



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

MÁQUINAS TÉRMICAS I

1ª parte

CICLOS TÉRMICOS A VAPOR
COMBUSTÍVEIS E COMBUSTÃO

Prof. FERNANDO BÓÇON, Dr.Eng.

Curitiba, março de 2016

1 – CICLOS TÉRMICOS A VAPOR

Neste capítulo é feita uma pequena introdução ao estudo das máquinas térmicas de combustão externa, bem como uma revisão de Termodinâmica clássica, no que se refere ao estudo dos ciclos térmicos a vapor.

1.1 – Máquinas Térmicas a Vapor

São máquinas que produzem, utilizam ou transformam o vapor de água obtido a partir da energia disponível em um combustível, com a finalidade de se obter calor ou produzir energia mecânica.

- Produção de vapor: geradores de vapor (caldeiras);
- Utilização: Turbinas a vapor e máquinas a vapor;
- Transformação: condensadores de vapor.

A preferência pela água dá-se pelo seu alto calor específico ($1\text{kcal/kg}^\circ\text{C}$; $4,186\text{ kJ/kgK}$) e calor latente de vaporização (cerca de 540 kcal/kg ; 2260 kJ/kg), bem como pela ampla disponibilidade, o que se reflete em um custo relativamente baixo quando comparado com outros fluidos.

Estados de aplicação:

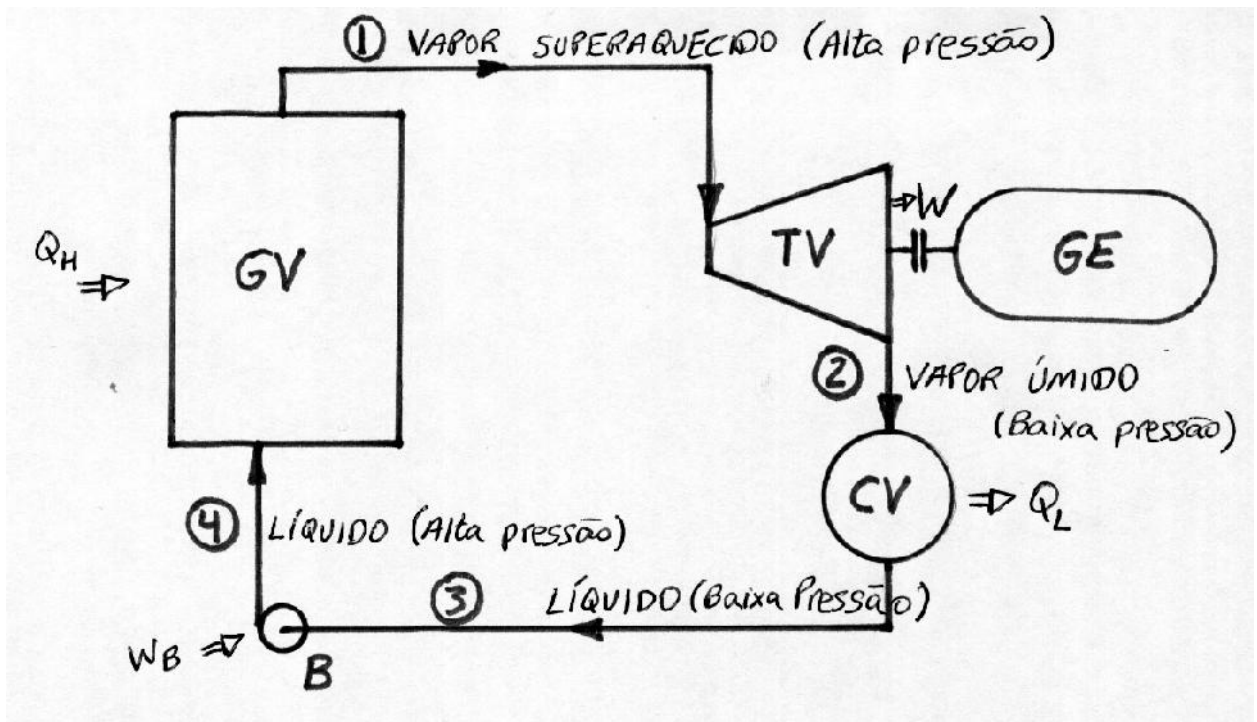
- Vapor Saturado: para processos industriais (aproveitamento do calor latente de condensação);
- Vapor Superaquecido: para acionamento mecânico (geração de potência), com crescente utilização em termelétricas ou em unidades de cogeração.

O vapor de água é um dos meios mais importantes de transporte de energia e o mais utilizado em indústrias e unidades de geração elétrica.

1.2 - Esquema de uma unidade de potência a vapor

A figura seguinte mostra esquematicamente os equipamentos que compõem uma unidade de geração de potência que funciona conforme o Ciclo Rankine (com superaquecimento). Esta unidade é composta basicamente por quatro equipamentos: o gerador de vapor (caldeira - GV), a turbina a vapor (TV), o condensador de vapor (CV) e a bomba hidráulica (B). Neste exemplo, a turbina aciona um gerador elétrico (GE) que converte energia mecânica em elétrica.

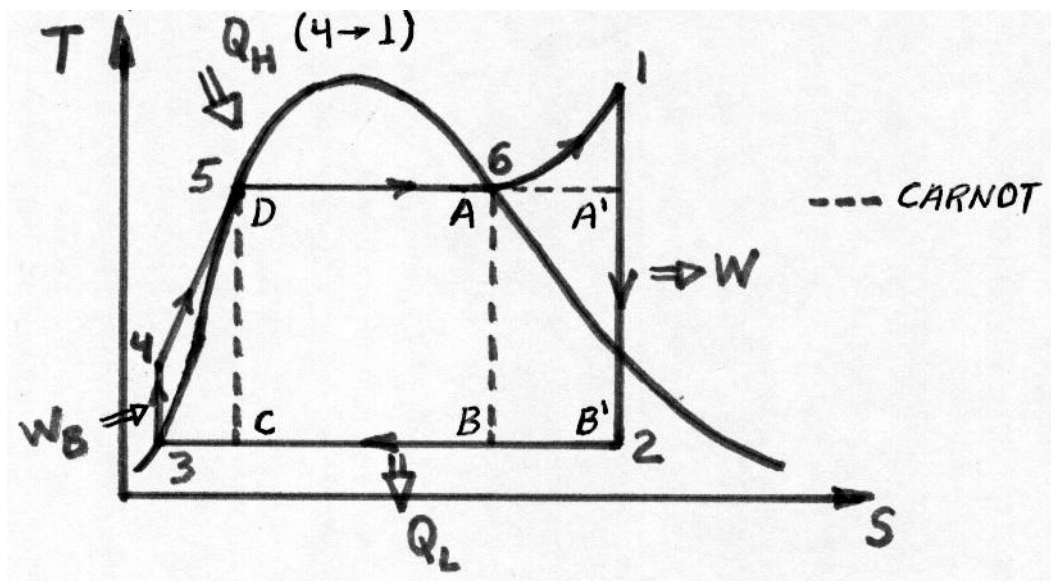
Melhores explicações sobre o funcionamento desta unidade encontram-se no capítulo de Ciclos Motores e de Refrigeração do livro de Fundamentos de Termodinâmica (Van Wylen, Sontag e Borgnake).



1.3 – Ciclo Rankine

É o ciclo teórico (ideal) para uma unidade motora simples a vapor. Embora o Ciclo de Carnot seja o que apresenta o melhor rendimento térmico, o mesmo é inviável na prática por:

- requerer bombeamento de vapor mais líquido (transformação CD)
- requerer superaquecimento com temperatura constante, ou seja, com expansão (transformação AA')
- caso não utilize superaquecimento a turbina irá operar só com vapor úmido e com título baixo no final da expansão, o que é altamente indesejável para o rendimento e durabilidade da turbina.



Fases do ciclo:

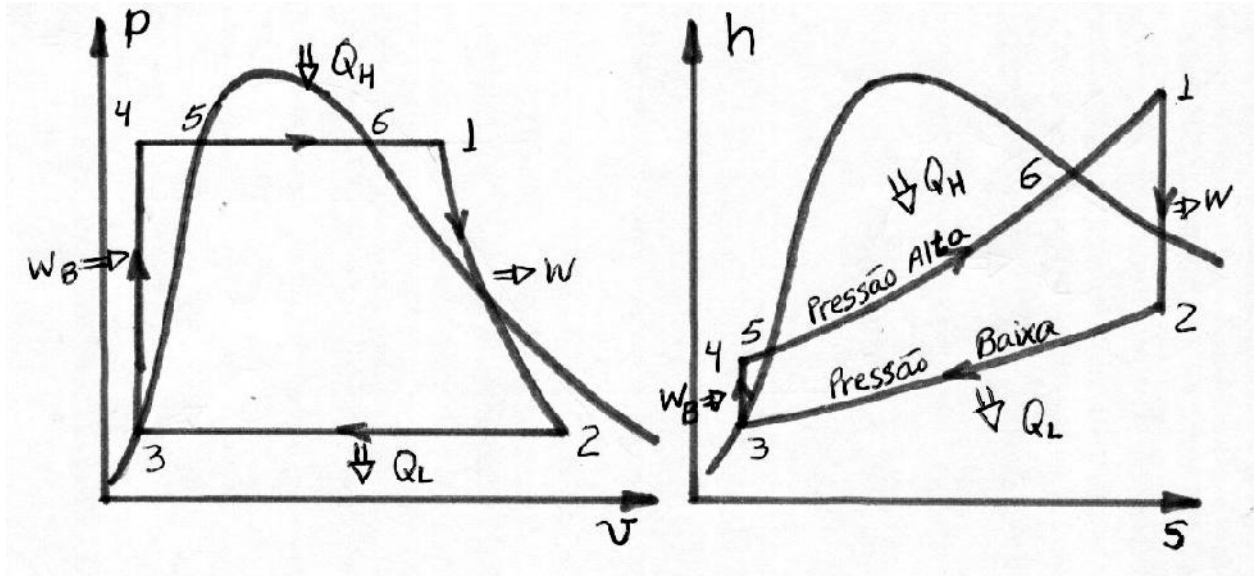
- 1 – 2: expansão adiabática (TV) ($s = \text{constante}$)
- 2 – 3: condensação (CV) ($p, T \text{ constantes}$)
- 3 – 4: pressurização (B) ($s = \text{constante}$)

4 – 5: aquecimento do líquido (GV) (p constante)

5 – 6: vaporização (GV) (p, T constantes)

6 – 1: superaquecimento (GV) (p = constante)

O mesmo ciclo acima pode ser representado em outros diagramas termodinâmicos, como o p-v e h-s abaixo.



1.3.1 – Rendimento térmico teórico do ciclo de Rankine

O rendimento (ou eficiência) do ciclo é definido como a razão entre o trabalho líquido realizado pelo ciclo (seu objetivo) e o calor fornecido a ele (insumo energético).

$$\eta_t = \frac{w - w_B}{q_H} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{h_1 - h_4}$$

q_H = calor fornecido ao ciclo (pela fonte quente - GV)

q_L = calor retirado do ciclo (pela fonte fria - CV)

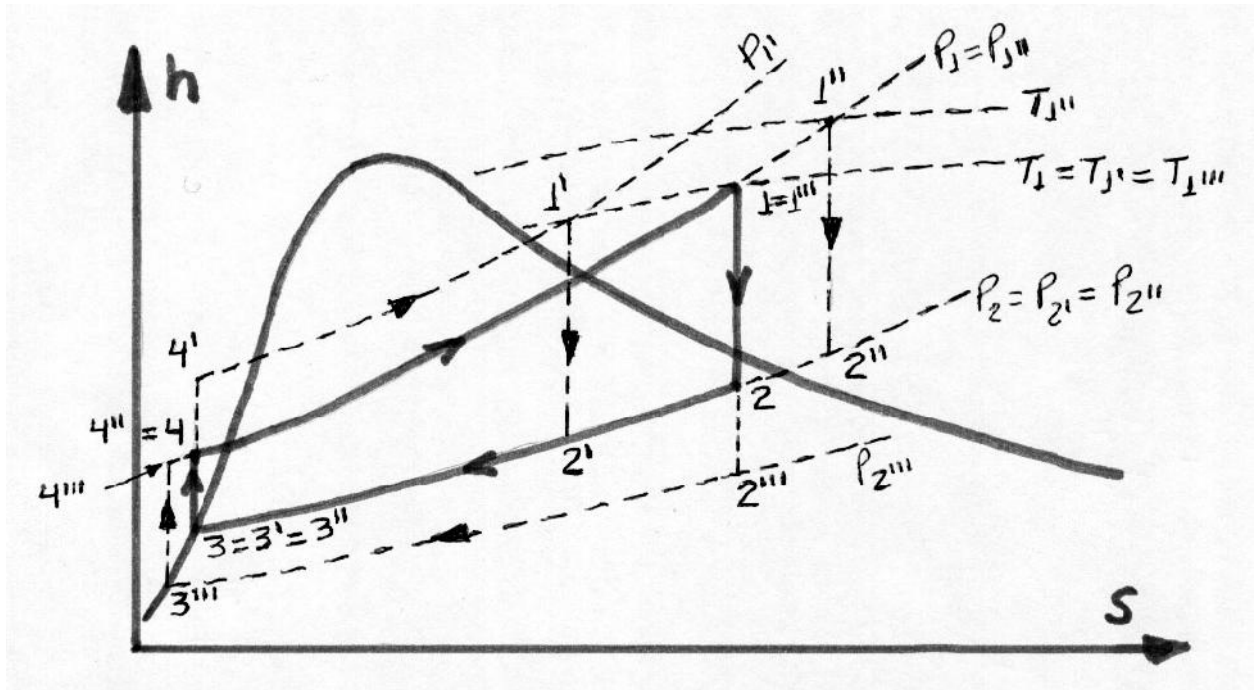
w = trabalho realizado na turbina (TV)

w_B = trabalho consumido na bomba ($= v_3 (p_4 - p_3)$)

Como o w_B é pequeno comparado com w e com q_H , podemos (com pouca perda de precisão) desprezá-lo, e assim simplificar a expressão para o rendimento, não sendo necessário calcular o valor de h_4 , pois neste caso considera-se $h_4 = h_3$ (tabelado). Então temos simplificada

$$\eta_t = \frac{w}{q_H} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_3}$$

1.3.2 – Influência da pressão e temperatura do vapor no rendimento térmico



a) Aumento da pressão máxima: (pontos "linha")

$$h_1 \downarrow \quad h_2 \downarrow \quad h_3 = \text{cte} \rightarrow \eta \uparrow$$

h_1 e h_2 diminuem (h_2 diminui mais), aumentando w , e h_3 permanece, porém $q_H = h_1 - h_3$ diminui, e portanto, η_t aumenta. Aumenta também a umidade de vapor de saída da turbina ($x_2 \downarrow$).

b) Aquecimento da temperatura máxima (maior grau de superaquecimento, pontos "duas linhas")

$$h_1 \uparrow \quad h_2 \uparrow \quad h_3 = \text{cte} \rightarrow \eta \uparrow$$

h_1 aumenta e h_2 também mas em valor muito menor, o que faz com que η_t aumente. Aumenta também o título na saída da turbina ($x_2 \uparrow$).

c) Diminuição da pressão mínima (pontos "três linhas")

$$h_2 \downarrow \quad h_3 \downarrow \quad h_1 = \text{cte} \rightarrow \eta \uparrow$$

h_2 e h_3 diminuem aproximadamente no mesmo valor, fazendo η_t aumentar. Diminui, porém, o título do vapor de saída da turbina.

Exemplo ilustrativo:

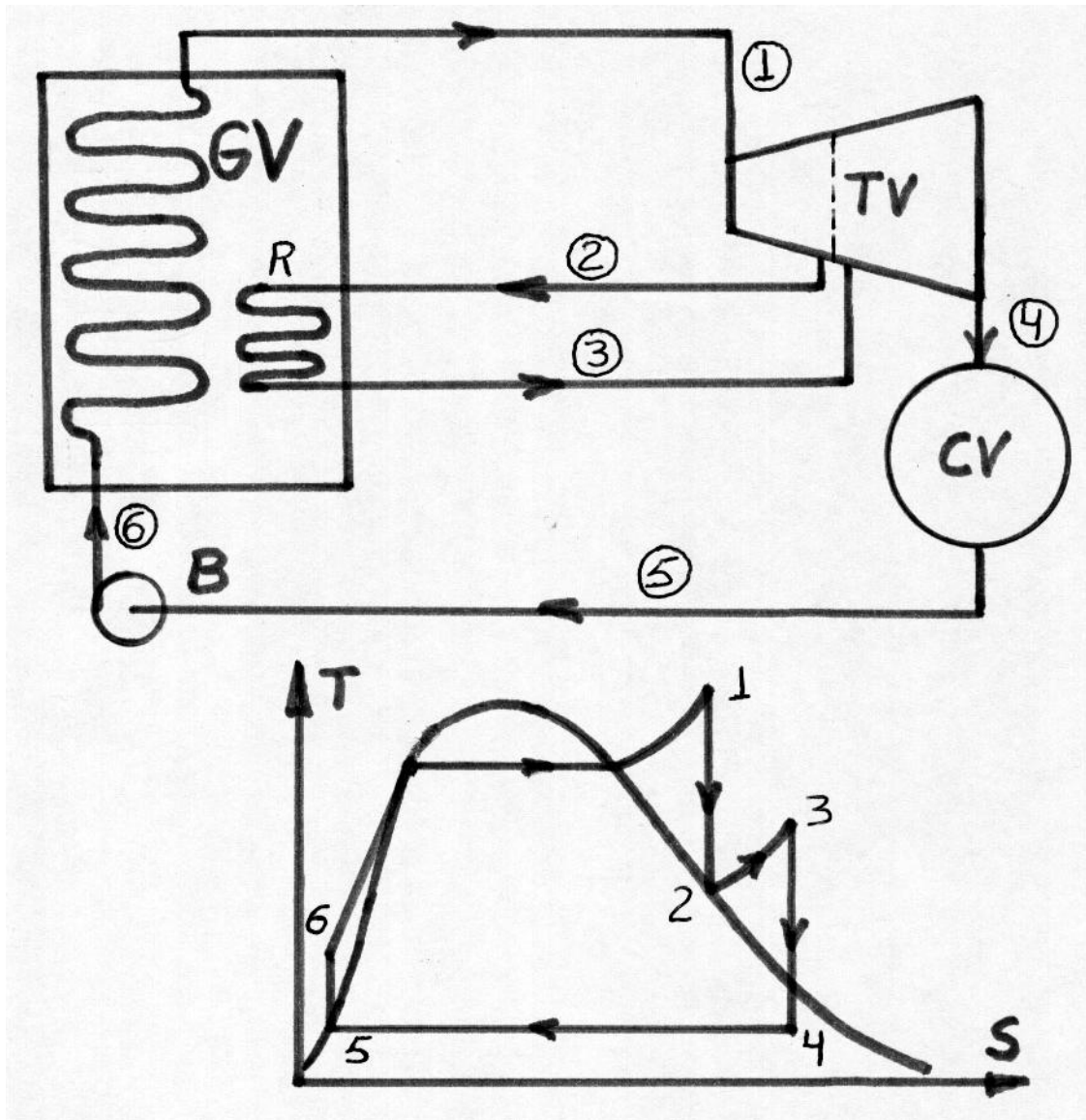
$p_1 = 50 \text{ bar} / 465^\circ\text{C}$	$p_{1'} = 70 \text{ bar} / 465^\circ\text{C}$	$p_1 = 50 \text{ bar} / 515^\circ\text{C}$	$p_1 = 50 \text{ bar} / 465^\circ\text{C}$
$h_1 = 800 \text{ kcal/Kg}$	$h_{1'} = 794$	$h_{1''} = 828$	$h_1 = 800$
$h_2 = 584 \text{ kcal/Kg}$	$h_{2'} = 567$	$h_{2''} = 584,5$	$h_{2''} = 541$
$h_3 = 90 \text{ kcal/Kg}$	$h_3 = 90$	$h_3 = 90$	$h_{3''} = 60$
$p_3 = 0,7 \text{ bar} / 90^\circ\text{C}$	$p_3 = 0,7$	$p_3 = 0,7$	$p_{3''} = 0,2 \text{ bar} / 60^\circ\text{C}$
$\eta = 30,4 \%$	$\eta = 32,2 \%$	$\eta = 33\%$	$\eta = 35 \%$

1.4 – Ciclo com reaquecimento

É uma variante do Ciclo Rankine, no qual o vapor é extraído em um estágio intermediário da turbina, conduzido para a caldeira para ser reaquecido (no reaquecedor) e retorna então à turbina para completar a expansão. Este ciclo tem como objetivos:

- diminuir a presença de líquido (maior título do vapor úmido) nos estágios de baixa pressão da turbina;
- aumentar o rendimento do ciclo.

As figuras seguintes mostram os componentes do ciclo com reaquecimento bem como a sua representação no diagrama T-s.



1.4.1 - Rendimento térmico teórico

$$\eta_t = \frac{w - w_B}{q_H} = \frac{(h_1 - h_2) + (h_3 - h_4) - (h_6 - h_5)}{(h_1 - h_6) + (h_3 - h_2)}$$

Se desprezarmos o trabalho de bombeamento, considerando $h_6 = h_5$, teremos:

$$\eta_t = \frac{w}{q_H} = \frac{(h_1 - h_2) + (h_3 - h_4)}{(h_1 - h_5) + (h_3 - h_2)}$$

Caso queiramos considerar o trabalho consumido na bomba:

$$w_B = h_6 - h_5 = (u_6 + p_6 v_6) - (u_5 + p_5 v_5) = p_6 v_6 - p_5 v_5 = v_5 (p_6 - p_5)$$

$$w_B = h_6 - h_5 = v_5 (p_6 - p_5)$$

pois $v_6 = v_5$ (líquido incompressível) e $T_6 \approx T_5 \Rightarrow u_6 = u_5$

1.5 – Ciclo Regenerativo

É outra variante do Ciclo Rankine, no qual uma fração do vapor que alimenta a turbina é extraída em um estágio intermediário desta, conduzido para um aquecedor (de mistura, no caso ilustrado na figura da página seguinte) onde vai misturar-se com o líquido (chamado de condensado no meio industrial) proveniente do condensador. Nessa mistura ocorre transferência de calor do vapor (que se condensa) para o líquido que então se aquece. Idealmente (ciclo teórico) o estado na saída do aquecedor é de líquido saturado.

Este ciclo tem como objetivo aumentar o rendimento em relação a um ciclo Rankine simples, que opere nas mesmas condições de pressões e temperatura de superaquecimento.

1.5.1 - Rendimento térmico teórico

Desprezando os trabalhos de bombeamento:

$$\eta_t = \frac{w' + w''}{q_H} = \frac{(h_1 - h_2) + (1 - m)(h_2 - h_3)}{h_1 - h_6}$$

Balanço de energia no aquecedor:

calor cedido pelo vapor na condensação = calor recebido pelo líquido no aquecimento

$$m(h_2 - h_6) = (1 - m)(h_6 - h_5)$$

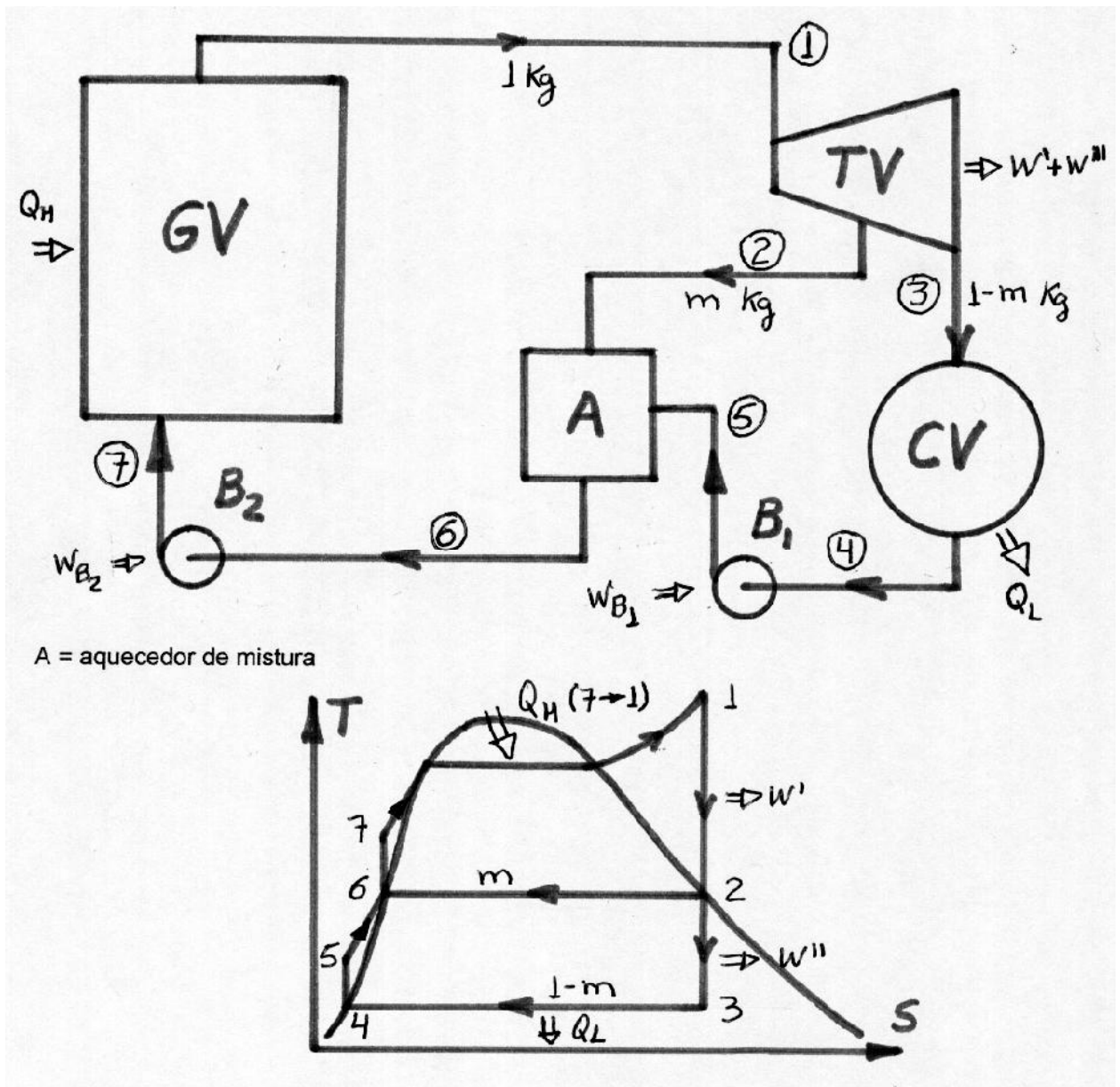
ou:

entalpia após mistura = soma das entalpias de líquido e vapor na entrada no aquecedor

$$h_6 = mh_2 + (1 - m)h_5$$

Por ambos os caminhos resulta:

$$m = \frac{h_6 - h_5}{h_2 - h_5}$$



1.6 – Rendimento efetivo da instalação térmica de potência

$$\eta_{\text{ef}} = \frac{\text{potência efetiva da instalação}}{\text{potência fornecida pelo combustível}} = \frac{P}{\dot{m}_{\text{cb}} \text{ PCI}}$$

\dot{m}_{cb} = consumo de combustível (vazão mássica)

PCI = poder calorífico inferior do combustível

Exemplo: O gerador elétrico de uma central térmica a vapor gera 150 MW, consumindo carvão (PCI = 20.000 kJ/kg) à taxa de 115 ton/h. Calcular o rendimento efetivo desta instalação.

$$\eta = \frac{P}{\dot{m}_{\text{cb}} \text{ PCI}} = \frac{150 \cdot 10^3}{\left(\frac{115 \cdot 10^3}{3600}\right) \cdot 20000} = 0,235$$

$$\eta = 23,5 \%$$

2 – COMBUSTÍVEIS E COMBUSTÃO

O estudo de combustíveis e combustão aqui apresentado é direcionado para a sua aplicação na disciplina de Máquinas Térmicas I, mais especificamente para a utilização em geradores de vapor (caldeiras). O assunto de combustíveis e combustão aplicado a geradores de vapor encontra-se de maneira mais completa nos seguintes livros que estão disponíveis na biblioteca de Ciências Exatas e Tecnologia.

- 1) Geração de Vapor - Edson Bazzo (UFSC) seção 3.2, p.18-26 e seção 3.7, p.54-72
- 2) Geradores de Vapor de Água - Hildo Pera (1ª ed. 1966 / 1973) capítulo 2, p.9-58
- 3) Geradores de Vapor de Água - Hildo Pera (2 ed. 1990) capítulo 2, p. 2.1 a 2.51
- 4) Geradores de Vapor - Raúl Peragallo Torreira (EX Libris) capítulos XI (seções 11.1 a 11.3) e XII (seções 12.1 a 12.3)
- 5) Geradores de Vapor de Água - Remi Benedito Silva (USP) capítulo de combustíveis e combustão
- 6) Combustíveis, combustão e câmaras de combustão - Dmitri Vlassov, Editora UFPR.

2.1 – Generalidades e classificação

Para fins de aplicação na indústria, combustível (do tipo convencional, ver classificação abaixo) é toda substância (sólida, líquida ou gasosa) que ao reagir com oxigênio libera grande quantidade de energia térmica (calor).

Podem ser classificados de acordo com:

a) Estado físico: sólidos, líquidos e gasosos;

b) Origem:

- Naturais (encontrados na natureza): petróleo, carvão fóssil, lenha, gás natural (GN, é composto principalmente por CH_4 - metano).

- Artificiais (obtidos a partir de processamento físico-químico de combustíveis naturais): derivados de petróleo, coque, carvão vegetal, álcool, gás de carvão (gasogênio), subprodutos de processos industriais (cavaco de madeira, bagaço de cana-de-açúcar, cascas de grãos e árvores).

c) Renovação: fósseis (não renováveis) e renováveis (madeira, biomassa).

d) Processo de liberação de energia: convencional (reação com O_2) e nuclear (fissão nuclear, $E=mc^2$)

A escolha do combustível a ser utilizado na caldeira é feita em função da disponibilidade local, custos (produto, transporte, manuseio, estocagem), fatores ambientais (poluição, descarte de resíduos) e operacionais (equipamentos e rendimento de queima, manutenção).

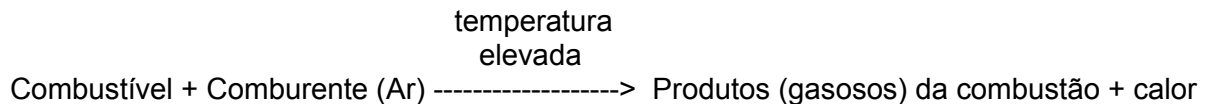
Os combustíveis mais frequentemente utilizados em caldeiras são óleo combustível, carvão mineral, gás natural, lenha, bagaço de cana-de-açúcar, cavaco de madeira e cascas de grãos ou árvores.

2.2 – Composição química dos combustíveis sólidos e líquidos

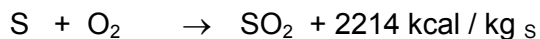
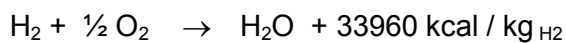
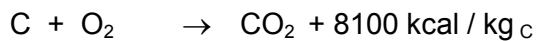
Encontramos na composição elementar dos combustíveis sólidos e líquidos: carbono, hidrogênio, enxofre, oxigênio, nitrogênio, umidade e cinzas.

C, H ₂ , S	O ₂	N ₂	H ₂ O	Z
substâncias combustíveis	comburente	inerte	umidade	cinzas (óxidos e impurezas)

Reação genérica de combustão industrial:

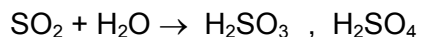


C, H₂ e S queimam liberando calor, pelas reações:



2.2.1 - Inconvenientes da presença de enxofre no combustível

1) O SO₂ resultante da queima do enxofre forma ácidos nos gases resultantes da combustão:



que quando estão, em geral, a menos de 160°C causam intensa corrosão nos tubos da caldeira. Evita-se o ataque corrosivo dimensionando o gerador de vapor para T > 160°C na saída dos gases para a chaminé ou usando materiais mais resistentes à corrosão nas partes mais frias. Na atmosfera esses ácidos provocam a chamada "chuva ácida".

2) SO₂ é poluente e tóxico, sendo necessária a sua remoção dos gases da combustão antes de emissão para a atmosfera, a fim de não ultrapassar os limites de emissão. Essa remoção do SO₂ dos gases pode ser feita através de equipamentos de controle de emissão denominados "lavadores de gases".

2.2.2 - Inconvenientes oriundos do nitrogênio

O nitrogênio em princípio não participa da reação (é inerte)). Mas em combustão a altas temperaturas (>1600°C) pode formar óxido de nitrogênio (NO, NO₂, NO₃ ou genericamente NO_x). Esses compostos originam "chuvas ácidas", devido à reação com a umidade do ar e formação de ácidos, de maneira semelhante como ocorre com o SO₂. Em caldeiras a formação de NO_x é muito pequena porque a temperatura média na fornalhas não deve ultrapassar 1350°C.

2.2.3 - Inconvenientes da presença de cinzas no combustível

As cinzas são materiais inertes (não reagem na combustão), são compostas principalmente por diversos óxidos (e outras impurezas): SiO₂ (sílica), Fe₂O₃, Al₂O₃, CaO, MgO. Os problemas causados pela sua presença no combustível são:

- a) Maior custo de transporte e armazenagem do combustível efetivo;
- b) Menor poder calorífico;
- c) Algumas cinzas (como as de carvões brasileiros) possuem ponto de fusão baixo ($< 1100^{\circ}\text{C}$) e quando ocorre a sua fusão, as cinzas fundidas escorrem e aderem à grelha, reduzindo a passagem de ar e diminuindo o rendimento da combustão;
- d) Podem também aderir nos tubos próximos à fornalha, dificultando a troca de calor e reduzindo a vida útil desses tubos;
- e) A fusão das cinzas sobre o combustível impede a queima pois bloqueia o contato com o ar, diminuindo o rendimento da combustão.

2.2.4 - Inconvenientes da presença de umidade no combustível

A umidade pode ser:

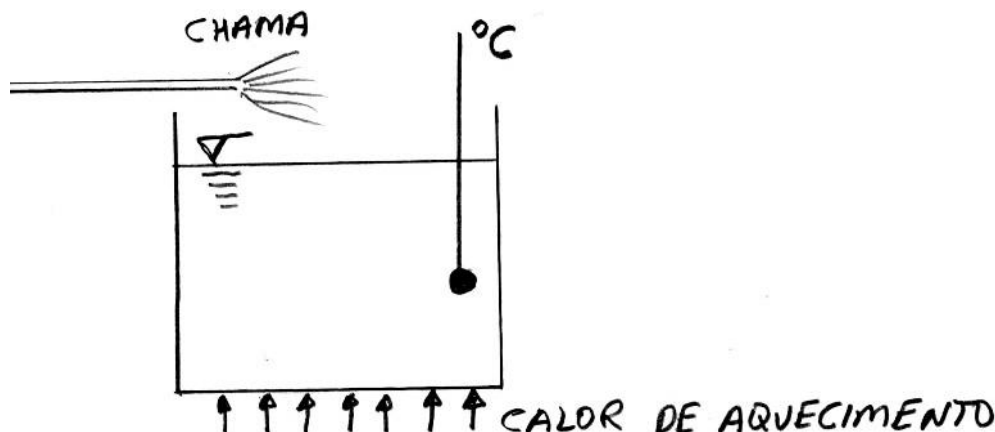
- acidental: causada por incidência de chuvas sobre o combustível. Elimina-se com ventilação em tempo seco ou em estufa (a 50°C).
- higroscópica: incorporada ao combustível e de difícil separação a não ser na queima ou por secagem a $T > 110^{\circ}\text{C}$. Seu teor oscila com a umidade relativa do ar.
- de constituição: combinada com sais na forma de água de cristalização. Permanece com os sais após a queima.

Problemas da presença de muita umidade no combustível:

- a) Diminuição do poder calorífico;
- b) Diminuição da temperatura de combustão devido ao alto calor específico e calor latente de vaporização da água, podendo levar a dificuldades na combustão e conseqüente redução do rendimento desta.

2.2.5 – Propriedades gerais dos combustíveis

- a) Poder calorífico: é a energia liberada na combustão (será abordado mais adiante no item 2.7)
- b) Temperaturas de fulgor, inflamação e ignição espontânea (determinadas pelo aparelho de Pensky-Martens para combustíveis líquidos, ver figura a seguir).



Ponto fulgor – passando a chama queima os vapores e apaga ($\cong 100^\circ\text{C}$ para óleo combustível)

Ponto inflamação – passando a chama começa a queimar o combustível da superfície e não apaga. Ex.: óleo combustível : $530^\circ - 580^\circ\text{C}$

Ponto de ignição espontânea – queima sem chama.

Para combustíveis sólidos tem-se somente a temperatura de ignição (ou inflamação) Entre 250° e 700°C . Ex.: Lenha: $\cong 300^\circ\text{C}$

- c) Peso específico
- d) Granulometria (média e distribuição de tamanho dos grãos)
- e) Viscosidade
- f) Ponto de fluidez (temperatura acima da qual o combustível líquido flui, podendo então ser bombeado e transportado em tubulações)
- g) Temperatura de fusão das cinzas
- h) Composição química

2.3 – Composição química dos combustíveis gasosos

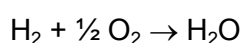
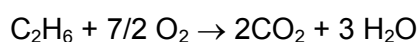
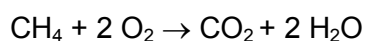
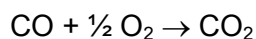
Os combustíveis gasosos são uma mistura de gases combustíveis e inertes.

Por exemplo:

CO , H_2 , CH_4 (metano), C_2H_6 (etano), C_3H_8 (propano), C_4H_{10} (butano) \Rightarrow gases combustíveis

CO_2 , O_2 , N_2 \Rightarrow gases inertes (não reagem com o O_2 e não geram calor)

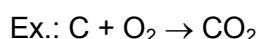
As reações elementares de combustão para esses gases são:



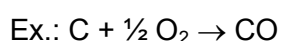
2.4 – Balanço de massa na combustão

Os cálculos de combustão baseiam-se nas reações químicas de combustão, estequiometricamente balanceadas. Os produtos da combustão são sempre gasosos e chamados gases da combustão.

A combustão é dita **completa** quando toda a massa de combustível reage com o oxigênio liberando calor e não se encontram substâncias ainda combustíveis nos gases da combustão.



Quando nos gases da combustão encontramos ainda substâncias combustíveis a combustão é dita **incompleta**.



Em caldeiras os subprodutos de combustão incompleta são CO, HC's (hidrocarbonetos), H₂S (sulfeto de hidrogênio ou gás sulfídrico, H₂ e fuligem. Essa última é material finamente particulado (pó) constituído essencialmente por carbono.

Substância	Massa Molecular (kg / kmol)	Volume molar (Nm ³ / kmol) *
C	12	-
H ₂	2	22,4
S	32	-
O ₂	32	22,39
N ₂	28	22,4
CO ₂	44	22,26
H ₂ O	18	22,4
SO ₂	64	21,89
CO	28	22,4
CH ₄	16	22,36

* Nm³ = m³ nas **CNTP** - condições normais de temperatura e pressão: 0°C e 1 atm (=1,0329 kgf/cm² = 101,325 kPa).

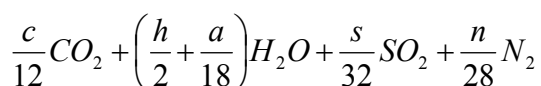
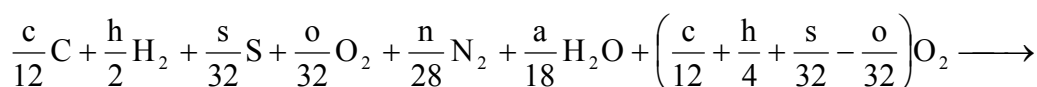
Adotamos para o volume molar o valor de 22,4 Nm³ / kmol (valor dos gases perfeitos) porque os gases da combustão têm comportamento próximo de gás perfeito.

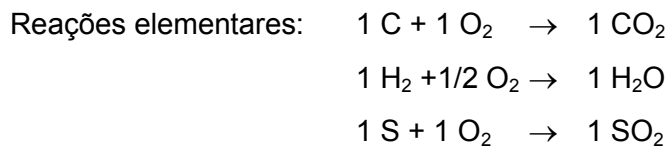
2.4.1 – Reação de combustão para combustíveis sólidos e líquidos

Considerando o combustível com a seguinte composição genérica (em massa):

- c kg de C / kg combustível
- h kg de H₂ / kg combustível
- s kg de S / kg combustível
- o kg de O₂ / kg combustível
- n kg de N₂ / kg combustível
- a kg de H₂O / kg combustível
- z kg de cinzas / kg combustível

a) Combustão com oxigênio





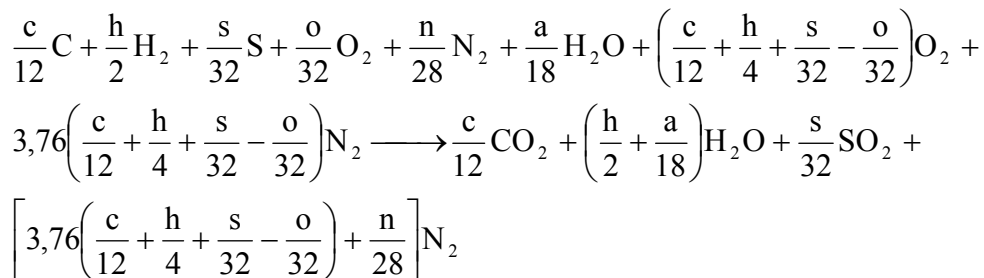
b) Combustão com ar estequiométrico (ar teórico ou mínimo)

Considerando o ar composto por:

Substância	% massa	% volume
O ₂	23,15	21
N ₂	76,85	79

Para cada kmol de O₂ temos $79 / 21 = 3,76$ kmol de N₂ (porque a composição em volume de uma mistura de gases é proporcional ao número de kmol de cada gás da mistura, já que o volume molar é o mesmo para todos os gases, 22,4 Nm³ / kmol).

Então a reação de combustão torna-se:



c) Combustão com excesso de ar

O coeficiente de excesso de ar é definido como a razão entre a quantidade de ar real utilizado para a combustão e a quantidade de ar estequiométrica necessária (a quantidade mínima para que haja oxigênio suficiente para reagir com carbono, hidrogênio e enxofre).

$$\lambda = \frac{\text{quantidade real de ar para combustão}}{\text{quantidade teórica (mínima ou estequiométrica) de ar}}$$

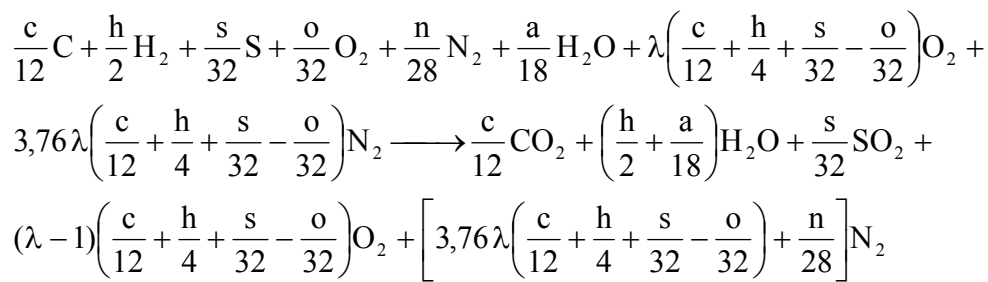
$$\lambda = \frac{AC}{AC_0} = \frac{V}{V_0}$$

AC = relação ar/combustível em massa, ou seja, a massa real de ar para combustão (kg ar / kg combustível)

AC₀ = relação ar/combustível teórica (estequiométrica) em massa, ou seja, a massa estequiométrica de ar para combustão (kg ar / kg combustível)

V = volume real de ar para de combustão (m³ ar / kg combustível)

V₀ = volume teórico (estequiométrico) de ar para combustão (m³ ar / kg combustível)



2.4.2 – Reação de combustão para combustíveis gasosos

Seja um combustível gasoso com a composição genérica:

$$x_{CO} \text{ Nm}^3 \text{ CO} / \text{Nm}^3 \text{ combustível}$$

$$x_{H_2} \text{ Nm}^3 \text{ H}_2 / \text{Nm}^3 \text{ combustível}$$

$$x_{CH_4} \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 / \text{Nm}^3 \text{ combustível}$$

$$x_{CO_2} \text{ Nm}^3 \text{ CO}_2 / \text{Nm}^3 \text{ combustível}$$

$$x_{O_2} \text{ Nm}^3 \text{ O}_2 / \text{Nm}^3 \text{ combustível}$$

$$x_{N_2} \text{ Nm}^3 \text{ N}_2 / \text{Nm}^3 \text{ combustível}$$

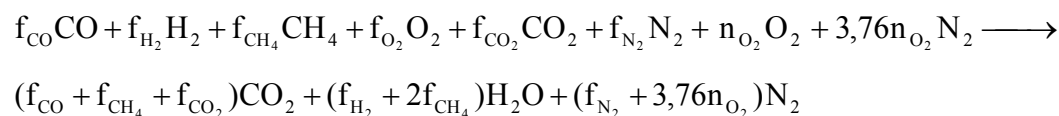
a) Combustão com ar estequiométrico

Definindo as frações molares de cada componente: $f_i = \frac{x_i}{V_{mi}}$

o índice "i" representa um determinado gás da mistura que compõe o combustível

$$f_i = \text{número de kmol do gás "i"} / \text{Nm}^3_{cb}$$

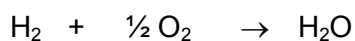
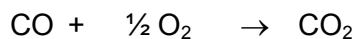
$$V_{mi} = \text{volume molar} (22,4 \text{ Nm}^3 / \text{kmol})$$



onde:

$$n_{O_2} = \frac{f_{CO}}{2} + \frac{f_{H_2}}{2} + 2f_{CH_4} - f_{O_2}$$

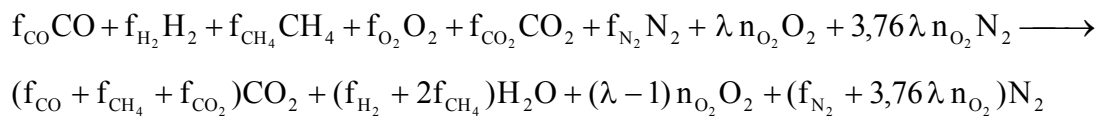
Reações elementares:



Se houver outros gases combustíveis além do CO, H₂ e CH₄ esses deverão entrar na equação de reação e no termo de n_{O₂}

b) Combustão com excesso de ar

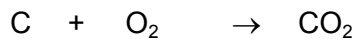
Na queima real (com excesso de ar) os termos de O₂ e N₂ no lado dos reagentes devem ser multiplicados pelo coeficiente de excesso de ar (λ) e haverá O₂ também no lado dos produtos da combustão.



2.5 – Ar necessário à combustão

Podemos calcular a quantidade em massa ou em volume de ar necessário para a combustão de diversas formas equivalentes.

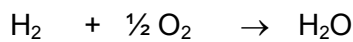
2.5.1 – Reações elementares de combustão



$$12 \text{ kg} + 32 \text{ kg} \rightarrow 44 \text{ kg} \quad (\text{massa})$$

$$c \text{ kg} + 32/12 c \text{ kg} \rightarrow 44/12 c \text{ kg} \quad (\text{massa})$$

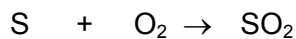
$$\cong 0 \text{ m}^3 + 22,4 \text{ Nm}^3 \rightarrow 22,4 \text{ Nm}^3 \quad (\text{volume})$$



$$2 \text{ kg} + 16 \text{ kg} \rightarrow 18 \text{ kg}$$

$$h \text{ kg} + 8 h \text{ kg} \rightarrow 9 h \text{ kg}$$

$$22,4 \text{ Nm}^3 + 11,2 \text{ Nm}^3 \rightarrow 22,4 \text{ Nm}^3$$



$$32 \text{ kg} + 32 \text{ kg} \rightarrow 64 \text{ kg}$$

$$s \text{ kg} + s \text{ kg} \rightarrow 2s \text{ kg}$$

$$\cong 0 + 22,4 \text{ Nm}^3 \rightarrow 22,4 \text{ Nm}^3$$

2.5.2 – Oxigênio teórico ou estequiométrico necessário

$$n_{O_2} = \frac{c}{12} + \frac{h}{4} + \frac{s}{32} - \frac{o}{32} \quad \frac{\text{kmol}_{O_2}}{\text{kg}_{cb}}$$

$$m_{O_2} = 32 n_{O_2} = 32 \left[\frac{c}{12} + \frac{h}{4} + \frac{s}{32} - \frac{o}{32} \right] \quad \frac{\text{kg}_{O_2}}{\text{kg}_{cb}}$$

$$V_{O_2} = 22,4 n_{O_2} = 22,4 \left[\frac{c}{12} + \frac{h}{4} + \frac{s}{32} - \frac{o}{32} \right] \quad \frac{\text{Nm}^3_{O_2}}{\text{kg}_{cb}}$$

2.5.3 – Ar teórico (estequiométrico) necessário para a combustão

Tomando por base a composição do ar dada em 2.4.1, a relação ar/combustível resulta

$$AC_0 = \frac{m_{O_2}}{0,2315} = \frac{32 n_{O_2}}{0,2315} = 138,2 \left[\frac{c}{12} + \frac{h}{4} + \frac{s}{32} - \frac{o}{32} \right] \quad \frac{\text{kg}_{ar}}{\text{kg}_{cb}}$$

E o volume de ar estequiométrico resulta

$$V_0 = \frac{V_{O_2}}{0,21} = \frac{22,4 n_{O_2}}{0,21} = 106,7 \left[\frac{c}{12} + \frac{h}{4} + \frac{s}{32} - \frac{o}{32} \right] \quad \frac{\text{Nm}^3_{ar}}{\text{kg}_{cb}}$$

No caso de combustível gasoso contendo CO, H₂, CH₄, O₂ o volume de ar teórico é

$$V_0 = \frac{V_{O_2}}{0,21} = \frac{22,4 n_{O_2}}{0,21} = 4,76 \left[\frac{x_{CO}}{2} + \frac{x_{H_2}}{2} + 2x_{CH_4} - x_{O_2} \right] \quad \frac{Nm^3_{ar}}{Nm^3_{cb}}$$

pois $n_{O_2} = \frac{x_{CO}}{2V_{mCO}} + \frac{x_{H_2}}{2V_{mH_2}} + \frac{2x_{CH_4}}{V_{mCH_4}} - \frac{x_{O_2}}{V_{mO_2}}$ e $V_{mi} \cong 22,4 Nm^3 / kmol$

A relação ar/combustível estequiométrica é dada por

$$\overline{AC}_0 = \frac{32 n_{O_2}}{0,2315} \quad \frac{kg_{ar}}{Nm^3_{cb}} \quad AC_0 = \frac{\overline{AC}_0}{\rho_{cb}} \quad \frac{kg_{ar}}{kg_{cb}}$$

A massa específica do combustível é calculada por $\rho_{cb} = \frac{\sum x_i M_i}{22,4} \quad [kg / Nm^3]$

2.5.4 – Ar real para combustão (com excesso)

A partir da definição do coeficiente de excesso de ar tem-se:

$$AC = \lambda AC_0 \quad V = \lambda V_0$$

Valores práticos de λ :

Combustível	Tipo de Queima	Coef. de excesso de ar (λ)
Gás combustível	Suspensão	1,05 – 1,2
Carvão pulverizado	Suspensão	1,1 – 1,25
Óleo combustível	Suspensão	1,1 – 1,25
Carvão granulado	Grelha	1,3 – 1,6
Lenha	Grelha	1,3 – 1,6

No caso de combustíveis gasosos o procedimento de cálculo do oxigênio e do ar necessários à combustão é análogo, bastando utilizar o termo n_{O_2} apropriadamente de acordo com a composição do gás.

2.5.5 – Fórmulas práticas para a relação ar/combustível

Quando a composição do combustível não é conhecida, a quantidade aproximada de ar para a combustão pode ser calculada a partir de expressões empíricas, considerando o poder calorífico do combustível.

V_0 e V_g são o volume de ar estequiométrico e volume de gases respectivamente.

a) Óleo combustível e carvão (segundo Izart)

$$AC_0 = \frac{1,38 p_{ci}}{10^3} \quad \left[\frac{kg_{ar}}{kg_{cb}} \right] \quad PCI = \left[\frac{kcal}{kg} \right]$$

b) Combustíveis sólidos:

$$V_0 = \frac{1,01 \text{ PCI}}{10^3} + 0,5 \quad \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}_{\text{cb}}} \right] \quad \text{PCI} = \left[\frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right]$$

$$V_g = \frac{0,89 \text{ PCI}}{10^3} + 1,65 \quad \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}_{\text{cb}}} \right]$$

c) Combustíveis líquidos:

$$V_0 = \frac{0,85 p_{\text{ci}}}{10^3} + 2 \quad \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}_{\text{cb}}} \right] \quad \text{PCI} = \left[\frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right]$$

$$V_g = \frac{1,11 \text{ PCI}}{10^3} \quad \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}_{\text{cb}}} \right]$$

d) Gases pobres ($\text{PCI}_i < 3000 \text{ Kcal} / \text{Nm}^3$)

$$V_0 = \frac{0,875 \text{ PCI}}{10^3} \quad \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}_{\text{cb}}} \right] \quad \text{PCI} = \left[\frac{\text{kcal}}{\text{Nm}^3} \right]$$

$$V_g = \frac{1,45 \text{ PCI}}{10^3} \quad \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}_{\text{cb}}} \right]$$

e) Gases ricos (gás natural, gás de coqueria, $p_{\text{ci}} > 3000 \text{ Kcal} / \text{Nm}^3$)

$$V_0 = \frac{1,09 \text{ PCI}}{10^3} - 0,25 \quad \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}_{\text{cb}}} \right] \quad \text{PCI} = \left[\frac{\text{kcal}}{\text{Nm}^3} \right]$$

$$V_g = \frac{1,14 \text{ PCI}}{10^3} + 0,25 \quad \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}_{\text{cb}}} \right]$$

2.6 - Produtos da Combustão

2.6.1 – Tipos de combustão

a) Com excesso de ar baixo → maior perda por combustível não queimado

b) Com excesso de ar normal → perdas mínimas

c) Com excesso de ar alto → maior perda na massa de gases quentes da chaminé

O excesso de ar chamado de “normal” (ou recomendado) é aquele que minimiza a soma das perdas por combustão incompleta e gases quentes lançados para a atmosfera.

2.6.2 – Influência do excesso de ar na combustão

Variáveis	λ baixo	λ normal	λ alto
Gases resultantes da combustão	$\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{SO}_2, \text{N}_2,$ $\text{O}_2(\downarrow), \text{CO}, \text{C}$	$\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{SO}_2, \text{N}_2,$ $\text{O}_2(\pm), \text{CO}(\downarrow), \text{C}(\downarrow)$	$\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{SO}_2, \text{N}_2,$ $\text{O}_2(\uparrow), \text{CO}(\downarrow\downarrow)$
% O_2 gases	Baixo (2%)	Normal (5%)	Alto (8%)
% CO_2 gases	Alto (até 21%)	Normal (12%)	Baixo (aumenta muito mais O_2 e N_2)

% CO gases	Alto (1%)	Normal (0,5%)	Baixo (desprezível)
Teor de C (fuligem) nos gases	Alto	Normal (quase 0%)	Nulo
Cor dos gases	Escura	Levemente marrom	Incolor (pouco branco se há H ₂ O)
Perda por combustão incompleta	Grande	Normal	Pequena
Perda de calor pelos gases da chaminé	Pequena	Normal	Grande

2.6.3 – Características dos Gases da Combustão

Sendo os índices:

- 1 = CO₂
- 2 = SO₂
- 3 = O₂
- 4 = N₂
- 5 = H₂O

a) Massa total:

$$m_g = \sum_1^5 m_i = AC + 1 - z \quad [\text{kg}_g / \text{kg}_{cb}] \quad (g = \text{gases} \quad cb = \text{combustível})$$

$$m_i = n_i M_i \quad [\text{kg} / \text{kg}_{cb}]$$

b) Número de kmol

$$n_g = \sum_1^5 n_i \quad [\text{kmol} / \text{kg}_{cb}]$$

c) Constante termodinâmica dos gases (R_g)

$$R_g = \frac{\sum_1^5 m_i R_i}{m_g} \quad R_i = \frac{848}{M_i} \quad [\text{kgfm} / \text{kg K}]$$

$$\text{ou} \quad R_g = \frac{848 n_g}{m_g} \quad M_i = \text{massa molecular do gás "i"}$$

d) Volume total

$$V_g = \sum_1^5 V_i = 22,4 \sum_1^5 n_i \quad [\text{Nm}^3_g / \text{kg}_{cb}] \quad (n_i = \text{kmol do gás "i"})$$

Ou pela equação de estado: $p V_g = m_g R_g T$

R_g = constante termodinâmica da mistura dos gases [kgfm / kg K]

Volume dos gases secos:

Gases da combustão isentos de umidade (H₂O)

$$V_g = \sum_1^4 V_i = 22,4 \sum_1^4 n_i \quad [\text{Nm}^3 / \text{kg}_{\text{cb}}]$$

e) Calor específico médio dos gases

É a média ponderada pela massa dos calores específicos dos gases da combustão.

$$c_{pg} = \frac{\sum_1^5 m_i c_{pi}}{m_g} \quad [\text{kcal} / \text{kg} \text{ } ^\circ\text{C}]$$

2.6.4 – Análise dos Gases da Combustão

Composição: CO₂, H₂O, SO₂, N₂, O₂, CO, etc.

A medição precisa do teor em volume (na base seca, isto é sem umidade – vapor de água) é feita pelo aparelho de ORSAT para o CO₂, O₂ e CO, por absorção destes por reativos apropriados.

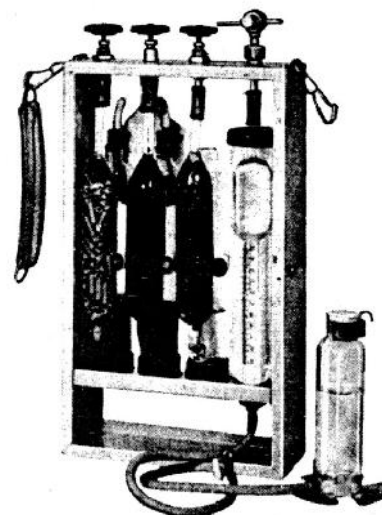
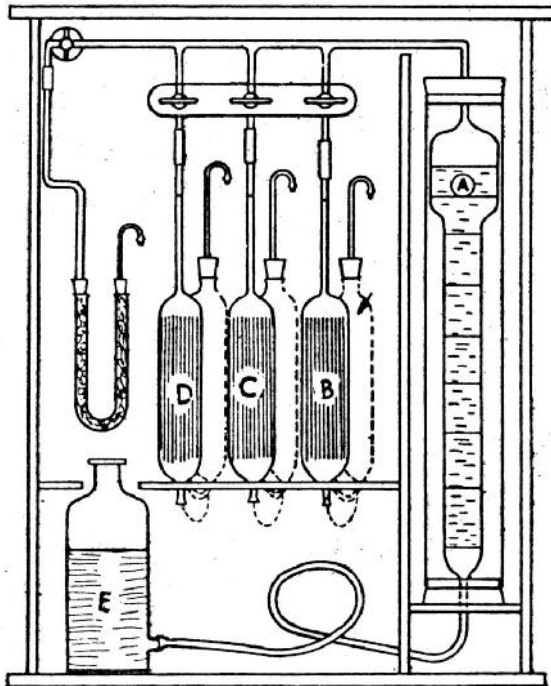


Figura nº 3.4.2 - Conjunto de um Aparelho Analisador de Gases (Cortesia Hays Co.)

Também podem ser usados analisadores de gases que funcionam com células eletroquímicas. Através de uma sonda inserida na chaminé faz-se a medição direta da composição química (CO₂, CO, O₂, SO₂, NO_x, HC's).

2.6.5 – Determinação aproximada do coeficiente de excesso de ar a partir do teor de CO₂ medido nos gases

Sendo

t_{CO_2} = % CO₂ em volume nos gases secos

$t_{\text{CO}_2\text{máx}}$ = % CO₂ em volume nos gases secos para combustão estequiométrica

V_{gs} = volume dos gases secos em condições estequiométricas [Nm³ / kg_{cb}]

V_{ar} = volume de ar estequiométrico de combustão

Para $\lambda = 1$ (combustão estequiométrica) teremos o teor máximo de CO_2 nos gases:

$$t_{CO_2max} = \frac{\text{volume de } CO_2}{\text{vol. dos gases sec os}} = \frac{\frac{c}{12} 22,4}{V_{gs}} 100 \quad (1)$$

Para $\lambda > 1$ (reação com excesso de ar):

$$t_{CO_2} = \frac{\frac{c}{12} 22,4}{V_{gs} + (\lambda - 1) V_{ar}} 100 \quad (2)$$

Dividindo as equações (1) / (2) :

$$\frac{t_{CO_2max}}{t_{CO_2}} = \frac{V_{gs} + (\lambda - 1) V_{ar}}{V_{gs}} = 1 + \frac{(\lambda - 1) V_{ar}}{V_{gs}}$$

Como $\frac{V_{ar}}{V_{gs}} \cong 1$ (*) temos:

$$\lambda = \frac{t_{CO_2max}}{t_{CO_2}}$$

(*) Diferença entre V_{ar} e V_{gs} : V_{ar} é aproximadamente 1 a 3 % maior.

O teor de CO_2 máximo é característico de cada combustível, pois depende de sua composição química.

Combustível	t_{CO_2max} [%]
Carbono puro	21
Coque	20,5
Carvão mineral	18-19
Óleo combustível	15,8
Gás GLP	14,8
Gás natural	12

Mais precisamente, a determinação do teor de CO_2 em volume nos gases secos é dada por:

$$t_{CO_2} = \frac{\frac{c}{12}}{\frac{c}{12} + \frac{s}{32} + (\lambda - 1) n_{O_2} + 3,76 \lambda n_{O_2} + \frac{n}{28}} 100 \quad [\%]$$

E o coeficiente de excesso de ar pode ser calculado isolando o “ λ ” na equação acima.

2.6.6 – Ponto de orvalho dos gases de combustão

O vapor de água se condensa quando os gases estão a uma temperatura igual ou inferior à temperatura de saturação da água correspondente à pressão parcial do vapor na mistura de gases (o ponto de orvalho).

$$p_g V = n_g R_g T \quad (3)$$

$$p_v V = n_v R_v T \quad (4)$$

$$R_i = 848 / M_i \quad (\text{kgfm} / \text{kg K})$$

M_i = massa molecular dos gases ou do vapor de água (kg / kmol)

p_v = pressão parcial de vapor (a pressão que ele exerceria se estivesse ocupando o volume total da mistura)

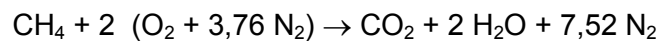
Dividindo (4) / (3) :

$$\frac{p_v}{p_g} = \frac{n_v}{n_g} \Rightarrow p_v = \frac{n_v}{n_g} p_g$$

Ex.: Queima de metano com ar teórico:



Reação com ar:



$$n_g = 1 + 2 + 7,52 = 10,52 \text{ kmol}$$

$$n_v = 2 \text{ kmol}$$

Tomando $p_g = 1 \text{ kgf} / \text{cm}^2$ (pressão atmosférica)

$$p_v = \frac{n_v}{n_g} p_g = \frac{2}{10,52} 1 = 0,19 \text{ kgf} / \text{cm}^2$$

Da tabela vapor saturado: $T_s \cong 59^\circ\text{C}$ (ponto de orvalho da mistura de gases)

2.7 – Poder Calorífico dos Combustíveis

Definições:

Poder calorífico superior (PCS) : quantidade de calor liberada por 1 kg de combustível quando todos os produtos da combustão são resfriados até a temperatura ambiente. Neste caso o vapor de água está condensado, na fase líquida.

Poder calorífico inferior (PCI) : quantidade de calor liberada por 1 kg de combustível resultando vapor d'água saturado como um dos produtos da combustão.

Assim, a diferença entre o PCS e o PCI é a energia contida no vapor de água, que sempre resulta nos gases de combustão industrial, devido à combustão do H_2 e também devido à presença de umidade no combustível, a qual é vaporizada durante a combustão.

Substância	PCS		PCI	
	kcal / kg	kcal / Nm ³	kcal / kg	kcal / Nm ³
C	8100	-	8100	-
H ₂	33960	3032	28702	2563
S	2214	-	2214	-
CO	2419	3023	2419	3023
CH ₄	13254	9467	11944	8531
C ₂ H ₆	12390	16594	11341	15189
C ₃ H ₈	12024	23619	11070	21745
C ₄ H ₁₀	11822	30611	10918	28270

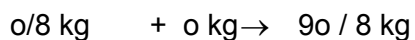
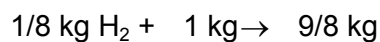
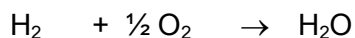
* Assume-se o volume molar como 22,4 Nm³ / kmol

2.7.1 – Cálculo do poder calorífico para combustíveis sólidos e líquidos

Seja o combustível genérico definido no item 2.4.1: c, h, s, o, n, z [kg / kg_{cb}]

Então o poder calorífico superior é a soma do poder caloríficos superiores do carbono, hidrogênio e enxofre contidos no combustível.

$$\text{PCS} = 8100c + 33960\left(h - \frac{o}{8}\right) + 2214s \quad [\text{kcal / kg}]$$

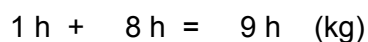
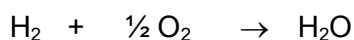


O hidrogênio livre para queima é o total menos o que já está combinado com o O₂. Porém não se sabe ao certo se todo o O₂ já está combinado com o H₂. A equação acima então é conservativa porque considera que todo O₂ presente no combustível reagiu com o H₂.

Da definição de poder calorífico inferior:

PCI = PCS – calor de aquecimento e vaporização da água (formada pela queima do H₂ + umidade presente no combustível)

$$\text{PCI} = \text{PCS} - \Delta h (a + 9 h) \quad [\text{kcal / kg}]$$



$\Delta h = [\text{kcal / kg}_{\text{H}_2\text{O}}]$ calor de aquecimento e vaporização da água

Considerando a temperatura ambiente de 20°C e sabendo-se que o calor específico da água é de 1 kcal / kg °C, bem como seu calor latente de vaporização de 540 kcal / kg , teremos:

$$\Delta h = Q_{\text{aquec}} + Q_{\text{vaporização}} = (100-20) \text{ kcal / kg} + 540 \text{ kcal / kg} = 620 \text{ kcal / kg H}_2\text{O}$$

Então:

$$\text{PCI} = \text{PCS} - 620 (a + 9 h) \quad [\text{kcal / kg}]$$

2.7.2 – Determinação do poder calorífico para combustíveis gasosos

O procedimento é análogo ao acima exposto para combustíveis sólidos e líquidos, apenas deve-se tomar cuidado quanto aos valores do poder calorífico dos gases combustíveis presentes (ver tabela no item 2.7). Notar também que, quando se trata de gases, normalmente trabalha-se em unidades volumétricas e não em termos de massa.

O exemplo a seguir ilustra o cálculo do poder calorífico para uma mistura gasosa composta por metano, etano e propano. Composição em base volumétrica:

$$x_{\text{CH}_4} \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 / \text{Nm}^3 \text{ combustível}$$

$$x_{\text{C}_2\text{H}_6} \text{ Nm}^3 \text{ C}_2\text{H}_6 / \text{Nm}^3 \text{ combustível}$$

$$x_{\text{C}_3\text{H}_8} \text{ Nm}^3 \text{ C}_3\text{H}_8 / \text{Nm}^3 \text{ combustível}$$

$$\overline{\text{PCS}} = 9467 x_{\text{CH}_4} + 16594 x_{\text{C}_2\text{H}_6} + 23619 x_{\text{C}_3\text{H}_8} \quad [\text{kcal / Nm}^3_{\text{cb}}]$$

Como o combustível gasoso não tem umidade (geralmente) o poder calorífico inferior pode ser calculado simplesmente pela soma dos Pci de cada gás.

$$\overline{\text{PCI}} = 8531 x_{\text{CH}_4} + 15189 x_{\text{C}_2\text{H}_6} + 21745 x_{\text{C}_3\text{H}_8} \quad [\text{kcal / Nm}^3_{\text{cb}}]$$

Em base mássica o poder calorífico de gases combustíveis resulta:

$$\text{PCS} = \frac{\overline{\text{PCS}}}{\rho_{\text{cb}}} \quad [\text{kcal / kg}_{\text{cb}}]$$

onde a massa específica do combustível é dada por:

$$\rho_{\text{cb}} = \frac{\sum x_i M_i}{22,4} \quad [\text{kg / Nm}^3]$$