0	MJ/kg	▼
Potência	1,2101	MW	▼
Base Seca			

Observe que o programa atualiza, sempre que se altera a composição dos componentes, as propriedades da mistura, como mostra a figura acima. 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.

Potência: potência da corrente deste combustível (é o produto da soma do Poder Calorífico Superior e da Entalpia pela Vazão Mássica.

$$Pot = Vc * (PCs + Hc)$$

O **Caldeira** 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**.

Wobbe	0,0	MJ/kg	▼
Potência	1,2101	MW	▼
Base Seca			
Ok		Cancela	

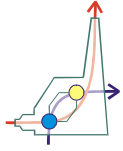
Também é possível, como se mostra na figura acima, calcular a vazão de combustível para uma determinada potência.



Lembre-se que o **Caldeira** 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 **20 °C**), portanto a transformação de unidade que envolve mudança de massa para volume depende da temperatura.

Arquivo de combustíveis gasosos

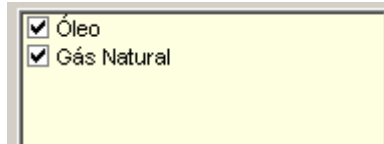
É possível salvar os dados de uma mistura em arquivo para futuro uso. Para tanto



Caldeira 5.0 - Recuperação e Eficiência na Geração de Vapor

altere o **Nome** da mistura para, por exemplo, **GLP** e clique no botão **Salvar Mistura** da barra de ferramentas.

Lista de combustíveis com dois combustíveis



Uma vez inserido um novo combustível, a lista de combustível é atualizada, mostrando todos os combustíveis que estão sendo considerados nos cálculos das eficiências.

É possível desabilitar, individualmente, um combustível, clicando sobre o quadro à sua esquerda.



Somente os combustíveis habilitados participam dos cálculos dos balanços de energia e massa e das eficiências

Ar de Combustão

A janela 'Editar' apresenta as seguintes configurações para o Ar de Combustão:

Parâmetro	Valor	Unidade	Habilitado
Nome	Ar		<input checked="" type="checkbox"/>
V	12316	kg/h	<input type="checkbox"/>
T	60	oC	<input type="checkbox"/>
Lb	129,86	%	<input checked="" type="checkbox"/>
Pot	171,63	kW	<input type="checkbox"/>
Per	1,8312	%	<input type="checkbox"/>
Cor	Green		<input type="checkbox"/>

Resumo de Cálculos:

- Ar Estequiométrico: 13,548
- Produção Específica: 14,286

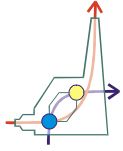
A figura acima apresenta a janela do **ar de combustão**. Os dados necessários são:

Vazão. Quando se altera a vazão do ar de combustão o programa altera o valor do coeficiente de ar –**Lb**, e a vazão dos gases de combustão.

Temperatura.

Coefficiente de Ar – Lb. Quando se altera o valor do coeficiente de ar o programa altera a vazão do ar de combustão e a vazão dos gases de combustão.

O coeficiente de ar de combustão define, também, a composição dos gases de combustão (teores de O₂, CO₂, N₂ e umidade).



Caldeira 5.0 - Recuperação e Eficiência na Geração de Vapor



O Caldeira trabalha **sempre** com **combustão completa**. Portanto o coeficiente de ar –**Lb**- deverá ser sempre maior ou igual a 100 %.

Coeficiente de Ar –**Lb**- igual a 100 % significa combustão estequiométrica, ou seja excesso de ar igual a 0 %.

Água

Gases de Combustão		Purga		Caldeira	
Combustível	Ar de Combustao	Vapor	Água	Nebulização	
<input checked="" type="checkbox"/> Nome	Água				
<input type="checkbox"/> V	10309	kg/h			
<input checked="" type="checkbox"/> T	60	°C			
<input type="checkbox"/> Pot	720,8	kW			
<input type="checkbox"/> Per	7,6903	%			
Cor	Aqua				
Ar Estequiométrico: 13,548		Produção Específica: 14,286		OK Cancel	

A figura acima apresenta a janela da **água**. Os dados necessários são:

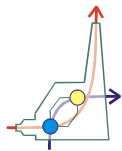
Vazão. Quando se altera a vazão da água o programa altera a vazão de vapor e a vazão de purga, mantendo-se a relação purga/água - **p**. As relações entre estas vazões são:

$$\text{água} = \text{vapor} + \text{purga}$$

$$\text{purga} = p * \text{água}$$

onde *p* é uma fração em relação à água

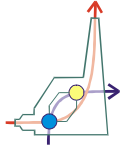
Temperatura.



Nebulização

Gases de Combustão		Purga		Caldeira	
Combustível	Ar de Combustao	Vapor	Água	Nebulização	
<input checked="" type="checkbox"/> Nome	Neb				
<input type="checkbox"/> V	15	kg/h			
<input type="checkbox"/> %	7,5	%			
<input type="checkbox"/> Pot	11,364	kW			
<input type="checkbox"/> Per	0,45745	%			
Cor	Yellow				
Ar Estequiométrico: 13,7 Produção Específica: 7					
					OK
					Cancel

A figura acima apresenta a janela do **vapor de nebulização**. Nesta versão do **Caldeira** somente é possível alterar os dados do vapor de nebulização dentro das janelas dos combustíveis.



Vapor

A figura acima apresenta a janela do **vapor**. Os dados necessários são:

Vazão. Quando se altera a vazão do vapor o programa altera a vazão de água e a vazão de purga, mantendo-se a relação purga/água - **p**. As relações entre estas vazões são:

$$\begin{aligned} \text{água} &= \text{vapor} + \text{purga} \\ \text{purga} &= p * \text{água} \\ \text{onde } p &\text{ é uma fração em relação à água} \end{aligned}$$

Pressão. Absoluta. Quando se altera a pressão do vapor o programa verifica o atual estado do vapor (saturado ou superaquecido) a temperatura e a temperatura de superaquecimento. Caso não sejam compatíveis com a nova pressão o programa altera o estado e as temperaturas.

Temperatura. Idem à pressão do vapor.

Super. Temperatura de superaquecimento. Quando se altera a temperatura de superaquecimento do vapor o programa recalcula a temperatura do vapor.

Estado. Quando se altera o estado do vapor o programa recalcula a Pressão ou a Temperatura ou a Temperatura de superaquecimento para o novo estado escolhido.

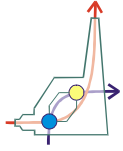


O **Caldeira** sempre trabalha com a pressão **absoluta** do vapor. Portanto se o seu manômetro estiver indicando uma pressão de 20 bar, e você estiver na cidade de São Paulo, 700 mmHg, a pressão absoluta será de 20 bar + 700 mmHg = 20,933 bar.

Estas contas ficam muito simples no **Caldeira**. Siga o exemplo.

1. Comece digitando a pressão manométrica:

2. Mude a unidade para mmHg:



Caldeira 5.0 - Recuperação e Eficiência na Geração de Vapor

3. Some a esta pressão os 700 mmHg:

P 15001+700 mmHg

4. Então, volte para a unidade inicial:

P 20,933 bar

Gases de Combustão

Editar

Combustível | Ar de Combustão | Vapor | Água | Nebulização

Gases de Combustão | Purga | Caldeira

Nome Gases

Tg 220 °C

O₂ 5 %

CO₂ 12,593 %

Lb 129,86 %

Pot 1361,2 kW

Per 14,522 %

Cor Blue

Psicrometria

Tdp 44,844 °C

Uab 5,9981 %

H 376,04 kJ/kg

Hdp 0,0 MJ/kg

P 1 atm

Ar Estequiométrico: 13,548
Produção Específica: 14,286

OK Cancel

A figura acima apresenta a janela dos **gases de combustão**. Os dados necessários são:

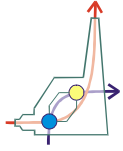
Temperatura.

O₂. Teor de oxigênio, base seca volumétrico. Quando se altera o valor de O₂ nos gases de combustão o programa recalcula o **coeficiente de ar** e, conseqüentemente, o CO₂.

CO₂. Teor de dióxido de carbono, base seca volumétrico. Idem ao O₂.

Coeficiente de Ar – Lb. Quando se altera o valor do coeficiente de ar o programa altera a vazão do ar de combustão e a vazão dos gases de combustão.

O coeficiente de ar de combustão define, também, a composição dos gases de combustão (teores de O₂, CO₂, N₂ e umidade).



Caldeira 5.0 - Recuperação e Eficiência na Geração de Vapor

Dados psicrométricos dos gases de combustão

Psicrometria		
T _{dp}	44,844	oC
U _{ab}	5,9981	%
H	376,04	kJ/kg
H _{dp}	0,0	MJ/kg
P	1	atm

O **Caldeira** calcula automaticamente os dados psicrométrico dos gases de combustão, segundo a sua composição e pressão. Os dados calculados são:

T_{dp}: Temperatura de orvalho. Abaixo desta temperatura haverá condensação do vapor de água presente nos gases de combustão. É recomendável sempre se trabalhar em uma faixa de 10 a 30 °C acima desta temperatura, para se prevenir pontos frios na chaminé.

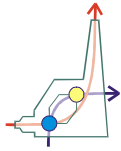
Combustíveis com enxofre na sua composição produzem óxidos de enxofre nos gases de combustão. Tais óxidos, na presença de água, se transformam em ácidos (H₂SO₄, por exemplo) provocando ataque ao material da chaminé.

U_{ab}. Umidade absoluta dos gases de combustão.

H. Entalpia dos gases de combustão.

H_{dp}. Entalpia dos gases de combustão na temperatura de orvalho, **T_{dp}**.

No cálculo da disponibilidade energética dos gases de combustão, quando da presença de enxofre no combustível, a diferença **H - H_{dp}** é a entalpia máxima teórica disponível.



Purga

Editar

Combustível | Ar de Combustao | Vapor | Água | Nebulização

Gases de Combustão | Purga | Caldeira

Nome: Purga

V: 309,27 kg/h

%: 3 %

Pot: 79,936 kW

Per: 0,85285 %

Cor: Maroon

Ar Estequiométrico: 13,548
Produção Específica: 14,286

OK Cancel

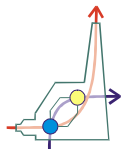
A figura acima apresenta a janela da **purga**. Os dados necessários são:

Vazão. Quando se altera a vazão da purga o programa altera a relação purga/água - %. As relações entre estas vazões são:

$$purga = \% * \text{água}$$

onde % é uma fração em relação à água

%. Relação entre a vazão mássica de purga e a vazão mássica de água. Idem anterior.



Caldeira 5.0 - Recuperação e Eficiência na Geração de Vapor

Caldeira

Editar

Combustível | Ar de Combustao | Vapor | Água | Nebulização

Gases de Combustão | Purga | Caldeira

Nome Caldeira 1

Perdas 3 %

Pot 259,56 kW

Per 2,7693 %

Cor InfoBk

Dados para o cálculo das Perdas

Pot Nom 1000 kW

Pot Útil 7346,8 kW

T sup 80 °C

T amb 25 °C

Paredes 2

Paredes de Água Ar

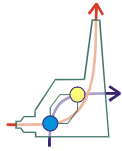
Ar Estequiométrico: 13,548

Produção Específica: 14,286

OK Cancel

A figura acima apresenta a janela da **caldeira**. O único dado necessário é a:

Perdas. Fração da potência útil dissipada para o ambiente. Esta fração pode ser digitada diretamente ou pode ser calculada clicando o botão à sua direita, através dos **Dados para o cálculo das Perdas**.



Caldeira 5.0 - Recuperação e Eficiência na Geração de Vapor

Dados para o cálculo das Perdas

Dados para o cálculo das Perdas

Pot Nom 1000 kW

Pot Útil 7346,8 kW

T sup 80 °C

T amb 25 °C

Paredes 2

Paredes de Água Ar

A figura acima apresenta os dados para o cálculo das perdas para o ambiente. Este cálculo é baseado nos ábacos apresentados pelo *ASTM Standards, Part 13, 1969*.

Os dados necessário são:

Potência Nominal. Caso não se disponha da potência nominal da caldeira é simples estimá-la. Suponha que se esteja trabalhando com 90 % da carga da caldeira, na figura acima onde a **potência útil** é de **7346,8 kW**, Então a potência nominal será de $7346,8/0,9 = 8163,1$ kW.

Esta conta pode ser feita diretamente no **Caldeira** através dos seguintes passos:

Copie o valor da potência nominal para a potência nominal, via **Ctrl-C** e **Ctrl-V**.

Pot Nom 7346,8 kW

Divida esta valor por 0,9 (90 % da carga).

Pot Nom 7346,8/0,9 kW

Potência Útil. Calculado pelo programa

T sup. Temperatura média superficial da caldeira

T amb. Temperatura ambiente

Paredes. Número de paredes de ar ou de água

Paredes de: água ou ar

Eficiências

O **Caldeira** calcula seis eficiências:

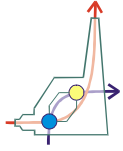
Método **Direto** base **PCs**

Método **Direto** base **PCi**

Método **Indireto** base **PCs**

Método **Indireto** base **PCi**

Método das **Saídas** base **PCs**



Caldeira 5.0 - Recuperação e Eficiência na Geração de Vapor

Método das Saídas base PCi

Sendo que a recomendada é a primeira, Método **Direto** base **PCs**. Contudo nem sempre se dispõem de dados suficientes para o cálculo desta.

As eficiências são calculadas a partir das potência a seguir definidas

Potências Definem-se 3 potências para o cálculo das eficiências

Qu : potência **útil**. É a quantidade de energia, por intervalo de tempo, transferida ao vapor.

Qt : potência **total**. É a quantidade de energia, por intervalo de tempo, que entra no sistema através das correntes de combustível, ar de combustão e vapor de nebulização.

Note que, aqui não se considera a parcela da energia que entra no sistema via corrente de água de alimentação.

O valor desta potência depende da base, PCs ou PCi.

Qp: potência **perdida**. É a quantidade de energia, por unidade de tempo, transferida pelo sistema ao ambiente.

O valor desta potência depende da base, PCs ou PCi.

Quando a base é **PCs**, considera-se a água presente nos gases de combustão no estado **vapor**.

Quando a base é **PCi**, considera-se a água presente nos gases de combustão no estado **líquido**.

Com as potências assim definidas é possível expressar as diversas eficiências.

Cálculo das Eficiências

Método Direto $Ed = \frac{Qu}{Qt}$

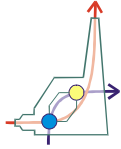
Método Indireto $Ei = 1 - \frac{Qp}{Qt}$

Método das Saídas $Es = \frac{Qu}{Qu + Qp}$

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



Caldeira 5.0 - Recuperação e Eficiência na Geração de Vapor



O **Caldeira** 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 kg de hidrogênio
- 32 kg de metano e
- 18 kg de água, estado vapor

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

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

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.

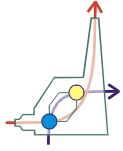
O mesmo vale para os teores dos componentes, por exemplo o **teor de hidrogênio** pode ser dado como:

- 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.

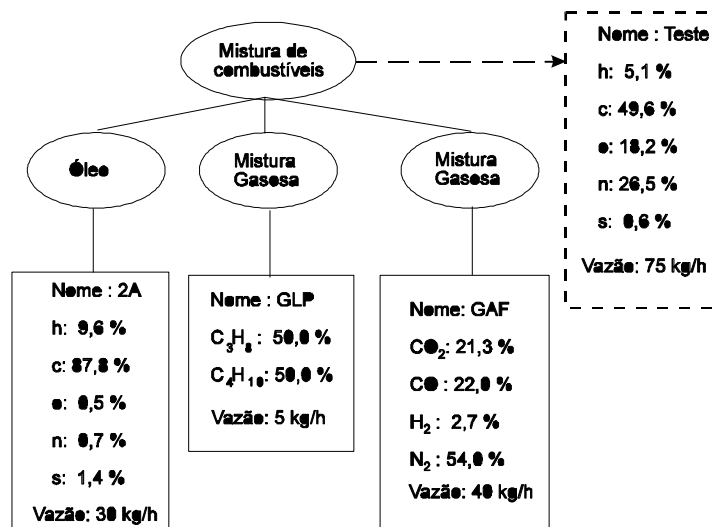


Caldeira 5.0 - Recuperação e Eficiência na Geração de Vapor

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 **Caldeira** resolve esta questão criando um combustível equivalente que resulte na mesma combustão, ou seja o mesmo gás de combustão à mesma temperatura.

Como o **Caldeira** vê os combustíveis



O **Caldeira** sempre trabalha considerando uma mistura de combustíveis. Quando se tem apenas um combustível esta mistura terá apenas um elemento. A figura acima 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 o mesmo gás de combustão à mesma temperatura. Assim, para a figura acima, o programa criará, internamente, um combustível equivalente, com vazão mássica de 75 kg/h.

Exemplo 2 Como exemplo de uso de misturas de combustíveis vamos estimar a eficiência de um gerador de vapor trabalhando com:

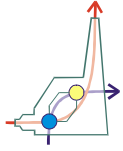
Óleo 2 A : 50 % em massa

GLP : 50% em massa

Teor de O₂ dos gases de combustão: 4 %

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.



Caldeira 5.0 - Recuperação e Eficiência na Geração de Vapor

Editar
✕

Gases de Combustão		Purga		Caldeira	
Combustível	Ar de Combustao	Vapor	Água	Nebulização	
<input checked="" type="checkbox"/> Nome	Mistura			<input checked="" type="checkbox"/> Óleo 2A <input checked="" type="checkbox"/> GLP	
<input checked="" type="checkbox"/> V	100 kg/h				
<input type="checkbox"/> T	52,05 °C				
<input type="checkbox"/> Pot	1298,6 kW				
<input type="checkbox"/> Per	91,12 %				
Cor	Black				

Ar Estequiométrico: 14,615

Produção Específica: 13,87

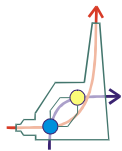
Entre com as características dos dois combustíveis do exemplo.

Como base de cálculo utilize a vazão de 100 kg/h para a mistura (50 kg/h para o óleo 2A e 50 kg/h para o GLP).

No exemplo mostrado na figura acima a temperatura do óleo 2A é de 80 °C e a temperatura do GLP de 20 °C. Observe que o programa calculou a temperatura média da mistura, 52,05 °C.



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.

*Caldeira 5.0 - Recuperação e Eficiência na Geração de Vapor*

Editar

Combustível | Ar de Combustao | Vapor | Água | Nebulização

Gases de Combustão | Purga | Caldeira

Nome: Gases

Tg: 400 °C

O₂: 4 %

CO₂: 12,233 %

Lb: 122,08 %

Pot: 331,18 kW

Per: 23,238 %

Cor: Blue

Psicrometria

Tdp: 50,17 °C

Uab: 8,1404 %

H: 632,04 kJ/kg

Hdp: 0,0 MJ/kg

P: 1 atm

Ar Estequiométrico: 14,615
Produção Específica: 13,87

OK Cancel

Digite os valores da temperatura (400 °C) e teor de O₂ (4 %) para os gases de combustão.

Editar

Combustível | Ar de Combustao | Vapor | Água | Nebulização

Gases de Combustão | Purga | Caldeira

Nome: Caldeira 1

Perdas: 0 %

Pot: 0 kW

Per: 0 %

Cor: InfoBk

Dados para o cálculo das Perdas

Pot Nom: 8163,1 kW

Pot Útil: 984,15 kW

T sup: 80 °C

T amb: 25 °C

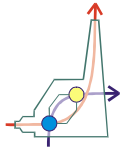
Paredes: 2

Paredes de: Água Ar

Ar Estequiométrico: 14,615
Produção Específica: 13,87

OK Cancel

O enunciado do exemplo sugere perdas desprezíveis, portanto anule este dados na janela dos dados da caldeira, como mostra a figura acima.

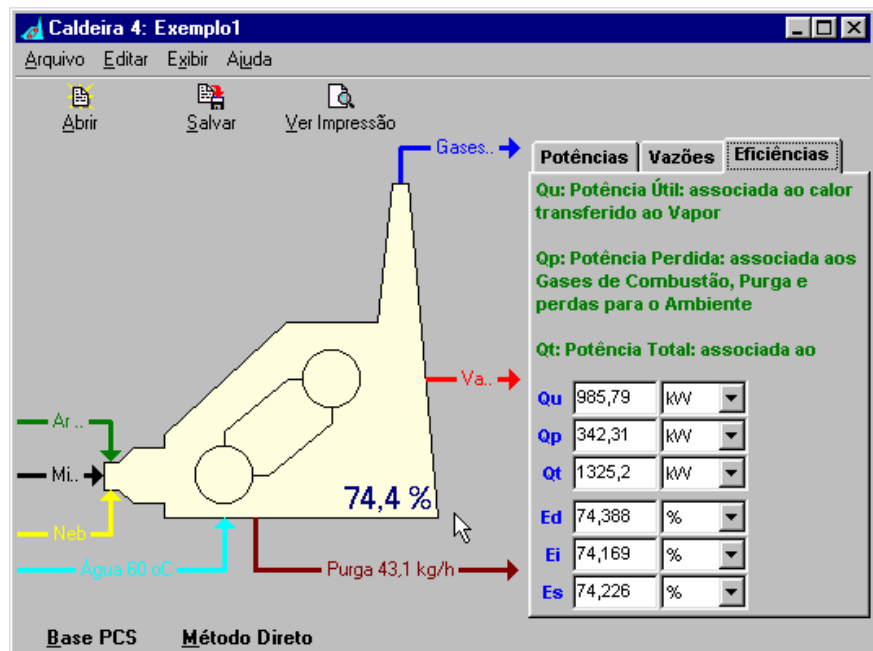


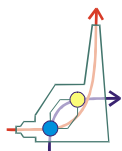
Caldeira 5.0 - Recuperação e Eficiência na Geração de Vapor

O enunciado do exemplo não nos diz nada sobre as vazões de combustível ou de vapor. Como base de cálculo nos utilizamos 100 kg/h de combustível, mas não sabemos qual é a vazão de vapor. Vamos assumir uma vazão de vapor que respeite o balanço de potência do sistema. Para calcular esta vazão clique sobre o botão a direita da entrada de vazão de vapor, como mostra a figura acima.

Com estes dados já é possível estimar a eficiência solicitada no exemplo 2, como mostra a figura abaixo.

Eficiência para o exemplo 2





Bancos de Dados

O **Caldeira** 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.

Banco de dados dos combustíveis

Nome	H	C	O	N	S	Z	U	PCs	Cp	Tipo
Bagaço 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:

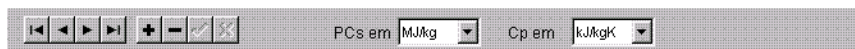
todos os dados são em base seca

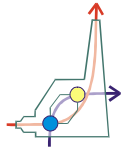
os teores elementares são mássicos e em porcentagem,

a unidade para o PCs, poder calorífico superior, é a unidade escolhida na barra de tarefas, figura abaixo.

a unidade para o C_p, calor específico, é a unidade escolhida na barra de tarefas, figura abaixo.

Barra de tarefas do banco de combustíveis





Banco de dados dos hidrocarbonetos

Critérios 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, CH_4 , será inserido como C = 1 e H = 4,

a unidade para PCs, poder calorífico superior, é a unidade escolhida na barra de tarefas, figura abaixo. 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 C_p , calor específico do componente, é dado em termos de parâmetros do polinômio:

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

para C_p 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 C_p da seguinte forma:

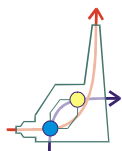
para uma temperatura T entre o intervalo Min e Máx $C_p = C_p(T)$

para uma temperatura T menor que Min $C_p = C_p(\text{Min})$

para uma temperatura T maior que Max $C_p = C_p(\text{Max})$

Barra de tarefas do banco de hidrocarbonetos

Impressão

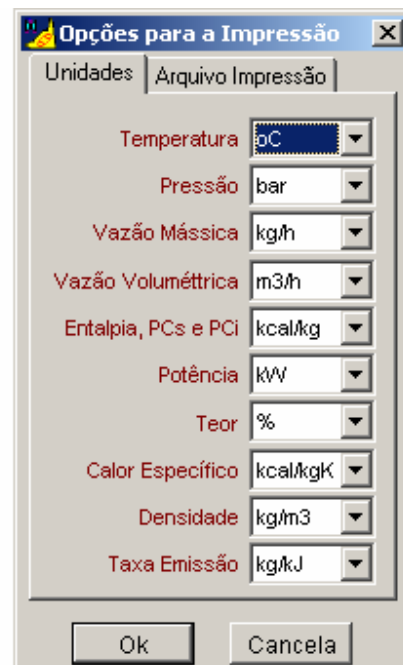
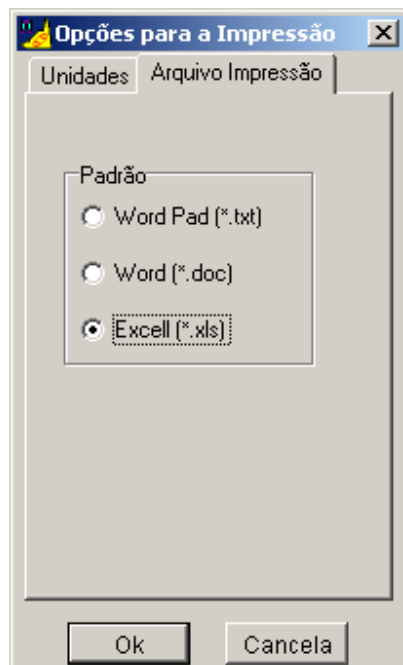


Caldeira 5.0 - Recuperação e Eficiência na Geração de Vapor

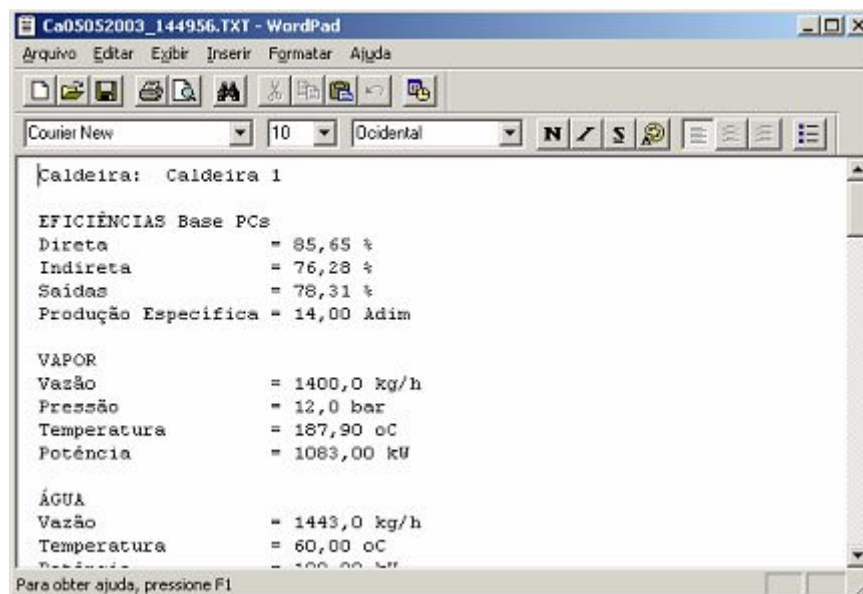
Opções para a Impressão

O Caldeira exporta arquivos para a impressão em três padrões:

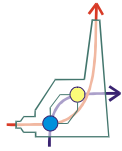
- WordPad (*.txt)
- MSWord (*.doc) e
- Excel (*.xls)



No menu de Opções para a Impressão é possível definir o padrão de arquivo que será exportado e as unidades para a apresentação na Impressão, como mostrado abaixo



As mesmas informações são exportadas para os aplicativos segundo a opção do usuário.



Caldeira 5.0 - Recuperação e Eficiência na Geração de Vapor

Microsoft Excel - Ca05052003_153927.xls

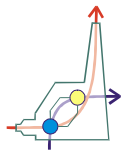
Arial 10 N I S

B5 = 76,28

	A	B	C	D	E	F
1	Caldeira:	Caldeira 1				
2						
3	EFICIÊNCIAS Base PCs					
4	Direta	85,65 %				
5	Indireta	76,28 %				
6	Saídas	78,31 %				
7	Produção I	14 Adim				
8						
9	VAPOR					
10	Vazão	1400 kg/h				
11	Pressão	12 bar				
12	Temperatu	187,9 oC				
13	Potência	1083 kW				
14						
15	ÁGUA					
16	Vazão	1443 kg/h				
17	Temperatu	60 oC				
18	Potência	100,9 kW				
19						
20	NEBULIZAÇÃO					
21	Vazão	15 kg/h				
22	Potência	11,36 kW				
23						

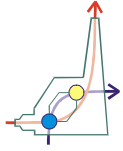
Ca05052003_153927

Prd



Referências

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
	CO₂	Teor de dióxido de carbono nos gases de combustão.
	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
	O₂	Teor de oxigênio nos gases de combustão.
	P	pressão
	PCi	poder calorífico inferior do combustível
	PCi/Vol	coeficiente para o gás de combustão. É a relação entre o poder calorífico inferior do combustível e o volume - ou massa - de gás de combustão formado. É função do excesso de ar.
	PCs	poder calorífico superior do combustível
	Per	Fração da potência total
	Pot	potência total que entra no sistema via correntes de combustível, ar de combustão, água e vapor de nebulização.
	Qp	potência perdida, associada aos gases de combustão, purga e perdas para o ambiente
	Qt	potência total, associada ao combustível, ar de combustão e vapor de nebulização.
	Qu	potência útil, associada ao calor transferido ao vapor
	Ro	densidade
	s	teor mássico de enxofre no combustível em base seca
	Super	Diferença entre a temperatura do vapor superaquecido e a sua temperatura de saturação numa dada pressão
	T	temperatura
	T Ar	temperatura do ar de combustão
	Tg	temperatura do gás de combustão



Caldeira 5.0 - Recuperação e Eficiência na Geração de Vapor

V	vazão mássica ou volumétrica
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

- PC_i: 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
%	Fração mássica. Por exemplo a fração mássica de purga em relação a água de alimentação da caldeira.

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;

o gás de combustão é isento de particulado (combustível não reagido ou cinza)

o ar e os gases de combustão são ideais;

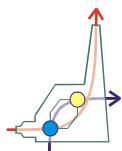
o ar de combustão é formado apenas por O₂ e N₂ e Umidade de 1 % mássica em base seca (1 kg de água por 100 kg de ar seco)

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 o gás de combustão é de 2500,0 °C
O coeficiente de ar - **Lb** - é sempre maior ou igual a 1,0.

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
- Stultz, Steven C et Kitto, John B., *Steam – its generation and use*, The Babcock & Wilcox Company, Barberton, Ohio, 1992
- Lefebvre, Arthur H., *Gas Turbine Combustion*, Taylor & Francis, London, 1999
- Bathie, Willian W., *Fundamentals of Gas Turbines*, John Wiley & Sons, New York, 1996.
- Irvine, Thomas F. Jr & Liley, Peter E., *Steam and Gas Tables with Computer Equations*, Academic Press, New York, 1984

Composição típica de alguns 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