

Monitoria de Aeronaves

Aula 6 - Especial sobre Propulsão

Prof. Dr. Fernando Martini Catalano
Gabriel Setim Porto Alegre
Rodrigo Marin Torres
Vinícius Rocha Monteiro

Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Engenharia Aeronáutica
Universidade de São Paulo

31 de maio de 2020

Aula de Hoje:

- 1 Objetivos
- 2 Introdução
- 3 Combustão Interna
- 4 Motores à Reação
- 5 Motores Elétricos
- 6 Resumo
- 7 Referências

Objetivos

Objetivos:

- Introduzir os diferentes tipos de grupo moto-propulsor

Introdução

Grupo Moto-Propulsor - GMP:

Na aula de hoje, daremos uma introdução a GMP que estão classificados em três categorias:

- Motores de combustão interna (pistão)
- Motores à reação (turbinas)
- Motores elétricos

Existem muitos outros, mas que não serão abordados hoje.

Combustão Interna

Motores de combustão interna:

Os motores de combustão **interna** (Internal Combustion Engines) são chamados assim uma vez que utilizam os próprios gases de combustão como fluido de trabalho, ou seja, são estes gases que realizam os processos de compressão, aumento de temperatura (queima), expansão e finalmente exaustão.

Esse tipo de motor distingue-se dos ciclos de combustão externa, nos quais os processos de combustão ocorrem externamente ao motor.

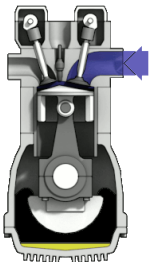


Figura: Motor de Combustão Interna - Ciclo Otto

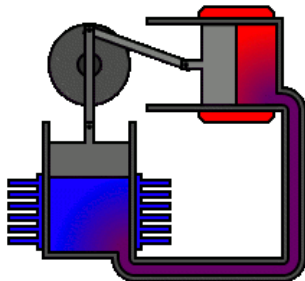
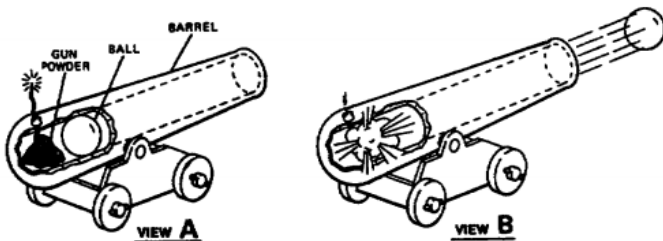


Figura: Motor de Combustão Externa - Motor Stirling

Motores de combustão interna:

O motor a pistão é um dos mais utilizados no mundo. Carros, Aeronaves gerais e pequenos helicópteros fazem uso extensivo desse tipo de motor. Começaremos nossa aula por ele.

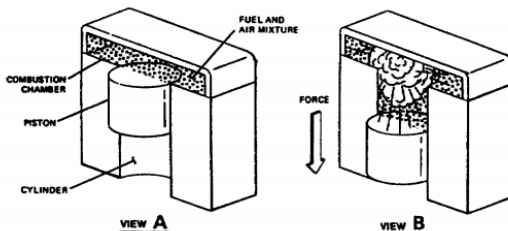
O funcionamento de um motor a pistão pode ser entendido numa comparação simples com um canhão.



No canhão, a pólvora queima muito rapidamente e sua queima resulta na expansão rápida dos gases resultantes. Essa rápida expansão causa um aumento abrupto das forças de pressão, expulsando a bala do canhão.

Motores de combustão interna:

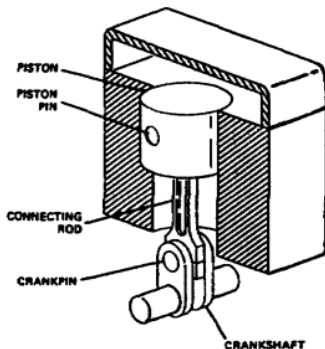
Agora, iremos substituir a pólvora pela mistura de combustível e comburente (oxigênio). O canhão e a bola serão trocados por um pistão e uma câmara de combustão.



De forma análoga, quando a mistura de combustível queimar, as forças de pressão decorrentes da expansão dos gases irão empurrar o cilindro para baixo.

Motores de combustão interna:

A força linear do pistão é convertida para um movimento rotacional utilizando a **Biela** (Connecting Rod) e o **Virabrequim** (Crankshaft).



Dessa forma, temos o que chamamos de potência de eixo, P_{bhp} . A potência de eixo em kW é calculada como $P_{bhp} = T * n / 9550$. Onde, T=torque [N.m] e n=rotação em rpm

Ciclo Otto:

O ciclo Otto é um ciclo padrão que se aproxima da operação de motores com ignição. Não entraremos nos detalhes do ciclo termodinâmico, mas apresentaremos a equação da eficiência térmica do ciclo:

Eficiência Térmica - Ciclo Otto:

$$\eta = 1 - \frac{1}{CR^{k-1}}$$

Onde:

CR: Taxa de compressão [-]

Nota-se que o aumento da taxa de compressão aumenta a eficiência térmica do motor, contudo o aumento excessivo pode levar ao **knocking**, isto é, a pré-ignição da mistura. Uma forma de aumentar esse limite, é aumentando a octanagem da gasolina. Em geral, o combustível disponível nos aeroportos de aeronaves gerais é o AVGAS, não sendo possível alterá-lo.

Em geral, a eficiência média deste ciclo é da ordem de 30%.

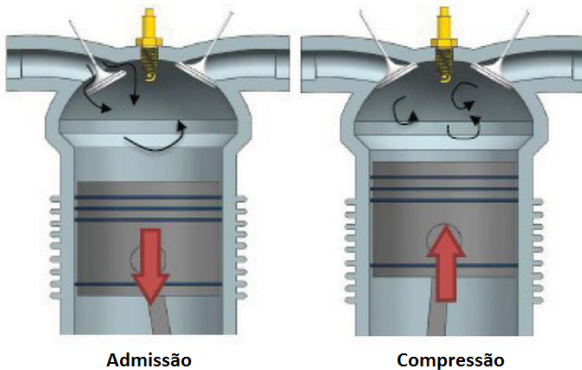
Motor a quatro tempos - Otto

Começaremos pelo motor quatro tempos que opera em ciclo Otto, o mais encontrado. As quatro fases desse tipo de motor são:

- 1 Admissão (intake)
- 2 Compressão (compression)
- 3 Combustão (power)
- 4 Exaustão (exhaust)

Motor 4 tempos - Otto

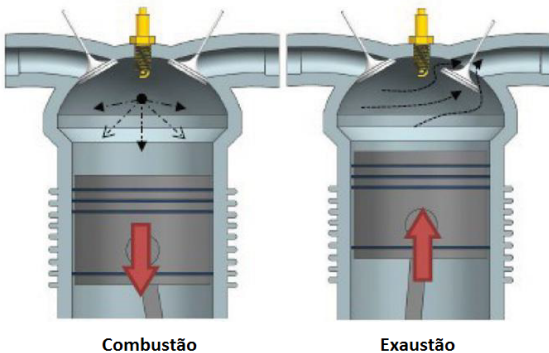
As duas primeiras fases desse ciclo, a admissão e compressão são ilustradas abaixo:



Repare no posicionamento das válvulas de admissão (esquerda) e de exaustão (direita).

Motor 4 tempos - Otto

E as duas últimas fases desse ciclo, a combustão e exaustão são ilustradas abaixo:



Repare no acionamento da vela (em dourado) na fase de combustão e na abertura da válvula de exaustão no fim do ciclo.

Ciclo diesel

Em alternativa aos motores de ciclo Otto, existe o motor de ciclo **Diesel**. Esse tipo de motor pode ser aplicado a motores 2 e 4 tempos.

No motor Diesel, a ignição não acontece pelo acionamento da vela, mas sim espontaneamente devido a alta taxa de compressão da mistura. Uma vez que ele opera em taxas maiores de compressão, ele apresenta algumas **vantagens** como:

- Menor consumo específico SFC quando comparado ao ciclo Otto
- Possibilidade de uso de outros combustíveis como o Jet-A
- Não utiliza sistema de ignição, reduzindo manutenção e problemas de interferência com outros sistemas da aeronave;
- Menor custo de manutenção

Contudo, ele apresenta algumas **desvantagens**:

- Partida não confiável em baixas temperaturas
- Maior peso seco
- Maior temperatura de operação

Motor 2 Tempos

Outro tipo de motor muito utilizado em UAVs de pequeno porte e aeromodelos é o motor 2 tempos. Esse tipo de motor tem suas vantagens como:

- Mais simples, menos partes móveis;
- Mais leve;
- Sem válvulas, é capaz de operar com maior confiabilidade

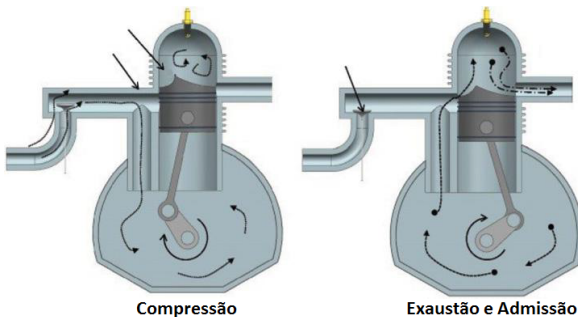
Contudo, ele também apresenta **desvantagens**:

- Menos eficiente;
- Apresenta dificuldade de refrigeração e lubrificação;

Para lubrificar, geralmente adiciona-se óleo à gasolina, o que dificulta a sua operação.

Motor 2 Tempos

As etapas desse tipo de motor estão ilustradas abaixo:



Motor tipo Wankel

O motor tipo Wankel é um motor de combustão interna rotativo.

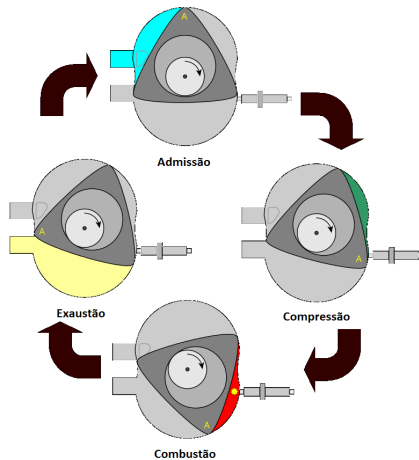
- Mais simples, menos partes móveis;
- Menos vibrações;
- Mais potência e torque para a mesma cilindrada

Contudo, ele também apresenta **desvantagens**:

- Maior taxa de emissão de poluentes;
- Maior temperatura de operação;
- Dificuldades de vedação;

Motor tipo Wankel

As etapas do ciclo estão descritas abaixo:



Exemplos:

Abaixo estão alguns exemplos de motores explicados até agora:



Figura: Motor 2 Tempos, 1 Cilindro - Utilizado no AeroDesign



Figura: Motor 4 Tempos, 4 Cilindros da Lycoming, Otto - Utilizado no Cessna 172

Exemplos:

Abaixo estão alguns exemplos de motores explicados até agora:



Figura: Motor 4 Tempos, 4 Cilindros, Diesel - Utilizado no Diamond Da-42



Figura: Motor Wankel da O.S. - Utilizado em Aeromodelos

Motores à Reação

Motores à reação

Os motores à reação são chamados assim por produzir empuxo ao expelir massa, de acordo com a terceira Lei de Newton.

Os seguintes motores são classificados assim:

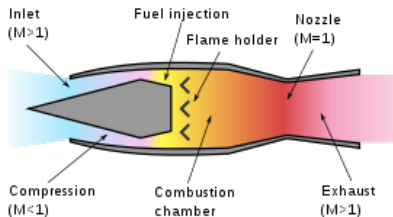
- Motor à jato;
- Motor Turbojato;
- Foguetes;

O motor turbofan produz tração tanto pela expulsão de gases em alta velocidade como pelo acionamento do fan.

Já o motor turbohélice é classificado como um motor de combustão interna que utiliza turbina, isso ocorre, uma vez que a tração é oriunda apenas da rotação da hélice (os gases da queima são responsáveis pela rotação da turbina e, conseqüentemente, o acionamento da hélice)

Motor Estado-Jato - Ram jet

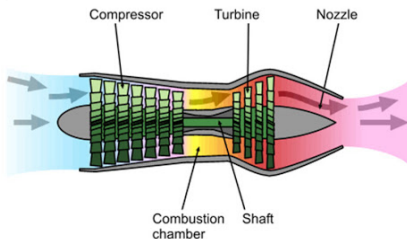
O motor ram jet é o mais simples dos motores a reação, uma vez que possui poucos componentes internos. Ele é um duto com entrada de ar divergente e um bocal de escape convergente ou convergente-divergente. Devido ao formato da entrada de ar, o ar que está em grande velocidade é desacelerado e tem sua pressão estática aumentada. Em seguida, combustível é adicionado e ocorre a queima. A combustão faz com que a massa de ar que entrou no motor saia com uma velocidade muito maior, resultando no empuxo.



Esse tipo de motor é utilizado em mísseis, mas é inadequado para aeronaves, porque necessita estar se locomovendo com grande velocidade para frente, antes que qualquer empuxo seja produzido por ele.

Motor Turbojato - Turbojet

O motor turbojato é um motor que utiliza o ar como fluido de trabalho para produzir tração. Para conseguir isto, o motor capta o ar à sua frente, acelera e o expulsa em alta velocidade



O ar atmosférico é admitido pelo bocal de entrada (*inlet*) e é comprimido pelos compressores (*compressor*). Na câmara de combustão (*combustion chamber*) ocorre a queima da mistura ar-combustível. Os gases expelidos em alta velocidade e temperatura passam pela turbina (*turbine*). Notem que a turbina e o compressor estão unidos por um eixo (*shaft*), dessa forma uma parte da energia da queima é consumida pela turbina para movimentar o compressor, garantindo o funcionamento do motor. Finalmente, os gases são expulsos pelo duto de escape (*nozzle*).

Motor Turbo-hélice (Turboprop)

O motor turbo-hélice é um motor turbojato no qual a maior parte da energia do fluxo de gases é consumida pela turbina que é responsável por acionar uma hélice. Nesse tipo de motor, a maior parte da força de tração é produzida pela hélice e uma pequena parte (entre 10% e 25%) é originada pelo impulso do fluxo dos gases resultantes da combustão.



Figura: Motor turbo-hélice PW100 da Pratt-Wittney



Figura: Ilustração do motor turbo-hélice na aeronave Bombardier Q400

Motor Turbo-hélice (Turboprop)

Vejam abaixo a ilustração do funcionamento de um motor turboprop. Note que uma caixa de redução é necessária para ajustar a velocidade de rotação da hélice.

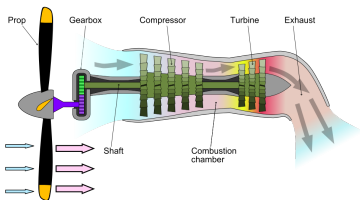


Figura: Motor turbo-hélice

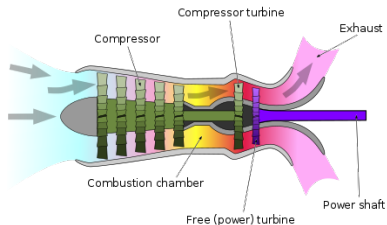


Figura: Motor turbo-eixo

Outra variante é o motor **turboeixo (Turboshaft)**, no qual a queima dos gases é responsável pelo acionamento de um eixo. Esse motor não é conectado a uma hélice, mas pode, por exemplo, ser conectado a um gerador elétrico. Notem que nos dois casos, a exaustão dos gases **não** fornece empuxo, classificando esses motores como de combustão interna.

Motor Turbofan

O motor turbofan é basicamente um motor turbojato que aciona um fan ou hélice múltipla dentro de um duto. O empuxo é gerado parte pelo gás quente resultante da combustão e parte pelo ar frio impelido para trás pelo fan.

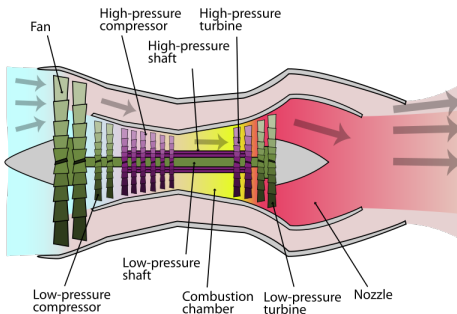


Figura: Motor turbofan

Esse tipo motor é o mais utilizado nas aeronaves comerciais.

Motor Turbofan

Um parâmetro muito importante na escolha do motor turbofan é a razão de **bypass**, que é definida como a razão entre a massa de ar frio que passa pelo fan dividida pela massa de ar quente que passa pelo núcleo do motor. Um bypass de 10:1 significa que para cada 10kg de ar frio que passam pelo fan, 1 kg de ar quente passa pelo núcleo do motor.

Um **bypass** maior significa um SFC menor para a mesma tração de referência e um ruído menor, contudo isso geralmente implica em fans maiores e mais pesados.

O vídeo abaixo detalha o funcionamento de um motor turbofan:

https://www.youtube.com/watch?v=_LaK1E2h3Jw

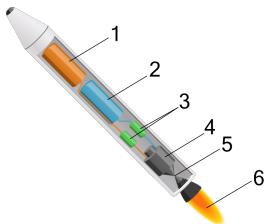
Este aqui mostra o motor **geared turbofan** do A350, observem quantos componentes e a complexidade do sistema:

<https://www.youtube.com/watch?v=m0X0o8aBrxk>

Motor Foguete

O motor foguete não capta o ar atmosférico para utilizá-lo, ele carrega seu agente oxidante e combustível na forma líquida ou sólida.

A força propulsiva é originada pelos gases liberados pela queima do combustível, que escapam através de um bocal de exaustão a uma grande velocidade e temperatura.



A figura ilustra os componentes de um foguete de combustível líquido. 1 corresponde ao combustível, 2 ao oxidante (oxigênio, por exemplo), 3 bombas de combustível e oxidante, 4 é a câmara de combustão, 5 ilustra a garganta e 6 a saída de gases;

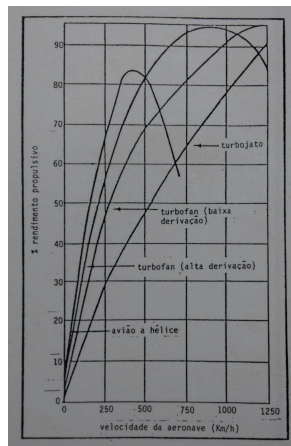
Exemplo: Teste de motor foguete realizado pelo Instituto de Aeronáutica e Espaço:

<https://www.youtube.com/watch?v=zkrteAqyEm4>

Considerações finais sobre motores a jato

Cada tipo de motor possui seu campo de aplicação. A seleção de um tipo específico de motor depende geralmente das velocidades de cruzeiro ou do uso que se destina a aeronave. Empuxo, consumo e custos de aquisição e manutenção também são fatores muito importantes na escolha.

A figura ao lado ilustra como varia o rendimento propulsivo de alguns motores de acordo com a velocidade, vejamos a grande diferença entre eles:



Motores Elétricos

Motores Elétricos:

Motores elétricos têm uma eficiência muito superior aos motores de combustão. Em geral, os motores elétricos apresentam as seguintes vantagens em relação aos de combustão interna:

- Ruído reduzido;
- Manutenção reduzida;
- Não são afetados pela altitude;
- Melhor relação potência/peso

Existe diversas arquiteturas de motores elétricos atualmente. Uma forma de classificá-los é pela corrente de operação. Se eles operam em corrente contínua (DC) ou em corrente alternada (AC). Existem outras subdivisões, mas não é objetivo entrar em detalhes neste momento.

Hoje daremos mais atenção a dois tipos de motores elétricos: os *brushless* de corrente alternada e os de fluxo axial.

Motores Elétricos - Brushless

O motor brushless é um motor sem escova muito utilizado em aeromodelos e UAVs.

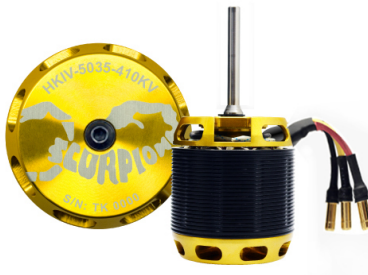


Figura: Motor Brushless da Scorpion

Esse tipo de motor tem uma boa relação de potência/peso e uma eficiência de torno de 70-85%. Um parâmetro muito importante nesse tipo de motor é a constante de rotação, o K_V cuja unidade é RPM/V. A partir dessa constante e da tensão de entrada, é possível saber o RPM do motor e dimensionar uma hélice adequada.

Motores Elétricos - Fluxo Axial

Os motores de fluxo axial são recentes e prometem uma relação de potência/peso de aproximadamente 5kW/kg. Além disso, eles prometem operar em eficiências de 90-98%. Contudo, muitos fabricantes ainda estão em estado experimental, esperamos ter respostas em breve.



Figura: Motor de Fluxo Axial da EMRAX

Esse motor é uma grande promessa para tornar aeronaves de grande porte elétricas. Contudo, o problema da densidade energética das baterias ainda é um impedimento.

Baterias

O grande desafio para tornar aeronaves elétricas de grande porte realidade são as baterias. O problema se concentra na **densidade energética**, ou seja, quanto de energia temos por kg de bateria transportada.

Apesar da maior eficiência dos motores elétricos, a densidade energética do combustível é algo em torno de 3000-5000 Wh/kg, enquanto que as melhores baterias atuais oferecem 200-250 Wh/kg. Além disso, a queima do combustível diminui o peso da aeronave, enquanto que uma aeronave elétrica tem seu peso constante durante todo o voo.

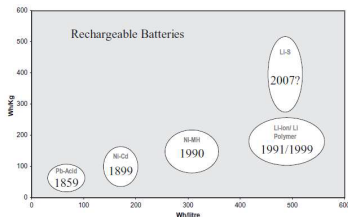


Figura: Evolução e previsão da densidade energética.

Atualmente, as baterias de LiPo e de Li-íon são as que apresentam as maiores densidades energéticas.

Baterias

Contudo, existem perspectivas de baterias de maior densidade energética para os próximos anos. Baterias do tipo Lítio-Enxofre (Li-S) e Lítio-Metal podem trazer até 500Wh/kg, o que permitiria uma aeronave regional de pequeno porte mais viável em rotas curtas.



Figura: Célula de Li-Metal da Licerion - 500Wh/kg

Essas células ainda estão em fase experimental. No momento, elas são extremamente caras, da ordem de 25x o preço de uma LiPo e têm uma vida útil curta (baixo nível de ciclos).

Energia Solar

Outra fonte de energia sendo explorada na aeronáutica é a solar. Contudo, as placas solares apresentam dificuldades como alto custo e baixa eficiência (10-35%). As melhores placas são utilizadas em satélites e tem uma ordem de custo de 50-100x mais que as placas residenciais.



Figura: Aeronave Eraole

Essa limitação de eficiência obriga aeronaves solares a terem uma grande área para abrigar os painéis solares, voarem em baixa velocidade (menor potência requerida) e com grandes alongamentos de asa (minimizar arrasto induzido). A aeronave Eraole recentemente realizou um voo de 10 horas consecutivas.

Resumo

Resumo

Essa aula especial foi apenas uma introdução aos mais diversos tipos de grupo moto-propulsores empregados na aviação. Não entramos em muitos detalhes, uma vez que o assunto será melhor abordado nas disciplinas de termodinâmica, aerodinâmica compressível e propulsão. Muitos cursos de engenharia aeronáutica no mundo tratam o tema de propulsão como uma especialização, devido a grande quantidade de conteúdo e complexidade do assunto.

Não se sintam obrigados a compreender tudo que foi exposto na aula de hoje e fiquem a vontade para revisar o conteúdo conforme estiverem avançando no curso. Enfim, hoje abordamos:

- Motores de combustão interna: motor a pistão 2 e 4 tempos, ciclos de Otto, Diesel e motor rotativo tipo Wankel;
- Motores à reação como: motor à jato, turbojato, turbofan, foguete;
- Motores de combustão interna especiais como o motor turbo-hélice e turbo-eixo;
- Motores elétricos do tipo brushless, de fluxo axial, baterias e painéis solares;

Referências

Referências

Referências utilizadas nesta aula:

- Apostila da Embraer, Fundamentos de Aeronáutica
- Farokhi, S. - Aircraft Propulsion, 2014.
- Wikipedia
- Estudo de viabilidade de aeronaves elétricas, Roland Berguer,
https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/roland_berger_aircraft_electrical_propulsion.