

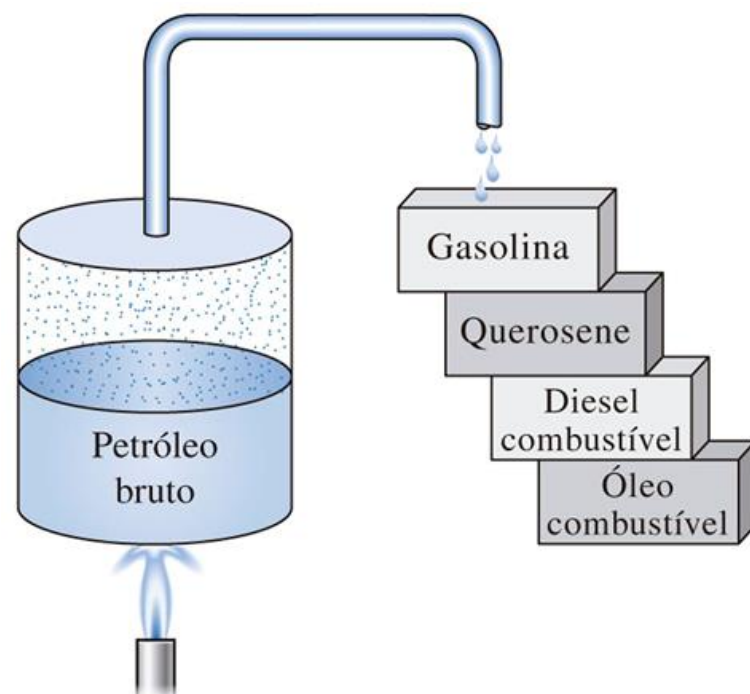
Combustão I

Conceituação e Aplicações da combustão

Objetivos

- Apresentar uma visão geral sobre combustíveis e combustão;
- Compreender a combustão com e sem chama;
- Entender as razões oxidante-combustível e de equivalência;
- Conhecer algumas aplicações de combustão em dispositivos práticos;

- **Combustível:** Toda substância que pode reagir com um oxidante e liberar sua energia em forma de calor.
- A maioria dos combustíveis conhecidos são primariamente constituídos de hidrogênio e carbono;
- Eles são chamados de **combustíveis de hidrocarbonetos** e indicados pela fórmula geral C_nH_m ;
- Os combustíveis de hidrocarbonetos existem em todas as fases, e entre eles estão o carvão, a gasolina e o gás natural;
- A maior parte dos combustíveis de hidrocarbonetos é uma mistura de vários hidrocarbonetos obtida do petróleo bruto por destilação.



A maioria dos combustíveis líquidos de hidrocarbonetos é obtida do petróleo bruto por destilação.

- Embora os combustíveis líquidos de hidrocarbonetos sejam misturas de muitos hidrocarbonetos diferentes, geralmente são tratados um único hidrocarboneto por conveniência:
- ✓ Gasolina (tratada como octano - C_8H_{18});
 - ✓ Diesel (tratado como dodecano - $C_{12}H_{26}$);
 - ✓ Gás natural (tratado como metano - CH_4);
 - ✓ Querosene aeronáutico (Jet A1 - $C_{12}H_{23}$);
 - ✓ Querosene de motor foguete ($C_{7,21}H_{13,29}$)
 - ✓ Etc.

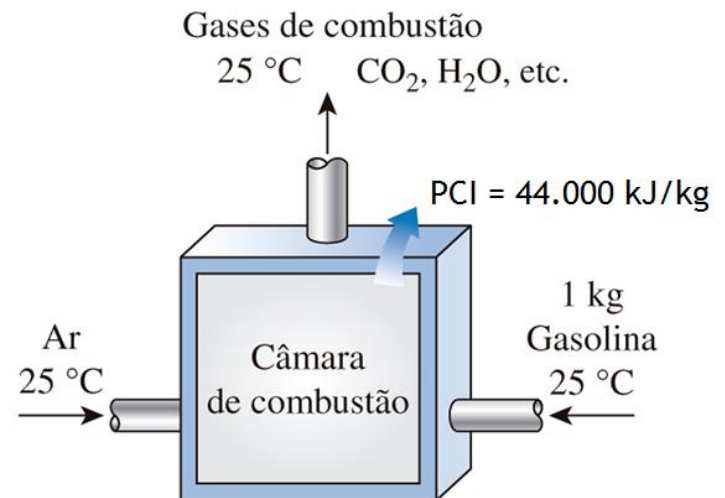
Poder calorífico do combustível: A quantidade de calor liberada quando uma quantidade unitária de combustível à temperatura ambiente é completamente oxidada e os produtos de combustão são resfriados até a temperatura ambiente.

Poder calorífico superior (PCS): Quando a água dos produtos de combustão é completamente **condensada** e, portanto, o calor da vaporização também é recuperado.

Poder calorífico inferior (PCI): Quando a água dos produtos de combustão é **liberada** sob a *forma de vapor*.

Os motores que operam segundo *ciclos a gás* como os alternativos (ciclo Otto ou Diesel) ou turbinas a gás (ciclo Brayton) tem como base o **PCI**.

Já os **fornos**, por sua vez, tem como base o **PCS**.



A definição do poder calorífico da gasolina.

Combustíveis	Poder calorífico inferior	
	kJ/kg	kcal/kg
Gás liquefeito de petróleo	49030	11730
Gasolina A	45978	11000
Gasolina com 20% de álcool	40546	9700
Óleo diesel	43888	10500
Álcool combustível	27169	6500
Óleo combustível	42635	10200
Carvão mineral	20899 – 33857	5000 - 8100
Carvão vegetal	33432	8000
Lenha	10450 – 14630	2500 - 3500
Bagaço de cana	9614 – 19165	2300 - 4585

ASTM – D1655: Standard Specification for Aviation Turbine Fuels

Jet-A1

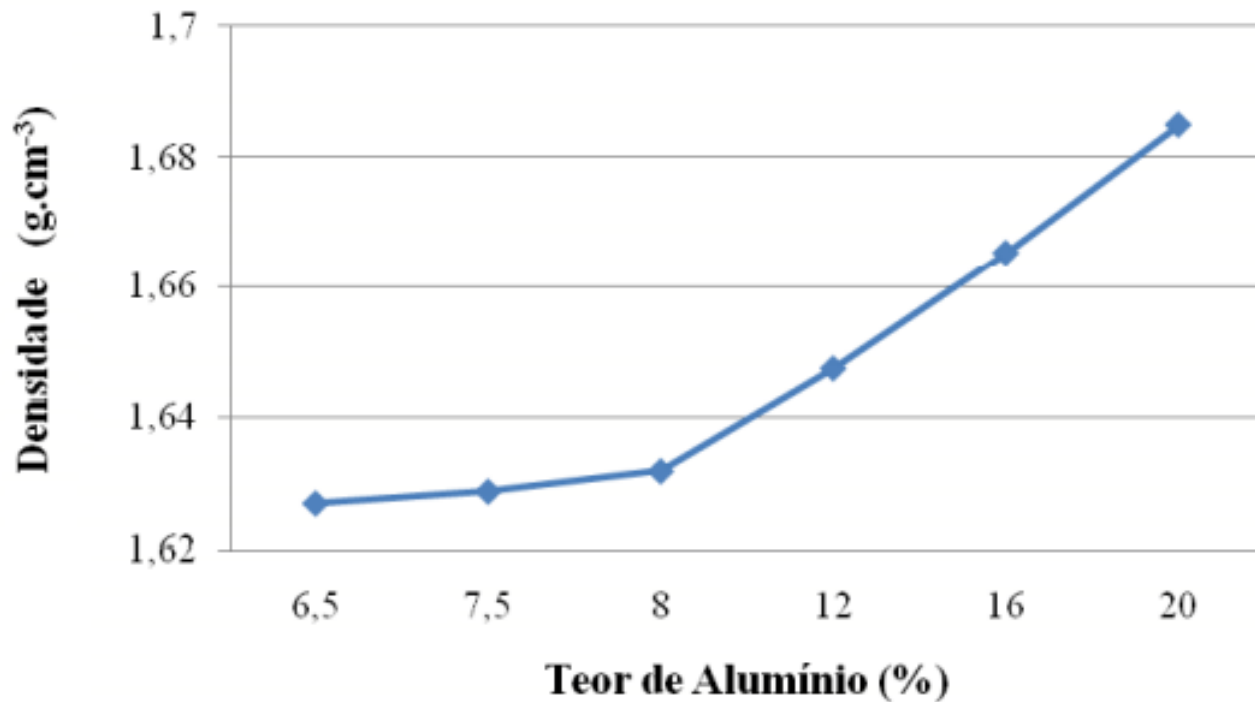
IMPORTANT PROPERTIES		ASTM Method	
Density @ 15°C (kg/m ³)	812.7	D4052	775–840
Viscosity @ -20°C (mm ² /sec)	4.55	D445	Max 8.0
Freezing Point (°C)	–53.4	D5972	Max –47
Net heat of combustion (MJ/kg)	42.91	D4809	Min 42.8
Mid Boiling Point (°C)	204.8	D86	
Final Boiling Point (°C)	258.2	D86	Max 300
Distillation Residue (%)	1.4		Max 1.5
Flash Point (°C)	51.0	D56	Min 38
Hydrogen content (mass %)	13.67	D3701	
Ignition Quality (DCN)	42.2	D6890	
Smoke Point (mm)	20.5	D1322	Min 18
Naphthalene's (vol %)	1.62	D1840	Max 3.0

Combustível motor foguete (sólido)

Composição do propelente sólido

Constituinte	Fração mássica (%)
PBLH (poliubutadieno líquido hidroxilado)	15,73-15,79
IPDI (agente de cura)	1,27-1,33
Al 32,6 μm (combustível metálico)	6,5
Perclorato de amônio (trimodal)	71,5
Óxido de ferro (catalisador de queima)	2,0
Aditivos (antioxidante, plastificante e agente de ligação)	3,0

Combustível motor foguete (sólido)

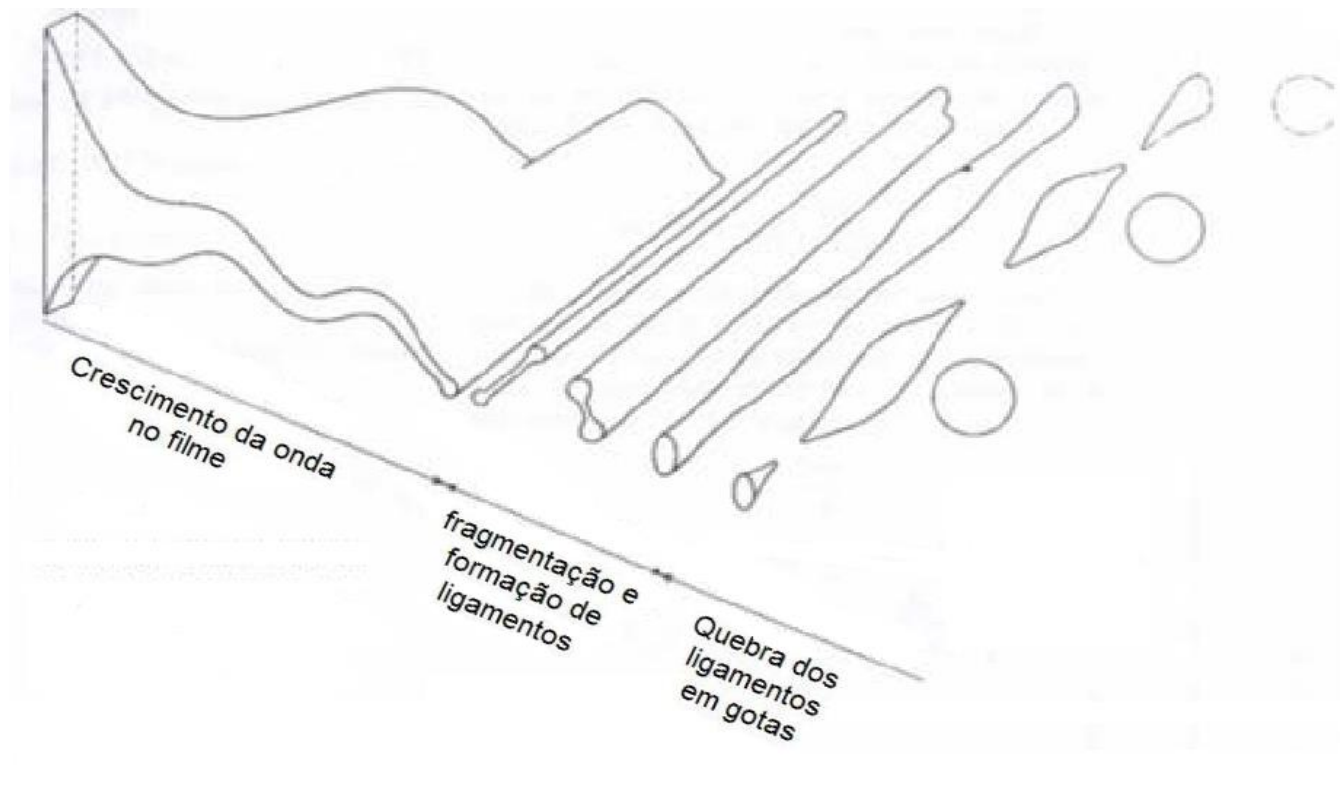


Combustível motor foguete (Líquido)

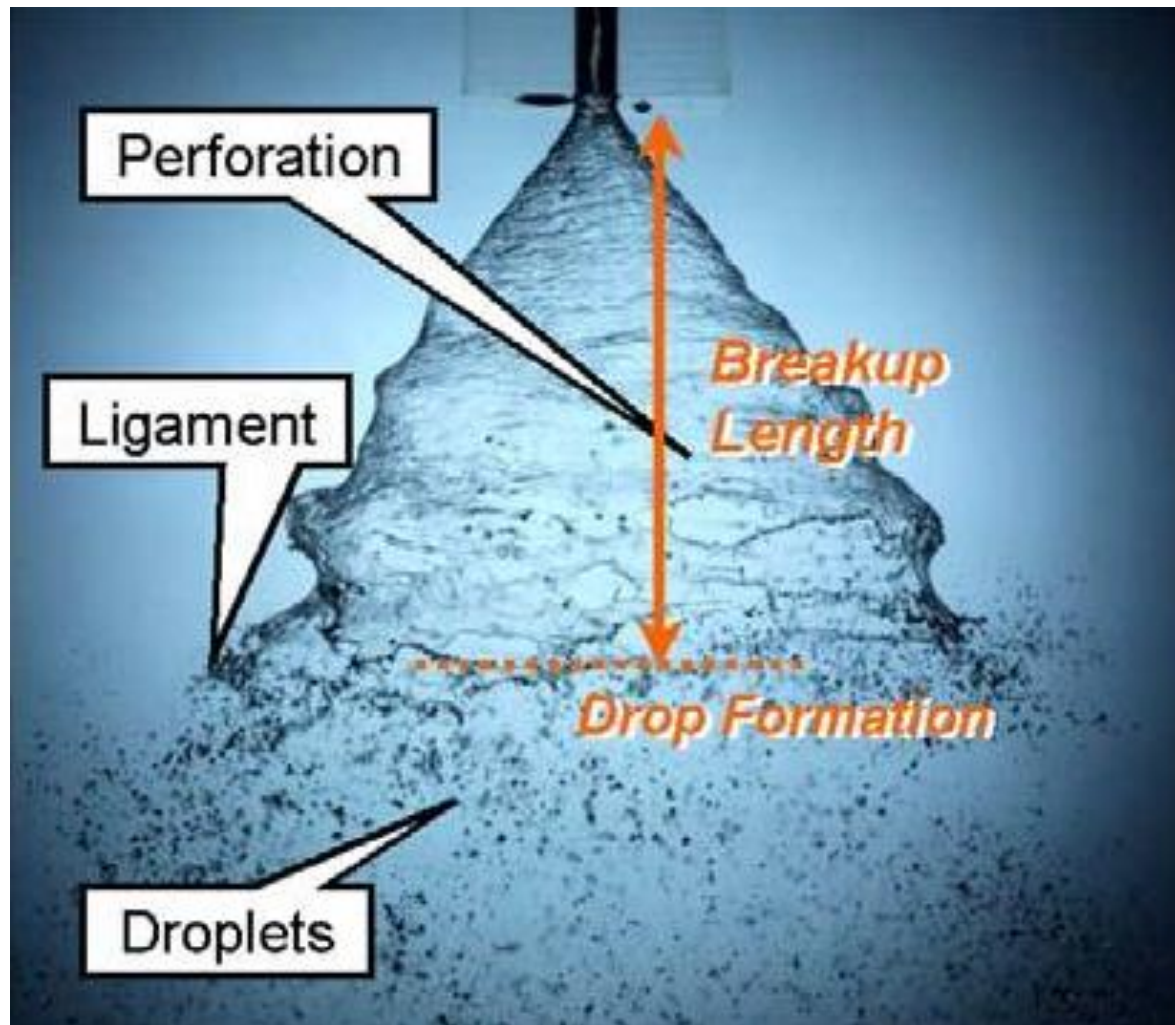
Décadas	Oxidantes	Combustíveis	Motores	Países
1940 - 1950	LO ₂ ; H ₂ O ₂ HNO ₃	C ₂ H ₅ OH Querosene	A-4 WALTER	Alemanha
1950 - 1960	LO ₂ H ₂ O ₂ + 27% N ₂ O ₄	Querosene UDMH (Hidrazina)	RD-107; RD-109; RD-214	Rússia
1960 - 1970	LO ₂ N ₂ O ₄	Querosene UDMH (Dimetil-hidrazina) Aerozine LH ₂	F-1 RD-253 LR-87-AJ-5 J-2	Rússia EUA
1970 - 1980	LO ₂ N ₂ O ₄	LH ₂ MMH (Monometil-hidrazina) UDMH (Dimetil-hidrazina)	HM - 7 SSME; OMS; VIKING	EUA FRANÇA
1980 - 1990	LO ₂ N ₂ O ₄	LH ₂ Querosene	RD-120 RD-170	Rússia
1990 - 2000	LO ₂	LH ₂ Querosene	Hm-60; LE-5; LE-7 RD-180	FRANÇA JAPÃO RÚSSIA
2000 - 2020	LO ₂	Querosene C ₂ H ₅ OH	L-5; L-15; L75	BRASIL ALEMANHA

- A **combustão** somente se processa na **fase gasosa**;
- O processo de **atomização** consiste em aumentar a **área superficial** do combustível líquido, intensificando o processo de **mudança** para a **fase gasosa**;
- **Antes** da atomização a área da superfície é simplesmente a **área do líquido que sai** através do orifício da saída do injetor;
- **Após** a atomização, a área é a **soma** das áreas da superfície de **todas as gotículas** individuais **do spray** formado;
- Este fator da multiplicação fornece uma indicação direta do nível de atomização alcançado e é útil em processos de **combustão** que enfatizam fenômenos de superfície como a **evaporação**;
- Assim, o combustível líquido injetado passa da **fase líquida para a gasosa rapidamente** de modo que o processo de combustão possa iniciar;

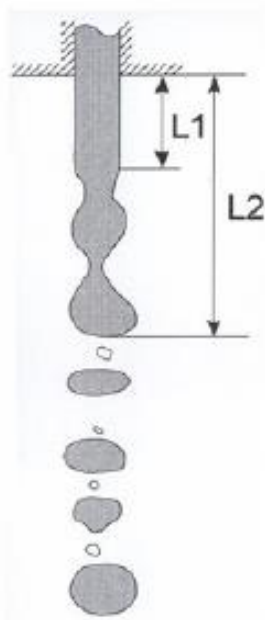
- A **atomização** normalmente é acompanhada de um jato, uma folha ou um **filme líquido**;
- Para atomizar o jato, a folha ou o filme líquido o que se necessita é **alta velocidade relativa** entre o líquido que emerge do orifício de saída do injetor e o ar ou gás da vizinhança;
- **Forças aerodinâmicas** atuam na superfície do líquido promovendo **perturbações** que se propagam em forma de onda e induzem instabilidade ao filme líquido;
- O **rompimento do filme** e a formação dos ligamentos ocorrem quando a magnitude da força de perturbação **exceder** a força de **tensão superficial** do líquido;
- No processo de **desintegração**, onde os ligamentos são fragmentados em gotas, são produzidas muitas gotas de maior dimensão que são **instáveis** e posteriormente são rompidas em pequenas gotas ou **gotículas** formando o **spray**;



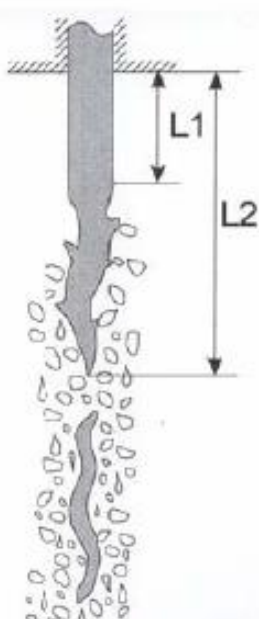
Desintegração de um filme líquido.



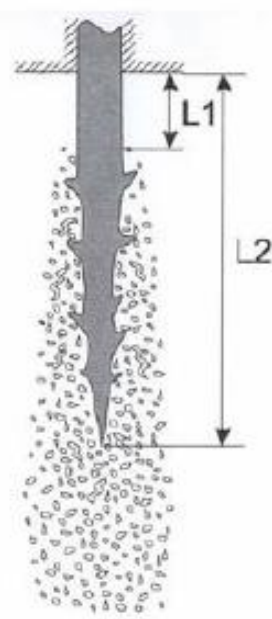
- Em **jato** de líquido, como, por exemplo, o formado na saída de **injetor de orifício plano**, identifica-se, com aumento progressivo da velocidade relativa, **quatro regimes distintos** de ruptura na desintegração do jato:



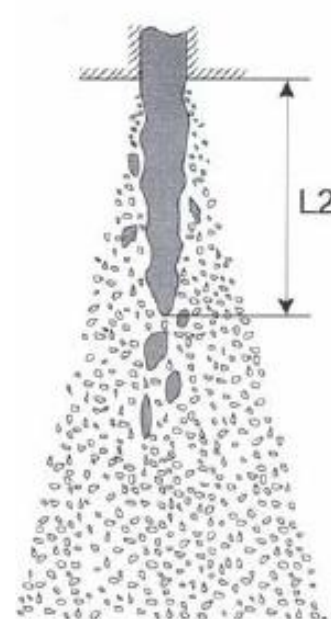
Regime de Rayleigh



Primeiro Regime de Vento Induzido

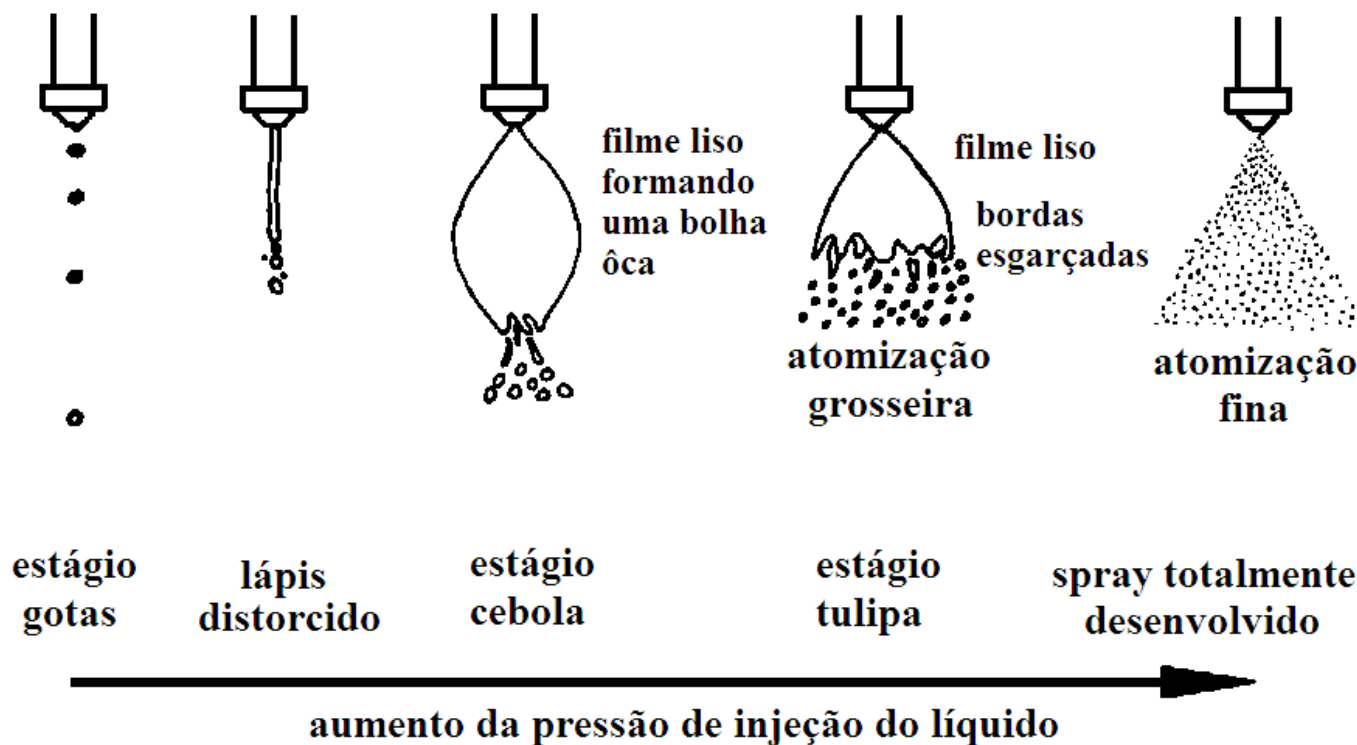


Segundo Regime de Vento Induzido



Atomização

- O **processo de atomização** em um filme líquido apresenta os **vários estágios** de spray com o aumento da pressão de injeção, conforme segue:



- É importante **determinar o tamanho das gotas** do spray gerado pelo injetor, após atomização, pois **gotículas muito pequenas** normalmente tem **baixa penetração** e causam **concentração** de combustível **próximo ao injetor** e **gotículas** de **grandes** dimensões tem **longo** tempo de **vaporização**, **aumentando** o comprimento das **regiões** de **mistura** e queima;
- o spray formado por injetores possui uma vasta gama de tamanhos de gotas e como **não existe uma teoria completa sobre a formação de sprays** utiliza-se correlações empíricas para obter o diâmetro médio das gotículas, conforme segue:

$$D_{ab} = \left[\frac{\sum N_i \cdot D_i^a}{\sum N_i \cdot D_i^b} \right]^{1/(a-b)}$$

onde:

a e b = apresentados na Tabela a seguir podem assumir valores conforme o efeito investigado

i = denota o tamanho do intervalo considerado

N_i = número de gotas dentro do intervalo i

D_i = diâmetro médio do intervalo i

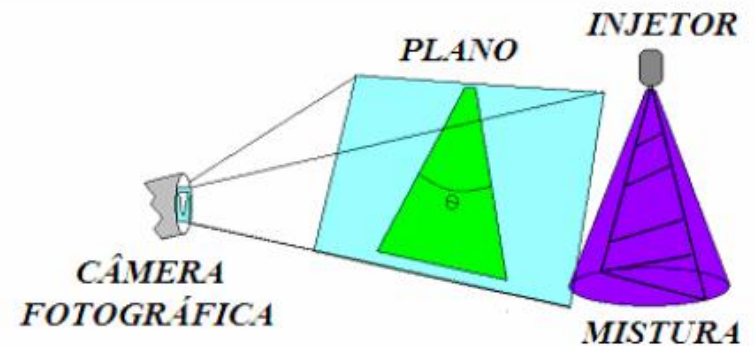
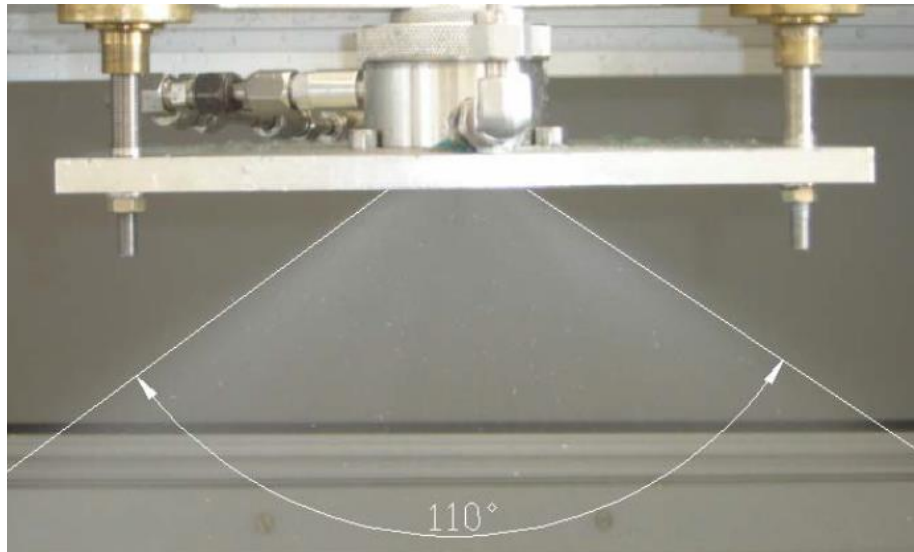
a	b	a+b (ordem)	Símbolo	Nome do diâmetro médio	Expressão	Aplicação
1	0	1	D_{10}	Aritmético	$\frac{\sum N_i \cdot D_i}{\sum N_i}$	Comparações
2	0	2	D_{20}	Área superficial	$\left(\frac{\sum N_i \cdot D_i^2}{\sum N_i} \right)^{1/2}$	Controle de área superficial
3	0	3	D_{30}	Volume	$\left(\frac{\sum N_i \cdot D_i^3}{\sum N_i} \right)^{1/3}$	Controle de volume
2	1	3	D_{21}	Área superficial - Aritmético	$\frac{\sum N_i \cdot D_i^2}{\sum N_i \cdot D_i}$	Absorção
3	1	4	D_{31}	Volume - Aritmético	$\left(\frac{\sum N_i \cdot D_i^3}{\sum N_i \cdot D_i} \right)^{1/2}$	Evaporação, difusão molecular
3	2	5	D_{32}	Sauter (SMD)	$\frac{\sum N_i \cdot D_i^3}{\sum N_i \cdot D_i^2}$	Transferência de massa, reação
4	3	7	D_{43}	De Brouckere ou Herdan	$\frac{\sum N_i \cdot D_i^4}{\sum N_i \cdot D_i^3}$	Combustão equilíbrio

- Assim, por exemplo:
 - ✓ **D10** é o valor **médio linear** do diâmetro de **todas as gotas** no spray;
 - ✓ **D30** é o diâmetro de uma gota cujo volume, se multiplicado pelo número de gotas, é igual ao volume total da amostra;
 - ✓ **D32 (SMD)**, ou **diâmetro médio de gotas de Sauter**, é o diâmetro da gota cuja razão volume/área superficial é a mesma daquela do spray completo;
- As gotículas geradas por injetores ou atomizadores aplicáveis em processos de **combustão** normalmente são previstas e medidas em **SMD**;

Medição de tamanho de gotas por meio de sistema laser pontual



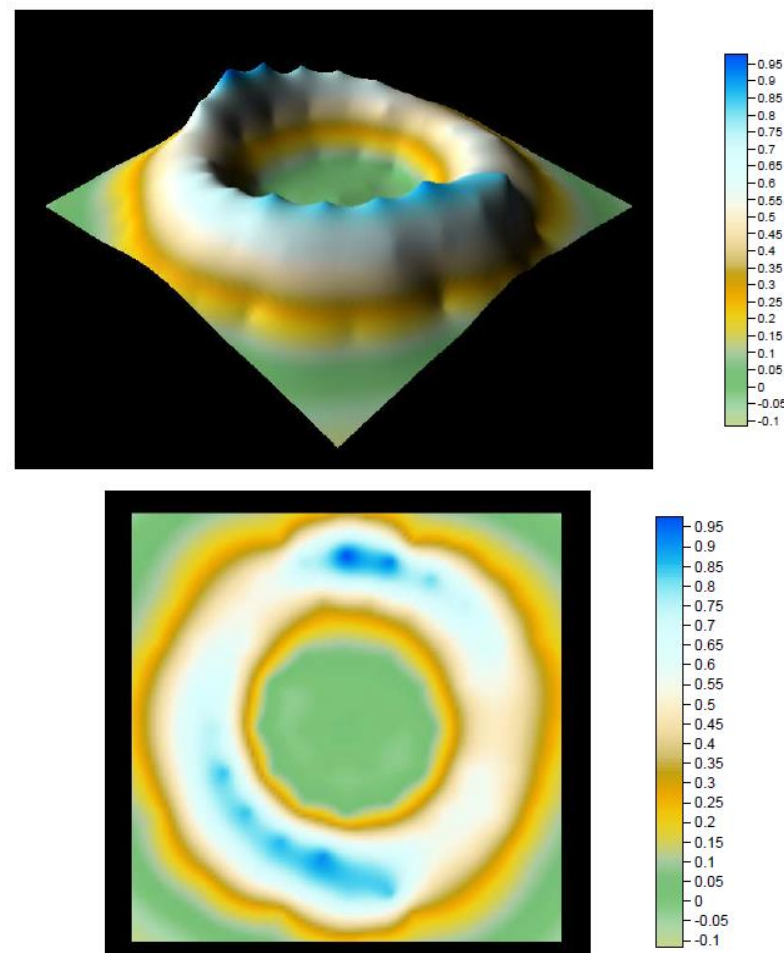
- Além do tamanho médio das gotículas é importante também determinar o **ângulo de cone** que o **spray** forma ao sair do injetor:



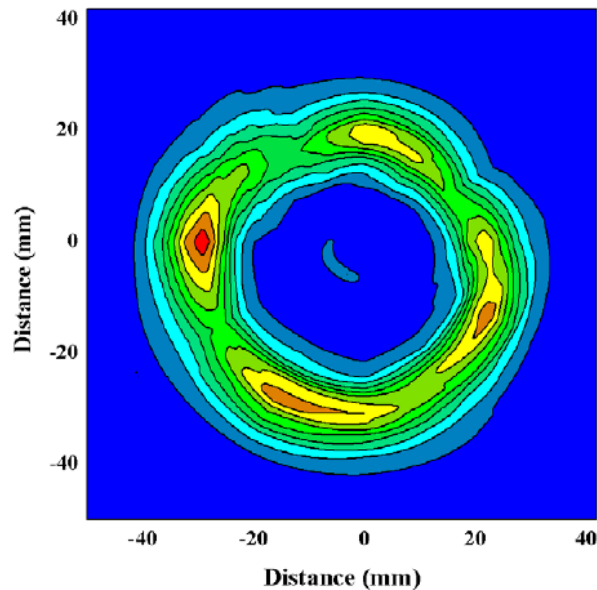
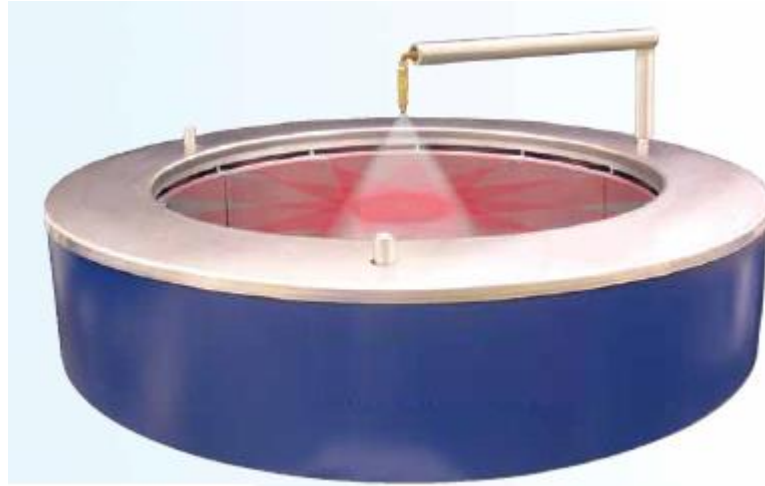
- Devido à vasta gama de **tamanho de gotas** ao longo do raio de abrangência do spray torna-se importante conhecer sua **distribuição**, que é realizado experimentalmente:



Bancada de ensaios de injetores com
Paternador mecânico (INPE - SJC/SP)

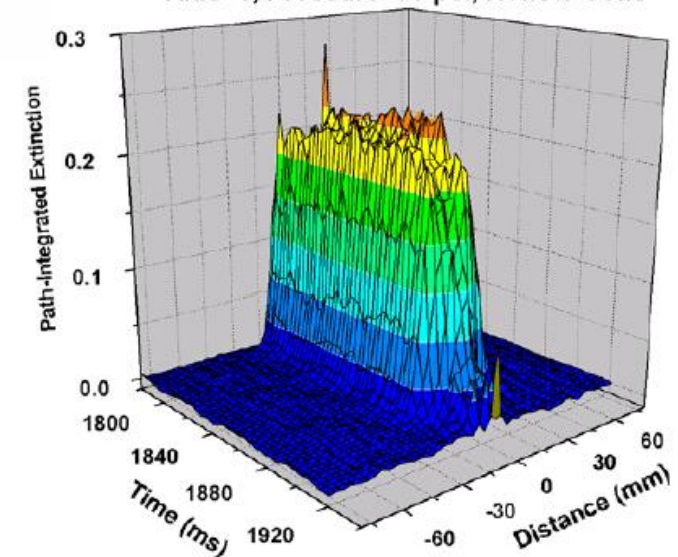


Paternador ótico
com 6 lasers.
Capaz de medir a
distribuição de
massa e volume ao
longo do spray em
tempo real. v

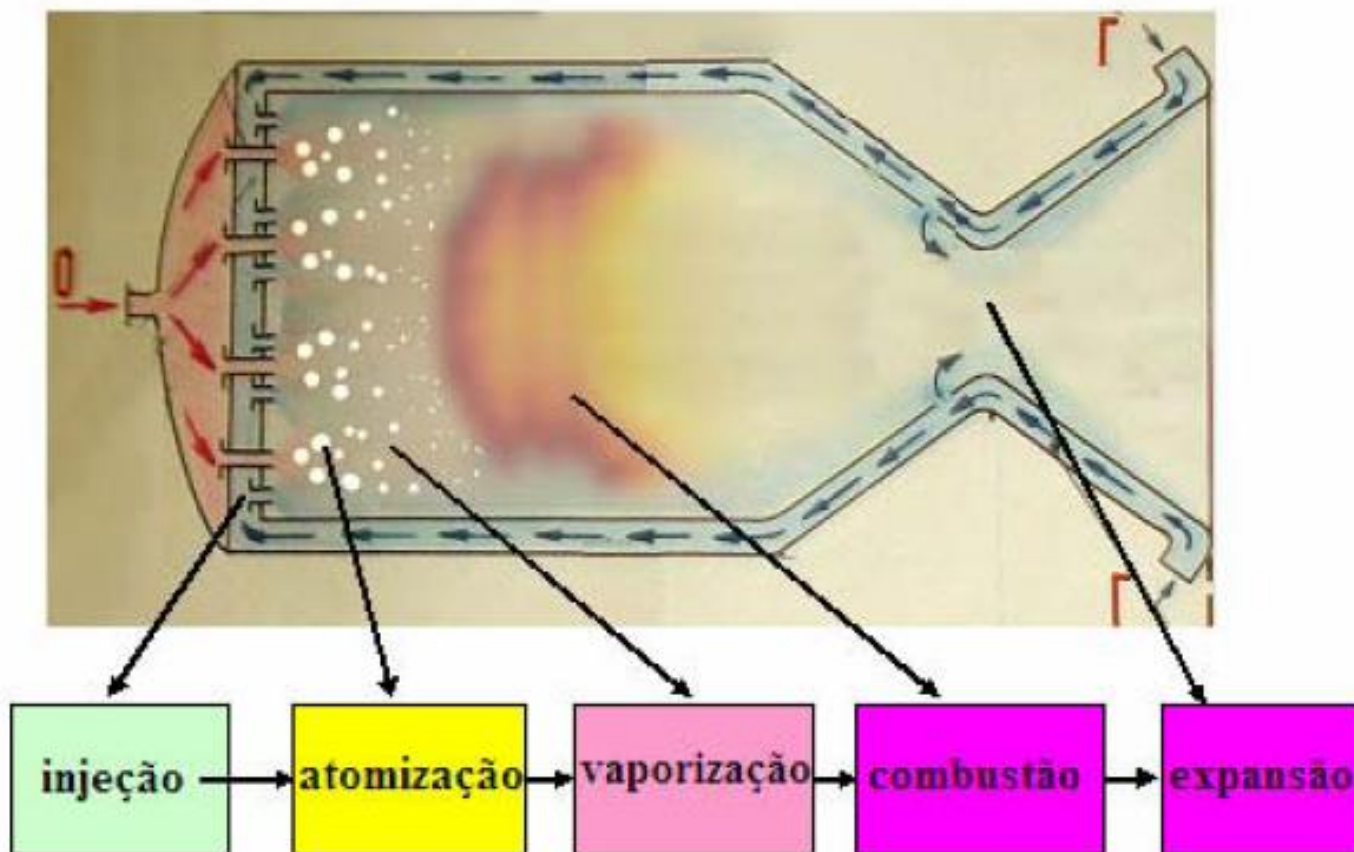


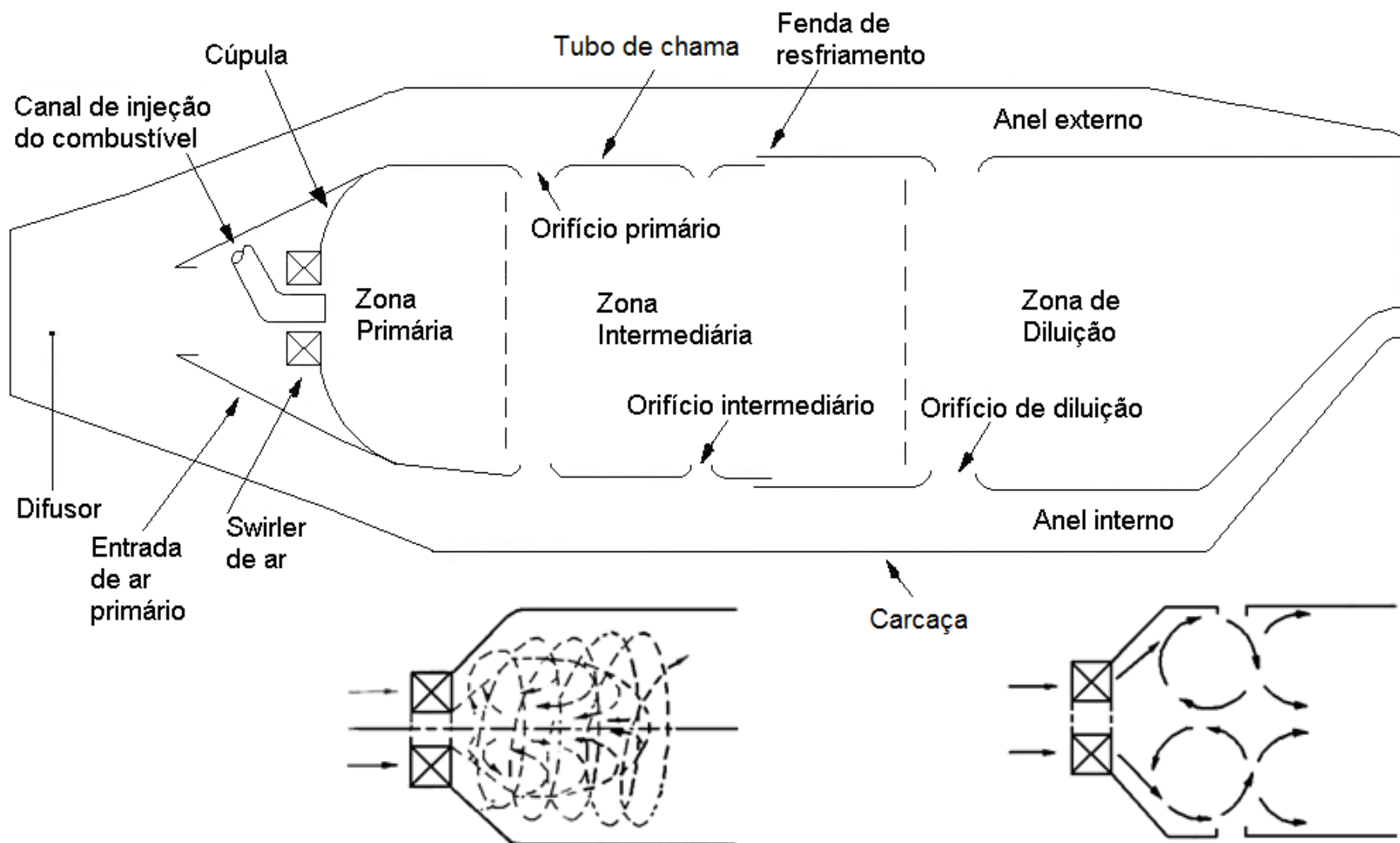
Contour plot of drop surface area

Axis=1, Pressure=70 psi, Hollow Cone

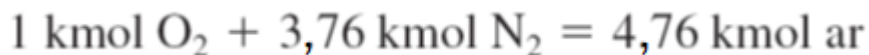


Transient spray patternation





- Uma reação química durante a qual um combustível é oxidado e uma grande de energia é liberada na forma de calor chama-se **combustão**;
- O oxidante mais usado nos processos de combustão é o ar (gratuito e disponível);
- Em um mol ou uma unidade de volume, o ar seco é composto de 20,9% oxigênio (O_2), 78,1% nitrogênio (N_2), 0,9% de argônio (Ar), e pequenas quantidades de CO_2 , He, Ne, H_2 ;
- Nas análises de processos de combustão, a composição do ar seco pode ser aproximada para uma proporção de 21% O_2 e 79% N_2 em mols.

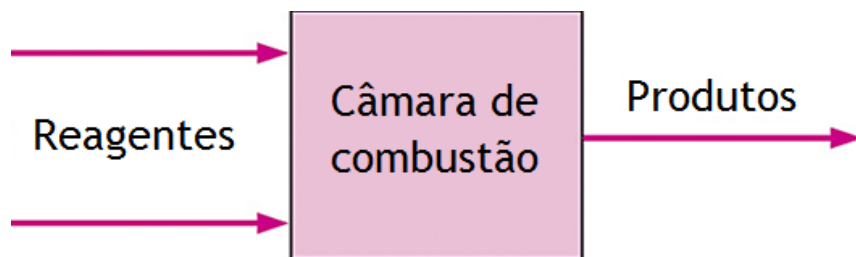


A combustão é a oxidação dos componentes do combustível que são capazes de serem oxidados através de rápidas reações exotérmicas.

Ar
(21% O_2)
(79% N_2)
1 kmol O_2
3,76 kmol N_2

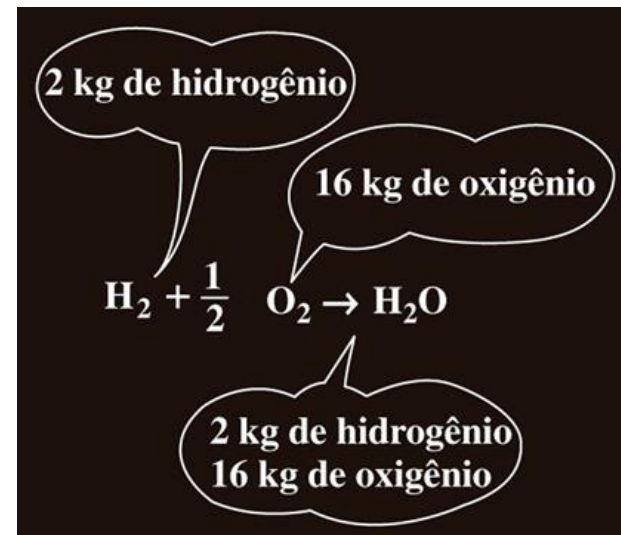
Cada kmol de O_2 do ar é acompanhado por 3,76 kmol de N_2 .

- O combustível deve ser levado até acima da temperatura de ignição para iniciar a combustão;
- As temperaturas mínimas de ignição no ar atmosférico são de aproximadamente 260°C para a gasolina, 400°C para o carbono, 580°C para o hidrogênio, 610°C para o monóxido de carbono e 630°C para o metano;
- As proporções entre combustível e ar devem estar dentro do intervalo adequado para que a combustão se inicie (limite de flamabilidade).



Em um processo de combustão em regime permanente, os componentes que entram na câmara de combustão são chamados de reagentes, e os que saem são chamados de produtos.

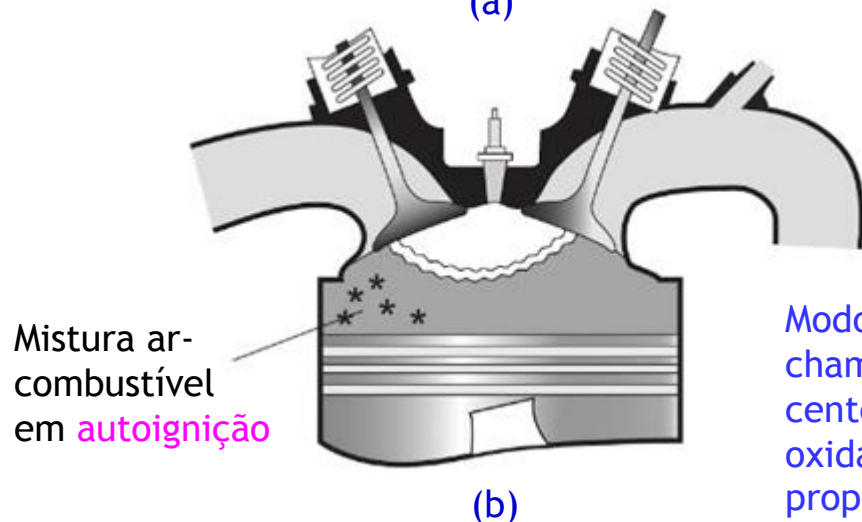
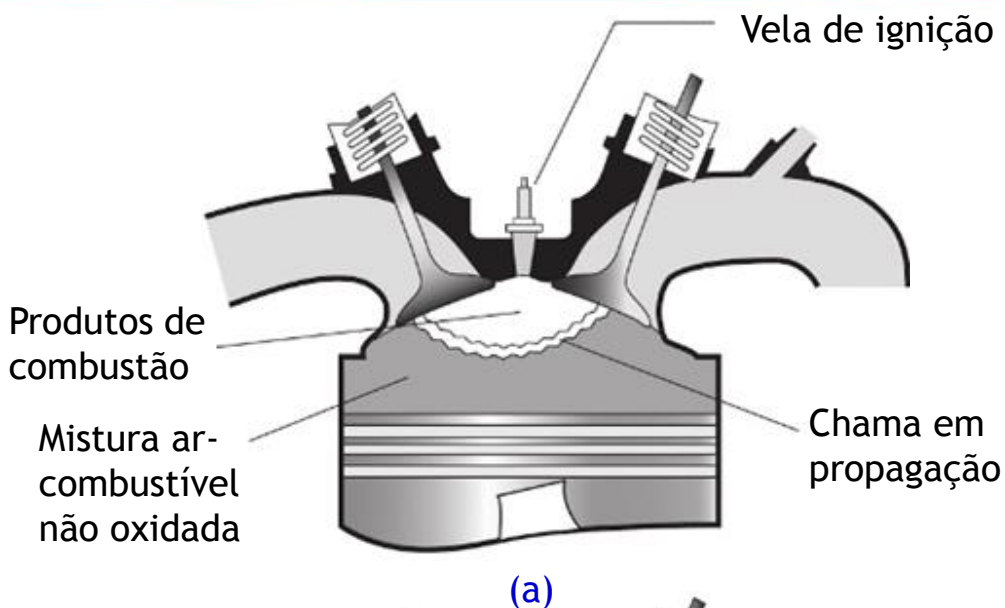
$$\eta_{\text{comb.}} = \frac{Q}{PC} = \frac{\text{Quantidade de calor liberado durante a combustão}}{\text{Poder calorífico do combustível oxidado}}$$



A massa (e o número de átomos) de cada elemento é conservada durante uma reação química.

O número total de mols **não** se conserva durante o processo de combustão.

Combustão com e sem chama



- A combustão pode ocorrer nos modos **com chama** ou **sem chama**;
- Atrás da chama estão os produtos de combustão. À medida que a chama se propaga na câmara de combustão, a **pressão** e, consequentemente, a **temperatura** da mistura de ar-combustível não oxidada **aumentam**.
- Reações de oxidação rápidas se desenvolvem em diferentes pontos da mistura - **autoignição** - “batida de pino”
- Adição de **chumbo** à gasolina reduz a tendência de deflagração. No Brasil, utiliza-se o **Etanol**.

Modos de combustão (a) com chama e (b) sem chama em um motor à pistão com ignição por centelha. Em (b) a autoignição da mistura não oxidada remanescente à frente de chama em propagação é responsável pela “deflagração”.

Razão oxidante/combustível

Razão oxidante/combustível (OC) é expressa em base mássica e é definida como a razão entre a *massa de oxidante* e a *massa de combustível* para um processo de combustão:

$$OC = \frac{m_{ox}}{m_{comb}}$$

Razão oxidante/combustível (*OC) expressa em base molar é definida como a razão entre o *número de mols de oxidante* e o *número de mols de combustível* para um processo de combustão:

$$*OC = \frac{N_{ox}}{N_{comb}}$$

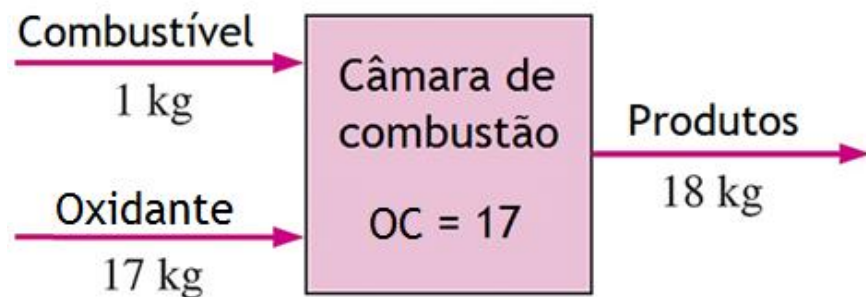
$$m = NM$$

m massa

N número de mols

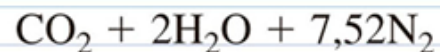
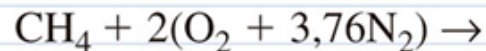
M massa molar

A razão oxidante/combustível (OC) representa a quantidade de oxidante usada por unidade de massa de combustível durante um processo de combustão.



- **Oxidante estequiométrico ou oxidante teórico:** A quantidade mínima de oxidante necessária para a completa combustão do combustível. Também chamado de *quantidade de oxidante quimicamente correta*, ou *100% oxidante teórico*;
- **Combustão estequiométrica ou combustão teórica:** Processo de combustão ideal durante o qual um combustível é completamente oxidado com o oxidante estequiométrico;
- **Excesso de oxidante:** A quantidade de oxidante acima da relação estequiométrica. A quantidade excedente de oxidante normalmente é expressa em relação ao oxidante estequiométrico *percentual de excesso de oxidante* ou *percentual de oxidante teórico*;
- **Falta de oxidante:** Quantidades de oxidante menores que a quantidade estequiométrica;

O processo completo de combustão sem nenhum oxigênio livre nos produtos é chamado de combustão teórica.



- nenhum combustível não oxidado
- nenhum oxigênio livre nos produtos

Razão de equivalência (ϕ): relaciona as quantidades de combustível e de oxidante e, assim, indica a condição de combustão:

$$\phi = \frac{\left(\frac{N_{\text{comb}}}{N_{\text{ox}}}\right)_{\text{operação}}}{\left(\frac{N_{\text{comb}}}{N_{\text{ox}}}\right)_{\text{estequiometria}}} = \frac{(*\text{CO})_{\text{operação}}}{(*\text{CO})_{\text{estequiometria}}} = \frac{(*\text{OC})_{\text{estequiometria}}}{(*\text{OC})_{\text{operação}}}$$

ou

$$\phi = \frac{\left(\frac{m_{\text{ox}}}{m_{\text{comb}}}\right)_{\text{estequiometria}}}{\left(\frac{m_{\text{ox}}}{m_{\text{comb}}}\right)_{\text{operação}}} = \frac{\left(\frac{m_{\text{comb}}}{m_{\text{ox}}}\right)_{\text{operação}}}{\left(\frac{m_{\text{comb}}}{m_{\text{ox}}}\right)_{\text{estequiometria}}}$$

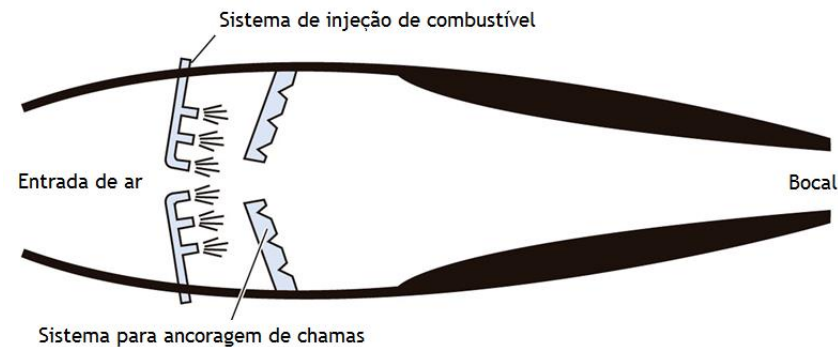
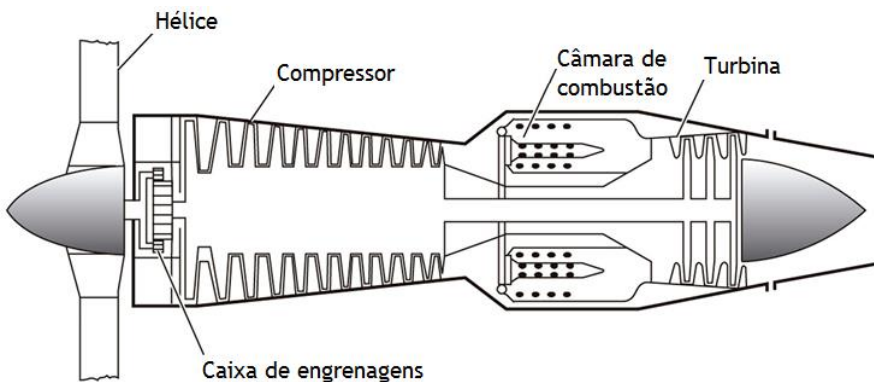
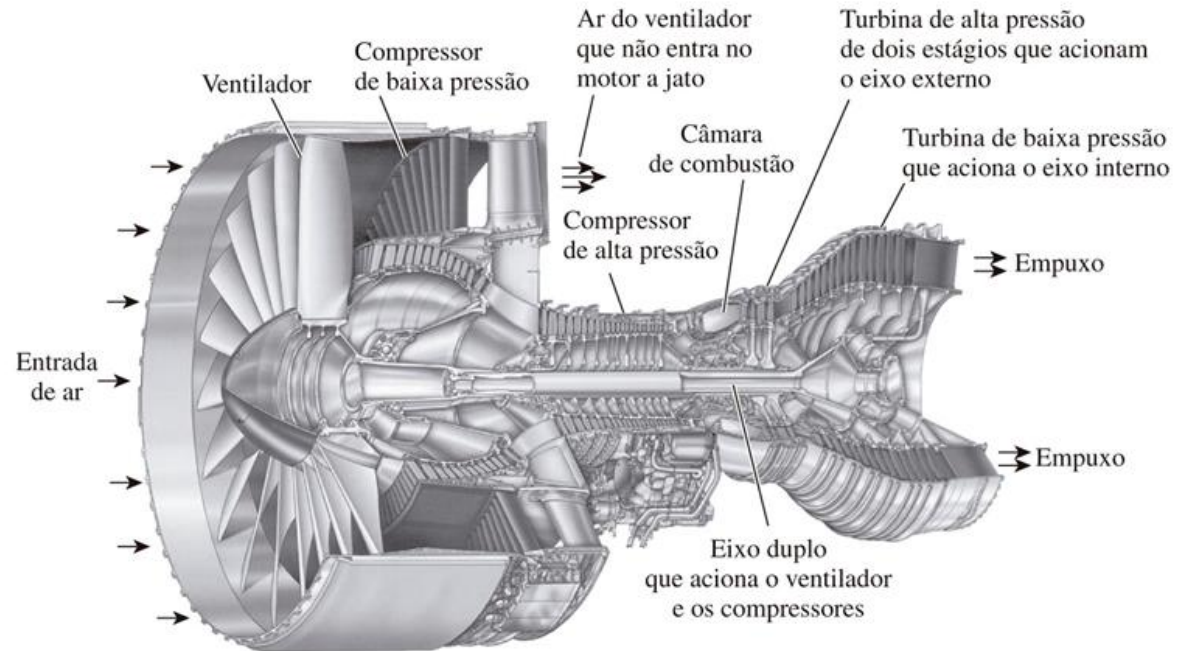
$\phi < 1 \rightarrow$ combustão pobre em combustível (excesso de oxidante)

$\phi = 1 \rightarrow$ combustão estequiométrica

$\phi > 1 \rightarrow$ combustão rica em combustível (falta de oxidante)

Aplicações - Turbinas a gás

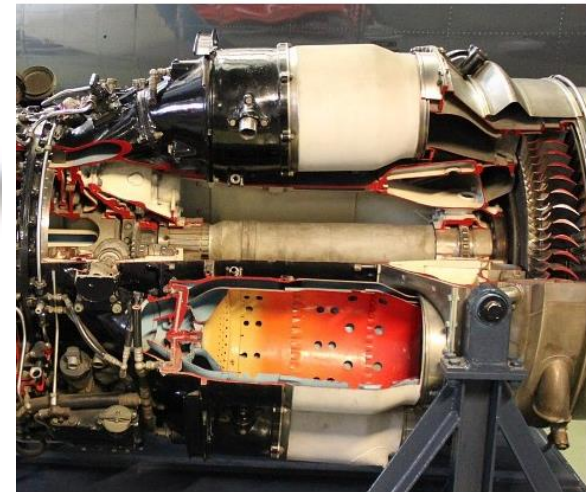
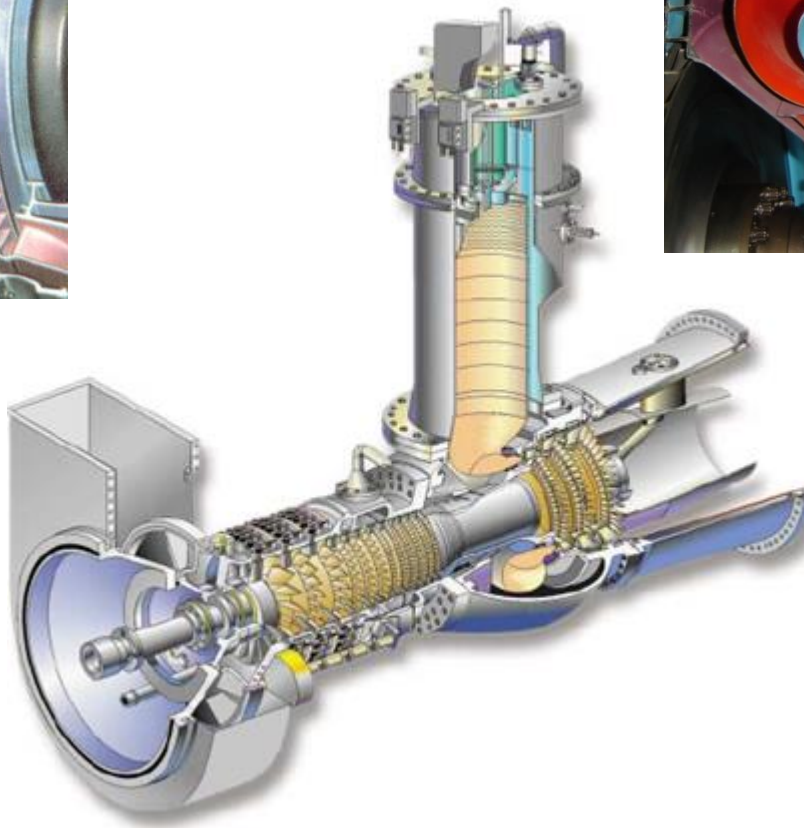
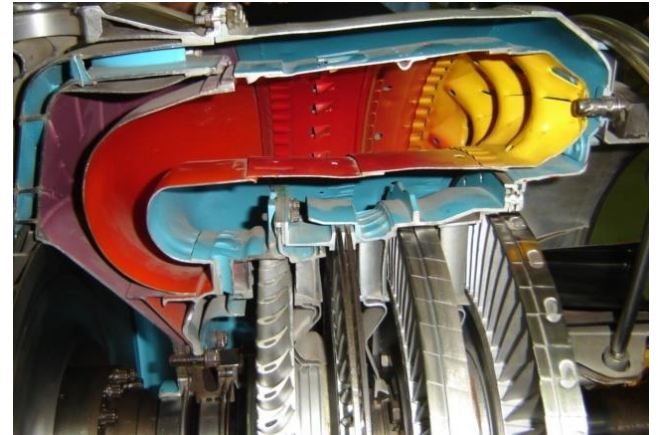
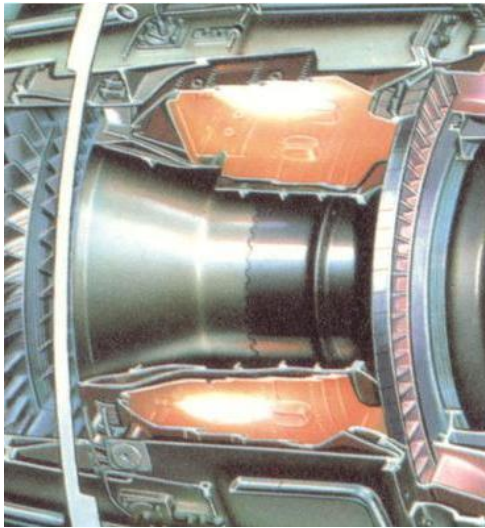
Um motor moderno usado para equipar a aeronave da Boeing modelo 777. Este motor é um turbofan modelo PW4084 da fabricante Pratt & Whitney capaz de produzir 374 kN de empuxo. Ele tem 4,87 m de comprimento, ventilador com 2,84 m de diâmetro e peso de 6.800 kg.



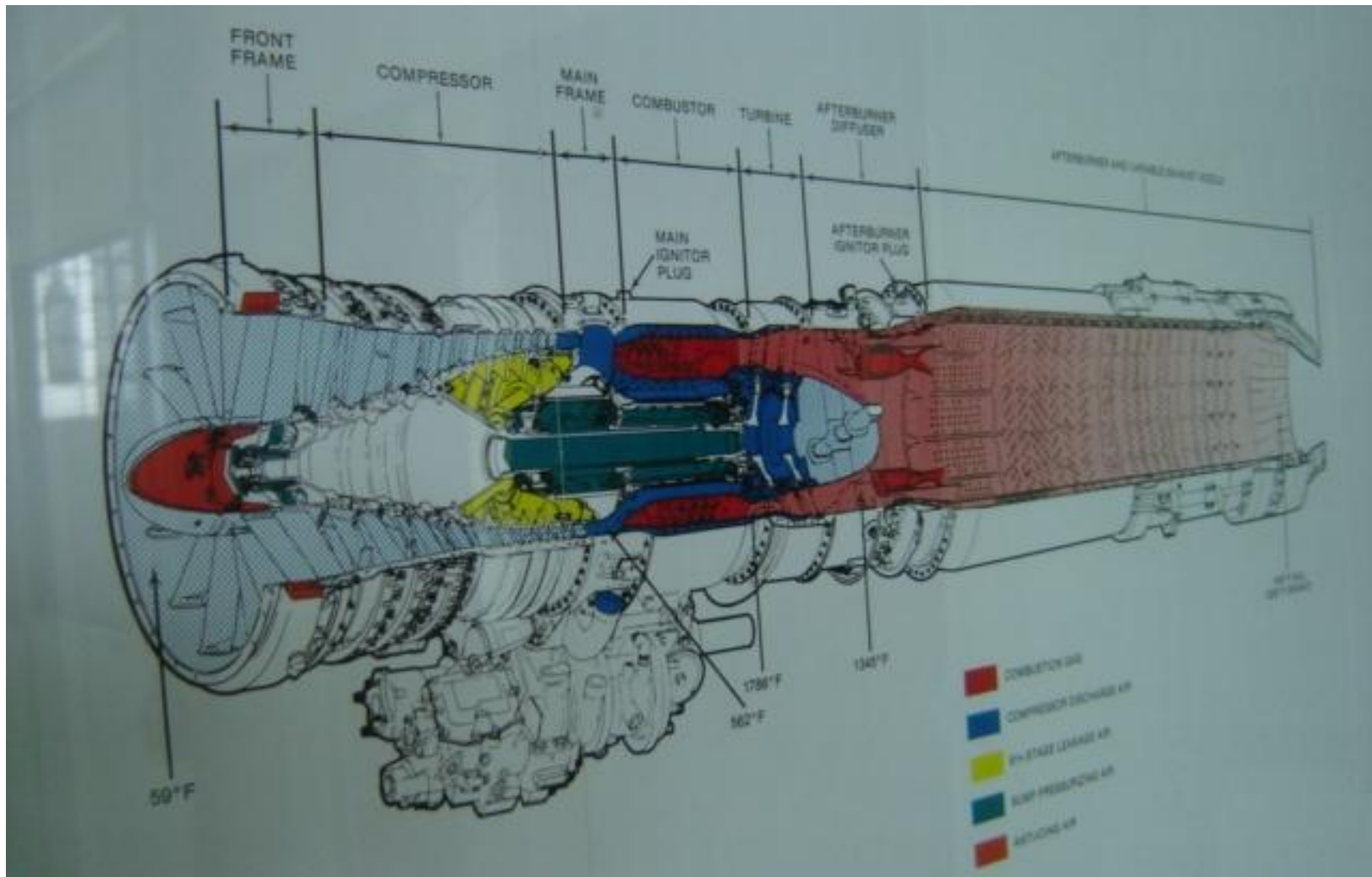
Um motor ramjet gera empuxo até Mach 6 (motor sem partes rotativas)

Um motor turbohélice.

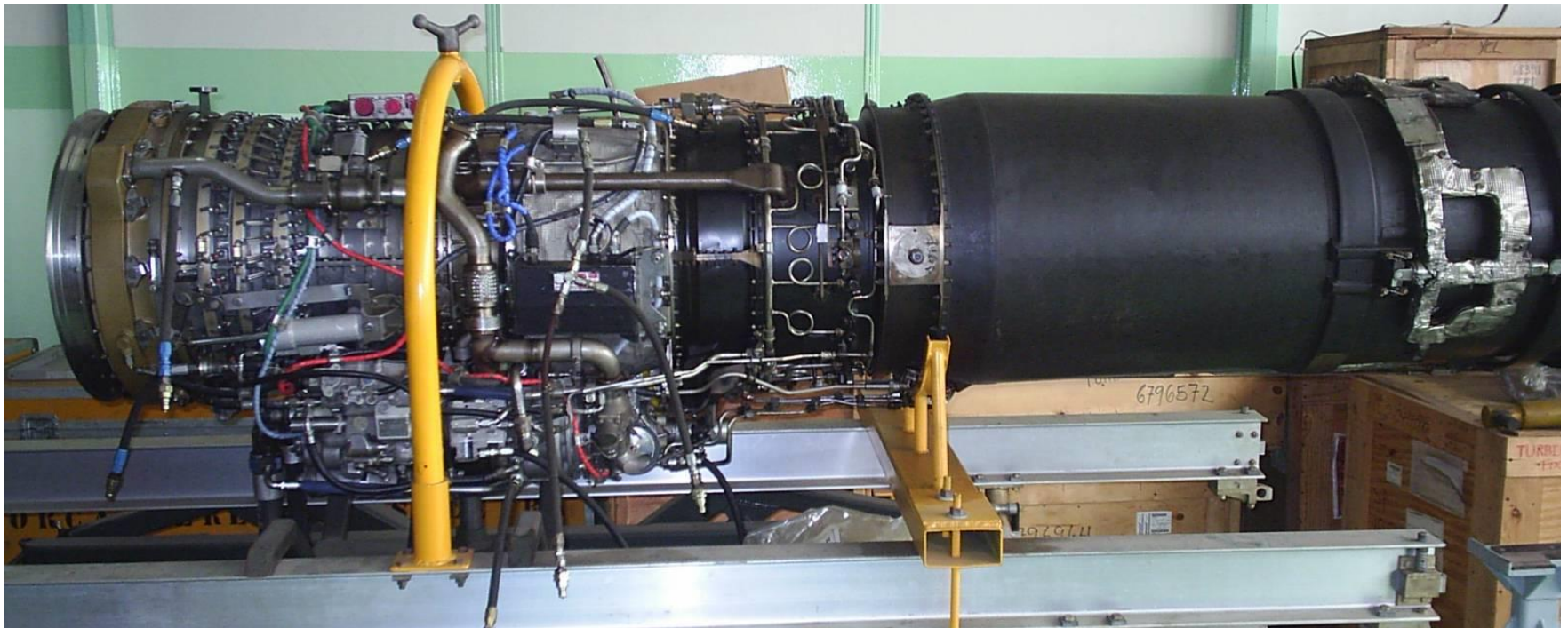
Tipos de câmaras de combustão de T. G.



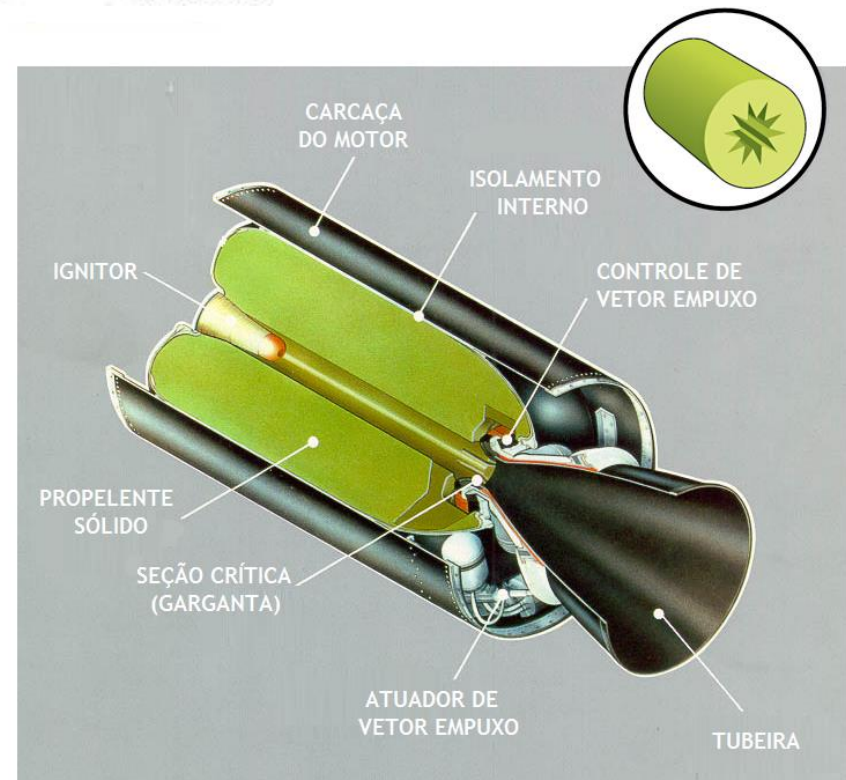
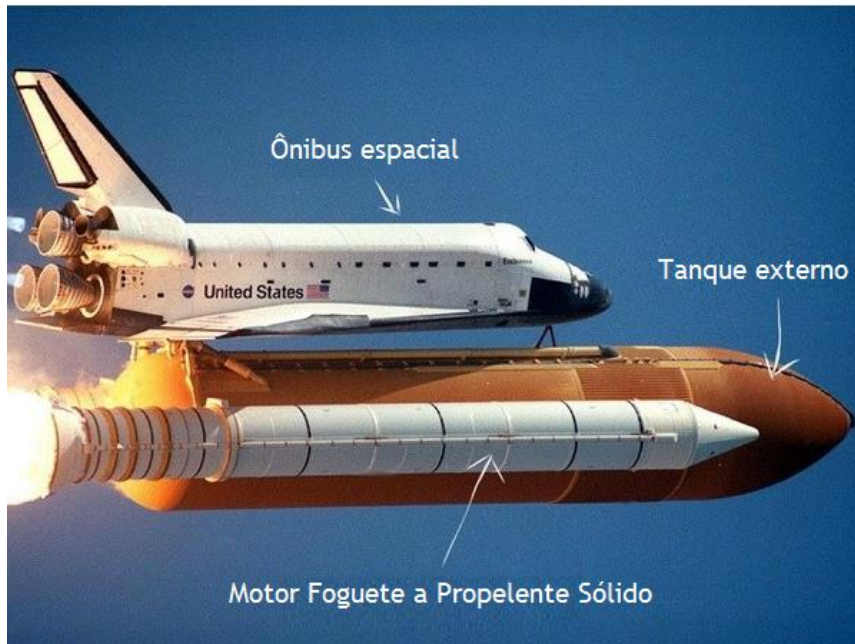
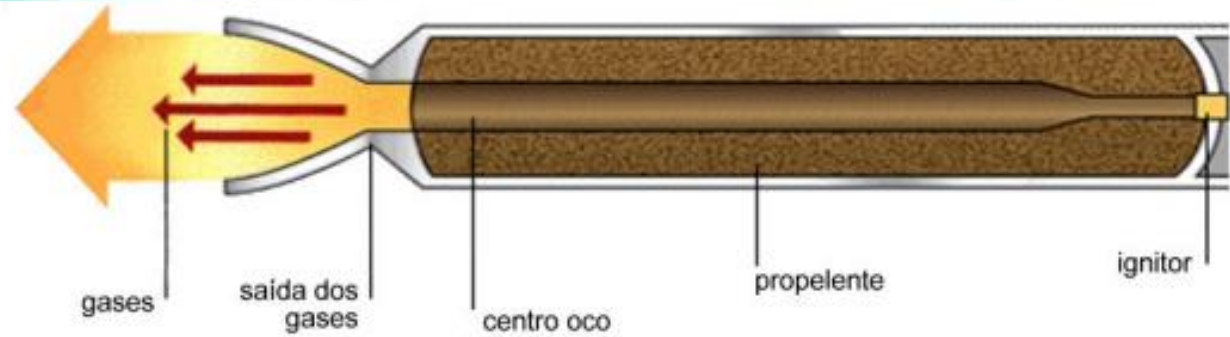
Turbinas a gás com pós queimador



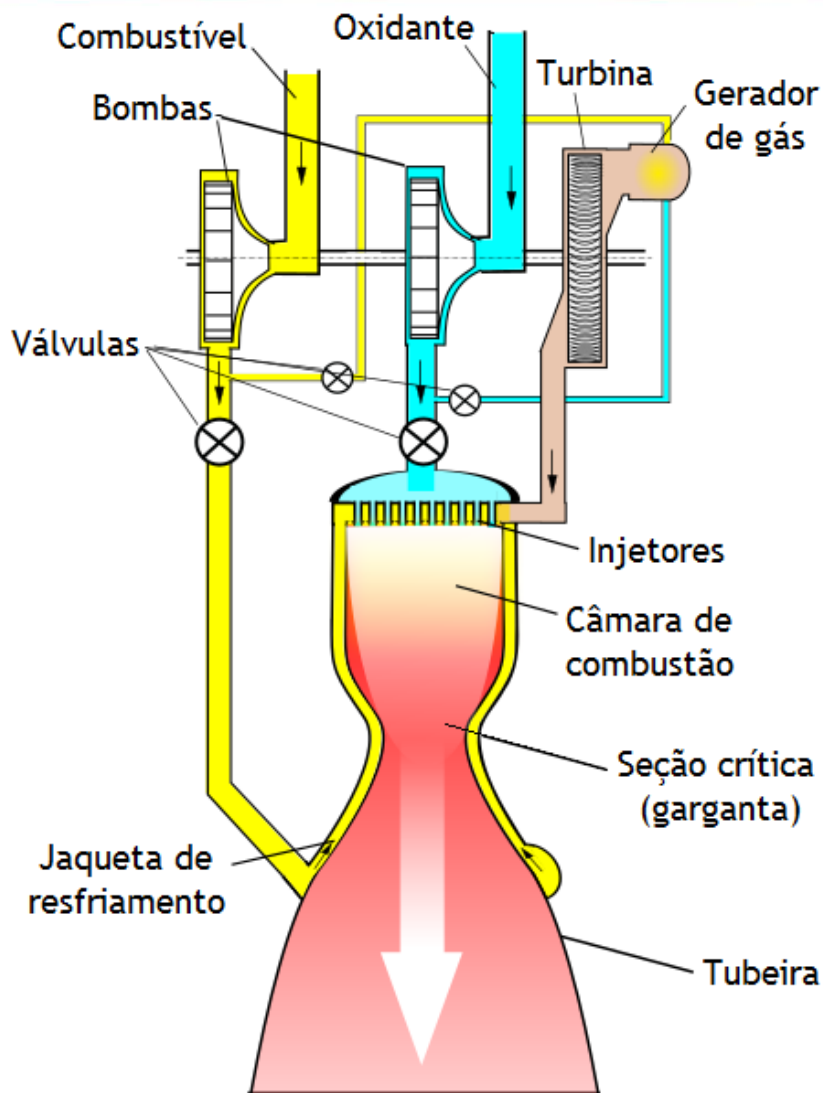
Turbinas a gás com pós queimador



Motor Foguete a Propelente Sólido

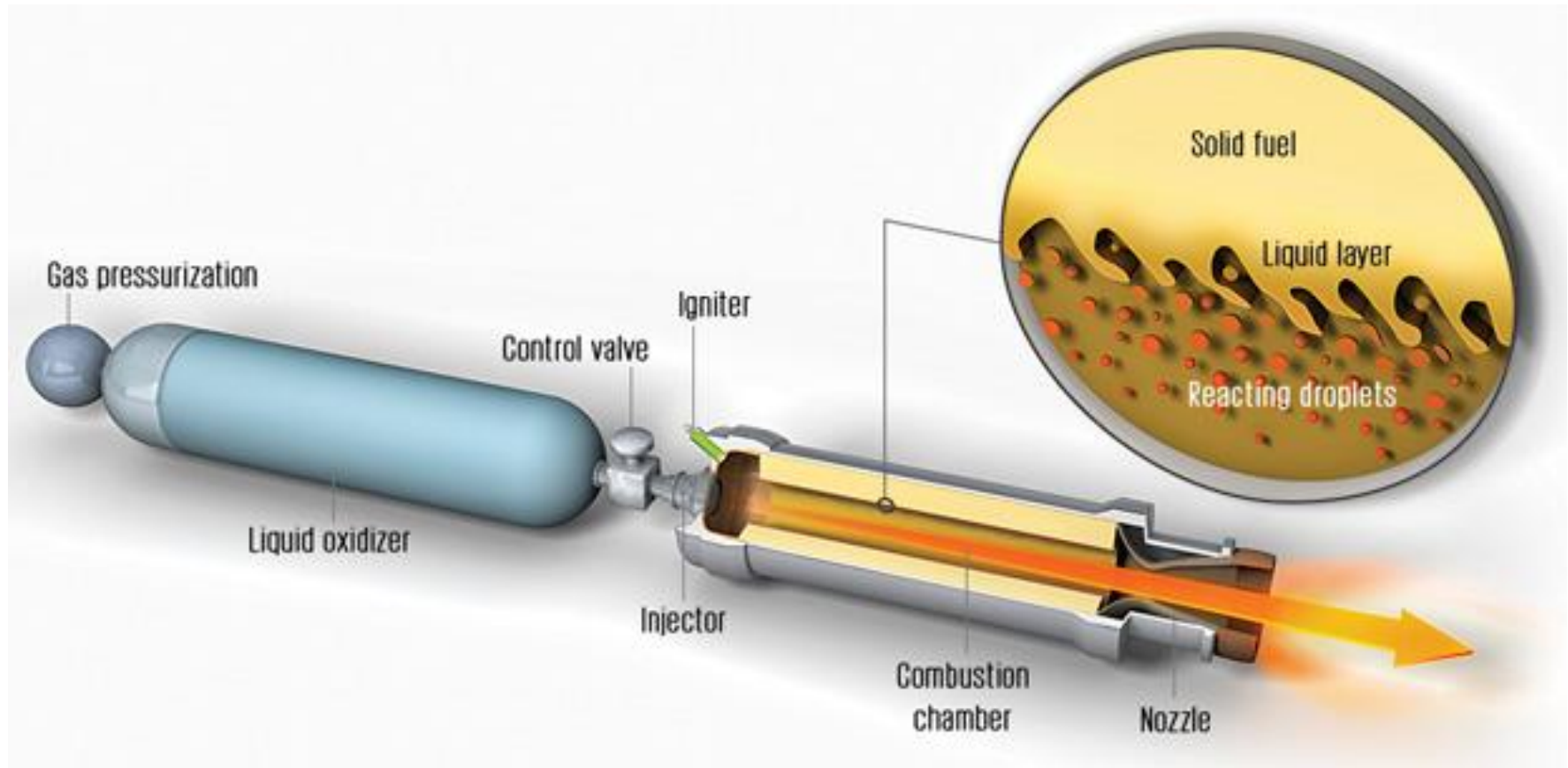


Motor Foguete a Propelente Líquido

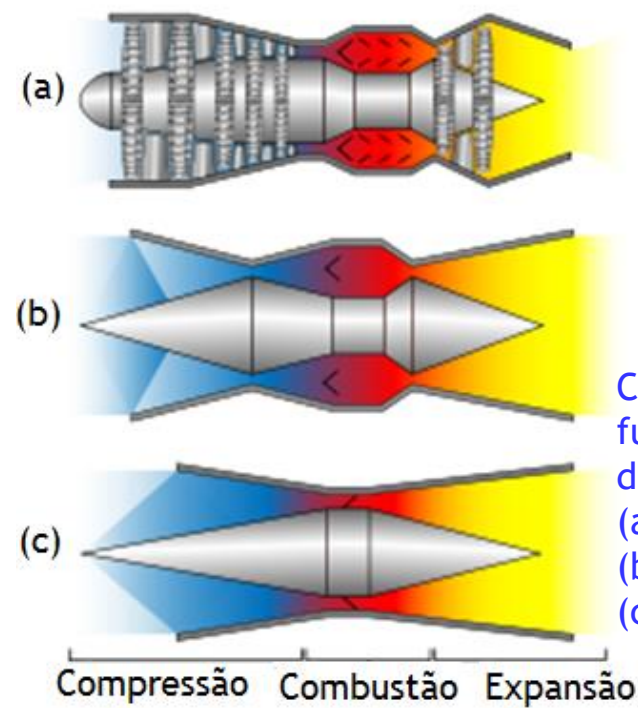


Motor foguete a propelente líquido brasileiro - L75 - capaz de gerar 75 kN de empuxo (vácuo). Desenvolvido pela FAB no DCTA/IAE para operar como motor de terceiro estágio, ele é alimentado com etanol e oxigênio líquido.

Aplicações - Motor Foguete Híbrido



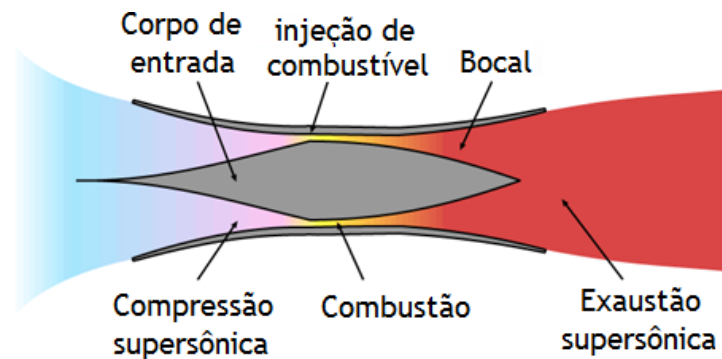
Scramjet (supersonic combustion ramjet) teoricamente gera empuxo até Mach 24



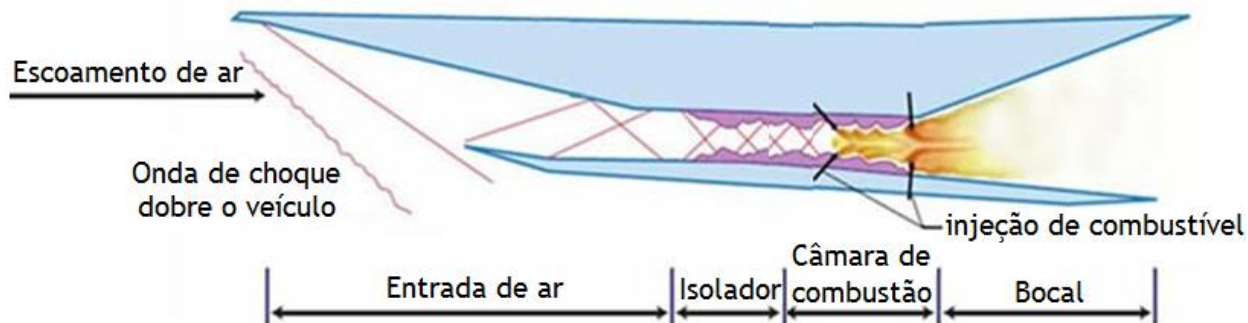
Comparação entre o funcionamento de diferentes motores:

- (a) Turbojato
- (b) Ramjet
- (c) Scramjet

Desenho ilustrativo do veículo com motor Scramjet em desenvolvimento pela FAB - DCTA/IEAv.



Desenho esquemático do veículo com motor Scramjet em desenvolvimento pela FAB - DCTA/IEAv.

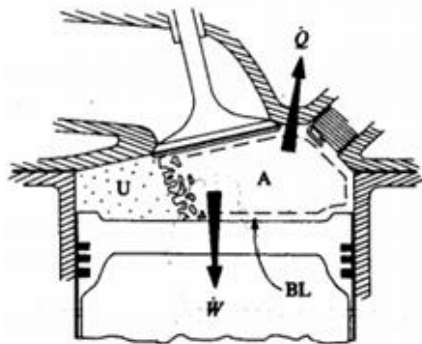


Motor de ignição por centelha (Ciclo Otto)

Combustão da mistura no cilindro por propagação da chama

Chamas de pré-mistura

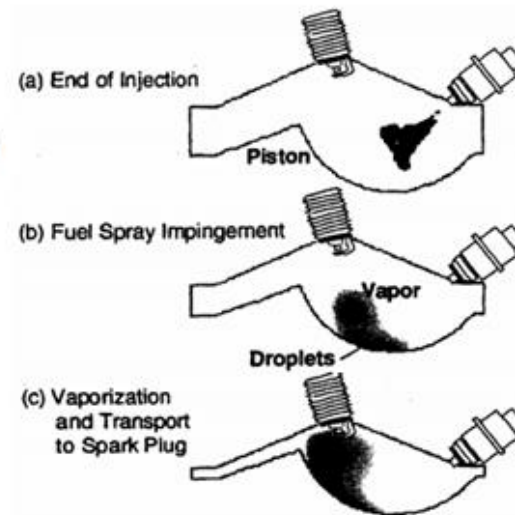
Mistura preparada em carburador, de injeção indireta, ou direta



A – Gás já queimado
U – Gás por queimar
BL – Zona de *quenching*

Heywood (1988) ICE Fundamentals

Injeção
direta

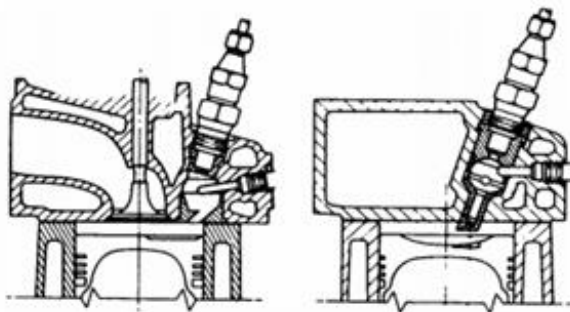


Zhao et al (2002) Aut. Gas. DI Eng

Motor de ignição por compressão (Ciclo Diesel)

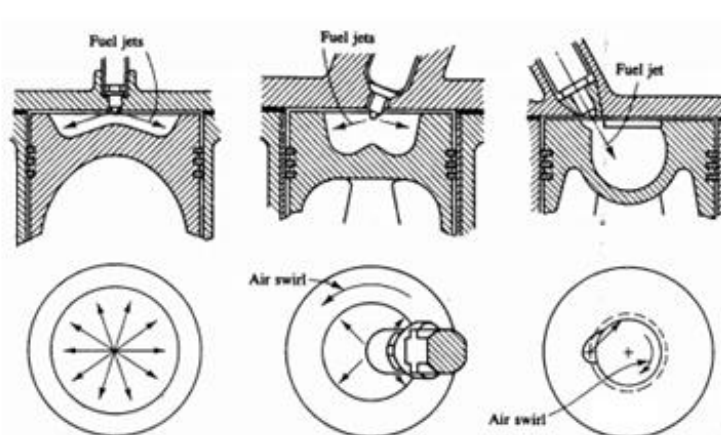
A compressão promove as condições necessárias à ignição do combustível que é vaporizado no interior do cilindro durante o fim da compressão e o início da expansão – chamadas de difusão.

Injeção indireta

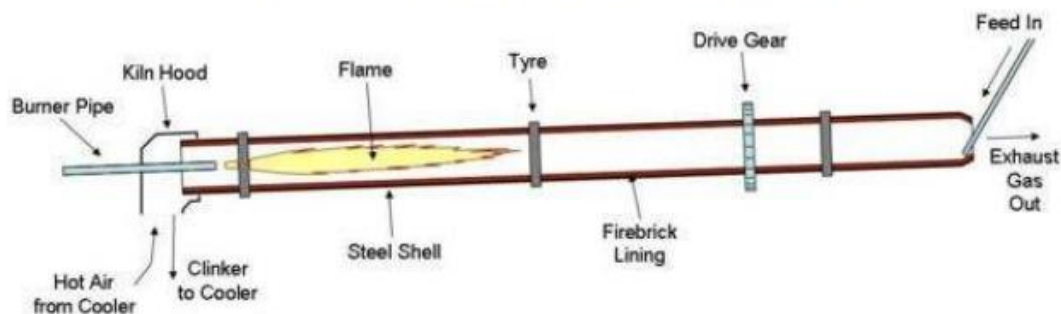


Pré câmara Swirl e turbulenta

Injeção direta

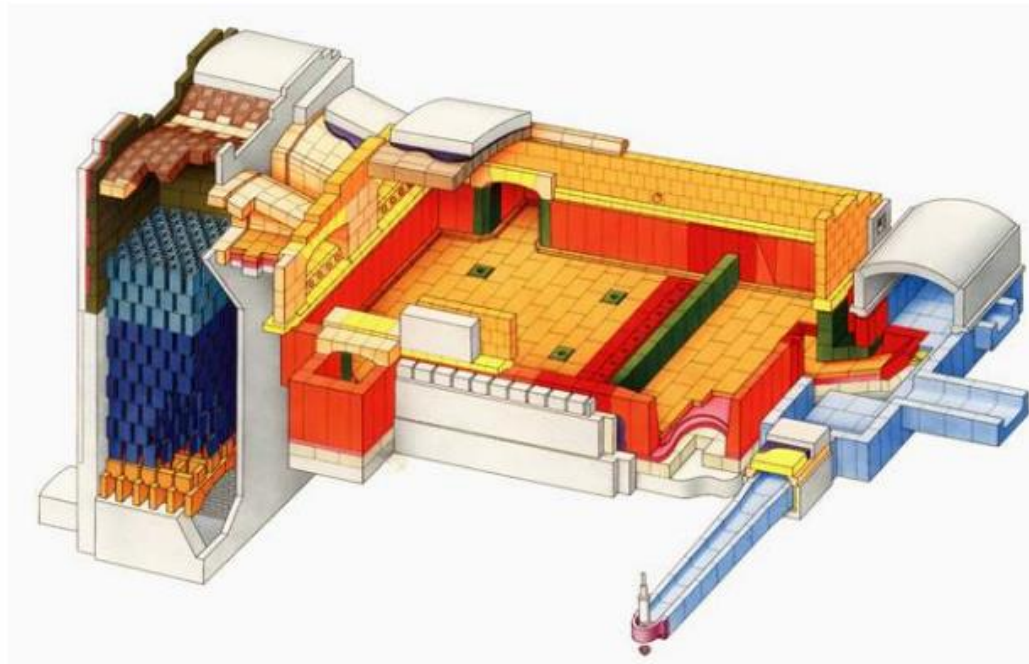


Fornos Cimento



Fornos rotativos longos com chama de carvão e resíduos em contra-corrente com produto (Clinker)

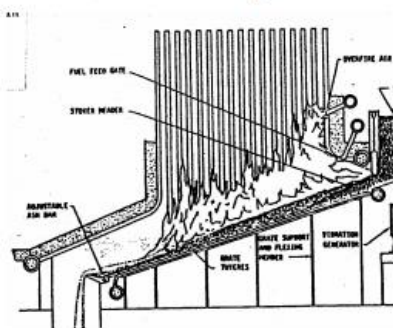
Fornos Vidro



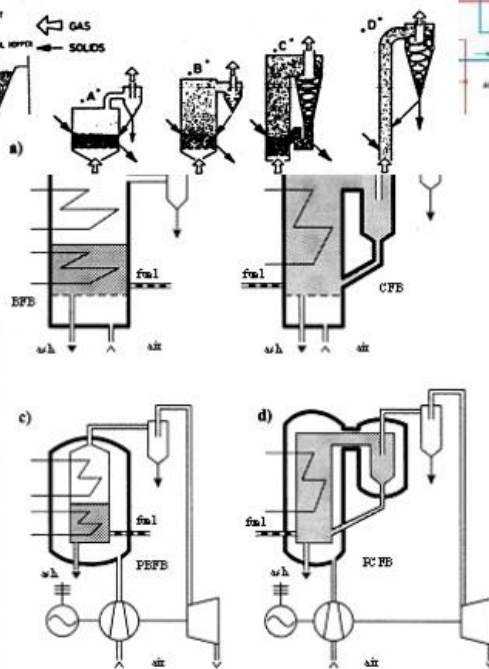
Queima em ciclos variando o queimador de modo a fazer pré-aquecimento do ar de combustão em regenerador de modo a atingir temperaturas elevadas

Combustão de sólidos

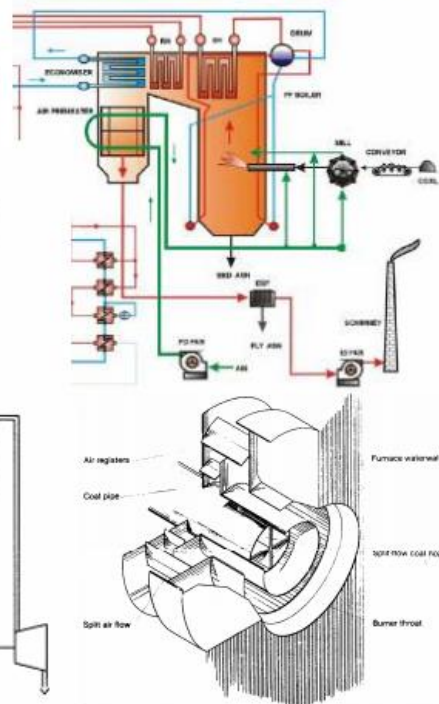
Queima em grelha



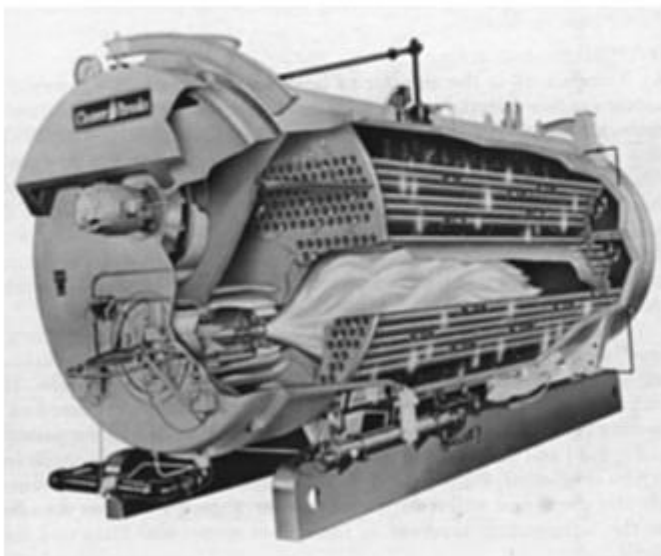
Leito fluidizado



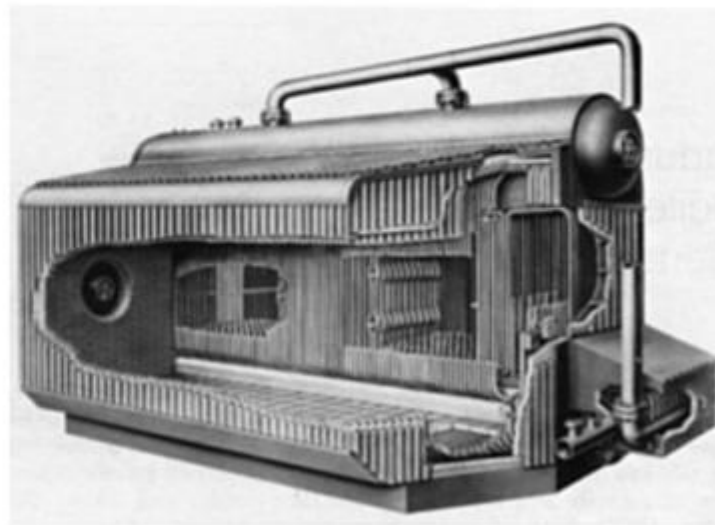
Combustível pulverizado



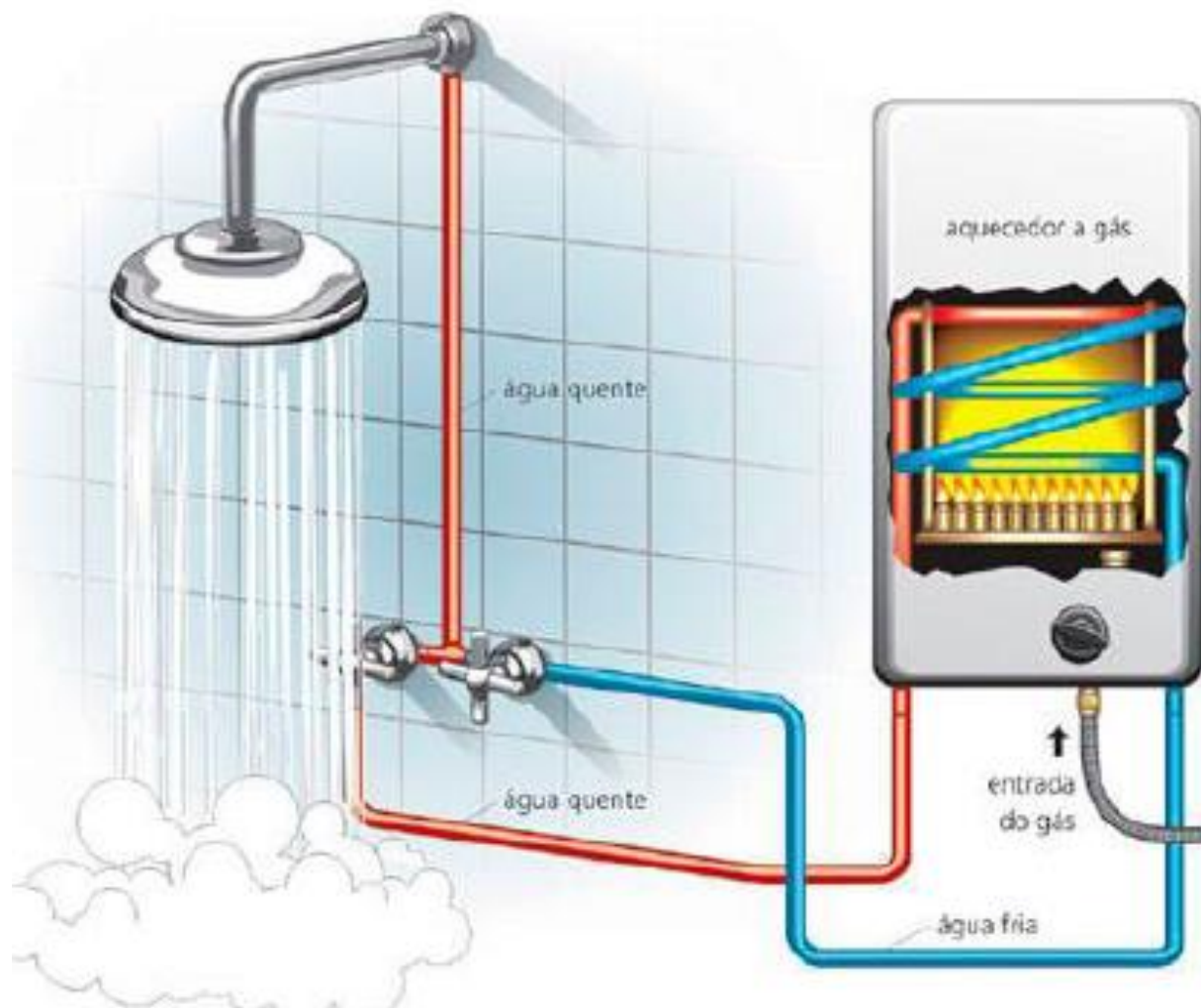
Caldeiras de vapor a Óleo ou Gás Natural



Em Tubos (Gás-tubulares)



No Exterior (Aquitubulares)



1. Um kmol de octano, ou seja, gasolina (C_8H_{18}) é oxidado no interior de uma câmara de combustão com 20 kmols de O_2 . Considerando que os produtos de combustão contenham apenas CO_2 , H_2O , O_2 e N_2 , determine o número de mols de cada gás desses produtos e a quantidade de oxidante necessário para a completa oxidação de 1 kg de combustível. Considere a massa molar do ar seco como sendo 29 kg/kmol, do Carbono 12 kg/kmol e do Hidrogênio (H_2) 2 kg/kmol.

1. Dados:

- . 1 kmol de C_8H_{18} (octano)
- . 20 kmol de O_2 (ar)
- . Produtos: CO_2 , H_2O , O_2 e N_2
- . $M_{ar} = 29 \text{ kg/kmol}$

2. Determinar:

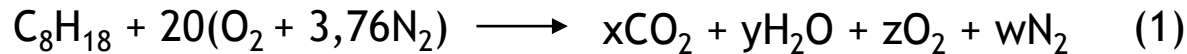
- a) n° de mols para cada gás dos produtos;
- b) razão OC_{esteq} do processo de combustão.

3. Desenho esquemático:



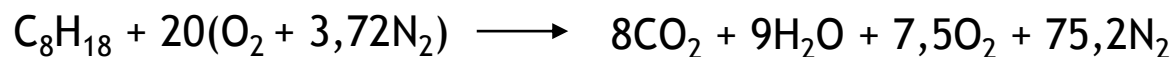
4.Solução:

- Equação química do processo de equilíbrio:



C:	$8 = x$	→	$x = 8$
H:	$18 = 2y$	→	$y = 9$
O:	$20 \cdot 2 = 2x + y + 2z$	→	$z = 7,5$
N ₂ :	$20 \cdot (3,76) = w$	→	$w = 75,2$

- Substituindo os valores na equação (1):



➤ Razão OC:

$$OC_{\text{est}} = \frac{m_{\text{oxid}}}{m_{\text{comb}}} = \frac{(N \cdot M)_{\text{ar}}}{(N \cdot M)_{\text{C}} + (N \cdot M)_{\text{H}_2}}$$

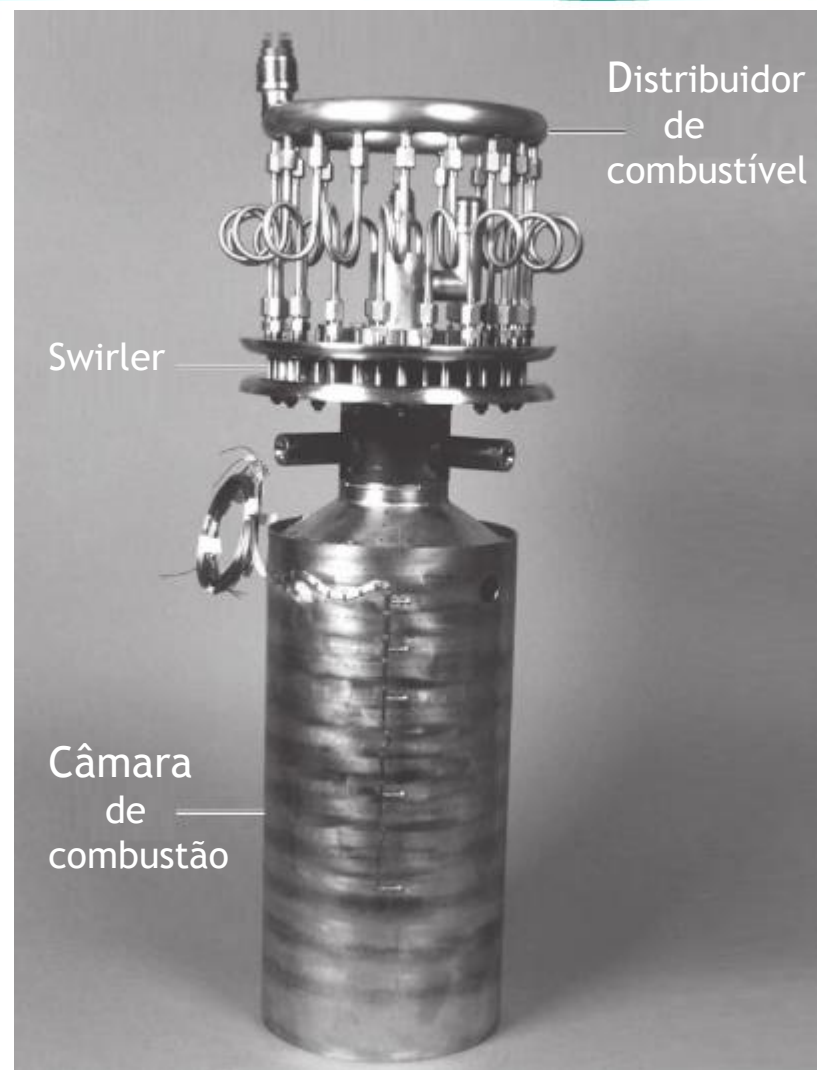
$$OC_{\text{est}} = \frac{(20 \cdot 4,76 \text{ kmol}) \cdot (29 \text{ kg/kmol})}{(8 \text{ kmol}) \cdot (12 \text{ kg/kmol}) + (9 \text{ kmol}) \cdot (2 \text{ kg/kmol})}$$

$$OC_{\text{est}} = \frac{2760,8 \text{ kg}}{114 \text{ kg}}$$

$$OC_{\text{est}} = 23,57$$

➤ Ou seja, para oxidar **1 kg de combustível** são necessários **23,57 kg de oxidante**

2. Uma turbina a gás estacionária opera no ponto de projeto (3950 kW) em uma razão de equivalência de 0,286, na saída da câmara de combustão, com uma vazão de ar na saída do compressor de 15,9 kg/s. A composição equivalente do gás natural combustível utilizado pela máquina é $C_{1,16}H_{4,32}$. Determine a vazão de combustível e a razão oxidante-combustível necessária para oxidar essa quantidade de combustível no interior da câmara de combustão. Considere a massa molar do ar como sendo 29 kg/kmol, do Carbono 12 kg/kmol e do Hidrogênio (H_2) 2 kg/kmol.



Exercício - turbina a gás

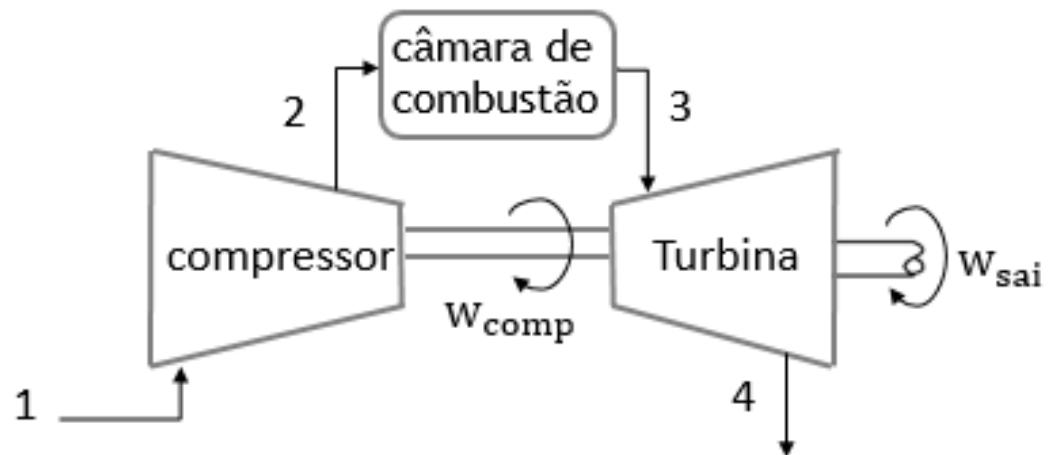
1. Dados:

- . $\Phi = 0,286$
- . $\dot{m}_{ar} = 15,9 \text{ kg}$
- . $M_{ar} = 29 \text{ kg/kmol}$
- . $M_C = 12 \text{ kg/kmol}$
- . $M_{H_2} = 2 \text{ kg/kmol}$

2. Determinar:

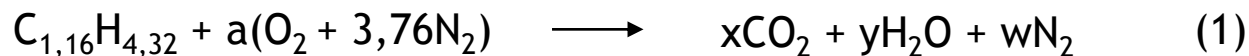
- a) $\dot{m}_{comb} = ?$
- b) $OC_{esteq} = ?$

3. Desenho esquemático:



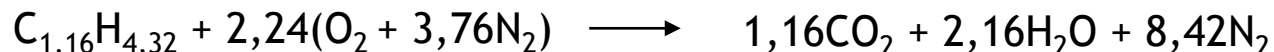
4. Solução:

- Equação química do processo de equilíbrio:



C:	$1,16 = x$	\longrightarrow	$x = 1,16$
H:	$4,32 = 2y$	\longrightarrow	$y = 2,16$
O:	$2a = 2x + y$	\longrightarrow	$a = 2,24$
N ₂ :	$3,76a = w$	\longrightarrow	$w = 8,42$

- Substituindo os valores na equação (1):



➤ Razão OC:

$$OC_{est} = \frac{m_{oxid}}{m_{comb}} = \frac{(N.M)_{ar}}{(N.M)_C + (N.M)_{H_2}}$$

$$OC_{est} = \frac{(2,24 \cdot 4,76 \text{ kmol}) \cdot (29 \text{ kg/kmol})}{(1,16 \text{ kmol}) \cdot (12 \text{ kg/kmol}) + (2,16 \text{ kmol}) \cdot (2 \text{ kg/kmol})}$$

$$OC_{est} = \frac{309,21 \text{ kg}}{18,24 \text{ kg}} \Rightarrow OC_{est} = 16,95$$

$$\phi = \frac{OC_{esteq}}{OC_{oper}} \Rightarrow OC_{oper} = \frac{OC_{esteq}}{\phi} = \frac{16,95}{0,286} = 59,26$$

$$OC_{oper} = \frac{\dot{m}_{oxid}}{\dot{m}_{comb}} \Rightarrow \dot{m}_{comb} = \frac{\dot{m}_{oxid}}{OC_{oper}}$$

$$\dot{m}_{comb} = \frac{15,9 \text{ kg/s}}{59,26} \Rightarrow \dot{m}_{comb} = 0,269 \text{ kg/s}$$

- Combustíveis
- Atomização
- Combustão
- Combustão com e sem chama
- Razões oxidante-combustível e de equivalência
- Aplicações
- Exercícios