

Universidade do Sul de Santa Catarina



Motores de Aviação Convencionais e a Reação

Disciplina na modalidade a distância

UnisulVirtual

A sua universidade a distância

Universidade do Sul de Santa Catarina

Motores de Aviação Convencionais e a Reação

Disciplina na modalidade a distância

Palhoça
UnisulVirtual
2013

Créditos

Universidade do Sul de Santa Catarina – Unisul

Reitor

Sebastião Salésio Herdt

Vice-Reitor

Mauri Luiz Heerd

Pró-Reitor de Ensino, de Pesquisa e de Extensão

Mauri Luiz Heerd

Pró-Reitor de Desenvolvimento Institucional

Luciano Rodrigues Marcelino

Pró-Reitor de Operações e Serviços Acadêmicos

Valter Alves Schmitz Neto

Diretor do Campus Universitário de Tubarão

Heitor Wensing Júnior

Diretor do Campus Universitário da Grande Florianópolis

Hércules Nunes de Araújo

Diretor do Campus Universitário UnisulVirtual

Fabiano Ceretta

Campus Universitário UnisulVirtual

Diretor

Fabiano Ceretta

Unidade de Articulação Acadêmica (UnA) - Educação, Humanidades e Artes

Marciel Evangelista Cataneo *(articulador)*

Unidade de Articulação Acadêmica (UnA) – Ciências Sociais, Direito, Negócios e Serviços

Roberto Iunskovski *(articulador)*

Unidade de Articulação Acadêmica (UnA) – Produção, Construção e Agroindústria

Diva Marília Flemming *(articuladora)*

Unidade de Articulação Acadêmica (UnA) – Saúde e Bem-estar Social

Aureo dos Santos *(articulador)*

Gerente de Operações e Serviços Acadêmicos

Moacir Heerd

Gerente de Ensino, Pesquisa e Extensão

Roberto Iunskovski

Gerente de Desenho, Desenvolvimento e Produção de Recursos Didáticos

Márcia Loch

Gerente de Prospecção Mercadológica

Eliza Bianchini Dallanhol

Hélio Luís Camões de Abreu

Motores de Aviação Convencionais e a Reação

Livro didático

Design instrucional

Marcelo Tavares de Souza Campos

Palhoça
UnisulVirtual
2013

Copyright © UnisulVirtual 2013

Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida por qualquer meio sem a prévia autorização desta instituição.

Edição – Livro Didático

Professor Conteudista

Hélio Luís Camões de Abreu

Design Instrucional

Marcelo Tavares de Souza Campos

Projeto Gráfico e Capa

Equipe UnisulVirtual

Diagramação

Cristiano Neri Gonçalves Ribeiro

Revisão

Smirna Cavalheiro

ISBN

978-85-7817-561-0

629.134

A14 Abreu, Hélio Luís Camões de

Motores de aviação convencionais e a reação : livro didático / Hélio Luís Camões de Abreu ; design instrucional Marcelo Tavares de Souza Campos.

– Palhoça : UnisulVirtual, 2013.

161 p. : il. ; 28 cm.

Inclui bibliografia.

ISBN 978-85-7817-561-0

1. Aviões - Motores. 2. Aeronáutica – Medidas de segurança. 3. Navegação aérea. I. Campos, Marcelo Tavares de Souza. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Universitária da Unisul

Sumário

Apresentação.....	7
Palavras do professor.....	9
Plano de estudo	11
UNIDADE 1 - Operação de motores aeronáuticos convencionais	15
UNIDADE 2 - Princípios básicos de motores aeronáuticos convencionais	57
UNIDADE 3 - Operação de motores aeronáuticos a reação	97
UNIDADE 4 - Princípios básicos de motores aeronáuticos a reação	127
Para concluir o estudo.....	151
Referências	153
Sobre o professor conteudista.....	155
Respostas e comentários das atividades de autoavaliação	157
Biblioteca Virtual.....	161

Apresentação

Este livro didático corresponde à disciplina **Motores de Aviação Convencionais e a Reação**.

O material foi elaborado visando a uma aprendizagem autônoma e aborda conteúdos especialmente selecionados e relacionados à sua área de formação. Ao adotar uma linguagem didática e dialógica, objetivamos facilitar seu estudo a distância, proporcionando condições favoráveis às múltiplas interações e a um aprendizado contextualizado e eficaz.

Lembre-se que sua caminhada, nesta disciplina, será acompanhada e monitorada constantemente pelo Sistema Tutorial da UnisulVirtual, por isso a “distância” fica caracterizada somente na modalidade de ensino que você optou para sua formação, pois na relação de aprendizagem professores e instituição estarão sempre conectados com você.

Então, sempre que sentir necessidade entre em contato; você tem à disposição diversas ferramentas e canais de acesso tais como: telefone, e-mail e o Espaço Unisul Virtual de Aprendizagem, que é o canal mais recomendado, pois tudo o que for enviado e recebido fica registrado para seu maior controle e comodidade. Nossa equipe técnica e pedagógica terá o maior prazer em lhe atender, pois sua aprendizagem é o nosso principal objetivo.

Bom estudo e sucesso!

Equipe UnisulVirtual.

Palavras do professor



O voo de uma aeronave depende do equilíbrio de forças que, em conjunto, fazem com que ela siga a trajetória desejada pelo piloto. Para se contrapor ao peso, força que tende a trazer a aeronave para o chão, deve ser gerada a força de sustentação, uma das componentes da resultante aerodinâmica que também inclui o arrasto. Para compensar o arrasto, é necessária uma tração, a qual é implementada por meio de um motor, dispositivo que transforma algum tipo de energia em movimento.

Neste sentido, nesta leitura você estudará as especificidades quanto ao funcionamento de motores aeronáuticos convencionais e a reação, que são, em geral, motores térmicos, ou seja, motores que transformam a energia calorífica em energia mecânica, a qual ocorre pela aplicação pura de leis físicas usuais como compressão e expansão de gases, trocas de temperatura e combustão.

Identificará cada etapa de funcionamento desses tipos de motores que, para poder transformar a energia adequadamente, admitem o ar atmosférico do meio no qual estão imersos, realizam a mistura bem equilibrada desse ar com o combustível e procedem à reação de combustão, gerando grande expansão de gases aproveitada convenientemente para produzir a propulsão necessária.

Você verá que o bom funcionamento dos motores aeronáuticos convencionais e a reação não depende apenas de seu projeto e do fornecimento de ar e combustível, mas também da forma como é operado. Assim, além de bem compreender o funcionamento dos referidos motores aeronáuticos, você estudará os procedimentos normais de emprego desses motores e também alguns a serem realizados em caso de emergência, tal como um incêndio.

Espero que com o estudo deste material você possa melhor compreender o funcionamento dos mencionados motores e operá-los de forma a proporcionar um voo mais eficiente e seguro.

Um ótimo estudo!

Professor Hélio.



Plano de estudo

O plano de estudos visa a orientá-lo no desenvolvimento da disciplina. Ele possui elementos que o ajudarão a conhecer o contexto da disciplina e a organizar o seu tempo de estudos.

O processo de ensino e aprendizagem na UnisulVirtual leva em conta instrumentos que se articulam e se complementam, portanto, a construção de competências se dá sobre a articulação de metodologias e por meio das diversas formas de ação/mediação.

São elementos desse processo:

- o livro didático;
- o Espaço UnisulVirtual de Aprendizagem (EVA);
- as atividades de avaliação (a distância, presenciais e de autoavaliação);
- o Sistema Tutorial.

Ementa

Tipos de motores alternativos (convencionais). Princípio de funcionamento. Componentes e acessórios. Sistemas do motor, performance e regimes de operação. Noções de propulsão a jato. Noções de hidrodinâmica. Princípio de funcionamento do motor a reação. Componentes básicos e tipos de motores a reação. Tração/Empuxo. Regimes e alcance dos motores turbo jato/turbo fan.

Objetivos da disciplina

Geral

Estudar os princípios básicos de transformação de energia calorífica em energia mecânica para aplicações aeronáuticas por meio de motores térmicos convencionais e a reação.

Específicos

- Identificar os componentes que fazem parte tanto dos motores aeronáuticos convencionais quanto a reação;
- Conhecer a importância dos sistemas auxiliares que trabalham em conjunto com motores de aviação convencionais e a reação;
- Entender os princípios de funcionamento de um motor aeronáutico convencional e de um motor a reação;
- Compreender os procedimentos de operação segura e eficiente tanto dos motores de aviação convencionais quanto a reação.

Carga horária

A carga horária total da disciplina é 60 horas-aula.

Conteúdo programático/objetivos

Veja, a seguir, as unidades que compõem o livro didático desta disciplina e os seus respectivos objetivos. Estes se referem aos resultados que você deverá alcançar ao final de uma etapa de estudo. Os objetivos de cada unidade definem o conjunto de conhecimentos que você deverá possuir para o desenvolvimento de habilidades e competências necessárias à sua formação.

Unidades de estudo: 4

Unidade 1 - Operação de motores aeronáuticos convencionais

Nesta unidade você estudará os componentes dos motores aeronáuticos convencionais, conhecendo sua nomenclatura e funcionalidade. Logo em seguida, você aprenderá o que são os sistemas acessórios dos referidos motores aeronáuticos e entenderá a importância dos mesmos para o bom funcionamento desses motores.

Unidade 2 - Princípios básicos de motores aeronáuticos convencionais

Aqui você compreenderá como os princípios básicos da física são aplicados para a eficiente transformação de energia calorífica dos combustíveis em energia mecânica, necessária para a tração das aeronaves por intermédio de motores aeronáuticos convencionais de quatro tempos e de dois tempos.

Unidade 3 - Operação de motores aeronáuticos a reação

Conhecerá, nesta unidade, os principais componentes dos motores aeronáuticos a reação e também os sistemas auxiliares essenciais para o funcionamento desses motores em aeronaves.

Unidade 4 - Princípios básicos de motores aeronáuticos a reação

Por meio desta unidade você compreenderá o funcionamento dos motores aeronáuticos a reação e entenderá que a operação desses motores deve ser feita de forma consciente e cuidadosa para que se possa utilizá-los na propulsão de aeronaves dentro de parâmetros aceitáveis de eficiência e segurança.

UNIDADE 1

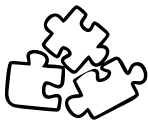
1

Operação de motores aeronáuticos convencionais



Objetivos de aprendizagem

- Identificar os componentes dos motores convencionais de aviação.
- Conhecer acessórios dos motores aeronáuticos convencionais.
- Entender a operação dos motores aeronáuticos convencionais.



Seções de estudo

- Seção 1** Componentes dos motores convencionais de aviação
- Seção 2** Acessórios dos motores aeronáuticos convencionais
- Seção 3** Operação dos motores aeronáuticos convencionais



Para início de estudo

Neste estudo você conhecerá os componentes de um motor aeronáutico convencional, os quais tornam possível a transformação da energia térmica, presente nos combustíveis, em energia mecânica, que é necessária para gerar a tração que impulsionará a aeronave no meio aéreo, e verá que esses componentes buscam compensar as deficiências físicas que surgem quando procuramos implementar o modelo teórico de máquina térmica na prática.

Conhecerá também alguns acessórios desses motores convencionais, que são dispositivos não diretamente ligados ao mecanismo de transformação de energia térmica em mecânica, mas fundamentalmente essenciais ao funcionamento do sistema como um todo.

Por fim, você estudará a forma com que devemos operar todo esse aparato de componentes e acessórios que compõem os referidos motores aeronáuticos de maneira a se obter um funcionamento efetivamente útil na propulsão de aeronaves sem correr riscos desnecessários e prolongando a operação dessas máquinas.

Seção 1 – Componentes dos motores convencionais de aviação

O estudo teórico de uma máquina térmica, especificamente motores aeronáuticos a combustão, envolve a idealização de compartimentos e dispositivos nos quais as reações químicas sejam realizadas e seus produtos aproveitados.

Neste sentido, um pesquisador teórico do funcionamento desses motores deve idealizar uma câmara cilíndrica com volume e dimensões determinados em que ocorram as referidas reações.

Deve idealizar ainda um local por onde a mistura ar-combustível ingressa nessa câmara para que ocorra a reação e outro por onde os gases resultantes da mesma possam sair.

Trazendo o estudo teórico para a prática, isso tudo deve ser implementado com peças reais, que de fato possam realizar as funções previstas na teoria considerando as limitações do mundo físico. Dessa forma, na sequência vamos estudar a descrição e nomenclatura dessas peças que são de fundamental importância para que o desenvolvimento teórico do funcionamento de um motor aeronáutico convencional possa tornar-se realidade.

Cilindro

Um dos principais componentes de um motor convencional de aviação é o cilindro, parte do motor em que ocorre a explosão e que irá converter a energia calorífica do combustível em energia mecânica.

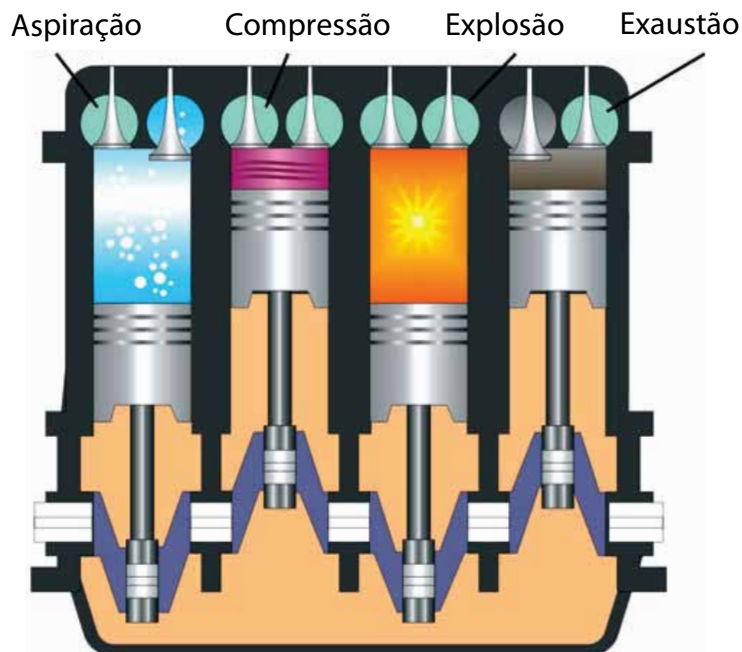


Para suportar as grandes variações de temperatura e pressão que ocorrem no ciclo de funcionamento do motor é fundamental que os materiais que compõem o cilindro tenham alta resistência, sejam leves e bons condutores de calor.

Visando a contextualizar os eventos referentes aos tempos e fases ocorridos no cilindro de um motor de aviação a **quatro tempos** durante seu ciclo de operação, apresentamos a seguir um modelo esquemático, o qual representa uma simplificação de um conjunto de quatro desses cilindros em funcionamento.

O ciclo de funcionamento do motor a quatro tempos envolve a admissão da mistura ar-combustível, compressão dessa mistura, ignição ou queima, que produz o movimento e, finalmente, a exaustão dos gases resultantes dessa queima, preparando o cilindro para um novo ciclo.

Figura 1.1 – Esquema de um conjunto de quatro cilindros em funcionamento a quatro tempos

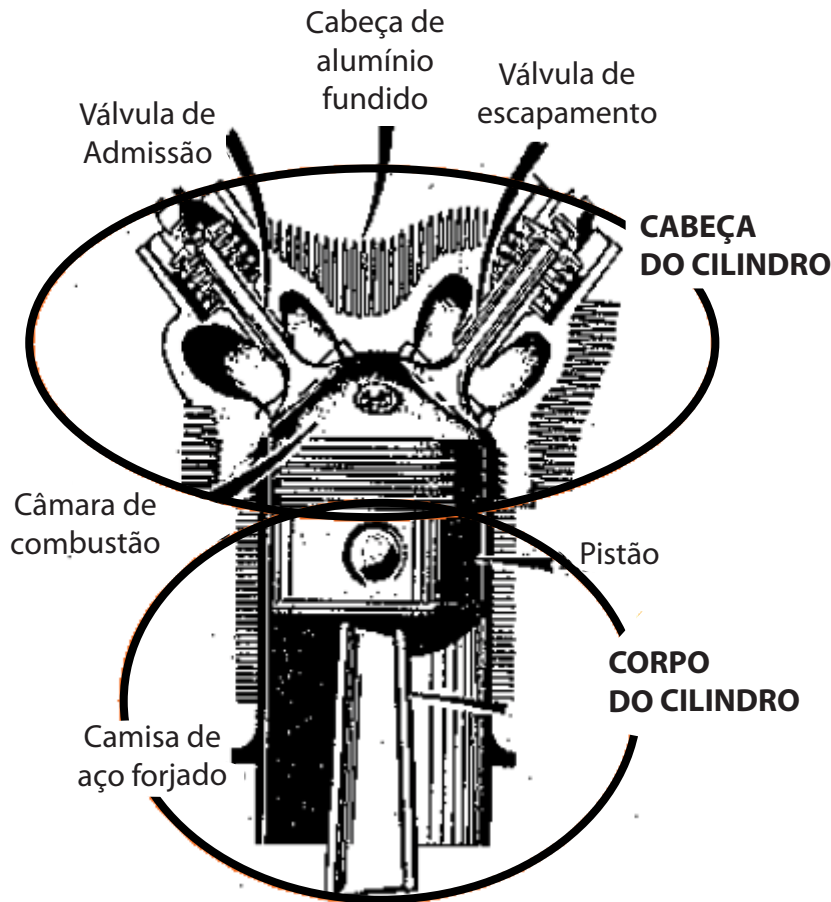


Fonte: StreetCustoms (2012).

Nessa figura verificamos quatro cilindros funcionando em conjunto, sendo que cada um deles se encontra em um tempo de operação. Nesse caso, a energia gerada pela explosão que ocorre no terceiro cilindro move o eixo do motor e, conseqüentemente, os demais cilindros.

Na próxima figura podemos observar a estrutura detalhada um cilindro, a qual está dividida em duas partes: **cabeça do cilindro** e **corpo do cilindro**.

Figura 1.2 – Cabeça e corpo de um cilindro

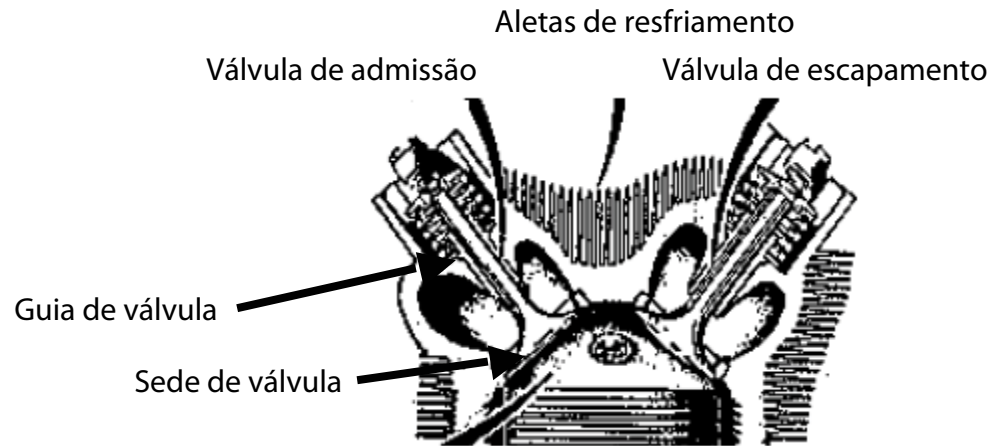


Fonte: Adaptado do Manual do Mecânico de Manutenção Aeronáutica (2002).

Podemos observar na figura anterior que as válvulas são instaladas com suas hastes inseridas em dutos, denominados guias de válvulas, de forma que a parte que efetivamente bloqueia ou libera a passagem de fluido, ou seja, a cabeça da válvula se aloje adequadamente em anéis instalados na cabeça do cilindro, chamados de sedes de válvulas.

A **cabeça do cilindro**, ilustrada pela figura na sequência, é a parte superior que comporta as válvulas e a vela de ignição. Normalmente, é confeccionada em liga de alumínio e também dispõe de aletas para dissipação do calor.

Figura 1.3 – Cabeça do cilindro



Fonte: Adaptado do Manual do Mecânico de Manutenção Aeronáutica (2002).

O **corpo do cilindro** é a parte central por onde se desloca o êmbolo e visa a orientar o deslocamento do mesmo no momento da produção de energia mecânica, sendo constituído de material resistente ao calor, geralmente aço, tendo a parte interna endurecida.

Segundo descrição do Manual do Mecânico de Manutenção Aeronáutica do Instituto de Aviação Civil (2002), o corpo do cilindro é a parte por onde se desloca o êmbolo e é, portanto, feita de material resistente ao atrito, geralmente aço, que é submetido a um tratamento especial de endurecimento na parte interna do cilindro.

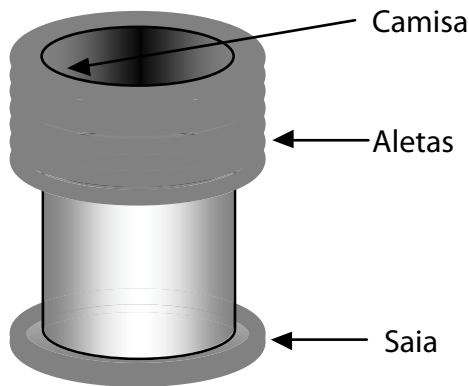
Os cilindros também podem ser confeccionados com outros materiais como, por exemplo, a liga leve. Neste caso, por não ser um material tão resistente quanto o aço, existe um revestimento interno feito de outro material mais resistente. Este revestimento denomina-se “**camisa**”.



O corpo do cilindro, em virtude do atrito, está sujeito a um grande aquecimento e, por isso, é dotado de aletas externas, as quais aumentam a área de contato com o ar para a dissipação do calor. É dotado, ainda, na sua parte inferior, de uma saia onde é feito o encaixe com o bloco do motor.

A figura a seguir ilustra o corpo do cilindro de um motor aeronáutico convencional, indicando a localização da camisa, aletas e saia.

Figura 1.4 – Corpo do cilindro



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

Câmara de combustão

No interior do cilindro, limitado pela cabeça, corpo e a parte superior do pistão, existe um espaço variável, de acordo com a posição do pistão, onde ocorre a queima da mistura ar-combustível. Quando o pistão está na sua posição superior, resta um espaço entre o topo do pistão e a parte interna da cabeça do cilindro. Este espaço é chamado de câmara de combustão.

Pistão

O pistão é o êmbolo, produzido por uma liga de alumínio, que realiza o movimento no interior do cilindro tendo as seguintes funções: aspirar a mistura ar-combustível, comprimi-la, e, após sua explosão, expulsar os gases resultantes da queima.



No momento em que ocorre a explosão da mistura ar-combustível o pistão é movimentado pela expansão dos gases, gerada pela referida explosão, que transforma a pressão em movimento de rotação.

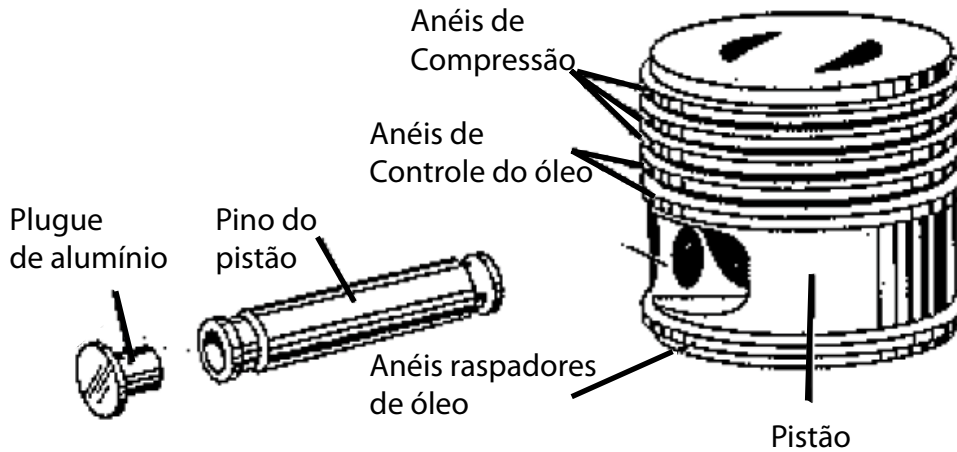
A parte superior do pistão, chamada de saia do pistão, conforme ilustração a seguir, dispõe de ranhuras circulares onde se encaixam anéis que se expandem por ação de mola.

A ação de mola pode ser explicada pelo fato de esses anéis serem segmentados e constituídos de material que aceita uma pequena deformação de maneira, e, ainda, que possam ser condicionados em um espaço sensivelmente menor, porém sempre fazendo pressão para se expandir, tal qual uma mola comprimida, que ocupa um espaço menor, mas se expande caso seja aliviada a pressão sobre ela.

Assim, a ação de molas permite que os anéis façam pressão sobre as paredes do cilindro e vedem a folga existente para permitir o livre movimento, mesmo com a dilatação causada pelo calor.

Esses anéis, que também são ilustrados pela figura a seguir, são chamados de anéis de segmento e têm funções específicas, sendo geralmente confeccionados em ferro fundido com uma dureza menor que a do cilindro, de forma a se desgastarem antes deste e serem substituídos nas revisões dos motores.

Figura 1.5 – Estrutura de um pistão



Fonte: Manual do Mecânico de Manutenção Aeronáutica (2002).

Na sequência são apresentados cada um dos tipos de anéis de segmentos os quais observamos na figura anterior.

Anéis de compressão

Os anéis de compressão são colocados nas ranhuras imediatamente abaixo da cabeça do pistão e têm como principal função evitar o escapamento dos gases durante o funcionamento do motor.

Anéis de controle de óleo

Os referidos anéis se localizam logo abaixo dos anéis de compressão e são responsáveis por regular a quantidade de óleo que forma a camada lubrificante nas paredes do cilindro, visto que a queima do óleo junto com a mistura ar-combustível deixa resíduos que podem prejudicar o funcionamento do motor. Dessa forma, o excesso de óleo nas paredes do cilindro deve ser evitado.

Anel raspador de óleo

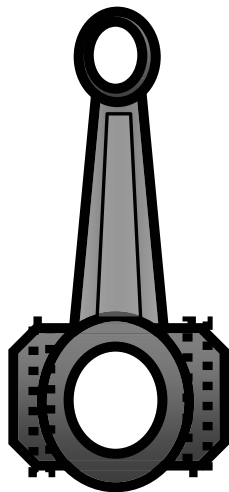
É o anel instalado em uma ranhura no fundo da saia do pistão, e tem como função retirar o excesso de óleo das paredes do cilindro.

Podemos observar também na figura anterior que o pistão é composto por um pino denominado pino do pistão, o qual é utilizado para o encaixe da biela, a seguir apresentada.

Biela e eixo de manivelas

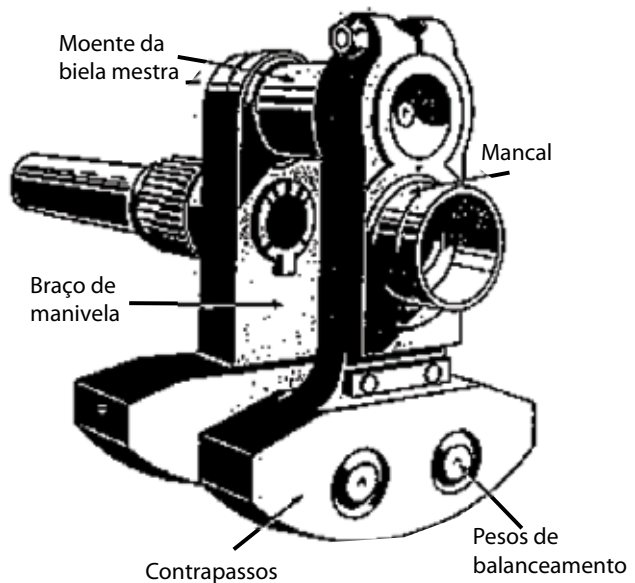
A biela é uma peça constituída de aço que tem a função de transmitir o movimento vertical do pistão para o eixo de manivelas. Esse conjunto, responsável pela conversão do movimento do pistão dentro do cilindro em movimento rotacional do eixo do motor convencional de aviação é ilustrado pelas figuras a seguir.

Figura 1.6 – Biela



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

Figura 1.7 – Eixo de manivelas



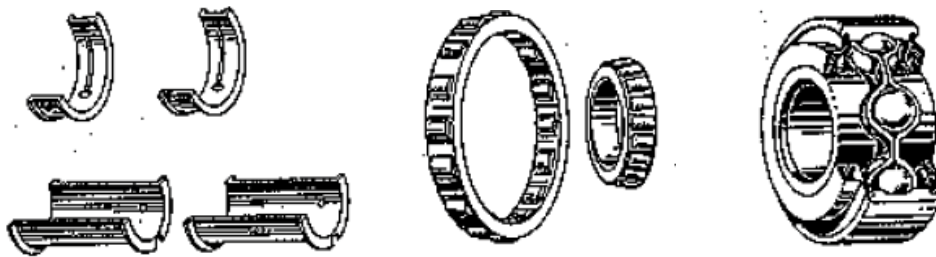
Fonte: Manual do Mecânico de Manutenção Aeronáutica (2002).

Podemos observar que o eixo de manivelas é constituído por diversas partes móveis que se acoplam umas às outras e que gerariam grande atrito, caso esse acoplamento fosse feito diretamente.

Assim, na maioria dos casos, as peças são acopladas por meio de rolamentos ou buchas que reduzem o atrito entre si, e que, assim como os anéis de segmentos, são substituídas com maior facilidade nas revisões dos motores.

É importante observar que peças dessa natureza são feitas para que se desgastem e sejam substituídas periodicamente, de forma a evitar a substituição de uma peça inteira pelo desgaste de uma parte específica apenas. Essas peças são chamadas de mancais, cujos alguns tipos são ilustrados pela figura seguinte.

Figura 1.8 – Alguns tipos de mancais



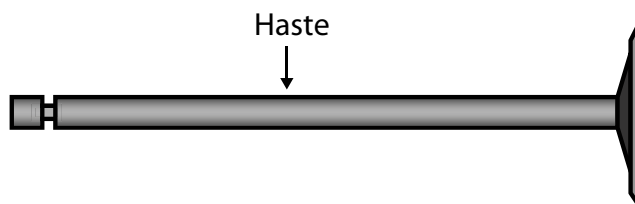
Fonte: Manual do Mecânico de Manutenção Aeronáutica (2002).

Válvulas de admissão e escapamento

As válvulas de admissão e escapamento são dispositivos que realizam o fechamento e abertura dos dutos por onde a mistura ar-combustível e os gases de exaustão, respectivamente, entram e saem da câmara de combustão.

Essas válvulas, em virtude de possuírem funções diferenciadas e lidarem com gases em diferentes condições de trabalho, possuem formatos diferentes, conforme ilustram as figuras na sequência.

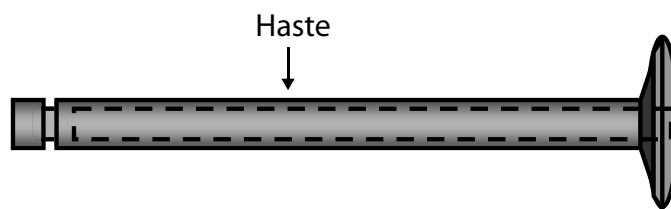
Figura 1.9 – Válvulas de admissão



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

Podemos verificar que a **válvula de admissão** é desenhada na forma de **tulipa** para facilitar a entrada da mistura ar-combustível na câmara de combustão, mistura essa que, ao passar pela válvula, auxilia em seu resfriamento. Repare que ela é desenhada com formato mais suave no lado da haste, por onde vem o fluxo da mistura, e mais abrupta no lado oposto, por onde a mistura escoava.

Figura 1.10 – Válvulas de escapamento



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

É possível verificar que essa válvula é mais robusta que a válvula de admissão, sendo que alguns modelos têm o interior oco, por onde flui um material que transfere o calor da cabeça para a haste. Para oferecer menor resistência à saída dos gases, essa válvula tem formato de **cogumelo**. Diferente do formato tulipa, este formato é abaulado na parte por onde recebe os gases (lado oposto à haste).



A **válvula de escapamento** permite o fluxo de gases resultantes da combustão, portanto, gases em temperaturas elevadas, logo, seu resfriamento fica um tanto quanto prejudicado. Entretanto, é constituída por materiais especiais.

Sistema de comando de válvulas

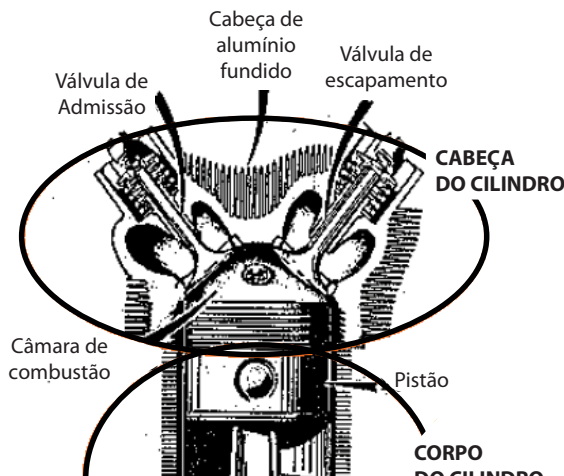
As válvulas de admissão e escapamento são acionadas em sincronia com o movimento do pistão. Essa sintonia é obtida por meio de um **sistema de comando de válvulas**, que possui um eixo acionado por engrenagens de forma a girar na metade da frequência do eixo de manivelas.

Assim, quando o eixo de manivelas realiza duas voltas para completar o ciclo de quatro tempos, o eixo de comando de válvulas dá uma volta e aciona cada uma das válvulas uma vez, sendo a válvula de admissão acionada no primeiro tempo e a válvula de escapamento no quarto tempo.

O acionamento dessas válvulas ocorre por ressaltos em um eixo próprio que podem atuar diretamente nas válvulas ou por meio de um sistema de **varetas e balancins**, sendo que o balancim atua como uma “gangorra” que mantém a válvula fechada a maior parte do tempo e a abre quando a vareta impulsiona o seu lado oposto. A vareta, por sua vez, é acionada pelo ressalto no eixo de ressaltos.

A figura a seguir ilustra o esquema do comando de válvulas.

Figura 1.11 – Esquema do comando de válvulas



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

Verificamos nessa figura que, quando o eixo do motor gira duas voltas, ele move o eixo do comando de válvulas uma volta. Esse eixo, por sua vez, tem um ressalto que aciona a vareta, a qual levanta um lado do balancim, o que, conseqüentemente, baixa o lado oposto, forçando a válvula para baixo, liberando a passagem dos gases.

Devido à relação de voltas do eixo do motor e eixo de comando de válvulas, a abertura de cada válvula ocorre uma vez a cada duas voltas do eixo do motor, ou seja, uma vez a cada ciclo do motor a quatro tempos.

Cárter

O cárter é a carcaça do motor, onde estão fixados os cilindros, tendo como função sustentar e manter o eixo de manivelas alinhado, proteger o motor contra detritos e também servir de reservatório de óleo lubrificante.

Berço do motor

O berço do motor é o componente utilizado para sustentar o motor da aeronave, tendo sua estrutura composta por tubos de aço montada em treliça para suportar as diversas forças atuantes durante o funcionamento desse motor. O berço do motor é fixado no cárter e na estrutura da aeronave por meio de coxins, que são suportes de borracha resistente para absorver as vibrações do motor.

É importante ressaltar que os diversos componentes de um motor aeronáutico convencional estão sujeitos ao atrito e às variações de temperatura. Contudo, apesar disso, devem funcionar perfeitamente e ainda manter suas dimensões e características dentro de padrões aceitáveis.

Diante desse contexto, além de sistemas de lubrificação eficientes é importante a manutenção periódica do motor da aeronave, na qual peças desgastadas são substituídas, mantendo assim o padrão de qualidade desse motor.

Seção 2 – Acessórios dos motores aeronáuticos convencionais

Os acessórios dos motores aeronáuticos convencionais estão relacionados a sistemas específicos, cujos componentes são responsáveis desde a admissão de combustível no motor até o resfriamento deste, a fim de garantir tanto o bom funcionamento do motor quanto de seus componentes básicos.

Na sequência são apresentados esses principais sistemas.

Sistema de alimentação

O sistema de alimentação tem a finalidade de fornecer a mistura ar-combustível aos cilindros livre de impurezas, na pressão e temperatura adequadas. Esse sistema é constituído de três subsistemas:

Subsistema de indução

Esse subsistema é responsável pela admissão, purificação, e, se necessário, aquecimento do ar externo, sendo que para executar essas funções é composto pelas seguintes partes: bocal de admissão (entrada de ar), filtro e aquecedor de ar, válvula de ar quente e coletor de admissão.

O bocal de admissão é a abertura por onde ingressa o ar atmosférico; o qual, na sequência, passa pelo filtro de ar que retira suas impurezas antes de admiti-lo no sistema de admissão. Já o aquecedor faz com que o ar passe por um duto aquecido pelos gases de escapamento, aumentando a temperatura do ar.

A passagem dos gases de escapamento pelo aquecedor é feito por meio da válvula de aquecimento, que pode ficar fechada se for necessário o aquecimento. Por fim, temos o coletor de admissão que distribui a mistura aos cilindros.

Subsistema de superalimentação

A alimentação de um motor convencional de aviação ocorre quando o pistão aspira a mistura ar-combustível ao deslocar-se para parte inferior do cilindro, fazendo com que o cilindro aumente seu volume interno. Este processo normalmente funcionará bem enquanto houver diferença de pressão entre o interior do cilindro, que possui uma pressão reduzida em virtude da referida aspiração, e a pressão atmosférica.

No entanto, à medida que uma aeronave ganha altitude, a pressão atmosférica diminui e os motores acabam perdendo potência. Dessa forma, torna-se necessário que o ar seja enviado para o cilindro sob pressão, processo esse realizado pelo subsistema de superalimentação, no qual um compressor faz com que o ar seja enviado com pressão superior à pressão atmosférica, de forma a manter a diferença de pressão necessária ao bom funcionamento do motor em altitude.

Esses compressores normalmente são do tipo centrífugo, os quais aceleram o ar em direção a difusores que reduzem a velocidade do ar admitido e aumentam a sua pressão, podendo ser acionados por sistemas de engrenagens ou por turbinas que aproveitam a energia dos gases de escapamento.

É importante observar que em aeronaves superalimentadas o piloto deve, constantemente, monitorar os parâmetros de pressão e temperatura do óleo e do ar de admissão para evitar que os limites sejam excedidos.

Subsistema de formação de mistura

Como o próprio nome já diz, é o responsável por fazer a mistura balanceada do combustível com o ar admitido, sendo que, de acordo com o tipo de subsistema, a formação dessa mistura pode ser feita por **carburação, injeção indireta e injeção direta**. Quando o subsistema é por carburação, existe um dispositivo chamado **carburador**, que mistura o ar com o combustível, este que pode ser succionado ou injetado no fluxo de ar.

No subsistema de injeção indireta, o combustível é injetado no fluxo de ar por uma bomba, e, neste caso, não existe o carburador, mas sim uma unidade controladora de combustível e um bico injetor que pulveriza o combustível no fluxo de ar. Já no subsistema de injeção direta, os cilindros aspiram o ar puro e o subsistema injeta o combustível diretamente na câmara de combustão por bicos injetores.

Em virtude de sua importância, vamos discorrer um pouco mais sobre um componente específico do subsistema de formação de mistura: o carburador.

O carburador

O carburador é a unidade destinada a fornecer a mistura ar-combustível na dosagem adequada a cada fase operacional de funcionamento do motor aeronáutico convencional, controlando a potência desenvolvida, o qual pode alterar a relação entre a quantidade de ar e combustível da mistura, bem como a quantidade de mistura fornecida.



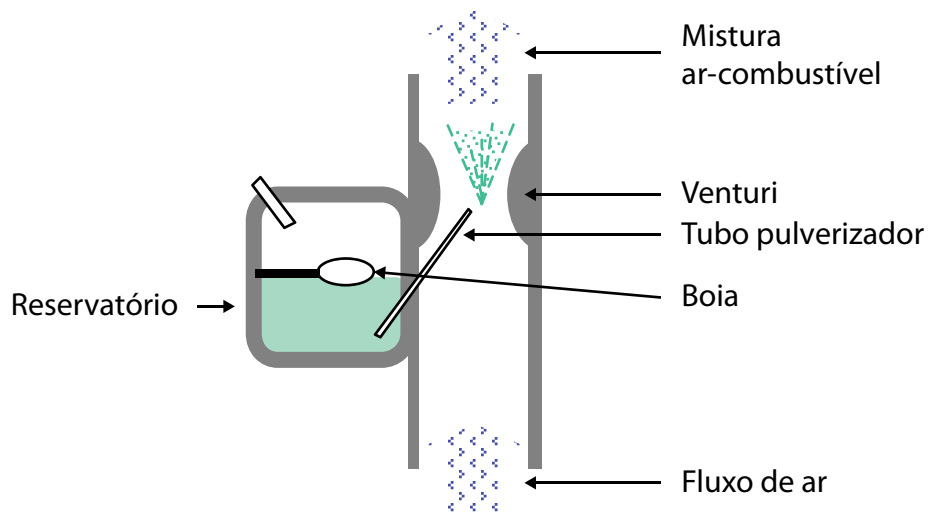
O correto funcionamento do carburador garante que o motor mantenha funcionamento contínuo sem parar por falta de combustível ou por afogamento (excesso de combustível que inviabiliza a combustão).

Princípio de funcionamento do carburador

O princípio de funcionamento do carburador é o tubo de Venturi, o qual possui uma estrutura anatômica com um estrangulamento por onde o ar, ao passar, aumenta sua velocidade e reduz a pressão, a qual causa uma sucção que faz com que o combustível suba por um tubo pulverizador e se misture ao fluxo de ar sob forma pulverizada, de forma a chegar aos cilindros junto com o ar em uma mistura gasosa.

Próximo ao estrangulamento do tubo de Venturi existe um pequeno reservatório no qual o combustível é mantido no mesmo nível por um mecanismo de boia. Podemos observar na próxima figura um esquema que ilustra o funcionamento de um carburador.

Figura 1.12 – Esquema do carburador



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

O carburador, ilustrado em forma esquemática simples na figura anterior, é, na verdade, composto de uma série de controladores que funcionam automaticamente ou a comando do piloto de maneira a adequar o fornecimento de ar e combustível à operação do motor. Entre esses reguladores podemos citar:

Giclê

O giclê é o orifício calibrado, na extremidade do duto que coleta o combustível da cuba de nível constante, que controla a quantidade de gasolina que se mistura com o ar por seu diâmetro, este que é especificado pelo fabricante do carburador.

Borboleta

Dispositivo móvel que funciona como válvula de passagem da mistura de ar-combustível após o estrangulamento do tubo, e que controla a potência do motor. A borboleta é acionada por meio do manete de potência da aeronave.

Pulverizador de marcha lenta

Quando a borboleta está na posição de marcha lenta, a velocidade do ar no estrangulamento do tubo de Venturi não é suficiente para aspirar combustível pelo pulverizador principal. Assim, outro pulverizador, o de marcha lenta, situado próximo à

abertura da borboleta, é acionado para garantir a continuidade do funcionamento do motor.

Cabe destacar que a abertura da borboleta na marcha lenta e do orifício do pulverizador de marcha lenta podem ser regulados em solo pelo mecânico.

Bomba de aceleração

Quando o motor é acelerado, a borboleta abre-se e o fluxo de ar aumenta rapidamente. No entanto, o combustível tem um retardo para ser pulverizado em maior quantidade pelo pulverizador. Neste momento, um pistão que funciona como bomba injeta uma quantidade adicional de combustível no tubo para compensar o retardo no fluxo.

Válvula economizadora

Quando a borboleta está totalmente aberta, o subsistema deveria se comportar em resposta a uma requisição de potência máxima. Nesse caso, uma válvula se abre fazendo passar mais combustível pelo pulverizador. Esta válvula encontra-se normalmente fechada para economizar combustível, daí seu nome de válvula economizadora.

Corretor altimétrico

À medida que a aeronave distancia-se do nível do mar, a pressão atmosférica diminui, assim como a quantidade de oxigênio admitido no sistema. Como a mistura ar-combustível deve ser dosada entre quantidade de oxigênio e combustível, a quantidade deste último precisa ser reduzida quando a aeronave ganha altitude. Essa correção pode ser feita automática ou manualmente pelo manete de mistura, que atua no corretor altimétrico.

Injetor de partida

Antes da partida do motor de uma aeronave não há fluxo de ar para realizar a pulverização, logo, é necessário haver um injetor de partida para o acionamento do motor.

Apesar de ainda ser utilizado, o carburador tradicional está perdendo sua popularidade em virtude do surgimento de sistemas

mais sofisticados, como o carburador de injeção e a injeção direta, e também por suas deficiências, como, por exemplo, a distribuição desigual de mistura de ar-combustível pelos cilindros devido à variação de distância entre o carburador e cada um dos cilindros do motor para o fornecimento dessa mistura, e, ainda, à formação de gelo no tubo de Venturi devido à queda de temperatura causada pela vaporização do combustível.

O carburador de injeção funciona com uma bomba que fornece o combustível sob pressão, dosando-o com o ar admitido logo após a borboleta e assim tornando menos provável a formação de gelo. Outra vantagem do carburador de injeção é sua flexibilidade quanto à posição em que o motor pode funcionar, pois não depende da **cuba de nível**.

A cuba de nível é um pequeno tanque no qual o combustível repousa antes de ser injetado no tubo do carburador. Caso a aeronave encontre-se em uma posição por demais inclinada ou mesmo em voo invertido, este sistema não é adequado, pois se baseia no repouso do líquido em nível mantido pela boia.



A injeção do combustível sob pressão torna a mistura mais adequada, pois vaporiza melhor o combustível e forma uma mistura mais precisa. Essas vantagens também são encontradas nos subsistemas de injeção indireta e injeção direta.

No subsistema de injeção indireta, a mistura é fornecida em fluxo contínuo imediatamente antes das válvulas de admissão, sendo que uma bomba injetora fornece pressão ao combustível que é enviado para uma unidade controladora de ar e combustível, a qual dosa a mistura e a envia a uma válvula distribuidora que, por sua vez, distribui a mistura em partes iguais aos bicos injetores de cada cilindro.

Já no subsistema de injeção direta, o combustível é injetado dentro do cilindro na fase de admissão enquanto o ar é aspirado separadamente, formando a mistura de ar-combustível na câmara de combustão. Nesse subsistema a bomba injetora não apenas fornece pressão ao combustível, mas também sincroniza seu fornecimento a cada cilindro, de acordo com o ciclo de funcionamento de cada um.



E de onde vem o combustível antes de chegar ao motor?

O combustível, antes de chegar ao motor, é submetido a um sistema que o armazena e fornece em quantidade adequada, aquecendo-o também, caso necessário, devido às condições de operação do motor aeronáutico convencional.

Sistema de combustível

O sistema de combustível é o responsável por armazenar e fornecer o combustível ao motor e, dependendo do sistema utilizado, o combustível pode ser fornecido por gravidade ou por pressão.

No sistema de alimentação por gravidade, o reservatório de combustível encontra-se em posição elevada em relação ao motor. Normalmente há mais de um tanque na aeronave, localizados nas asas ou sua seção central.

O piloto pode fazer a escolha dos tanques, por meio de uma válvula de seleção, ou seletora de combustível controlando assim o consumo e o balanceamento da aeronave. Essa mesma válvula também é utilizada para o corte de combustível em caso de emergência, como fogo no motor ou quando não estiver em operação.

Com relação ao sistema de alimentação por pressão, o combustível é enviado por uma bomba, bomba principal, a qual é acionada pelo motor. As aeronaves normalmente são equipadas por uma bomba auxiliar elétrica que funciona nas partidas, decolagens, pousos ou em grandes altitudes. Assim, caso haja uma falha na bomba principal, a bomba auxiliar deve ser capaz de suprir a necessidade de alimentação do motor.



Além da bomba principal e auxiliar, pode ainda existir outra pequena bomba elétrica, ou mesmo manual, para injetar a gasolina no tubo de admissão durante a partida.

Também fazem parte do sistema de combustível o indicador de quantidade de combustível, ou liquedômetro, normalmente individualizado por tanque, assim como filtros localizados em diversos setores de passagem de combustível e drenos, os quais têm a função de retirar água que eventualmente decante do combustível nos tanques após longos períodos de repouso.

Após o combustível ser injetado na câmara de combustão, tem-se início o processo da produção de uma centelha para iniciar a combustão, o qual está relacionado ao sistema de ignição.

Sistema de ignição

Ao ser admitido e comprimido adequadamente o combustível no cilindro, uma centelha produzida pela **vela de ignição** dará início à queima da mistura de ar-combustível. A vela, ilustrada na próxima figura, é um dispositivo que tem um eletrodo central, o qual recebe alta tensão em relação à massa, ligada à sua carcaça.

Essa diferença de potencial gera a centelha entre o pequeno espaço especificamente deixado entre o eletrodo e a massa com esse fim. Caso o espaço entre eletrodo e a massa seja excessivo, não ocorrerá a centelha, o mesmo acontece caso o eletrodo e a massa estejam se tocando.

Figura 1.13 – Vela de ignição



Fonte: Mercado Livre (2013).

Podemos observar na figura anterior que ao redor do eletrodo central existe um isolador, geralmente de cerâmica, de modo a evitar que este toque a carcaça, ou massa, ou mesmo que haja uma centelha fora do local específico.

O isolador também é responsável por distribuir o calor da vela de acordo com as especificações com as quais foi fabricado, que facilitará ou dificultará a dissipação do calor, sendo a vela, neste aspecto, classificada como quente, normal ou fria.



Se a vela trabalhar muito quente, pode causar a pré-ignição, queimando o combustível antes do tempo previsto. Caso trabalhe muito fria, tende a acumular resíduos da queima. Assim, a vela a ser usada em cada motor aeronáutico convencional é especificada pelo fabricante do motor.

A alta tensão elétrica necessária para causar a centelha na vela é gerada por um conjunto de componentes chamado de magneto, o qual é formado pelo **magneto** propriamente dito, que é um alternador que induz tensão alternada no enrolamento de uma **bobina**.

A corrente elétrica gerada no enrolamento primário da bobina é levada ao **aterramento** através do platinado, que funciona como se fosse uma chave interruptora. Assim, quando o platinado se abre, interrompe repentinamente a corrente elétrica e essa variação causa um aumento de tensão no enrolamento primário e, conseqüentemente, eleva a tensão no enrolamento secundário para mais de 10.000 volts.

Esse enrolamento secundário está ligado nos eletrodos da vela por intermédio do **distribuidor**, que é uma chave seletora rotativa, ajustada para fornecer coordenadamente a energia para cada uma das velas no seu tempo de ignição.

Ainda faz parte desse sistema a **chave de ignição**, que em paralelo com o platinado conduz a corrente elétrica à massa quando na posição desligada, inibindo a função do platinado, pois liga o enrolamento primário da bobina diretamente à terra. Na posição ligada, a chave de ignição se abre e a referida corrente passa pelo platinado que, ao abrir, causa a centelha na vela.

É formada por dois enrolamentos, o primário e o secundário. Quando a corrente elétrica varia no enrolamento primário, surge uma corrente induzida no enrolamento secundário.

Um circuito elétrico funciona por diferença de potencial elétrico. As diferenças de potencial são obtidas em relação a um referencial chamado de aterramento, massa ou terra. Em um motor, em geral, o aterramento é feito em sua própria carcaça.

A chave de ignição é geralmente montada junto a chaves individuais dos magnetos e à do motor de partida, conforme observamos na próxima figura. Assim, o piloto tem condições de checar antes da decolagem o funcionamento de cada magneto.

Figura 1.14 – Chave e magnetos



Fonte: FlyTech (2013).

É importante observar que, por medida de segurança, em aviação, todo sistema de ignição é duplicado, ou seja, existem dois magnetos (conjunto magneto, bobina, platinado e distribuidor) e também duas velas para cada cilindro. Desse modo, durante a operação do motor convencional de uma aeronave, ambos os sistemas funcionam em conjunto e, caso haja falha em um deles, o outro é capaz de manter o motor funcionando.

Observamos ainda que é prevista uma pequena queda de rotação do motor com o desligamento de um dos magnetos. Neste sentido, caso a queda for demasiada, indica uma deficiência no sistema de ignição correspondente ao magneto que está ligado. Se não houver queda, podemos nos deparar com uma falha no desligamento do magneto ou com uma falha no próprio magneto desligado, pois sua atuação não está fazendo qualquer diferença na rotação do motor.

Sistema de lubrificação

Durante o funcionamento do motor aeronáutico convencional, há, simultaneamente, diversas peças em movimento e em contato direto entre suas partes, gerando dessa forma o atrito que, além de causar aquecimento e desgaste das peças, dificulta o movimento. Assim, para minimizar o atrito entre as partes em contato e seu consequente desgaste, essas partes são submetidas a polimento e também a um sistema de lubrificação.

Tipos de lubrificação

A lubrificação é feita por meio da inserção de um óleo lubrificante entre as partes que estão em contato, aproveitando as propriedades de viscosidade, baixo ponto de congelamento e alto **ponto de fulgor** do óleo. Na sequência são apresentados os tipos de lubrificação.

É a temperatura em que o óleo inflama-se.

• Lubrificação por salpique

Por meio desse tipo de lubrificação o óleo é espalhado dentro do motor, nos locais adequados, pelo próprio movimento das peças. Na lubrificação por salpique o óleo que fica no fundo do cárter, por exemplo, é espalhado pela passagem da biela, sendo lançado para dentro do pistão e para as paredes do cilindro.



A lubrificação por salpique é extremamente simples, porém não é a mais eficiente, pois não consegue lubrificar todas as partes do motor, requerendo desse modo outro tipo de lubrificação mais sofisticado.

• Lubrificação por pressão

Este tipo de lubrificação força o óleo a percorrer os dutos de lubrificação por meio da pressão de uma bomba de óleo. Assim, o óleo chega por dutos dentro do eixo de manivelas e da biela até o pino do pistão e dele nas paredes do cilindro.

• Lubrificação mista

Na prática, em virtude da complexidade do sistema por pressão, sua utilização em todo o motor fica inviabilizada. Então, normalmente utiliza-se a lubrificação mista, pela qual peças como, por exemplo, o cilindro e os pinos dos pistões são lubrificadas por salpique e outras, como o eixo de manivelas e o eixo de comando de válvulas, são lubrificadas por pressão.

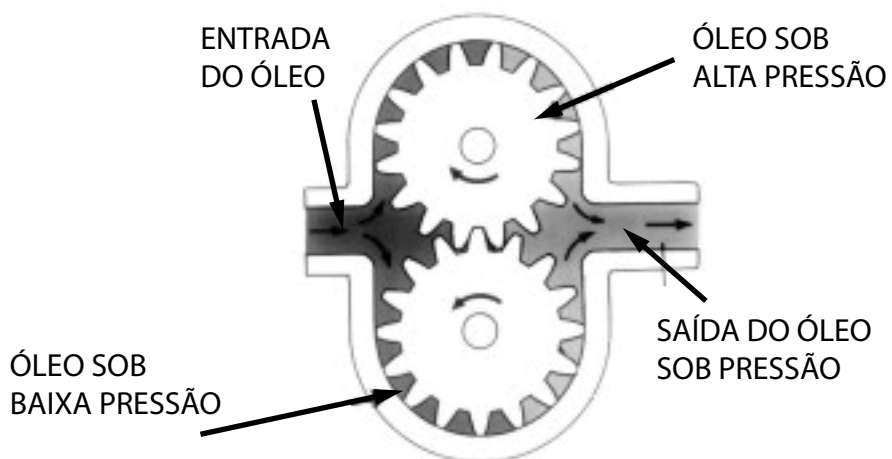
Ciclo do óleo lubrificante

O ciclo do óleo lubrificante começa no **reservatório**, que em motores convencionais de aviação de “**cárter molhado**”, é o próprio cárter; já em motores convencionais de “cárter seco”, existe um reservatório específico para o óleo. Pelo fato de ocorrerem perdas normais de óleo por vazamento, vaporização ou queima, é importante que o nível de óleo no reservatório seja verificado nos pré-voos e inspeções de rotina.

O cárter é a carcaça que sustenta as demais peças do motor, a qual pode ser modelada para armazenar o óleo lubrificante e, neste caso, é chamada de “cárter molhado”. Se o óleo é armazenado em reservatório específico para isso, dispensa essa função do cárter, sendo o mesmo chamado de “cárter seco”.

O óleo do reservatório é movimentado pelo motor por força da bomba de óleo, que normalmente é do tipo bomba de engrenagens, ilustrada na sequência. Esta, conforme sua finalidade, retira o óleo do reservatório e envia ao motor (bomba de pressão, ou recalque), ou recolhe o óleo do motor e envia de volta ao reservatório (bomba de retorno, recuperação).

Figura 1.15 – Bomba de engrenagens



Fonte: Reis (1999).

A partir do reservatório, o óleo trafega por dutos específicos em direção às peças do motor, passando por **filtros** e **válvulas**.

Filtros

Os filtros, cujo elemento filtrante pode ser de tela metálica, discos ranhurados ou papelão especial corrugado, servem para retirar impurezas que porventura estejam presentes no óleo, e assim evitar que essas danifiquem as peças do motor.



Os filtros devem ser regularmente verificados para substituição do elemento filtrante, e, caso seja constatada eventual presença de resíduos metálicos nos mesmos, deve ser investigada a causa da presença desses resíduos, pois normalmente são oriundos de desgaste anormal de peças.

Válvulas

As válvulas que compõem o sistema de lubrificação podem ser de vários tipos, sendo normalmente encontradas as **válvulas reguladoras de pressão**, que são colocadas nos dutos de transporte do óleo, também chamados de linhas, por medida de segurança, abrindo-se e retornando parte do óleo ao reservatório, caso a pressão seja excessiva.

Dentre essas válvulas reguladoras, temos as **válvulas unidirecionais**, que impedem que o óleo trafegue no contrafluxo, mesmo com a queda da pressão; e as **válvulas de contorno**, ou *by-pass*, que servem para dar uma passagem alternativa para o óleo no caso de obstrução de alguma parte da linha, tais como os filtros, que podem ficar obstruídos repentinamente.



Caso a temperatura do óleo se eleve demais em virtude do contato com as partes quentes do motor, um termostato faz com que ele passe através de um **radiador**, que serve para reduzir sua temperatura, recuperando-lhe a viscosidade.

Ao finalizar seu ciclo, o óleo escorre para um tanque **decantador** e daí é filtrado e bombeado de volta ao reservatório, sendo que

em alguns motores aeronáuticos o próprio reservatório funciona como decantador.

É importante observar que o sistema de lubrificação deve ser monitorado por meio da checagem do nível do reservatório e verificação do estado dos filtros tanto nos períodos de pré-voos quanto nas manutenções periódicas. Entretanto, durante o funcionamento do motor, o piloto deve estar atento aos instrumentos que indicarão qualquer anormalidade no sistema, ainda que as válvulas estejam presentes para contornar algumas irregularidades previsíveis.

Entre os mencionados instrumentos indicativos estão o **manômetro do óleo** e o **termômetro do óleo**, os quais devem indicar valores na “faixa verde” na operação regular. Particularmente, o manômetro deve ser observado atentamente na partida do motor, situação na qual o óleo pode estar frio e, portanto, com viscosidade maior que a de operação o que confere pressões maiores, aceitáveis apenas por curto período de tempo.

Caso a alta pressão do óleo persista por mais tempo que o previsto (geralmente 30 segundos), a partida deve ser interrompida para evitar dano no motor por deficiente lubrificação.

Sistema de resfriamento

A eficiência de um motor convencional de aviação é obtida pela alta temperatura de combustão. No entanto, seus componentes podem ser seriamente danificados com a operação em elevada temperatura.

Apesar de o sistema de lubrificação contribuir com a retirada do calor das peças do motor com a passagem do óleo, o qual, se preciso, é resfriado no radiador antes de continuar seu ciclo, o referido sistema não é o bastante para refrigerar adequadamente o motor, tornando-se necessária a criação de um sistema exclusivo para esse fim.

O sistema mais simples de refrigeração para motores aeronáuticos é o de **resfriamento a ar**, que é um sistema leve e barato, porém

não permite um controle efetivo da temperatura do motor pelo piloto e, por isso, tende ao superaquecimento. Entretanto, em motores convencionais, cujo resfriamento é a ar, existem folgas maiores entre as peças a fim de comportar as dilatações causadas pelo aquecimento, refletindo em perda de eficiência.

O princípio dessa refrigeração é que o vento relativo que incide na aeronave seja desviado adequadamente para que passe por aletas instaladas nas partes quentes do motor. Nesse sistema de arrefecimento a ar podem ainda ser utilizados defletores e flapes de arrefecimento, podendo estes últimos ser ajustados pelo piloto em voo.

O sistema de arrefecimento a ar mais sofisticado utilizado em aeronaves é o sistema de **resfriamento a líquido**, o qual se utiliza de um fluido, normalmente água, que passa pelos cilindros. Esse sistema proporciona melhor controle e maior resfriamento, porém é mais complexo, pesado e caro. Os motores com resfriamento a líquido podem ter folgas menores entre as peças, pois a dilatação é menor, refletindo em maior eficiência.



A temperatura do motor de uma aeronave deve permanecer dentro de uma faixa definida de operação, pois temperaturas muito baixas podem fazer com que o motor pare por liquefação do combustível e temperaturas muito altas podem causar diversos outros efeitos nocivos como pré-ignição, distorção e rachadura de peças, lubrificação deficiente, entre outros.

Em grandes altitudes ou em locais mais frios, assim como em descidas prolongadas com o motor em marcha lenta, devemos ficar atentos aos limites inferiores da faixa de temperatura definida. Em se tratando de climas quentes, devemos observar os limites superiores.

É importante observar que existem alguns recursos adicionais para diminuir a temperatura de um motor aeronáutico convencional como reduzir a potência, aumentar a velocidade por altitude e enriquecer a mistura. Este último recurso, apesar de aumentar o consumo, esfria o motor por excesso de combustível.

Seção 3 – Operação dos motores aeronáuticos convencionais

Quando estudamos a operação de motores aeronáuticos convencionais é necessário conhecer alguns conceitos e definições relativos ao desempenho dessas máquinas, também conhecido como performance, cuja avaliação se dá pela potência desenvolvida nas diversas condições de operação.

Potência

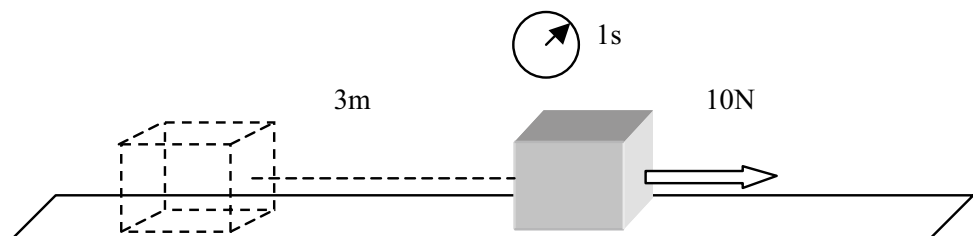
Potência é a medida do trabalho, o qual se refere ao deslocamento causado em um corpo por uma força nele aplicada, desenvolvido por unidade de tempo. Seja P (potência) = T (trabalho)/ t (tempo). Onde $T = F \times d$ (Força vezes distância).



Uma força de 10 Newtons desloca uma massa por 3 metros. O trabalho desenvolvido foi de $10 \times 3 = 30$ Newtons.metro, ou 30 N.m, ou, ainda, 30 Joules (30J). Caso esse trabalho tenha sido realizado em 1 segundo, teremos uma potência de 30J/s, ou 30 Watts (30W).

Podemos observar na figura a seguir a representação gráfica do exemplo apresentado.

Figura 1.16 – Potência



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

Em aviação, costumamos usar mais as unidades de medida do sistema inglês para potência. Assim, o trabalho realizado para elevar uma massa de 76 quilogramas a uma altura de 1 metro no tempo de 1 segundo é chamado de **1HP** (*Horse Power*).

Parâmetros de potência de um motor de aeronave

A potência de um motor depende de vários parâmetros, dentre eles cilindrada, eficiência e rotação.

Cilindrada

A cilindrada refere-se ao volume percorrido pelo pistão no seu curso, o qual diz respeito ao deslocamento do pistão no cilindro. Cabe destacar que quando o pistão está no ponto morto alto, parte superior de um cilindro, ainda sobra um espaço na câmara de combustão, na qual a mistura está comprimida e que possibilita o movimento das válvulas e acomodação da vela. Esse espaço não é computado para a cilindrada.



No caso de um motor aeronáutico convencional multecilindros, considera-se como sua cilindrada o volume total de deslocamento em todos os cilindros.

Eficiência

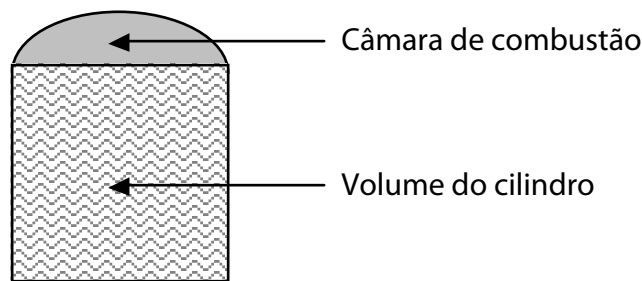
Eficiência, ou rendimento, é a razão entre a energia mecânica produzida pelo motor e a energia calorífica consumida para produzir essa energia mecânica. Nos motores convencionais de aviação, essa razão gira em torno de 25 a 30%.

A eficiência pode ser melhorada com uma melhor construção do motor, por exemplo, a diminuição de folgas, sistemas de refrigeração mais eficientes, melhor alimentação, entre outros, ou pelo aumento da **taxa de compressão**.

Essa taxa diz respeito ao quociente entre o volume total do cilindro e o volume da câmara de combustão. O volume da taxa de compressão atinge valores de 8:1, ou seja, o volume total do cilindro é oito vezes o volume da câmara de combustão.

A figura a seguir ilustra a relação entre a câmara de combustão e volume do cilindro.

Figura 1.17 – Relação entre volume da câmara de combustão e volume do cilindro



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

Cabe destacar que valores de taxa de compressão maiores que 8:1 representariam maior compressão da mistura. No entanto, na prática, se mostram inconvenientes, pois tendem a detonar a mistura antes do tempo previsto.

Rotação

A tração de aeronaves que dispõem de motores convencionais é realizada por meio de um conjunto com a hélice, que forma o que chamamos de Grupo Moto Propulsor (GMP). A eficiência da tração gerada pela hélice depende da sua rotação, da velocidade da aeronave e do seu ângulo de torção, pois esses fatores determinam as características aerodinâmicas do aerofólio, que constitui cada pá da hélice.

Com rotação excessivamente baixa, a hélice não tem a velocidade ideal para tracionar a aeronave, porém rotações muito altas fazem com que suas pontas atinjam velocidades próximas à do som, reduzindo o rendimento.

Dessa forma, os motores convencionais de aviação geralmente são de baixa rotação e **torque** elevado, o que se consegue com grandes cilindradas. Existe também a possibilidade de a rotação da hélice ser reduzida em relação à rotação do motor por meio de sistemas de redução por engrenagens.

É a capacidade de uma força de produzir rotação. Sua intensidade é medida pela intensidade da força aplicada, multiplicada pela distância do ponto de aplicação ao eixo de rotação.

Valores referenciais de potência

Na operação de motores aeronáuticos convencionais, devemos conhecer uma série de valores referenciais de potência, que são nominados adequadamente conforme listado a seguir:

Potência teórica: É a potência liberada pela queima do combustível e representa o total de energia nele contida. É mensurada em laboratório por um aparelho chamado calorímetro, o qual mede a transferência de calor da queima para uma quantidade de água.

Potência indicada: É a potência desenvolvida pelos gases queimados sobre o conjunto pistão-biela. A potência indicada é mensurada por meio da tomada de pressões no interior do cilindro. Como existe uma restrição na taxa de compressão, ou seja, a mistura não pode ser comprimida a valores muito altos, nesse processo há uma perda significativa de potência.

Potência efetiva: É a potência fornecida diretamente ao eixo, sendo que em sua mensuração são consideradas as perdas por atrito das peças internas. Para mensurar a potência de atrito das peças internas, colocam-se hélices calibradas que são giradas por meios externos ao motor, sendo que a potência necessária para girar essas hélices é considerada como potência de atrito, ou seja, o motor gasta essa potência apenas para girar a hélice. As hélices usadas nos testes são chamadas de molinetes.

Potência máxima: Como nome já diz, é o valor da máxima potência efetiva que um motor pode fornecer. Geralmente supera a potência recomendada, mas pode ser usada com segurança por intervalos limitados de tempo, tal como na decolagem ou arremetida da aeronave.

Potência nominal: É a potência efetiva máxima para a qual o motor aeronáutico foi projetado e na qual ele pode funcionar indeterminadamente sem limitações.

Potência útil: É a potência transmitida à aeronave. Para determiná-la, basta multiplicar a potência efetiva pela eficiência da hélice. Por exemplo, um motor de aviação convencional com potência efetiva de 200 HP equipado com uma hélice que tem

eficiência de 85% (0,85) em uma determinada rotação, terá potência útil de 170 HP.

Potência necessária: É a potência que a aeronave, em uma determinada configuração e condições externas, necessita para se manter em voo nivelado em uma determinada velocidade.

Potência disponível: É a potência útil máxima que o GMP pode fornecer a aeronave nas condições em que ele se encontra (altitude, temperatura, velocidade).

Controle da potência de um motor aeronáutico convencional



Como o piloto controla a potência de uma aeronave?

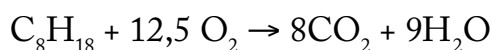
A potência de um motor aeronáutico convencional, de forma geral, é elevada ou reduzida por meio do manete de potência, que regula a abertura da borboleta do carburador, aumentando ou reduzindo a quantidade de ar admitido no motor.



O ar, que é composto de diversos gases, dos quais apenas o oxigênio representa aproximadamente 21% do volume de sua constituição, toma parte na combustão. Esses 21% em volume de oxigênio no ar correspondem a, aproximadamente, 23% da massa do ar.

É importante observar que em uma reação na qual os reagentes sejam a gasolina comum, cuja fórmula química é C_8H_{18} , e o oxigênio, de fórmula O_2 , em que haja uma combustão completa, ou seja, naquela em que todo o oxigênio e todo o combustível são consumidos, os produtos gerados são gás carbônico e água, cujas fórmulas são, respectivamente, CO_2 e H_2O .

A equação química balanceada da combustão completa da gasolina é expressa a seguir:



Efetuada-se o cálculo da massa correspondente de gasolina e oxigênio para se conseguir esta relação em moléculas, teremos a relação de 1 unidade de massa de gasolina para 15 unidades de massa de ar com 23% de oxigênio. Desse modo, para obtermos uma combustão completa da gasolina, necessitamos 15 vezes de sua massa em ar.

A essa razão damos o nome de **mistura** e podemos indicar por 15:1 ou 1:15, sendo que o número maior corresponde à quantidade de ar. Essa indicação pode ser usada para outras relações de mistura que não a ideal para a combustão completa, como, por exemplo, mistura 10:1 indicando 10 partes de ar para 1 parte de gasolina.

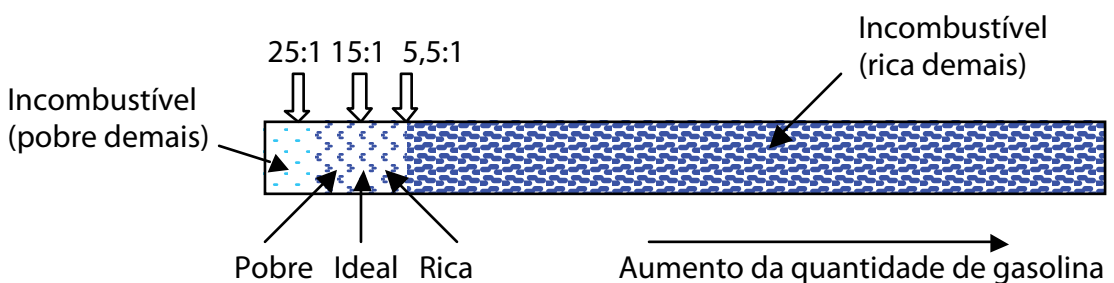
Observe que a palavra “mistura” está sendo usada para definir uma relação entre ar e combustível em uma composição desses dois elementos. Assim, quando falamos em “mistura” estaremos nos referindo à relação entre ar e combustível.



Uma mistura com maior quantidade de ar que a ideal é chamada de **mistura pobre** e a mistura com maior quantidade de combustível que a ideal é chamada de **mistura rica**.

Existem limites para se diminuir ou aumentar a proporção de gasolina na mistura, pois uma mistura por demais rica não queima por falta de ar, ao passo que a mistura pobre demais, não queima por falta de gasolina. Esses limites definem as **misturas incombustíveis**, que são as mais pobres que 25:1 e as mais ricas que 5,55:1, conforme podemos observar na seguinte figura:

Figura 1.18 – Mistura



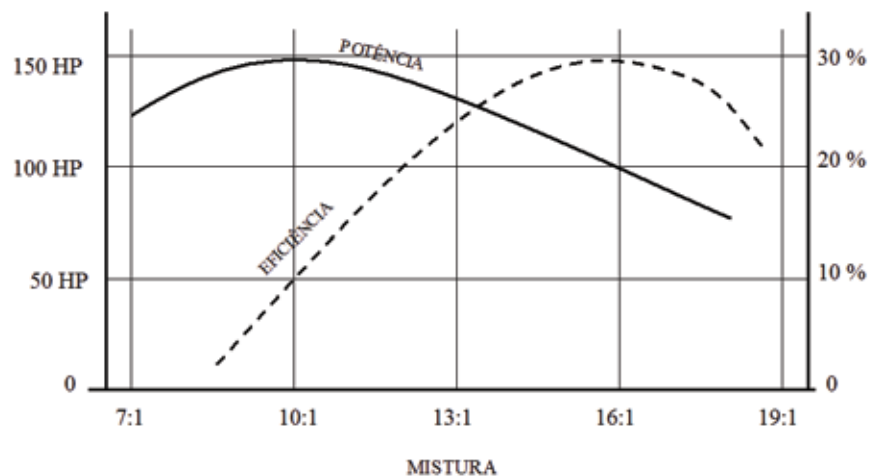
Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

Uma mistura de ar-combustível mesmo que não se encontre na proporção ideal, mas esteja dentro da faixa combustível, o motor irá funcionar com características particulares.

Assim, se a mistura for rica, após a combustão sobrar gasolina não queimada e o motor funcionará com maior potência, porém perderá em eficiência. Se a mistura for pobre, sobrar oxigênio não queimado após a combustão e a potência do motor será menor, em virtude da falta de combustível; contudo, a eficiência será maior, pois todo o combustível disponível será aproveitado.

O gráfico expresso na figura a seguir, adaptado de Homa (2012, p. 56), mostra como se comporta a relação potência versus eficiência à medida que se altera a composição da mistura. Repare que a mistura rica (10:1) produz potência de 150 HP; entretanto, com eficiência de apenas 10%. Já a mistura pobre (16:1) reduz a potência para 100 HP, mas aumenta a eficiência para 30%.

Figura 1.19 – Potência e eficiência x Mistura



Fonte: Adaptado de Homa (2012).

Podemos observar na figura apresentada que a mistura ideal otimiza a potência e a eficiência.

É interessante observar também que, na prática a mistura 15:1 não é utilizada, pois, devido às limitações do motor aeronáutico real, a combustão não se dá por completo, deixando resíduos de gasolina e de oxigênio. Logo, é preferível utilizar uma mistura levemente pobre, que venha a garantir um desempenho bem próximo do ideal, porém sem desperdiçar combustível.

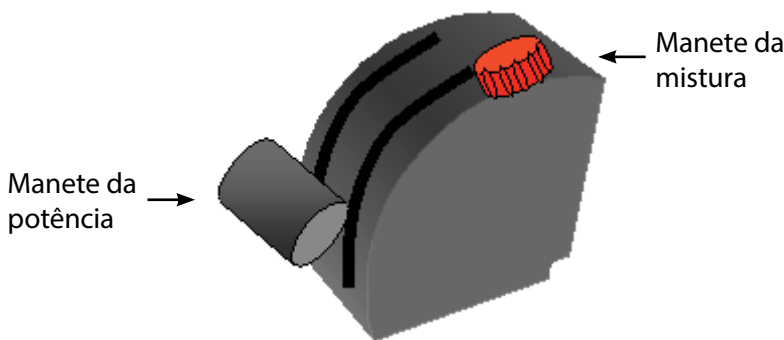
Fases operacionais do motor aeronáutico convencional

É possível relacionarmos a aplicação de potência, pela quantidade de ar fornecida ao motor e pela relação ar-combustível da mistura, com as fases operacionais de: **marcha lenta, decolagem, subida, cruzeiro, aceleração e parada**. A potência nessas fases é controlada por meio do manete de potência e do manete de mistura, conforme ilustra as figuras na sequência.

Fase operacional de marcha lenta

Nessa fase, o motor da aeronave trabalha na sua potência mínima, a qual é suficiente para se manter em funcionamento.

Figura 1.20 – Posição dos manetes em marcha lenta



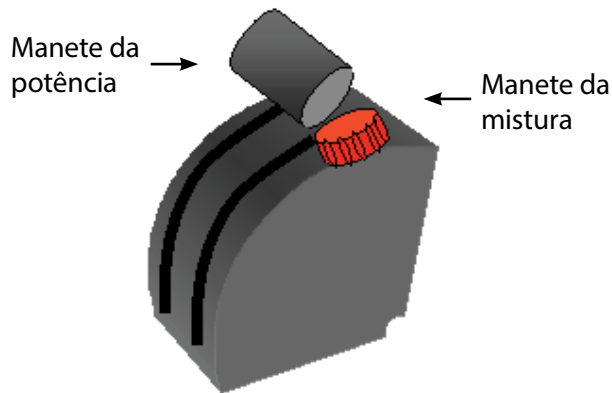
Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

Podemos verificar nessa figura que o manete da potência está no batente reduzido e a quantidade de ar que é admitida no motor depende da regulagem de marcha lenta feita. Já o manete da mistura estará todo à frente, mantendo a mistura rica para compensar a perda causada pela operação em marcha.

Fase operacional de decolagem

Na decolagem de uma aeronave é exigida a máxima potência de seu motor, assim o manete da potência estará a pleno (todo à frente) e a mistura rica (10:1), conforme observamos na próxima figura.

Figura 1.21 – Posição dos manetes para decolagem



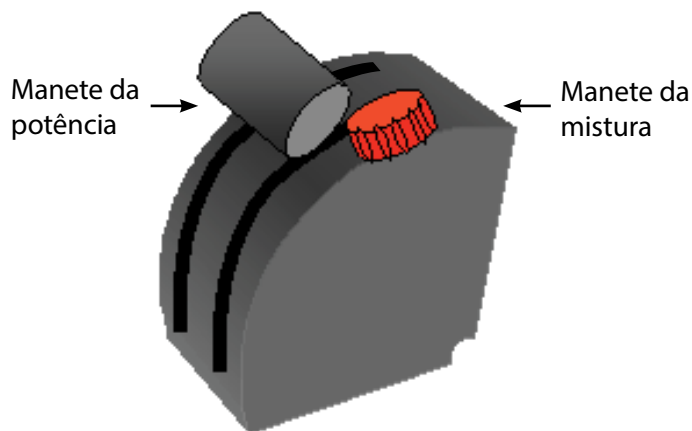
Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

É importante destacar que este regime de potência somente poderá ser utilizado por tempo limitado. Dessa forma, na decolagem utilizamos esse regime por dois ou três minutos apenas, contudo, caso o piloto, por exemplo, quiser subir com a potência máxima, permanecendo por períodos de tempo superiores nesse regime, irá causar danos no motor.

Fase operacional de subida

Para essa fase operacional, o manete de potência deverá ser reduzido para uma posição em que o motor possa operar com grande potência, mas por tempo indeterminado, sendo ajustada a máxima potência contínua.

Figura 1.22 – Posição dos manetes na subida



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

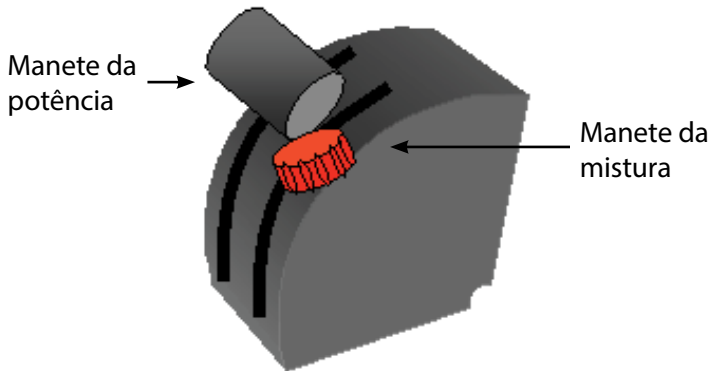
Durante a referida fase, a mistura deverá estar levemente rica (12,5:1), mas à medida que a aeronave ganha altitude, o ar se torna mais rarefeito, tornando a mistura rica demais. Assim, o manete da mistura deve ser ajustado no processo que chamamos de correção altimétrica, na qual é feita empobrecendo da mistura, ou seja, deslocando o manete para trás e verificando o tacômetro.

À medida que a mistura se aproxima da ideal, a rotação do motor aumenta, atinge um máximo e começa a cair novamente, pois, ao atingir o máximo, o piloto retorna o manete um pouquinho para a frente, tornando a mistura levemente rica para aquela altitude.

Fase operacional de cruzeiro

É a fase que supostamente a aeronave permanecerá por mais tempo em deslocamento ou exercício local, para qual é utilizada uma mistura levemente pobre, para economizar combustível (16:1).

Figura 1.23 – Posição dos manetes em cruzeiro



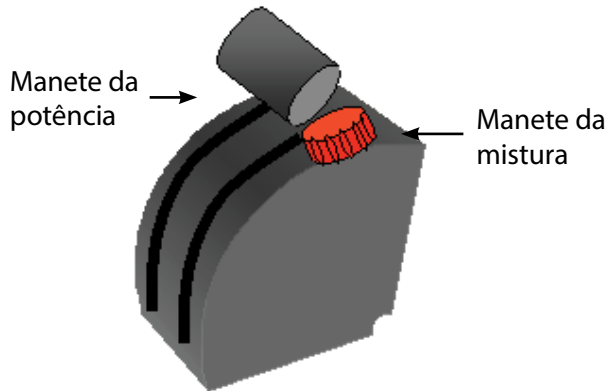
Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

Podemos observar nessa figura que o manete deve ser ajustado para a rotação recomendada pelo fabricante e o piloto deverá verificar frequentemente a rotação do motor no tacômetro.

Fase operacional de aceleração

Esta fase diz respeito à situação em que o piloto necessita acelerar imediatamente a aeronave em voo, e normalmente está relacionada a uma arremetida.

Figura 1.24 – Posição dos manetes em aceleração



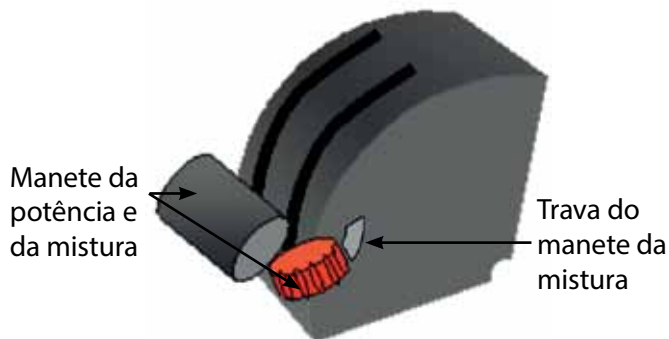
Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

Cabe destacar que o motor aeronáutico convencional é composto por um sistema que enriquece a mistura, injetando combustível adicional no caso de o manete de potência ser levado à frente.

Fase operacional de parada

A fase operacional de parada ou corte do motor ocorre quando se interrompe o funcionamento do mesmo. Primeiramente, o motor é levado à marcha lenta e então a interrupção é feita com o corte da mistura em vez do corte da ignição. Esse procedimento permite que todo o combustível nos cilindros seja queimado por completo, não restando resíduos que possam diluir o óleo ou causar outros danos ao motor.

Figura 1.25 – Posição dos manetes no corte do motor



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

Para se evitar o corte inadvertido do aeronáutico convencional, o manete da mistura geralmente tem uma trava que deve ser liberada para que o motor possa ser cortado, conforme observamos na figura anterior.



Síntese

Neste estudo você conheceu as partes que compõem a estrutura principal de um motor aeronáutico convencional, as quais tornam possíveis as reações necessárias para a correta e eficiente transformação da energia térmica em mecânica.

Entendeu que a vida útil de um motor convencional de uma aeronave não depende apenas dos cuidados mecânicos e revisões ao qual é submetido, mas principalmente dos cuidados em sua operação, pois quando esse tipo de motor for utilizado conforme as especificações do fabricante terá melhor rendimento e os serviços de manutenção realizados em períodos programados e não quando há problema, o que torna o motor mais confiável.

Por fim, conheceu os sistemas que não estão diretamente relacionados ao processo de transformação de energia calorífica em mecânica, mas que são fundamentais para que este processo ocorra adequadamente, e estudou a operação de um motor aeronáutico convencional de acordo com as especificações do fabricante, de forma a obter o melhor rendimento desta máquina.



Atividades de autoavaliação

- 1) A partir de nossos estudos referentes aos anéis de segmento dos motores aeronáuticos convencionais, assinale V ou F conforme as afirmativas sejam, respectivamente, Verdadeiras ou Falsas:
 - () Todos os anéis de segmento de um mesmo pistão são idênticos.
 - () A grande vantagem dos anéis iguais é que são intercambiáveis.
 - () Cada anel de segmento tem uma função específica e distinta.
 - () Um pistão deve ter no mínimo oito anéis de segmento.

- 2) De acordo com o conteúdo estudado, relacionado aos componentes dos motores aeronáuticos convencionais, assinale V ou F em cada uma das afirmações a seguir conforme elas sejam, respectivamente, Verdadeiras ou Falsas:
 - () As aletas servem para sustentar as válvulas na cabeça do cilindro.
 - () Não é possível construir cilindros de liga leve, pois o atrito no interior é muito grande.
 - () As válvulas de admissão e de escape têm características físicas distintas.
 - () A mistura ar-combustível ajuda na refrigeração da válvula de admissão.



Saiba mais

BIANCHINI, Denis. **Conhecimentos técnicos – piloto privado**. Bianch Pilot Training, 2012.

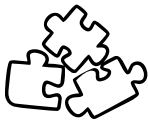
MARTINS, Jorge. **Motores de combustão interna**. 4 ed. [s/l]: Publindústria, 2013.

Princípios básicos de motores aeronáuticos convencionais



Objetivos de aprendizagem

- Conhecer os princípios básicos do funcionamento de motores aeronáuticos convencionais.
- Entender as fases de operação de um motor aeronáutico convencional a quatro e a dois tempos.



Seções de estudo

Seção 1 Funcionamento de motores aeronáuticos convencionais

Seção 2 Motores convencionais de aviação a quatro tempos

Seção 3 Motores convencionais de aviação a dois tempos



Para início de estudo

Nesta leitura você estudará as especificidades quanto ao funcionamento dos motores aeronáuticos convencionais, que são motores térmicos, ou seja, transformam a energia calorífica em energia mecânica por meio da aplicação pura de leis físicas usuais como, por exemplo, compressão e expansão de gases, trocas de temperatura e combustão.

Conhecerá cada etapa de funcionamento desses motores os quais, para transformar a energia calorífica em mecânica adequadamente, admitem o ar atmosférico do meio no qual estão imersos e realizam uma mistura bem equilibrada desse ar com o combustível para que ocorra uma reação de combustão, a qual irá gerar grande expansão de gases.

Por fim, verá que a energia dessa expansão será aproveitada para mover a hélice que dará a tração necessária para a aeronave, e entenderá que o processo de obtenção de energia mecânica por meio da combustão em um motor aeronáutico convencional é geralmente realizado de duas formas: ciclos de quatro e de dois tempos.

Seção 1 – Funcionamento de motores aeronáuticos convencionais

É a resistência causada pela aeronave pelo seu próprio deslocamento no ar. Essa resistência é proporcional à área frontal, ou seja, a área que é vista ao ser observada de frente.

O voo de uma aeronave depende do equilíbrio de forças que, em conjunto, fazem com que ela siga a trajetória desejada pelo piloto. Assim, para se contrapor ao seu peso, força que tende a trazer a aeronave para o chão, deve ser gerada a força de sustentação, uma das componentes da resultante aerodinâmica que também inclui o **arrasto**.

Para compensar o arrasto é necessário haver uma tração, a qual, em geral, é implementada por um motor como, por exemplo,

o motor convencional de aviação, dispositivo que transforma energia térmica em mecânica.

Princípio de funcionamento dos motores aeronáuticos convencionais

De maneira geral, todos nós estamos acostumados a tirar proveito do trabalho dos motores, os quais são dispositivos projetados para transformar determinado tipo de energia em movimento e estão presentes em diversas máquinas que fazem parte do nosso dia a dia.

O motor elétrico utilizado em um ventilador, por exemplo, transforma energia elétrica em energia mecânica, possibilitando o movimento das pás que geram o vento. Já os motores à combustão interna, utilizados, por exemplo, em automóveis, transformam energia térmica em mecânica.



Quando se trata de motores para aviação, há alguns requisitos fundamentais que são exigidos aos mesmos em virtude da singular operação realizada toda vez que uma aeronave alça voo.

Assim, dentre os diversos tipos de motores existentes, apenas alguns satisfazem as condições que tornam viável e segura a sua utilização em aeronaves. Segundo Homa (2012), entre as qualidades mais importantes exigidas a um motor aeronáutico estão a confiabilidade, leveza, facilidade de manutenção, durabilidade e economia.

Confiabilidade

A confiabilidade em um motor de aviação é fundamental para a operação de uma aeronave, cuja atividade é bastante arriscada e seu sucesso depende do correto funcionamento de todos os seus componentes, em especial seus motores, pois a falha desse componente em pleno voo, diferentemente da falha de um motor de automóvel que está em terra firme, geralmente significa queda com consequências negativas e incalculáveis.

Leveza

Na aviação o peso é um fator crítico. Desse modo, a relação entre massa e potência de um motor aeronáutico, chamada de leveza, tem extrema importância. Muitos motores possuem rendimento elevado, o qual é obtido pela relação entre a energia mecânica gerada e a energia original fornecida, como é o caso de grandes motores elétricos.

Entretanto, os motores elétricos, apesar de possuírem bom rendimento, são muito pesados, sendo ineficientes para uso em aviação, atividade na qual, mais importante que a eficiência energética, é a relação entre o peso do motor e a potência fornecida.

Facilidade de manutenção

A confiabilidade de um motor aeronáutico é garantida pelo fabricante desde que sua operação ocorra conforme o recomendado. Dessa forma, peças que se desgastam e fluidos que perdem suas características devem ser substituídos periodicamente.

A manutenção, além de ser realizada de acordo com as recomendações previstas pelo fabricante, deve permitir que a montagem e desmontagem do motor seja facilitada, de forma a não deixar a aeronave indisponível por tempo excessivo em manutenções, evitando assim o custo relacionado ao fato de a aeronave não estar em operação, além das possíveis falhas advindas de uma complexa cadeia de operações técnicas.

Durabilidade

Após um determinado número de horas de operação, o motor deve sofrer uma revisão geral, na qual certos procedimentos devem ser realizados como, por exemplo, troca de peças com horas vencidas ou com desgaste. O período de tempo estipulado para a realização desses procedimentos é chamado de *time between overhauls* (TBO), o qual define a durabilidade do motor e é determinado pelo fabricante.

Economia

A economia, sem dúvida, é uma qualidade desejável por todo usuário de um motor de qualquer equipamento, afinal, a utilização de um motor pouco econômico representa elevação nos custos de operação. Contudo, na aviação, além desse custo, a economia representa também autonomia de voo que é particularmente importante não apenas em termos financeiros, mas, principalmente, em termos de segurança.

Da mesma forma que a leveza, o peso é um fator crítico também no que se refere à economia, visto que em aviação um motor que não seja econômico, além de consumir mais, terá de carregar maior quantidade de combustível para voar o mesmo período de tempo que um motor mais econômico.

Demais fatores

É importante observar que, além desses fatores apresentados, há outros que devem ser levados em consideração quando estudamos motores aeronáuticos, entre eles estão a suavidade de funcionamento ou ausência de vibrações excessivas, o excedente de potência para decolagem, a pequena área frontal, a flexibilidade de operação, ou seja, a capacidade de operar de forma confiável e eficiente sob uma diversa gama de condições atmosféricas, entre outras.

Tipos de motores

Os motores são dispositivos que transformam um determinado tipo de energia em energia mecânica. Assim, podemos ter motores hidráulicos, motores pneumáticos, motores elétricos, motores térmicos, entre outros.



Qual desses motores é o mais eficiente para a aviação?

Em virtude de características como compatibilidade, praticidade, dentre outras, atualmente, os motores térmicos,

cujo funcionamento é apresentado na sequência, são os mais adequados para o uso em aviação.

Motores térmicos

Em especial, os motores térmicos transformam, por meio de uma **reação de combustão**, energia calorífica em energia mecânica. Essa reação pode ser executada dentro ou fora do motor e, de acordo com o local em que ela ocorre, os motores podem ser classificados em motores de combustão externa e interna.

Reação química que tem como reagentes um combustível, geralmente um hidrocarboneto, e um comburente, usualmente o oxigênio do ar, a qual gera, além de produtos resultantes da combinação desses reagentes, grande quantidade de energia térmica.

■ Motores de combustão externa

Este tipo de motor é caracterizado pela queima do combustível para obtenção de energia térmica, em um local distinto ao ponto de geração da energia mecânica, sendo a transmissão de energia entre esses locais feita, normalmente, a partir da expansão de um fluido.

Nesse sentido, o motor de combustão externa apresenta grande versatilidade quanto ao tipo de combustível a ser queimado, pois o local da combustão pode ser adaptado independentemente do local da geração de movimento.



Motor a vapor no qual a queima de combustível, seja lenha ou carvão, ocorre em uma caldeira externa ao sistema mecânico, que aquece a água cujo vapor deslocará um pistão, gerando o movimento.

A figura na sequência ilustra um antigo veículo tracionado por um motor a vapor.

Figura 2.1 – Locomotiva a vapor exposta no Parque Malwee



Fonte: Acervo do autor (2013).

Podemos verificar na figura apresentada o reservatório de vapor e, acima deste, o sistema mecânico que transmitia o movimento às rodas do veículo.

■ Motores de combustão interna

Nos motores de combustão interna, o combustível é queimado no mesmo local em que é produzida a energia mecânica, ou seja, no interior do motor, gerando grande potência, fazendo com que esse tipo de motor seja muito mais compacto que o de combustão externa. Essas características tornam os motores de combustão interna os mais utilizados atualmente em aviação.



Mas de que forma a energia mecânica é transformada em força de propulsão em uma aeronave?

Todos os motores térmicos têm a característica de transformar a energia calorífica em energia mecânica por meio do fluxo de uma massa fluida que passa através dele. Essa energia calorífica é liberada em uma posição do ciclo de funcionamento em que a pressão é bastante alta. Entre esses motores térmicos de aviação temos os motores aeronáuticos a reação e convencionais.

Nos **motores aeronáuticos a reação**, por exemplo, a expansão dos gases de combustão para trás gera o movimento da aeronave para a frente por meio do princípio da terceira Lei de Newton, ação e reação, (daí o nome de motor a reação), ou seja, a força motora é obtida a partir da ação de deslocamento de uma massa para trás, os gases resultantes da combustão, que geram a reação de movimento de outra massa para a frente, a aeronave.



Entre os tipos de motores aeronáuticos a reação temos motor turbo-hélice, cuja maior parte da energia do jato é utilizada para tracionar a hélice.

Já em **motores aeronáuticos convencionais**, a combustão gera expansão de gases dentro do próprio motor movimentando um pistão, que, por sua vez, movimenta um eixo que gira uma hélice. Nesses motores a função da hélice é impulsionar grandes massas de ar no sentido contrário ao de deslocamento da aeronave. Contudo, essa massa impulsionada não é resultado da combustão que ocorreu no interior do motor, como no caso do motor a reação.

A próxima figura ilustra uma aeronave que utiliza o motor aeronáutico convencional.

Figura 2.2 – Aeronave da Força Aérea Brasileira com motor convencional



Fonte: SempreFS (2013).

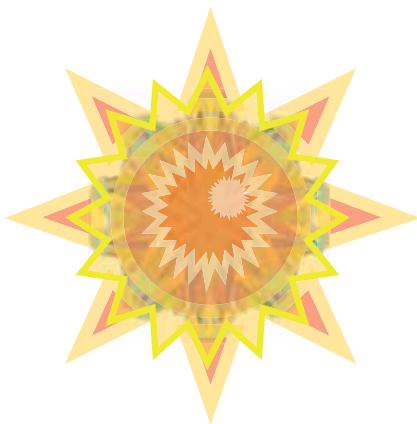
Observamos nessa figura uma aeronave de treinamento da Força Aérea Brasileira utilizada na instrução básica dos cadetes. Este tipo de motor, além do baixo consumo, baixo custo e simplicidade de manutenção, adéqua-se bem a voos a baixa altitude e velocidade, característicos da instrução básica em aeronaves.

Para que possamos entender o processo de transformação da energia térmica em mecânica, vamos analisar um dispositivo que aproveita a energia calorífica de uma combustão explosiva e a transforma em movimento. Assim, por meio desta análise compreenderemos melhor as fases de trabalho de um tipo de motor térmico, o motor convencional.

Transformação da energia térmica em mecânica de um motor convencional

Quando a combustão de uma mistura de ar-combustível ocorre em condições de alta pressão e volume reduzido, tendemos a obter uma explosão com expansão violenta dos gases resultantes, e como não existe uma direção preferencial de deslocamento, há uma expansão espacial, tal como uma esfera que cresce de forma abrupta, conforme observamos na figura seguinte.

Figura 2.3 – Explosão com expansão esférica

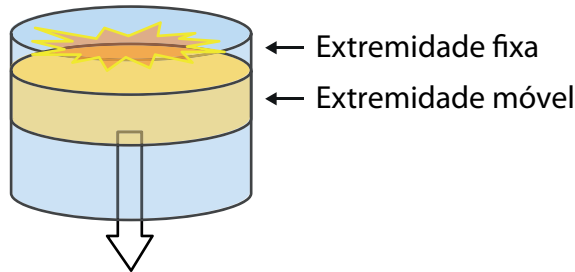


Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

Se desejarmos orientar esse movimento amplo da esfera em uma direção preferencial dada por um eixo, mantendo a simetria da circunferência ao longo dele, podemos fazê-lo por meio

de um cilindro com uma extremidade fixa e outra móvel, o qual é ilustrado na próxima figura. Desse modo, geramos um movimento linear que poderá ser convertido em um movimento circular por meio de uma biela.

Figura 2.4 – Cilindro com êmbolo para aproveitamento da explosão



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

Este tipo de dispositivo deve ser reposicionado para a ocorrência de novas explosões em uma ação alternada, o que pode ser feito por meio de uma sequência de cilindros idênticos trabalhando em conjunto.



Os motores convencionais, ou seja, os que trabalham com pistões, são também chamados de motores alternativos. Esses motores são assim denominados porque utilizam mais de um cilindro trabalhando de forma alternada, ligados ao mesmo eixo e dispostos de diferentes formas. A maneira como esses cilindros são dispostos define a classificação dos motores.

É importante observar que a opção de se colocar um número maior de cilindros menores, em vez de aumentar o tamanho do cilindro, proporciona um ciclo menor, ou seja, uma troca mais rápida entre as **fases de funcionamento**.

A fase refere-se a cada um dos eventos ocorridos durante o deslocamento da parte móvel do cilindro para baixo ou para cima.

Assim, os motores multicilíndricos, como são chamados, funcionam com maior suavidade, pois os movimentos de cada pistão ou êmbolo dentro dos cilindros é menor, o que possibilita trabalharem de forma a compensar seus movimentos, melhorando desse modo, o equilíbrio e diminuindo a vibração.

Disposições de cilindros em motores aeronáuticos convencionais

Em geral, para operar nas condições requeridas para a aviação, os motores aeronáuticos convencionais se utilizam de vários cilindros que são dispostos adequadamente definindo os modelos de motor. Na sequência, apresentamos algumas das disposições mais comuns de cilindros nos referidos motores.

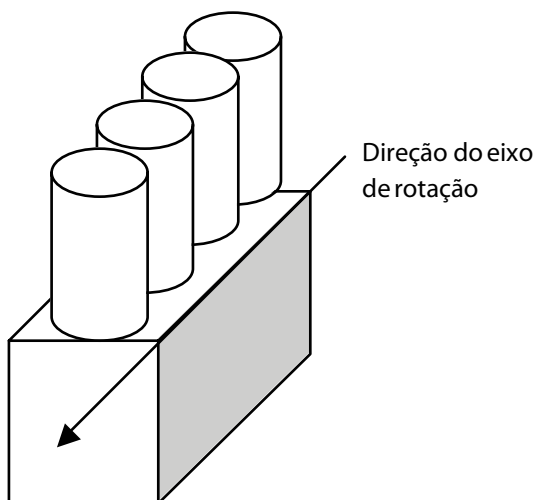
Motores aeronáuticos convencionais com cilindros em linha

Nessa disposição os cilindros são enfileirados um após o outro, possibilitando uma área frontal menor, o que é conveniente para diminuir o arrasto. Contudo, apresenta como desvantagem a deficiente refrigeração dos cilindros, em virtude de a área de contato com o ar atmosférico também ser menor.

Outra desvantagem da disposição em linha é a presença de maiores vibrações devido aos cilindros estarem dispostos em uma área maior ao longo do eixo longitudinal da aeronave. Assim, esse tipo de motor aeronáutico é utilizado apenas em aeronaves de pequeno porte.

A figura seguinte ilustra o esquema de um motor de aviação convencional com a disposição dos cilindros em linha em uma aeronave.

Figura 2.5 – Esquema da disposição dos cilindros em um motor em linha



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

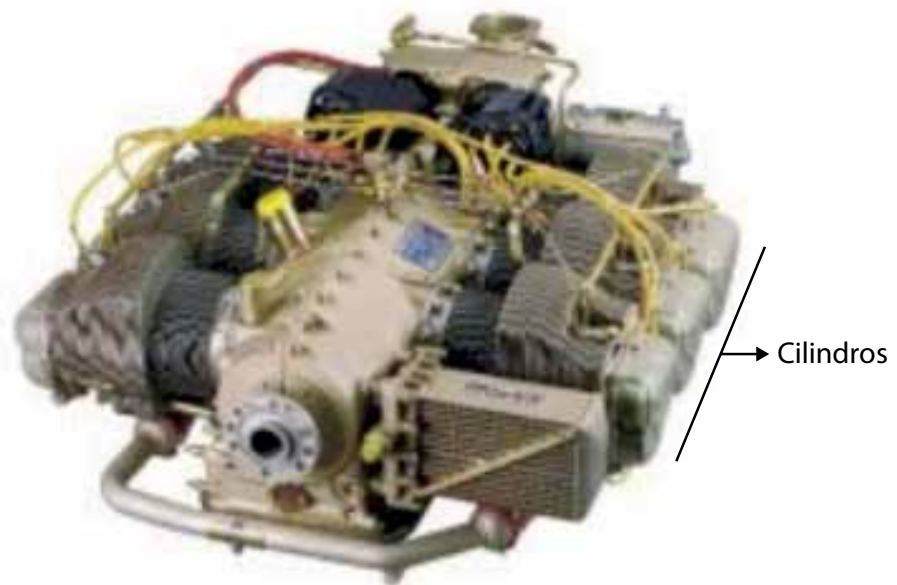
Cabe destacar que há motores denominados motor invertido, os quais são projetados para operar com os cilindros abaixo do eixo de rotação, tendo como vantagem oferecer melhor campo visual para o piloto.

Entretanto, o motor invertido tem como desvantagens a refrigeração deficiente e as vibrações se tornam relevantes com o aumento do tamanho do motor. Dessa forma, o motor aeronáutico em linha, quando usado, aparece apenas em aeronaves de pequeno porte.

Motores aeronáuticos convencionais com cilindros horizontais opostos

Nesses motores aeronáuticos os cilindros são dispostos horizontalmente em lados opostos do eixo de rotação. Isso possibilita o aumento do campo visual do piloto e melhor refrigeração dos cilindros, conforme observamos na figura a seguir.

Figura 2.6 – Motor com cilindros horizontais opostos



Fonte: Eaglesgate (2010).

Podemos observar na figura apresentada que esse motor demandará um aumento da área frontal da aeronave e, conseqüentemente, o arrasto. Contudo, apesar do referido aumento, esse motor tem como vantagem, por ter silhueta estreita e horizontal, adequar-se à instalação nas asas e também possibilita a eliminação da tendência de acúmulo de óleo na câmara de combustão e nas velas.



O motor com cilindros horizontais opostos é compacto, leve e barato, o que o torna bastante popular também nas aeronaves de pequeno porte.

Motores aeronáuticos convencionais com cilindros em “V”

Esta é uma disposição intermediária entre a disposição horizontal e a em linha, em que a colocação de cilindros é realizada em duas fileiras em ângulo, o que propicia um aspecto frontal semelhante à letra “V”, sendo que o referido ângulo entre as fileiras varia conforme o modelo do motor. A figura na sequência ilustra um motor com a disposição dos cilindros em “V”.

Figura 2.7 – Motor Merlin em “V”, da Rolls-Royce



Fonte: Aviation History Online Museum (2006).

A disposição dos cilindros em V, sendo intermediária entre a disposição em linha e a horizontal, agrega vantagens e desvantagens de ambas.

Se compararmos um motor em V com um motor correspondente em linha, e um horizontal no tocante à área frontal, veremos ele possui praticamente a mesma área frontal do motor horizontal, no entanto, não ocupa tanto espaço lateral, ou seja, é mais compacto. Já em relação ao motor em linha, este mesmo motor em V teria uma refrigeração melhor, pois tem mais cilindros expostos ao ar incidente.

Segundo a Aviation History Online Museum (2006), hoje são raras as aeronaves que utilizam motores com a disposição cilindros em “V”, contudo, alguns modelos usados na II Guerra se tornaram famosos, como é o caso dos motores Merlin, da Rolls-Royce, que equipavam o Spitfire e o P-51 Mustang.

Motores aeronáuticos convencionais radiais

Nos motores aeronáuticos radiais, os cilindros são dispostos ao redor do eixo de rotação em um mesmo plano perpendicular a este. A grande vantagem do motor radial é a refrigeração, pois todos os cilindros estão expostos diretamente ao vento relativo, entretanto, apresenta uma elevada área frontal, conforme verificamos na próxima figura.

O Manual do Mecânico de Manutenção Aeronáutica do Instituto de Aviação Civil (2002) acrescenta que este tipo de motor demonstrou ser muito robusto e de operação confiável.

Figura 2.8 – North American T-6 com motor radial



Fonte: Kadellar (2010).

Podemos verificar nesta figura que essa configuração é a que melhor acomoda um número grande de cilindros. No entanto, os motores aeronáuticos radiais estão caindo em desuso em virtude de os motores aeronáuticos turbo-hélice os substituírem com grandes vantagens na mesma faixa de potência.

O que veremos a seguir é como isso é feito na prática, ou seja, quais são as etapas necessárias para que a explosão controlada do combustível possa produzir energia mecânica útil. Atualmente, em aviação, dois tipos de ciclos de funcionamento são utilizados: o de dois e o de quatro tempos.

Seção 2 – Motores convencionais de aviação a quatro tempos

Os motores aeronáuticos convencionais transformam a energia calorífica de um combustível em energia mecânica a partir de explosões controladas, das quais podemos aproveitar a expansão dos gases para movimentar pistão em um cilindro. Uma das formas de se fazer isso é por meio de um motor aeronáutico convencional a quatro tempos, que se utiliza de um ciclo de quatro movimentações do pistão dentro do cilindro.

Vejamos algumas definições importantes referentes ao funcionamento dos motores aeronáuticos convencionais para que possamos entender as diversas situações que veremos a seguir, tanto nos motores aeronáuticos convencionais a quatro tempos quanto nos motores a dois tempos.

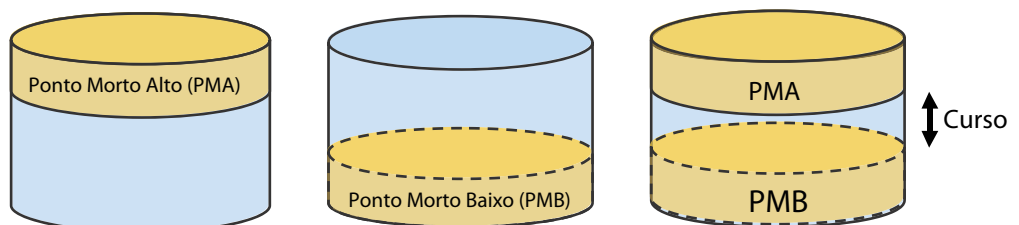
Funcionamento de motores de aviação convencionais



Como aproveitar a energia liberada pela expansão dos gases da explosão em um cilindro de motor aeronáutico convencional?

Para que possamos fazer esse aproveitamento, vamos analisar que tipo de alterações podem ser implementadas em um cilindro simples de forma a podermos executar explosões repetidas vezes pelo fluxo de uma mistura ar-combustível, a qual transmitirá sua energia calorífica para ser transformada em movimento.

Figura 2.9 – Cilindro com êmbolo para aproveitamento da explosão



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

Podemos observar nessa figura que o ponto mais alto em que o êmbolo móvel pode se encontrar no cilindro em estudo é denominado de **Ponto Morto Alto** (PMA), e analogamente, o ponto mais baixo denomina-se **Ponto Morto Baixo** (PMB). Observamos ainda que o caminho percorrido pelo êmbolo entre os dois pontos mortos é chamado de **Curso**.

É importante destacar há uma nomenclatura para os diversos momentos que se passam durante a movimentação do êmbolo dentro do cilindro, a saber:

Tempo: É o movimento do êmbolo de um ponto morto a outro.

Fase: É cada um dos eventos ocorridos em um tempo. Por exemplo, durante uma subida do cilindro, o combustível é comprimido e uma centelha é acionada, a compressão é uma fase e o acionamento da centelha é outra.

Ciclo: É a sequência de movimentos distintos que inclui tempos e fases, o qual se repetirá durante o funcionamento normal do motor.

Diante do contexto apresentado e visando a demonstrar o princípio de funcionamento de um motor aeronáutico convencional a quatro tempos, vamos estudar na sequência como ocorre este ciclo que inclui quatro tempos, como o próprio nome já indica, e seis fases nas quais os processos físico-químicos ocorrem para realizar a transformação de energia desejada.

O ciclo de quatro tempos

1º Tempo – Admissão

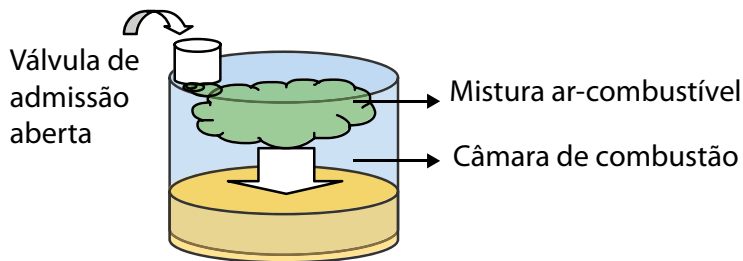
O início do processo de geração de energia calorífica, obtida por meio da combustão, a qual será transformada em energia mecânica, parte do êmbolo no PMA, ou seja, com o cilindro no seu menor volume, e, portanto, sem qualquer quantidade de mistura de gases em seu interior.

Para obter a combustão é necessário inserir uma quantidade balanceada de ar e combustível em um espaço do cilindro, que

se denomina câmara de combustão. Neste momento, o êmbolo se movimenta para baixo, aumentando o volume do cilindro e criando, dessa forma, uma força de sucção no interior deste que faz com que a mistura preencha este volume.

No entanto, para que a referida mistura chegue ao cilindro, é necessário haver uma abertura de comunicação com o sistema de alimentação, que proverá os gases devidamente balanceados para a combustão. Essa abertura é chamada de **válvula de admissão**, conforme ilustra a próxima figura.

Figura 2.10 – Válvula de admissão



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

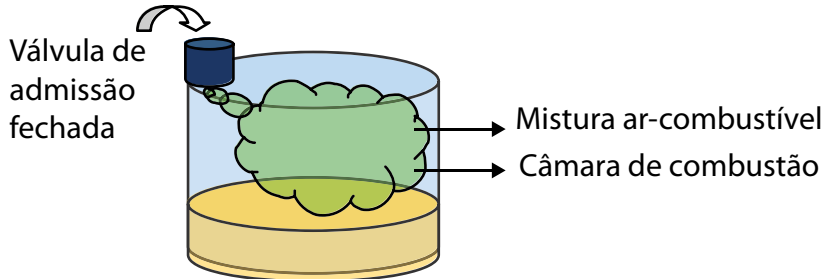
Nessa figura vemos que a descida do êmbolo provoca uma redução da pressão no interior do cilindro, o que succiona a mistura ar-combustível. Perceba que na situação que acabamos de descrever, o êmbolo se deslocou do PMA para o PMB, logo, temos um tempo, o qual chamamos de 1º tempo, ou tempo de admissão.

Durante esse tempo de admissão ocorreu o evento de entrada da mistura ar-combustível no cilindro, isto é um evento, ou seja, uma fase, que chamamos de fase de admissão. Repare que temos um tempo e uma fase, ambos com o mesmo nome, contudo, cabe observar que há outros tempos e fases no ciclo de funcionamento do motor aeronáutico a quatro tempos que não coincidem, necessariamente, tal como o tempo e fase de admissão.

2º Tempo – Compressão

O segundo tempo inicia-se com o fechamento da válvula de admissão, para permitir que a mistura seja comprimida.

Figura 2.11 – Fechamento da válvula de admissão



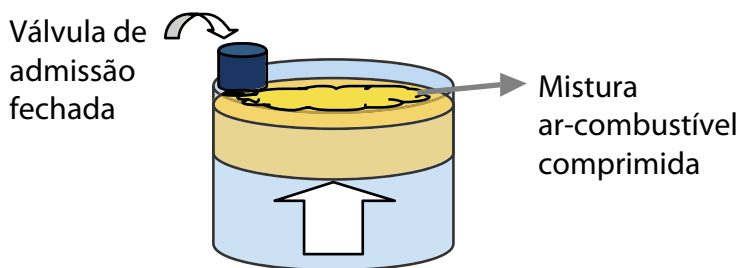
Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

Após o fechamento da válvula de admissão o êmbolo sobe e a mistura é comprimida de forma a obtermos melhor aproveitamento da sua combustão, sendo que durante o referido tempo ocorre propriamente a compressão da mistura ar-combustível, que é a fase de compressão.



Tempo é o movimento do êmbolo do PMA para o PMB ou do PMB para o PMA, e fase é cada um dos eventos que ocorrem no decorrer do tempo. Mais uma vez, temos apenas uma fase ocorrendo em um tempo e com nomes coincidentes.

Figura 2.12 – Compressão da mistura ar-combustível



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

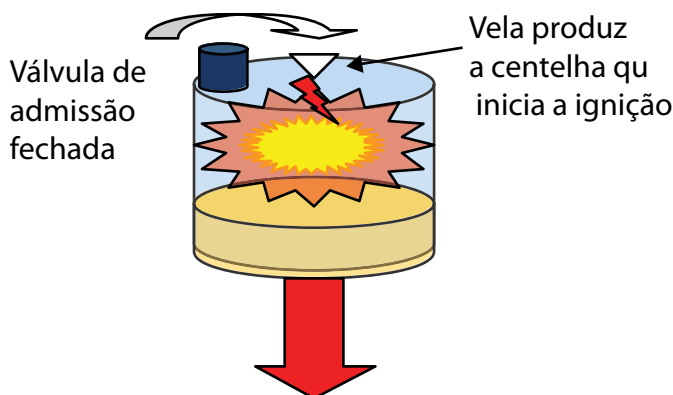
Com o fechamento da válvula de admissão o êmbolo move-se para cima, comprimindo a mistura ar-combustível, conforme observamos na figura anterior.

3º Tempo – Tempo de motor

No terceiro tempo é iniciada a combustão da mistura ar-combustível que foi comprimida no segundo tempo por meio de um dispositivo chamado vela, que produz uma centelha. Como a mistura ar-combustível está comprimida, a combustão ocorre de forma explosiva, aumentando bruscamente o volume, deslocando o êmbolo para baixo, visto que a parte superior do cilindro e suas paredes são rígidas.

Na figura a seguir observamos esse deslocamento do êmbolo para baixo devido à ação da força de expansão violenta dos gases causada pela explosão, sendo que, ao contrário das fases anteriores, esse movimento é produzido pelo próprio cilindro em virtude da combustão.

Figura 2.13 – Expansão violenta dos gases



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

Conforme podemos observar na figura anterior, durante o terceiro tempo, chamado de tempo motor, ocorrem três eventos distintos: a ignição, que é produção da centelha pela vela; a combustão, que é a queima da mistura ar-combustível, e a expansão, que é o movimento do êmbolo para baixo.

O movimento causado pela explosão é tão intenso que o êmbolo desce e, por inércia, o movimento do eixo ao qual ele está conectado continua, então ele sobe e desce novamente. Daí vem

a força para movimentar o êmbolo no primeiro, no segundo e, como veremos, no quarto tempo.

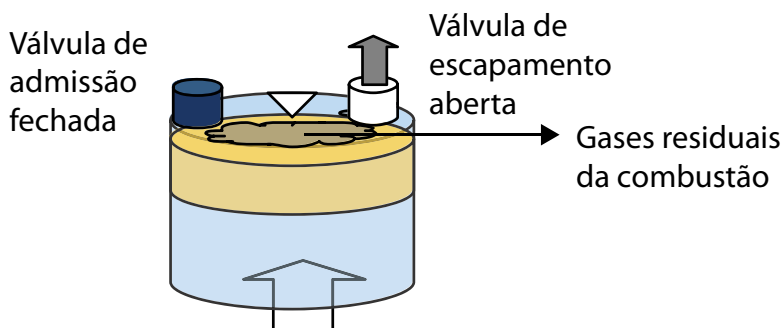
É importante destacar que em motores com mais de um cilindro, o funcionamento de cada um é coordenado de forma que o tempo motor de um cilindro forneça energia para o acionamento do pistão dos demais cilindros que estiverem em tempos distintos.

4º Tempo – Escapamento

Depois de ocorrida a queima, temos resíduos da combustão que não queimarão novamente e devem ser expulsos do cilindro para permitir uma nova queima, dando continuidade ao processo.

Essa etapa, ilustrada na sequência, ocorre mediante a subida do êmbolo do PMB para o PMA, juntamente com a abertura de uma válvula que permite a saída dos gases, a qual é chamada de **válvula de escapamento**.

Figura 2.14 – Abertura da válvula de escapamento



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

Verificamos nesta figura que o êmbolo move-se para cima expulsando os gases residuais da queima que saem pela válvula de escapamento. Assim como no primeiro e segundo tempo, o movimento do êmbolo no quarto tempo é resultante da explosão ocorrida no terceiro tempo do ciclo anterior, sendo que para iniciar o processo é necessária uma energia mecânica externa, que pode ser elétrica, manual, pneumática, ou outra.

Especificidades em relação a tempo e fase

Apesar de, na maioria das vezes, um determinado tempo coincidir com a única fase que ocorre em seu período e, ainda na maioria das vezes, o tempo e a fase possuírem o mesmo nome, é importante notar a ocorrência de três fases distintas no tempo motor, o que destaca a diferença entre tempo e fase. Essa diferença fica evidente quando estudamos o ciclo de funcionamento do motor aeronáutico a dois tempos, pois ocorrem diversas fases em cada tempo.

Outra consideração importante é relativa à força que move o êmbolo. Tal como vimos na descrição de cada tempo de funcionamento do motor a quatro tempos, apenas o terceiro tempo, chamado de tempo motor, gera energia. Assim, o movimento do êmbolo no primeiro, segundo e quarto tempo ocorre por inércia do movimento gerado no terceiro tempo do ciclo anterior.



Mas de onde vem a força para dar início a todo processo?

Para que ocorra o movimento inicial do êmbolo em um motor a combustão é necessária a ação de força externa para iniciar o processo. Essa força, nos primeiros automóveis fabricados, era gerada por meio de uma manivela, localizada na frente do veículo, conforme observamos na ilustração a seguir.

Figura 2.15 – Automóvel Ford 1920 com partida a manivela



Manivela
para partida

Fonte: Fotolog (2010).

Assim, ao girar essa manivela o motorista impulsionava o êmbolo para a realização dos primeiros ciclos, até que o funcionamento do motor se tornasse autônomo. Nas primeiras aeronaves, a partida do motor também era realizada por meio de um procedimento similar. Contudo, não havia a manivela já que uma pessoa auxiliar poderia girar o motor a partir da própria hélice, e avisava o piloto para ligar o sistema de ignição, gritando: “Contato!”.

Outro exemplo de aplicação de força externa para dar partida num motor a combustão é a partida nas motocicletas com motores de baixa cilindrada, nos quais o motociclista aplica a força por meio de um “pedal”, o qual faz o motor iniciar seu funcionamento.

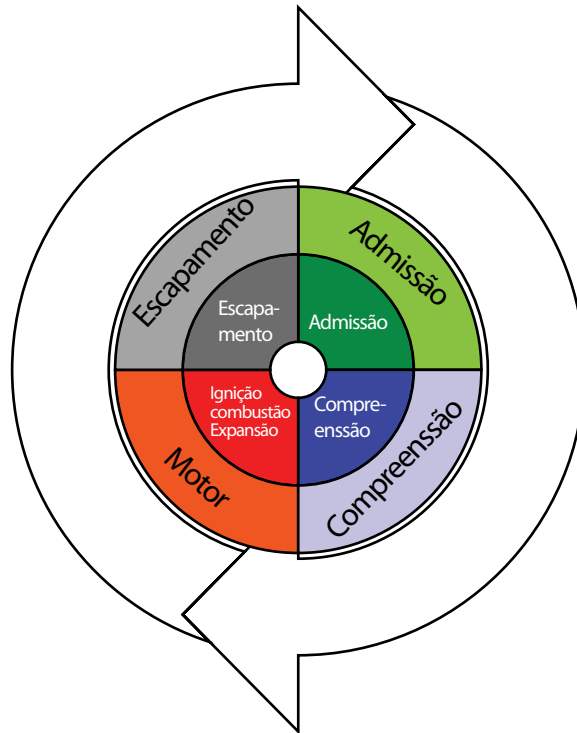


Hoje, quase todos os motores convencionais vêm com um motor elétrico acoplado para exercer a função de auxiliar de partida. Este motor elétrico geralmente é alimentado por uma bateria que, por sua vez, é recarregada por um gerador movido pelo próprio motor a combustão durante o seu funcionamento.

O tempo motor de um cilindro é capaz de impulsioná-lo não apenas a meia volta do eixo correspondente ao movimento do êmbolo do PMA para o PMB, como ainda mais uma volta e meia, expulsando os gases de exaustão, aspirando e comprimindo a nova mistura de forma a reiniciar o ciclo.

A figura a seguir ilustra o ciclo teórico do motor que acabamos de estudar, no qual cada quarto de círculo representa um tempo do ciclo, sendo que cada seta externa representa uma volta completa do eixo.

Figura 2.16 – Diagrama esquemático do ciclo de funcionamento de um motor aeronáutico convencional a quatro tempos



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

É importante destacar que o modo como foi descrito o ciclo de funcionamento do motor aeronáutico convencional a quatro tempos é uma forma teórica, que não leva em consideração as limitações físicas encontradas nas máquinas reais, como, por exemplo:

- As válvulas levam um determinado tempo para abrir e para fechar;
- As válvulas não se abrem totalmente e oferecem resistência à passagem dos gases;
- A queima da mistura ar-combustível não ocorre instantaneamente;
- A massa de gás em movimento possui inércia que ocasiona retardo no fluxo.

Com o objetivo de minimizar os efeitos dessas limitações físicas, na prática, são feitos alguns ajustes na atuação dos componentes

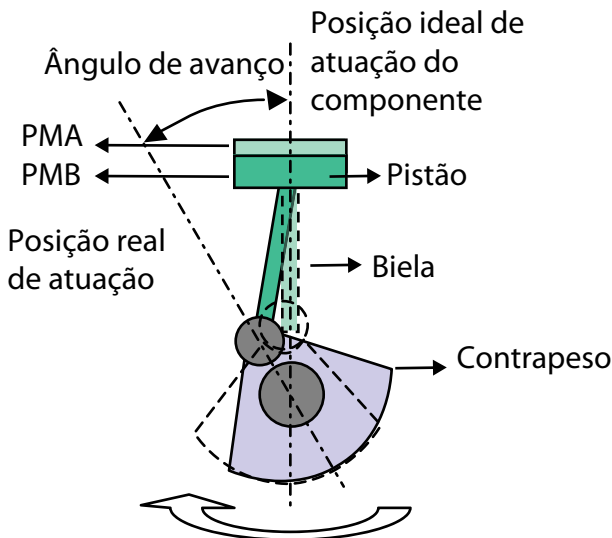
que determinam as fases de funcionamento como, por exemplo, válvula de admissão, vela e válvula de escapamento, visando assim ao melhor aproveitamento da combustão.

Dessa forma, a atuação desses componentes será avançada ou atrasada adequadamente em relação ao ciclo teórico, sendo que a mensuração do avanço ou atraso da atuação dos componentes será dada em graus correspondentes à posição do eixo de manivelas em relação ao ciclo teórico.

Em tese, a válvula de admissão deveria abrir quando o êmbolo estivesse no PMA, no início do tempo de admissão. No entanto, se a abertura dessa válvula for comandada um pouco antes desse momento, dizemos que houve um avanço no comando da válvula, o qual é medido em graus angulares do eixo do motor.

Observe na figura a seguir que à medida que o êmbolo sobe e desce, o eixo do motor gira. Esse giro pode ser medido em graus angulares, ou seja, ao girar uma volta completa, o eixo avançou 360 graus.

Figura 2.17 – Indicação da medida de avanço ou atraso de acionamento de válvulas ou ignição



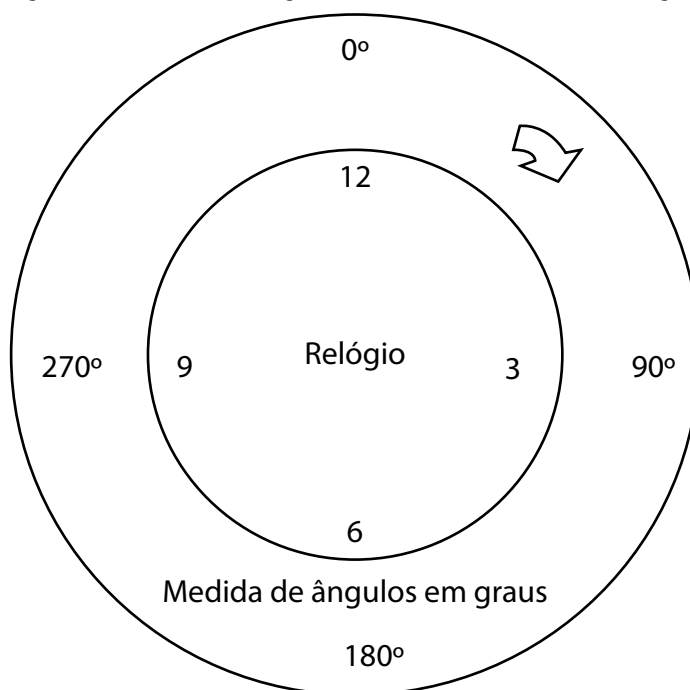
Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

Podemos observar na figura anterior que quando o êmbolo está no PMA o eixo do motor está em uma determinada posição (contrapeso e biela desenhados em pontilhado), sendo que um

pouco antes de o êmbolo atingir o PMA, o eixo do motor está em uma posição diferente (contrapeso e biela desenhados em linha cheia).

Essa diferença de posição do eixo pode ser medida em graus por meio de um ponteiro imaginário no eixo do motor. À medida que o eixo gira, esse ponteiro também irá girar, tal como o ponteiro dos minutos de um relógio comum, conforme ilustra a próxima figura.

Figura 2.18 – Medida de ângulos em uma circunferência usando graus e relógio



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

Dessa forma, podemos descrever a posição desse ponteiro no mostrador do relógio dizendo sobre qual número ele está passando, contudo, uma maneira mais técnica de descrever a posição é utilizando os graus angulares. Como uma volta completa tem 360 graus, meia-volta tem 180 graus, um quarto de volta 90 graus, e assim por diante.

Definindo que a posição de zero grau é a correspondente ao número que indica 12 horas daquele relógio, teremos que a posição de 90 graus seria a correspondente ao número que indica 3 horas, já a posição de 180 graus corresponderá ao número que indica 6

horas e a posição de 270 graus ao número de 9 horas do mesmo relógio.

Assim, caso a válvula, que deveria abrir quando o eixo estivesse na posição correspondente ao ponteiro imaginário no número 12 horas daquele relógio, ou zero grau, abrir na posição correspondente ao ponteiro na posição à esquerda, de 9 horas do relógio ou 270 graus, ou seja, abrindo 90 graus antes, ou seja, estará avançada em 90 graus. Neste caso mencionamos “avançada”, pois ocorreu “antes”, se antecipou, avançou.

Nas modificações feitas na atuação dos componentes no ciclo de quatro tempos de um motor aeronáutico convencional que apresentaremos a seguir, são utilizados os graus angulares para indicar quanto a atuação de um dispositivo é avançada ou atrasada em relação à atuação que teoricamente deveria ocorrer para minimizar os efeitos já descritos.

Modificações no tempo de admissão

Essas modificações visam a compensar o tempo que a válvula de admissão leva para estar totalmente aberta, assim como aproveitar a inércia do fluxo da mistura ar-combustível que entra no cilindro para aumentar a quantidade de combustível admitida, e são realizadas da seguinte forma:

■ Avanço na abertura da válvula de admissão

A válvula de admissão começa a ser aberta antes de o êmbolo chegar ao PMA, de forma que ela esteja totalmente aberta no momento em que este começa a descer aspirando a mistura.

■ Atraso no fechamento da válvula de admissão

Quando o êmbolo atinge o PMB, teoricamente a fase de admissão chegou ao fim, no entanto, a mistura de ar-combustível que entra no cilindro continua, por inércia, a fluir, então a válvula de admissão é deixada aberta por mais alguns graus de giro do eixo. Assim, enquanto o eixo sobe vai comprimindo a mistura e aumentando a pressão no cilindro.

Caso não houvesse a inércia da entrada dos gases, esse aumento de pressão faria com que a mistura voltasse pelo duto de admissão, contudo o atraso é calculado para que a válvula esteja fechada antes que a pressão seja suficiente para fazer a mistura voltar.

Ponto de ignição

No ponto de ignição a modificação é feita de maneira a adiantar a produção da centelha pela vela, visto que a queima não ocorre instantaneamente. Assim, a ignição ocorre antes de a mistura estar totalmente comprimida. É importante observar que, em virtude de a velocidade de combustão não variar, o avanço da ignição será maior quanto maior for a rotação do motor.

Assim como foram feitas alterações nos momentos de abertura e fechamento da válvula de admissão em consequência do tempo necessário para a completa abertura e fechamento e da inércia da massa de gás que flui, no tempo de escapamento também serão necessárias alterações na atuação da respectiva válvula.

Tempo de escapamento

As alterações na válvula de escapamento têm como finalidade a eliminação completa dos gases de exaustão.

■ Avanço na abertura da válvula de escapamento

A abertura da válvula de escapamento se inicia antes de o êmbolo atingir o PMB para que esteja totalmente aberta quando este começar o curso ascendente e a pressão dos gases no cilindro não oferecer muita resistência.

■ Atraso no fechamento da válvula de escapamento

A válvula de escapamento, no ciclo ideal, deveria estar fechada quando o êmbolo atingisse o PMA, de forma que quando ele iniciasse a descida, não aspirasse esses gases para dentro do cilindro.

No entanto, a saída dos gases também sofre o efeito da inércia, tal como a admissão, e esses ainda tenderão a continuar saindo quando o êmbolo estiver no PMA. Assim, tal como no caso

do atraso no fechamento da válvula de escapamento, esse fechamento estará completo antes que a redução de pressão no cilindro seja suficiente para aspirar os gases de volta.



As modificações realizadas na atuação dos componentes que envolvem o ciclo de funcionamento do motor acarretarão na ocorrência de abertura simultânea das válvulas de admissão e escapamento no início da admissão, devido ao avanço da abertura da válvula de admissão e atraso no fechamento da válvula de escapamento.

Diante dessa situação, denominada cruzamento de válvulas, os gases de escapamento ainda estarão saindo por inércia e a mistura ar-combustível estará prestes a entrar com a redução da pressão no interior do cilindro.

As referidas modificações visam a melhorar o desempenho do motor aeronáutico convencional e são calculadas para um regime específico de funcionamento, o **de cruzeiro**. Entretanto, podem não ser adequadas para outros regimes como de marcha lenta, táxi, decolagem, subida e descida, mas como esses regimes são usados por tempos significativamente menores que o regime de cruzeiro, as alterações se justificam.

No entanto, é importante ressaltar que o piloto deve seguir as orientações de operação do motor feitas pelo fabricante, visto que ao voar prolongadamente em regimes não previstos, o motor poderá perder eficiência ou até mesmo sofrer um desgaste maior de seus componentes.

O regime de operação de um motor aeronáutico se refere às condições de operação do mesmo, tais como potência, rotação e mistura. O regime de cruzeiro é o regime adequado para a aeronave percorrer grandes distâncias em voo reto e nivelado. A título de comparação, o regime de subida é o regime adequado para a aeronave ganhar altitude.

Seção 3 – Motores convencionais de aviação a dois tempos

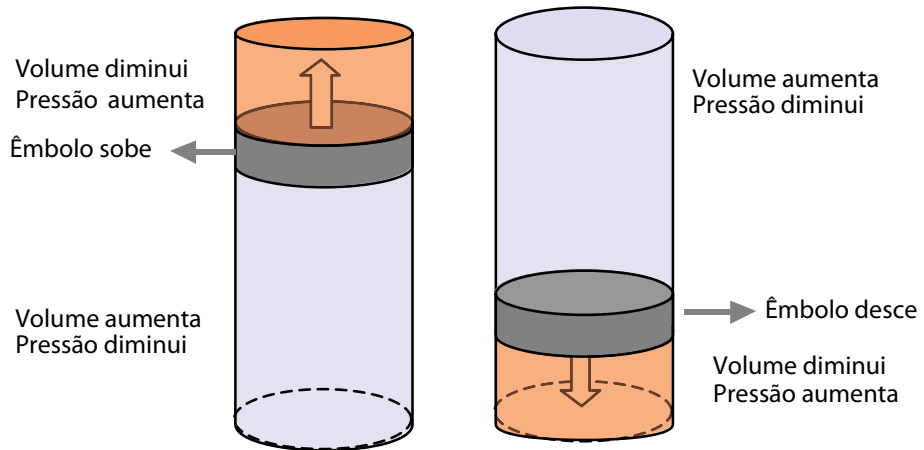
No estudo do motor aeronáutico convencional a quatro tempos consideramos apenas a parte superior do cilindro, na qual o volume diminui com a subida do êmbolo e aumenta com a descida do mesmo.



Mas o que acontece com a parte inferior do cilindro?

Quando o êmbolo sobe, o volume da parte inferior do cilindro aumenta, reduzindo a pressão. Já no momento em que o êmbolo desce, o volume da parte inferior do cilindro diminui, aumentando a pressão. Essas alterações são ilustradas pelas figuras apresentadas na sequência.

Figura 2.19 – Mudanças de estado nas duas partes do cilindro

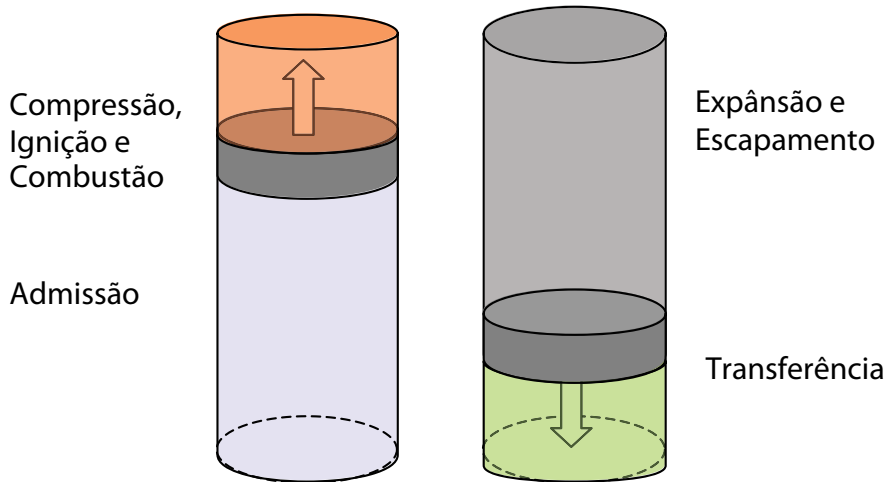


Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

A concepção do motor aeronáutico convencional a dois tempos visa a aproveitar, além das alterações na parte superior do cilindro, também as mudanças de estado da parte inferior, economizando “tempos” na execução das fases de funcionamento, conforme observamos nas ilustrações a seguir.

Na figura seguinte podemos observar que as mudanças de estado na parte inferior do cilindro também podem ser aproveitadas no funcionamento do motor.

Figura 2.20 – Distribuição das fases nos dois tempos



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

Verificamos nessa figura que, enquanto o êmbolo sobe para comprimir a mistura na parte superior do cilindro, a redução de pressão na parte inferior é aproveitada para aspirar a nova mistura que será queimada no próximo ciclo.

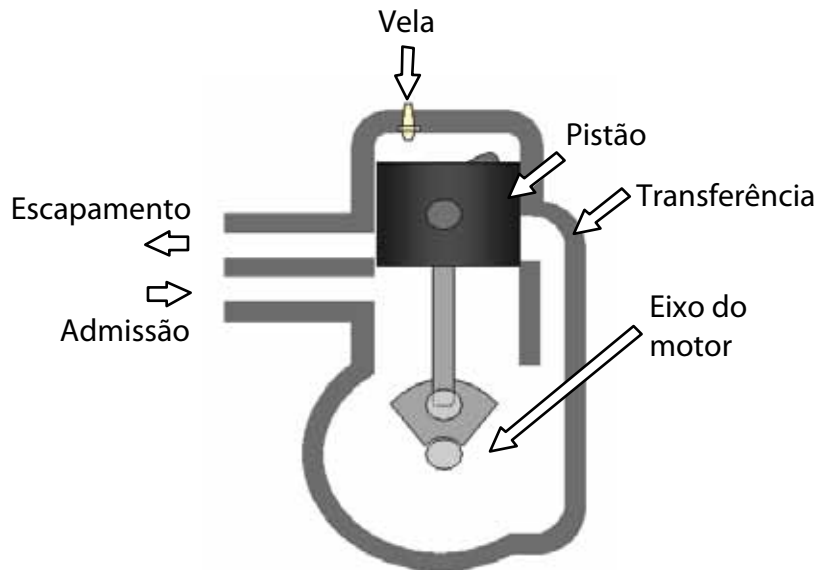
Já quando o êmbolo desce, em função da expansão dos gases de combustão na parte superior, o aumento de pressão na parte inferior do cilindro é utilizado para transferir a nova quantidade de mistura para a parte superior, expulsando os gases residuais da explosão.



Diante desse aproveitamento, continuamos tendo as seis fases do ciclo de um motor aeronáutico convencional de quatro tempos: admissão, compressão, ignição, combustão, expansão e escapamento, contudo, distribuídas agora em dois tempos.

Assim, para que esse sistema funcione, o próprio êmbolo faz a abertura e fechamento das janelas de admissão, escapamento e transferência, esses que são ilustrados na próxima figura.

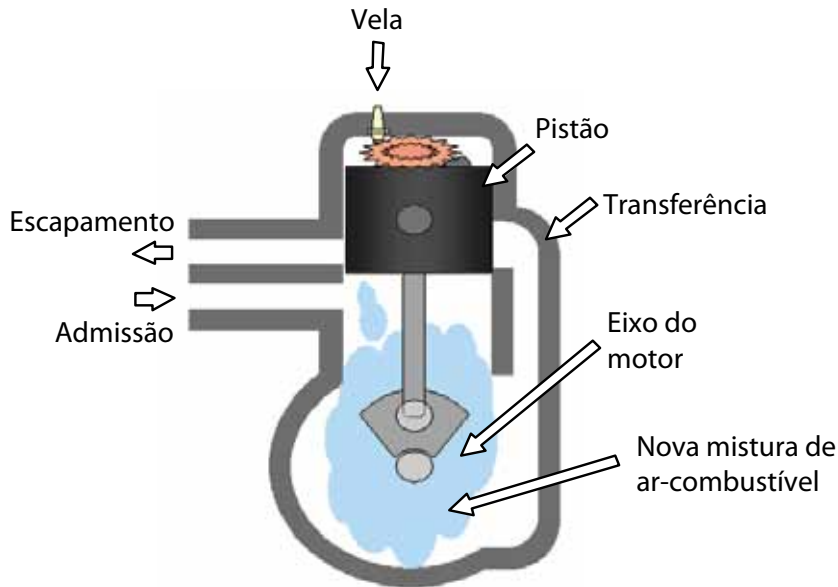
Figura 2.21 – Esquema do motor aeronáutico convencional a dois tempos



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

Observamos nessa figura o esquema de um motor aeronáutico convencional a dois tempos no qual podemos identificar os dutos de escapamento, admissão e transferência. Observamos ainda que não há válvulas, pois o controle de fluxo é feito pelo próprio movimento do pistão, conforme você poderá verificar na figura seguinte.

Figura 2.22 – Primeiro tempo de funcionamento de um motor aeronáutico convencional a dois tempos

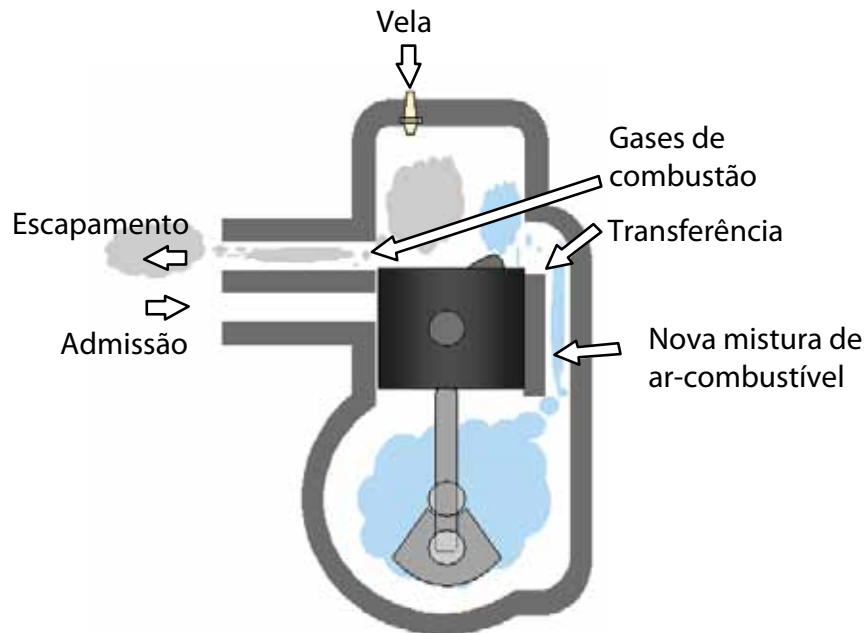


Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

Podemos verificar que no 1º tempo de funcionamento do motor aeronáutico a dois tempos a subida do pistão comprimiu a mistura ar-combustível na parte superior do cilindro, ao passo em que criou uma sucção na parte inferior, na qual a nova mistura a ser queimada no próximo ciclo foi admitida. Verificamos ainda que este movimento fecha a janela de escapamento e a de transferência.

Na figura a seguir veremos o que ocorre no 2º tempo, lembrando que o conceito de tempo, para o funcionamento de um motor a pistão, se refere a cada vez que o pistão vai do PMA ao PMB ou vice-versa.

Figura 2.23 – Segundo tempo de funcionamento de um motor aeronáutico convencional a dois tempos



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

Nessa figura podemos observar o 2º tempo, no qual os gases de combustão, ao se expandirem, movem o pistão para baixo, aumentando a pressão na parte inferior do cilindro, que estava repleta de mistura nova. Esse movimento fecha a janela de admissão e abre as janelas de transferência e de escapamento.

Observamos, ainda, que a alta pressão na parte inferior faz com que a nova mistura flua pela janela de transferência, expulsando os gases de exaustão pela janela de escapamento.

Comparação entre motores aeronáuticos convencionais de quatro e dois tempos

Ao estabelecermos uma comparação, neste caso, entre o motor aeronáutico convencional a dois tempos em relação ao motor a quatro tempos, podemos listar vantagens e desvantagens, as quais são apresentadas na sequência.

Vantagens do motor convencional a dois tempos

- É evidentemente mais simples, pois apresenta menor quantidade de componentes móveis, principalmente válvulas e comandos de válvulas, sendo dessa forma mais leve;
- É mais potente, pois a cada volta do eixo existe um tempo motor;
- É mais barato.

Desvantagens do motor convencional a dois tempos

- Apresenta um consumo mais elevado de combustível, pois perde parte da mistura admitida que escapa junto com os gases de exaustão;
- A abertura simultânea das janelas de escapamento e de transferência, além de perder mistura a ser queimada, retém gases de exaustão que contaminam a nova mistura;
- O fato de ocorrerem explosões a cada volta do eixo produz mais potência, no entanto, faz com que o motor trabalhe em uma temperatura mais elevada;
- A lubrificação não é tão eficiente quanto no motor a quatro tempos;
- É menos flexível que o motor aeronáutico convencional a quatro tempos, isto é, perde eficiência com pequenas variações das condições ideais de operação como, por exemplo, rotação, altitude, temperatura, entre outros.

Os motores convencionais de aviação a dois tempos, em virtude de seu baixo custo, são comumente utilizados na aviação desportiva. No entanto, não são adequados à aviação geral devido às desvantagens apresentadas. Outro fator relevante é que os motores aeronáuticos a quatro tempos podem ter sua admissão de ar-combustível forçada por um supercompressor melhorando sua performance, recurso esse não possível de ser empregado nos motores aeronáuticos a dois tempos.



Síntese

Nesta leitura você estudou os princípios básicos de funcionamento de um motor aeronáutico convencional e teve a oportunidade de conhecer algumas das disposições normalmente adotadas na configuração de cilindros desses motores.

Verificou detalhadamente as etapas de funcionamento dos motores aeronáuticos convencionais a quatro tempos e identificou cada um dos seus quatro tempos que incluem seis fases.

Por fim, você compreendeu que as mesmas seis fases presentes no ciclo de funcionamento dos motores aeronáuticos a quatro tempos podem ser implementadas em motores aeronáuticos a dois tempos, e verificou que essa diferente abordagem propicia vantagens e desvantagens desse motor em relação ao motor aeronáutico a quatro tempos.



Atividades de autoavaliação

- 1) A partir de nossos estudos relacionados aos motores de aviação, assinale a alternativa correta e justifique as alternativas erradas:
 - a) A principal vantagem da aviação é que qualquer tipo de motor pode ser usado em aeronaves.
 - b) O mais importante em aviação é o rendimento do motor.
 - c) O motor de aviação deve ser confiável.
 - d) Um motor econômico somente é importante por poupar recursos financeiros.

- 2) De acordo com o conteúdo estudado referente ao funcionamento do motor aeronáutico convencional a quatro tempos, assinale V ou F em cada uma das afirmações a seguir conforme elas sejam, respectivamente, Verdadeiras ou Falsas.
 - () Cada tempo de funcionamento desse motor corresponde a um movimento do êmbolo de um ponto morto a outro percorrendo um curso.
 - () Durante os quatro tempos de funcionamento do motor ocorrem quatro fases.
 - () O tempo motor corresponde às fases de ignição, combustão e expansão.
 - () Durante a fase de escapamento, todas as válvulas permanecem fechadas.

- 3) Diante de nossos estudos, assinale a alternativa que não corresponde a uma justificativa para as modificações no acionamento das válvulas e vela de ignição do ciclo de um motor aeronáutico convencional a quatro tempos:
 - a) A combustão real não é instantânea.
 - b) A abertura e fechamento das válvulas é instantânea.
 - c) As válvulas oferecem resistência à passagem dos gases.
 - d) A mistura ar-combustível e os gases queimados possuem inércia.

- 4) Segundo o conteúdo estudado referente ao funcionamento do motor aeronáutico convencional a dois tempos, assinale V ou F em cada uma das afirmações na sequência conforme elas sejam, respectivamente, Verdadeiras ou Falsas:
- () O motor aeronáutico convencional a dois tempos recebe este nome porque o seu ciclo de funcionamento compreende duas voltas do eixo.
 - () Durante os dois tempos de funcionamento do referido motor ocorrem as mesmas seis fases do motor a quatro tempos.
 - () O motor aeronáutico a dois tempos é mais simples e mais leve que o motor a quatro tempos de mesma potência.
 - () O motor aeronáutico a dois tempos aquece menos que o motor a quatro tempos, pois tem dois tempos a menos.



Saiba mais

GUNSTON, Bill. **Development of Piston Aero Engines**. Haynes Publishing - 2 ed. 2006.

TAYLOR, Charles Fayette. **The Internal Combustion Engine in Theory and Practice**. Revised - Thermodynamics, Fluid Flow, Performance. Vol. 1. 2 ed. 1985.

Operação de motores aeronáuticos a reação



Objetivos de aprendizagem

- Identificar componentes e acessórios dos motores aeronáuticos a reação.
- Conhecer os sistemas que integram os motores aeronáuticos a reação.
- Entender os conceitos quanto ao desempenho nos diversos regimes de operação dos motores aeronáuticos a reação.



Seções de estudo

Seção 1 Componentes dos motores aeronáuticos a reação

Seção 2 Sistemas dos motores aeronáuticos a reação

Seção 3 Operação de motores aeronáuticos a reação



Para início de estudo

Neste estudo você entenderá o funcionamento dos motores aeronáuticos a reação, identificando seus componentes que são, basicamente, peças projetadas para implementar a queima da mistura ar-combustível, aproveitando a força de reação da expulsão dos gases para movimentar a aeronave.

Compreenderá que o funcionamento adequado dos referidos motores requer a existência de sistemas auxiliares adicionais que proporcionam a alimentação, a refrigeração e a lubrificação adequada dos mesmos, além de outras necessidades.

Por fim, entenderá como operar de maneira racional esses artefatos, de forma a obter os melhores resultados possíveis e garantir o bom funcionamento desses motores.

Seção 1 – Componentes dos motores aeronáuticos a reação

Histórico dos motores aeronáuticos a reação

No decorrer da Segunda Grande Guerra, a busca pela superação do inimigo por meio da surpresa levou ao desenvolvimento de motores aeronáuticos a reação, os quais inicialmente foram utilizados para impulsionar artefatos bélicos não tripulados e, mais tarde aperfeiçoados para o uso em aeronaves de caça.



Após a guerra, verificou-se que esse tipo de motor se mostrava extremamente adequado as condições que limitavam a operação de motores aeronáuticos convencionais, tais como a baixa pressão e consequente baixa demanda de oxigênio em altitude. Mostravam-se também mais velozes e com maior capacidade de transporte de carga e passageiros a custos mais compensadores.

Essas características tornaram tais motores aeronáuticos os mais utilizados atualmente na aviação comercial de grande porte, os quais são constituídos por diversos componentes, dispostos adequadamente para fazer a queima interna de combustível e produzir, por meio do princípio da terceira lei de Newton, ação e reação, a energia mecânica necessária ao movimento da aeronave. Na sequência apresentamos cada um desses componentes.

Entrada de ar

A rigor, a entrada de ar, ou bocal de admissão, não é considerada como parte do motor, mas sim da estrutura da aeronave, que tem a função de reduzir o arrasto produzido por ela durante seu deslocamento, devendo desta forma apresentar uma superfície aerodinâmica favorável que possibilite essa redução.



Além de reduzir o arrasto, a entrada de ar em aeronaves com motores a reação tem a finalidade principal de direcionar o ar, fornecendo um fluxo regular e em proporção adequada para funcionamento eficiente dos mesmos.

Essa estrutura deve ainda recuperar a pressão do ar perdida em virtude do impacto deste com a estrutura da aeronave e do atrito com as paredes internas do duto que o conduz à parte interna do motor, assim como fornecer ar em fluxo mais laminar possível, ou seja, sem turbulências e com o mínimo de variações de pressão para o compressor, dispositivo que irá elevar a pressão do ar para a posterior queima.

Tipos de entrada de ar

O tipo de entrada de ar dependerá do modelo e da quantidade de motores da aeronave, além do regime de velocidade em que a mesma irá operar, sendo os mais comuns apresentados na sequência. Segundo Palharini (2011), existem três tipos de entrada de ar em motores aeronáuticos a reação:

Pitot – Mais utilizada em aeronaves de velocidade subsônica, tem pequeno comprimento interno para reduzir o atrito ocorrido durante o deslocamento do ar da parte externa do motor para o compressor, e aproveitar melhor a pressão de impacto desse ar ao incidir na aeronave.

Entrada simples – Usada em aeronaves de motores com **compressores axiais** para proporcionar fluxo de ar direto através do motor.

Esses compressores utilizam aletas dispostas como hélice para aumentar a pressão do ar que entra no motor.

Entrada dupla – O bocal para entrada de ar possui duas entradas que conduzem o ar para um único duto. Esse tipo de bocal é utilizado em aeronaves de caça monomotores, visto que em bimotores cada entrada alimenta um motor que possui seu bocal próprio. Cabe observar que a forma interna do duto procura minimizar perdas de velocidade e de pressão do ar por atrito e adaptar-se ao regime de velocidade no qual o motor é utilizado.

Além dos tipos apresentados podemos encontrar a entrada **boca de sino**, em formato de funil, a qual é empregada para ensaios de motor em banco de provas, durante os procedimentos de revisão, homologação e manutenção corretiva ou preventiva nos quais o motor funciona sem estar instalado na aeronave, mas sim em uma bancada na oficina.

De maneira simplificada, em aeronaves para voos subsônicos são utilizados bocais divergentes e para voos supersônicos bocais convergentes-divergentes com mecanismos para alteração da geometria, de forma a possibilitar a operação da aeronave em diversas velocidades.

Outra observação quanto ao bocal de admissão é a proteção contra ingestão de objetos que podem causar danos, tais como sujeira, detritos ou pequenas peças presentes na pista, denominados *Foreign Object Damage* (FOD).

É importante ressaltar que não existem sistemas padronizados para proteção contra os FOD, sendo os mais conhecidos o sistema de separação inercial e os geradores de redemoinho. O sistema de separação inercial provê um desvio para objetos sólidos que tendem a manter a trajetória retilínea na admissão, já os geradores de redemoinho sopram um jato de ar em direção ao solo em frente a referida entrada, como se fosse uma vassoura, varrendo o caminho por onde a entrada de ar vai passar.

Cabe observar que há algum tempo existiu o sistema de proteção por tela de aço, o qual foi abandonado por produzir perdas de potência por diminuir o volume de ar admitido na câmara de combustão, causar turbilhonamento e propiciar a formação de gelo na própria tela, cujos fragmentos poderiam ser absorvidos pelo motor.

Compressor

O compressor é o dispositivo do motor aeronáutico a reação responsável pela manutenção da diferença de pressão entre sua parte externa e a parte interna, a qual é necessária para o funcionamento adequado do efeito ação e reação, pois faz com que o ar admitido, que está em alta velocidade e baixa pressão, seja entregue à câmara de combustão nas condições de melhor eficiência possível com velocidade baixa e alta pressão para que possa ocorrer a troca de energia calorífica da combustão.



Um dos principais fatores que contribuem para a eficiência de um motor aeronáutico a reação é a taxa de compressão, definida como a razão entre a pressão do ar entregue à câmara de combustão pelo compressor e a pressão do ar admitido pelo motor. Dependendo do tipo desse motor e do compressor, essa razão varia entre valores de 5:1 até 25:1.

Atualmente, dois tipos de compressor são usados em motores de aeronaves a reação, sendo eles o compressor de fluxo axial e o compressor centrífugo. Essa nomenclatura está associada ao funcionamento dos mesmos, pois a palavra “axial” está relacionada a “eixo”, e a palavra “centrífugo”, à direção oposta ao centro.

Diante desse contexto, no compressor axial o fluxo de ar segue em direção paralela ao eixo do motor, ao passo que no centrífugo o ar é comprimido à medida que é deslocado para fora do centro. Na sequência são apresentados esses dois tipos de compressor.

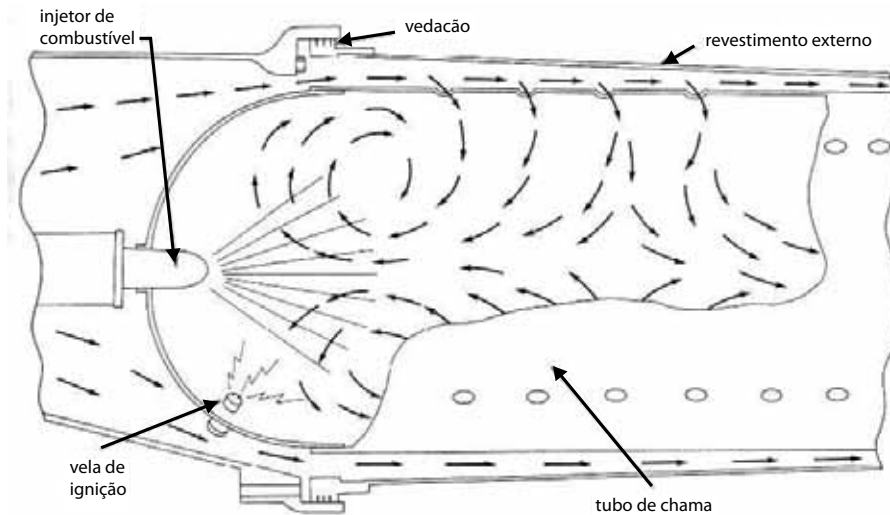
Compressor axial

O compressor axial é composto pela associação de dois componentes: rotor e estator. O rotor é a parte móvel do compressor, constituída de uma série de discos paralelos, acoplados ao mesmo eixo, os quais possuem palhetas montadas radialmente de forma a impulsionar o ar para trás, tal como uma hélice ao girar.

Os mencionados discos giram intercalados entre outras palhetas fixadas radialmente na carcaça do motor, que servem para direcionar o ar da entrada para o primeiro disco do rotor, e assim sucessivamente da saída de um disco para a entrada do outro, até a saída do último disco para a câmara de combustão. Essa segunda relação de palhetas, fixada na carcaça do motor e que intercala com aquela fixada no eixo, denomina-se estator.

Cabe destacar que cada um dos pares constituídos por um disco do rotor e uma fileira de palhetas do estator é chamado de **estágio de compressão**. A figura a seguir ilustra a estrutura de um compressor axial.

Figura 3.1 – Compressor axial



Fonte: Adaptado do Manual de Manutenção Aeronáutica do Instituto de Aviação Civil (2002).

Na figura apresentada observamos um motor axial simples, composto por apenas um sistema rotor e um sistema estator. Perceba que o rotor está representado na parte central do desenho, ao passo que o estator está desenhado de forma “explodida” para que se possa ver o rotor.

Quando se trata de um compressor duplo, o qual é utilizado em motores nos quais é exigida uma razão de compressão muito alta, empregam-se dois compressores simples colocados em sequência.



O compressor dianteiro, denominado compressor de baixa pressão, regula a quantidade de ar que passa para o compressor traseiro, chamado de compressor de alta pressão, que não é projetado para receber um fluxo elevado de ar tal como é o ar de admissão.

É importante ressaltar que os eixos de rotação desses compressores são coaxiais concêntricos, em que um eixo passa

por dentro do outro, de forma que cada compressor tem sua turbina de acionamento independente e, assim, possam trabalhar em velocidades distintas.

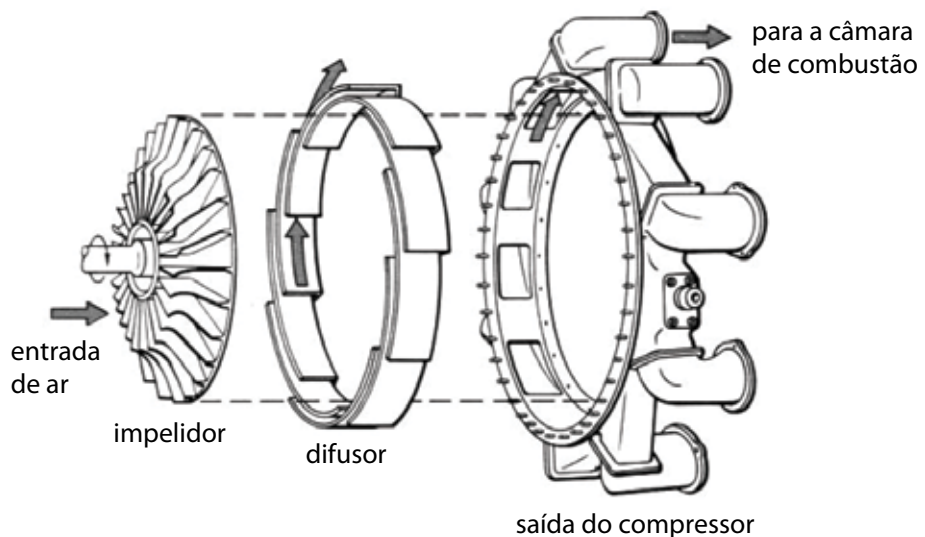
A velocidade do compressor traseiro é regulada pelo sistema de combustível ao passo que o dianteiro gira em velocidade adequada para fornecer um melhor fluxo de ar para o compressor de alta pressão, sendo que o giro do compressor de baixa pressão dependerá da velocidade da aeronave, da densidade do ar e do giro do compressor de alta pressão.

O compressor axial apresenta, em relação ao outro de tipo de compressor, centrífugo, menor área frontal e maior taxa de compressão em conjunto, pois pode associar-se a vários compressores axiais, um em seguida ao outro, formando estágios.

Compressor centrífugo

O compressor centrífugo, conforme podemos observar na próxima figura, pode ser descrito como um disco fechado, com raios sobressalentes e mais espessos na região próxima ao eixo que na borda. Assim, o ar que incide frontalmente é desviado em ângulo reto do centro para as bordas, sendo acelerado pelo movimento do disco.

Figura 3.2 – Compressor centrífugo



Fonte: Manual de Manutenção Aeronáutica do Instituto de Aviação Civil (2002).

A forma com que esse compressor é projetado permite que, ao chegar às bordas, a energia cinética do fluxo de ar se transforme em pressão e que o volume de ar seja enviado às câmaras de combustão. Para executar esse processo, o compressor centrífugo dispõe de três componentes fundamentais: a ventoinha ou impelidor, o difusor e o coletor.

O compressor centrífugo apresenta maior taxa de compressão e menor peso por estágio, assim como maior robustez e resistência a danos por ingestão de objetos estranhos, pois não possui palhetas, as quais são frágeis e facilmente danificadas pela ingestão de objetos estranhos.

Estol de compressor

O estol de compressor é um fenômeno indesejável que pode ocorrer durante o funcionamento de um motor aeronáutico a reação, e está relacionado ao fluxo de ar que passa pelo compressor, seja axial ou centrífugo, porém com maior incidência em compressores axiais.

Se por algum motivo houver uma diferença desfavorável de pressão, que faça com que a energia cinética do referido fluxo não consiga vencer a pressão, o ar tende a retornar e impedir a admissão, caracterizando assim o estol de compressor, que ainda pode ocorrer pelo impedimento ou restrição nos estágios iniciais, que se reflete sucessivamente para os próximos estágios, resultando, da mesma maneira, em débito na alimentação de ar do motor.

O referido fenômeno pode ser identificado por fortes ruídos, estampidos ou zumbidos, ou, ainda, pelo excesso de fumaça na saída do motor. Também é possível que seja identificado por meio de instrumentos que acusam a queda de rotação do motor, aumento da temperatura dos gases de exaustão, além da perda de potência do motor, retardo na resposta ao acionamento do manete e vibrações no motor.

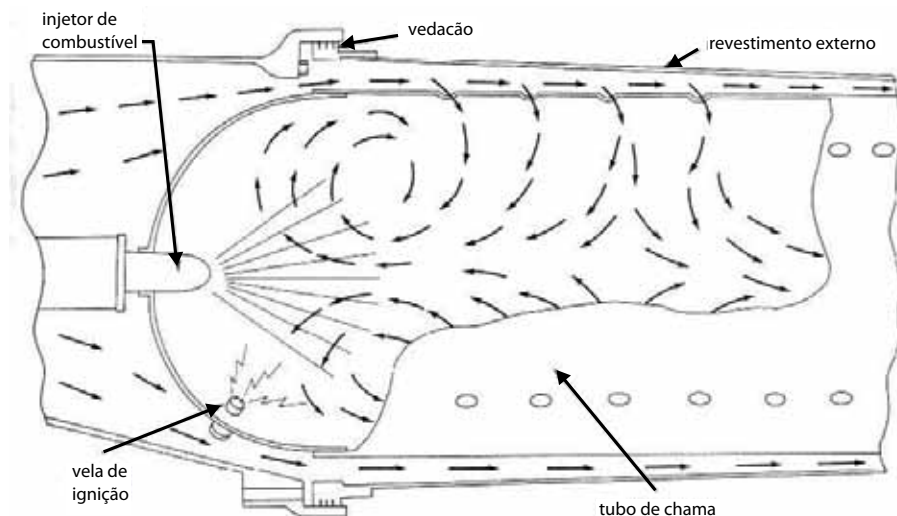
Existem mecanismos para se reduzir a incidência ou evitar o estol de compressor, dentre os quais incluem a sangria controlada do fluxo de ar no compressor, a variação do ângulo das palhetas do estator, a variação da área do bocal de descarga e o controle de rotação do eixo.

Câmara de combustão

A câmara de combustão, tal como no motor convencional, é o local onde se processará a queima da mistura ar-combustível. Entretanto, no motor aeronáutico a reação, conforme ilustra a figura a seguir, essa queima é contínua, depois de iniciada pelo centelhamento das velas.

Após a queima da mencionada mistura a câmara deve direcionar adequadamente os gases para a turbina, de forma a proporcionar energia mecânica para o acionamento do eixo dessa turbina que irá mover o compressor em ato contínuo.

Figura 3.3 – Câmara de combustão de motores aeronáuticos a reação



Fonte: Manual de Manutenção Aeronáutica do Instituto de Aviação Civil (2002).

No interior de seu espaço limitado, as câmaras de combustão devem adicionar energia térmica ao fluxo de ar através do motor, em quantidade suficiente para acelerar essa massa de gases a ponto de produzir o empuxo necessário ao motor aeronáutico por reação, e assim proporcionar o movimento da turbina.



As câmaras de combustão dos referidos motores ainda devem proporcionar a queima integral da mistura de ar-combustível, evitar perdas de pressão, manter a chama acesa, evitando o apagamento e, ainda, conter a chama no seu interior sem que haja escapamento de chama com os gases de exaustão.

A quantidade de combustível injetada na câmara de combustão para a queima junto ao ar varia em virtude de diversos fatores, sendo o principal deles a temperatura máxima de operação determinada pelo fabricante do motor.

No entanto, podemos dizer que a proporção da mistura ar-combustível permanece em torno de 1 parte de combustível para 40 partes de ar (1:40) até 1 parte de combustível para 80 partes de ar (1:80), proporção esta que é muito superior à proporção ideal para a queima completa da mistura em motores, que é de 1 parte de combustível para 15 partes de ar (1:15).



Por que há essa acentuada diferença na quantidade de ar admitido na câmara de combustão, mesmo considerando-se que o combustível utilizado para calcular a relação ideal, no caso a gasolina, não seja exatamente o mesmo que o usado normalmente em motores a reação, ou seja, o querosene de aviação?

O motivo dessa maior quantidade de ar admitido não se justificaria por uma maior necessidade de ar em virtude da diferença de combustível utilizado, mas sim porque que boa parte do ar é aproveitada para o próprio controle de temperatura da câmara de combustão, sendo que o ar usado para combustão é chamado de ar primário, e o utilizado para o controle de temperatura, de ar secundário.

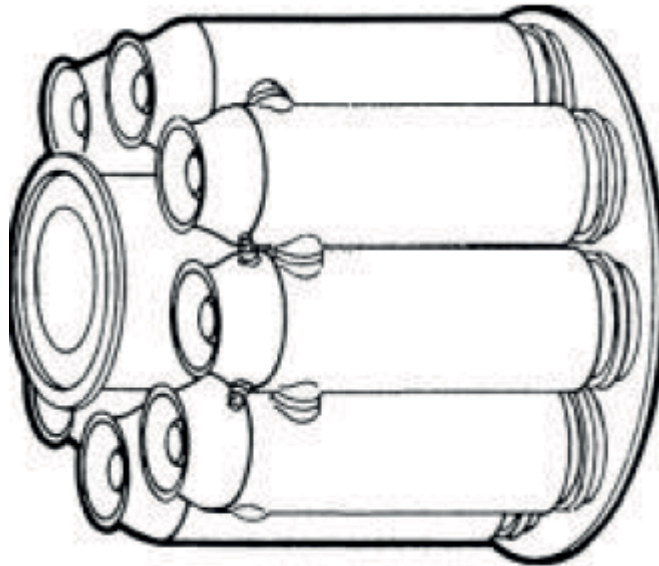
É importante observar que a câmara de combustão dos motores aeronáuticos a reação deve ser projetada para que a queima do ar primário seja feita completamente antes de haver o resfriamento pelo ar secundário, caso contrário poderia prejudicar o funcionamento eficiente do motor.

No que se refere à sua construção, as câmaras podem ser do tipo tubular (ou caneca), anular ou tubular-anular (canular), as quais são apresentadas na sequência.

Câmaras tipo tubular

Este tipo de câmara de combustão é formado por diversas câmaras dispostas em torno de um eixo, conforme observamos na próxima figura, cada uma com seu próprio injetor de combustível.

Figura 3.4 – Conjunto de câmaras de combustão tipo tubular



Fonte: Manual de Manutenção Aeronáutica do Instituto de Aviação Civil (2002).

Essas câmaras são interligadas para equalizar a pressão e permitir a propagação da chama na partida, uma vez que não é necessário que todas as câmaras possuam vela de ignição. Uma vela de ignição apenas seria suficiente para o funcionamento do motor; contudo, por medida de segurança, em geral existem duas.

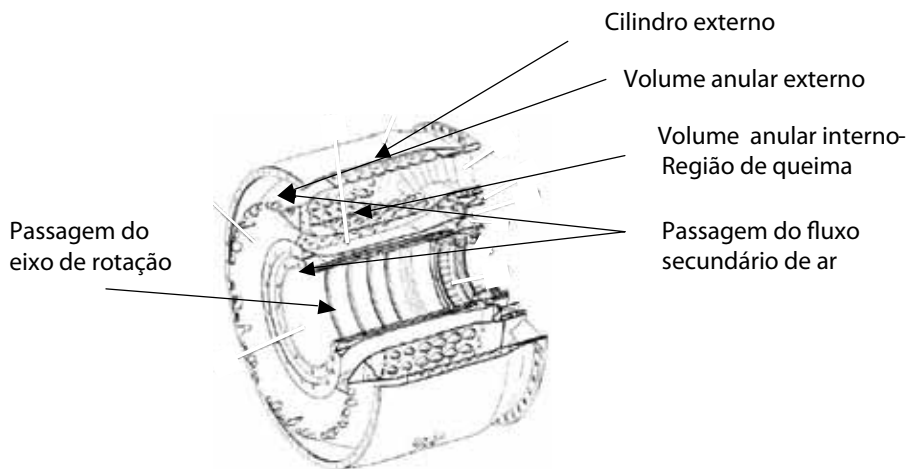
Em virtude dessa disposição periférica, câmaras tubulares em torno de um eixo, esse tipo de câmara é muito utilizado em motores com compressor centrífugo, apresentando como vantagem menor peso, estrutura mais robusta e maior facilidade de manutenção devido à possibilidade de remoção individual de unidades do sistema.

Por outro lado, a desvantagem é que o posicionamento dos injetores de combustível no centro da câmara força o ar primário a vencer considerável distância para realizar a mistura e, no caso de apagamento de uma das câmaras, será fornecida uma massa de ar com temperatura irregular à turbina, podendo causar danos às palhetas da mesma por variações bruscas de temperatura.

Câmara tipo anular

É o tipo de câmara formada por quatro cilindros concêntricos em torno de um eixo, os quais definem três volumes anulares tal como ilustrado na figura a seguir, sendo que o volume interno define a região de queima e os volumes contíguos servem para a passagem do fluxo de ar secundário.

Figura 3.5 – Câmara de combustão tipo anular



Fonte: Adaptado do Manual de Manutenção Aeronáutica do Instituto de Aviação Civil (2002).

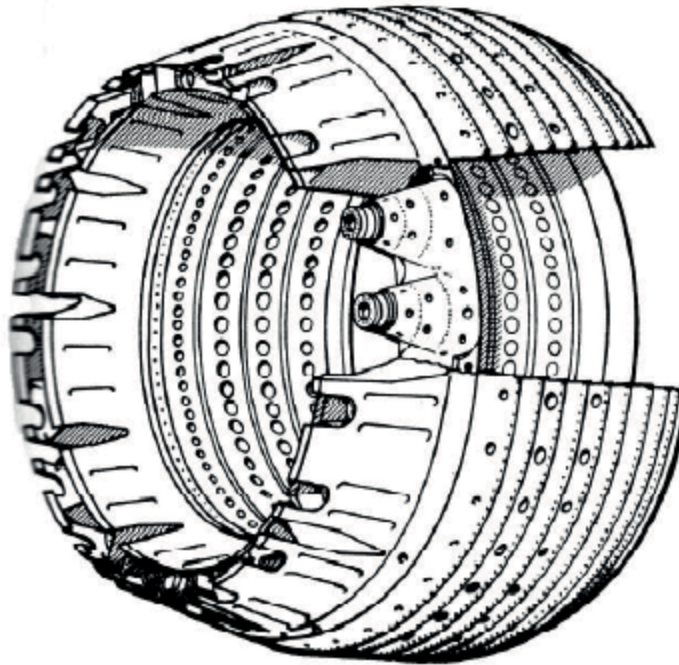
A câmara tipo anular tem como vantagem melhor mistura de ar-combustível, uso mais efetivo do espaço disponível e uma relação entre a área da superfície interna e volume de ar de passagem mais adequada, oferecendo maior refrigeração dos gases à medida que a combustão se realiza, sendo mais utilizada em conjunto com compressores axiais.

Como desvantagens podemos citar os frequentes empenamentos e distorções por sua grande área estrutural, visto que uma peça muito grande que sofre constantes variações de temperatura tende a empenar com maior facilidade que uma peça pequena, que é o caso de cada uma das câmaras tubulares. Temos, adicionalmente, em virtude do grande tamanho, a dificuldade de remoção para serviços de manutenção.

Câmara tubular-anular

A câmara tubular-anular, ilustrada pela figura na sequência, é um modelo híbrido dos dois tipos apresentados, que visa a aproveitar as vantagens de ambos, eliminando as respectivas desvantagens.

Figura 3.6 – Câmara de combustão tubular-anular



Fonte: Manual de Manutenção Aeronáutica do Instituto de Aviação Civil (2002).

Cabe destacar que a câmara tubular-anular possui uma estrutura pequena e robusta e uma distribuição uniforme de temperatura para a turbina, mesmo no caso de uma eventual obstrução de injetor.

Turbinas

As turbinas dos motores aeronáuticos a reação são dispositivos projetados para transformar a expansão dos gases em movimento giratório a ser usado para impulsionar o compressor, **fan** ou hélice de forma eficiente.

Assim como o compressor, a turbina possui uma parte móvel, chamada de rotor, e uma parte fixa, chamada de estator, e conforme a disposição das palhetas do estator e do rotor, para proporcionar o movimento deste último, as turbinas podem ser classificadas em impulsivas, reativas e impulso-reativas.

Nas turbinas impulsivas, as palhetas do estator orientam os gases, sem acelerá-los, para que impulsionem as palhetas do rotor. Com relação às turbinas reativas, existe uma convergência na passagem dos gases, havendo uma aceleração que gera a reação na passagem pelo rotor. Já as turbinas impulso-reativas resultam de uma combinação equilibrada desses dois efeitos.

Fan ou ventoinha é um dispositivo semelhante a uma hélice, porém com um diâmetro menor e com maior número de pás, utilizado em uma espécie de motor a reação para produzir tração por rotação do eixo.

Escapamento

O escapamento é a parte do motor aeronáutico a reação que conduzirá os gases de exaustão para a atmosfera em velocidade, pressão e densidade adequadas para o exterior do motor de modo a fornecer a tração requerida por reação. O escapamento é constituído basicamente pelo duto, bocal de descarga e cone. Na figura a seguir, verificamos o escapamento de um motor aeronáutico a reação.

Figura 3.7 – Escapamento de um motor aeronáutico a reação



Fonte: Boeing (2013).

Os gases de escapamento devem expandir-se completamente na saída do motor para que se obtenha um melhor aproveitamento da tração, sendo que o fluxo de saída deve ser laminar, isento de turbilhonamento, e orientados no sentido do eixo de deslocamento da aeronave.



O bocal é a parte do escapamento que irá orientar o fluxo de gases de exaustão no sentido de se obter as mencionadas características, que são fundamentalmente importantes, principalmente nos motores aeronáuticos que obtêm a tração exclusivamente da reação dos gases.

Contudo, para a obtenção dessas características nas diversas condições de operação do motor, faz-se necessário um sistema que possa regular a área dos bocais de escape. Essa regulagem é obtida por meio de um sistema mecânico acionado automaticamente por mecanismos elétricos, hidráulicos ou pneumáticos, conforme as características de construção do motor.

Supressor de ruído

O supressor de ruído é um conjunto de sistemas que atenua um efeito indesejável dos motores aeronáuticos a reação que é o elevado nível de ruído, uma das características mais marcantes desse tipo de motor, cuja fonte principal é a exaustão dos gases.

Segundo Palharini (2011), uma das formas de reduzir o ruído desses motores é acelerar a redução da velocidade do fluxo de gases, a qual pode ser feita com formatos específicos de bocais de escapamento.



Em um motor a jato puro, no qual toda tração é proveniente do fluxo de descarga de gases, os tipos de supressores mais empregados são os de forma corrugada e os multitubos, que dividem a corrente de gases de escapamento única em várias correntes menores.

Esses bocais possibilitam aumentar o perímetro de saída dos gases de escapamento sem alterar sua energia total, reduzindo assim a intensidade de turbilhonamentos. Esse aumento de perímetro possibilita uma elevação considerável na frequência do ruído, a qual fica em uma faixa inaudível ao ouvido humano. Além disso, as frequências mais altas são mais rapidamente atenuadas e absorvidas na atmosfera.

É importante observar que nos motores turbo-fan a mistura de fluxo dos gases quentes da turbina e do ar mais frio do fan atenua sensivelmente o ruído e dispensa sistemas mais complexos de supressão.

Pós-combustão

O sistema de pós-combustão é composto por tubo provido de bicos injetores e ignitores, o qual é colocado atrás da turbina com a finalidade de aproveitar o ar remanescente da combustão, visto que apenas uma pequena parte do volume de ar admitido pelo motor é consumida nas câmaras de combustão, sendo o excedente

expulso em temperatura elevada e em condições de queima após a passagem pela turbina.

Esse ar excedente poderá ser aproveitado para prover um empuxo adicional em situações de necessidade. Em casos de decolagens ao nível do mar, esse ar poderá fornecer um empuxo adicional de 90%, contudo, esse recurso tem um custo extremamente alto em relação ao consumo de combustível.



Para que possamos ter uma ideia do consumo de combustível de uma aeronave que se utiliza desse recurso, em geral, um aumento de 50% no empuxo requer um consumo de 150% de combustível.

Reversão do empuxo

A reversão do empuxo, ou reverso, são sistemas que visam a reduzir a velocidade de aeronaves com motores a reação por meio de uma forte reação no sentido contrário ao movimento da aeronave para pará-las no momento do pouso, visto que os referidos motores implementam soluções de tração para grandes altitudes e velocidades, estando, muitas vezes, associados a aeronaves de maior porte, mais pesadas e velozes, que são extremamente difíceis de serem retiradas do solo.

Assim, da mesma forma que existe essa dificuldade para tirar essas grandes máquinas da inércia na hora da decolagem, haverá também no momento da aterrissagem, o que exigirá pistas maiores e sistemas de frenagem que poupem os freios das rodas, como, por exemplo, a reversão do empuxo.

Esse sistema é comandado pelo piloto, que atua diretamente nos manetes de potência do motor, sendo que os tipos mais comuns utilizam conchas defletoras retráteis ou articuláveis que atuam no momento em que são acionadas, revertendo, não completamente, mas com um desvio significativo, o fluxo dos gases de exaustão.

Nos motores turbo-hélice, a solução empregada é a inversão do passo das hélices, as quais continuam girando no mesmo sentido, porém proporcionam tração no sentido oposto ao deslocamento da aeronave.

Para o acionamento do sistema reverso, o piloto normalmente reduz a potência normal para frente, passa para a posição de mínima potência, desativa o sistema de travamento de segurança, que pode ser uma pequena chave ou a mudança de direção no curso dos manetes e então prossegue deslocando os manetes para trás, até o máximo de potência previsto para atuação em reverso.

O sistema de reversão de empuxo nos motores aeronáuticos a reação deve ter como característica principal a não interferência no sistema de funcionamento normal do motor quando acionado, e quando não acionado acomodar-se aerodinamicamente ao motor não interferindo no desempenho da aeronave.

Seção 2 – Sistemas dos motores aeronáuticos a reação

De uma forma geral, os sistemas dos motores de aviação a reação são mais simples que os dos motores de aviação convencionais, em virtude de não existirem tantas peças móveis nem a necessidade de sincronização de fases. Dessa forma, na sequência são apresentados apenas alguns tópicos básicos desses sistemas visando a uma compreensão geral de seu funcionamento, os quais que poderão ser detalhados por ocasião do estudo de um modelo específico de motor.

Sistema de combustível

Parte do sistema de combustível dos motores aeronáuticos a reação se situa fora do motor, ou seja, alojada na estrutura da aeronave, e envolve diversas peças como tanques, bombas auxiliares, válvulas de corte e de controle de transferência de combustível e filtros.

Segundo Palharini (2011), a nomenclatura FCU é utilizada pelo fabricante Pratt & Whitney, entretanto, a General Electric utiliza a denominação Main Engine Control (MEC).

Já a parte que fica no motor propriamente dito, temos a bomba principal, o sistema de aquecimento e a unidade de controle de combustível (**FCU**), radiador de óleo e, eventualmente, o controle de pós-combustão.

Cabe destacar que o acionamento da bomba principal é mecânico, enquanto as bombas auxiliares, normalmente instaladas nos tanques, são de acionamento elétrico. Destacamos ainda que no funcionamento normal do motor, todas as bombas, principal e auxiliares, atuam no transporte de combustível dos tanques para o motor.

A FCU recebe a solicitação de potência dada pelo acionamento do respectivo manete e a processa juntamente com diversos outros dados obtidos de sensores para fornecer a quantidade de combustível adequada. Dentre os sinais processados pela FCU estão a pressão de descarga do compressor e a temperatura em sua entrada, a velocidade de rotação do motor e temperatura dos gases de descarga.

Devido ao sistema de combustível ser utilizado em grandes altitudes, há uma preocupação quanto à formação de gelo, ou cristalização das gotículas de umidade presentes no combustível. Assim, para evitar essa formação de gelo, utiliza-se o processo de troca de calor do combustível com uma parte do ar sangrado do compressor ou com o óleo lubrificante do sistema de lubrificação.

Também é utilizado um combustível específico com características importantes, como o querosene de aviação, que têm baixo ponto de congelamento e igualmente baixo poder de corrosão, elevado poder calorífico e efeito lubrificante. O querosene de aviação pode ser encontrado sob diversas designações, dependendo do fornecedor.

Sistema de lubrificação

O sistema de lubrificação é mais simples que o dos motores de aviação convencionais, pois poucas peças necessitam ser lubrificadas. Em geral, essas peças executam movimento rotativo, sendo necessária apenas a lubrificação no eixo de

rotação. Além disso, não existe uma peça móvel de grande porte dentro da câmara de combustão, tal como nos referidos motores convencionais, o que reduz a exposição do óleo a altas temperaturas, que possibilitaria a carbonização desse óleo.

O mencionado sistema é constituído basicamente por reservatório, bomba mecânica, trocador de calor, linhas de fluxo, pontos de lubrificação, filtros, linha e bomba de retorno. O trocador de calor, em geral, é um radiador que possibilita a troca de calor do óleo com o ar ou o combustível, pois estes elementos, principalmente em grandes altitudes, estão em temperaturas muito baixas.

O trocador de calor que utiliza o próprio combustível da aeronave ainda nos tanques é o mais utilizado, pois permite uma instalação que não aumenta a área frontal do motor e, conseqüentemente, o arrasto, além de aquecer o combustível, evitando a formação de cristais de gelo que seriam extremamente prejudiciais ao sistema de alimentação por risco de entupimento dos filtros e obstrução do sistema.

Sistema de partida e ignição

Da mesma forma que os motores de aviação convencionais, os motores aeronáuticos a reação necessitam de um dispositivo auxiliar de partida para dar início ao seu funcionamento, o qual pode ser um motor elétrico, geralmente usado em motores de pequeno porte ou motores pneumáticos, utilizado em motores maiores, que operam com ar comprimido proveniente de uma fonte externa de pressão de ar, unidade de apoio de solo – *Ground Power Unit* (GPU), unidade auxiliar de força – *Auxiliar Power Unit* (APU) ou ar sangrado de outro motor que já esteja em funcionamento.

É outro motor a reação de menor porte instalado na aeronave, geralmente na cauda.



Quando o dispositivo auxiliar utilizado para partida for um motor elétrico, o mesmo poderá ser usado posteriormente como gerador de energia, sendo conhecido nesses casos como *starter gerador*.

Para que o motor de fato comece a funcionar, além de se mover o compressor mecanicamente, é necessário proporcionar o início da queima do combustível por meio da produção de centelhas nas velas, o que é feito pelo sistema de ignição.

É importante observar que em um motor aeronáutico a reação o sistema de ignição não depende de sincronização tal como ocorre em um motor de aviação convencional, no qual a centelha deve ser gerada quando o pistão estiver em cima e a mistura comprimida, visto que naquele motor a reação, a centelha, pode ser gerada a qualquer momento no início do funcionamento e, assim que a combustão se inicia, a centelha pode ser dispensada, pois a combustão permanece de forma contínua.

Contudo, eventualmente pode ser necessário o acionamento do sistema de ignição em voo no caso de um apagamento inadvertido ou para prevenção de um apagamento em situação crítica, que poderá ocorrer em situação de chuva ou de estol de compressor.

Dessa forma, o sistema que move o motor na partida é independente do sistema de ignição, que gera centelha nas velas, apesar de os dois funcionarem simultaneamente durante a partida. Essa independência também permite que se faça uma “partida a seco”, ou seja, girar o motor sem ignição quando se deseja ventilar a câmara de combustão em casos de fogo no motor, por exemplo.

Sistema de proteção contra fogo

Em virtude das características de funcionamento do motor de aviação a reação, é necessário que haja um sistema de detecção e de extinção de fogo, o qual é composto por sensores que detectam a elevação de temperatura acima dos limites em pontos estratégicos, gerando um alerta visual ao piloto ou mecânico pelo acendimento de uma luz vermelha justamente no punho de acionamento do sistema de detecção. Esse alerta visual, que não pode ser cancelado, é seguido de um alerta sonoro cancelável.

Assim, ao receber os alertas, o piloto deverá identificar o motor onde ocorreu o fogo, e cortá-lo por meio do acionamento do manete de potência, combustível ou ignição e então puxar o punho de acionamento do sistema, pois, ao puxar esse punho, é cortada a alimentação elétrica e de combustível do motor correspondente.



A identificação do motor que realmente está com fogo é de suma importância para seu combate, pois a luz vermelha acende somente no punho correspondente, e após puxar o punho que corta a alimentação elétrica e de combustível, o mesmo deverá ser girado para acionar a descarga do agente extintor sobre o motor.

Depois do acionamento do sistema de extinção de fogo o motor não deve ser novamente ligado até que seja feita uma investigação do motivo do fogo e que o sistema de extinção de fogo seja reestabelecido.

Sistema de proteção contra gelo

O sistema de prevenção à formação de gelo é utilizado no motor aeronáutico a reação em virtude de este operar em grandes altitudes, estando assim suscetível à solidificação da umidade que restringe a admissão de ar, causa redução na tração e aumento da temperatura dos gases de exaustão em consequência do aumento da relação mistura de ar-combustível. Essa redução de tração faz com que a FCU aumente o fluxo de combustível, agravando a situação.

Para evitar tais efeitos, existe o sistema antigelo, que procura inibir a formação de gelo, diferentemente do sistema de degelo que procura desfazer o gelo já formado, o qual traria um risco caso fosse utilizado em motores aeronáuticos a reação, pois pedaços de gelo poderiam ser ingeridos pelo motor causando sérios danos às palhetas do compressor ao se chocarem com elas.

Esse sistema é formado por um conjunto de sensores que, ao detectar condições para formação de gelo, aciona a sangria de ar do compressor que é direcionado para as partes a serem protegidas, elevando sua temperatura e inibindo a solidificação da umidade nelas presente.

Seção 3 – Operação de motores aeronáuticos a reação

As especificidades da operação de cada modelo de motor aeronáutico a reação são normalmente abordadas em manuais de operações e procedimentos de aeronaves, os quais acompanham as mesmas. Desse modo, ao efetuar o treinamento orientado para a operação de uma aeronave, o piloto, mecânico ou qualquer outro profissional que trabalhe com a operação do motor daquela aeronave aprenderá a lidar com uma sequência de procedimentos e conhecerá as limitações do motor que equipa a referida aeronave.

Cabe destacar que para este estudo são apresentados aspectos básicos a serem observados durante a operação desses motores, com o objetivo de oferecer noções que permitam entender os procedimentos específicos com maior clareza quando oportuno. Para tanto, abordaremos na sequência a operação dos motores aeronáuticos a reação no solo e o ajuste de potência.

Operação dos motores a reação no solo

As operações desses motores no solo envolvem ações antes e durante a partida, controle de fogo e corte do motor.

Antes da partida do motor

Os cuidados na operação dos motores aeronáuticos a reação devem iniciar pela inspeção externa da aeronave no solo com a observação de seu aspecto geral e limpeza, conforme preconize a lista de verificações, a qual é um item obrigatório em todas as aeronaves.

Nas operações desses motores em solo devemos prestar atenção especial a itens básicos como uma eventual remoção de capas de proteção da entrada de ar e do escapamento, condições gerais da estrutura de fixação e carenagem, presença de objetos estranhos, tais como ferramentas ou peças nos dutos de entrada e escapamento, entre outros.

Na inspeção externa devemos observar a existência de objetos estranhos junto ao motor, assim como em toda a área de operação que a aeronave irá percorrer como, por exemplo, estacionamento, pista de táxi e pista de pouso e decolagem em busca de objetos estranhos, visto que tais objetos poderão ser ingeridos em virtude da admissão de ar em grande quantidade pelo motor a reação.



A ingestão de objetos pelo sistema de admissão de um motor aeronáutico a reação, mesmo que pequenos, como parafusos e porcas, podem causar sérios danos ao motor. Assim, é recomendável que se proceda a um programa de verificação periódica da limpeza da área de operação das aeronaves propulsadas por esses motores.

É importante destacar que diante as características das operações de um motor aeronáutico a reação, com admissão e escapamento de grandes quantidades de ar ao redor, exige de seus operadores ou pessoas que lidam ou estão expostas a eles tenham cuidados especiais quanto às áreas de sua proximidade.

A área situada à frente do motor, por exemplo, é onde ocorre a sucção do ar e por isso deve ser evitada a circulação dentro de uma distância de segurança de cerca de 10 metros. Neste sentido, quando não estamos habitualmente envolvidos nas atividades de operação e manutenção dos referidos motores, o cuidado deve ser redobrado, pois não sabemos quando ele pode ser acionado ou, caso já esteja em operação, quando pode ser acelerado.



Mesmo as pessoas que estão envolvidas nas operações devem tomar todo o cuidado possível e efetivamente seguir os procedimentos padronizados.

No que se refere à área situada na parte posterior do motor, que é onde acontece o escape de gases a alta temperatura e velocidade, a área de segurança envolvida é bem maior que a área frontal, de sucção. Em geral, em instalações onde há operações com motores aeronáuticos a reação existem delimitações visuais adequadas para se evitar a exposição de pessoas e objetos aos fluxos de sucção e escapamento de gases, sendo que esses limites devem ser rigorosamente respeitados.

Partida do motor a reação

Durante a partida do motor, devemos observar o comportamento dos instrumentos que indicarão o processo normal ou alguma anormalidade, a qual, existindo, justificará a interrupção da partida para se evitar danos ao motor.

O comportamento normal esperado na partida de uma aeronave com motores a reação envolve a elevação da pressão do óleo, indicando o funcionamento do sistema de lubrificação, o aumento da temperatura dos gases de exaustão dentro dos limites estabelecidos, informando a queima normal do combustível, e a elevação da rotação do eixo, que indica o funcionamento do compressor, essencial para a operação autônoma do motor.

A observância de qualquer anormalidade no processo de partida do motor aeronáutico a reação, tais como extrapolação do período de tempo permitido em uma determinada faixa de temperatura ou de limites de rotação, pressão de quaisquer dos componentes do motor, caracterizam a partida deficiente, a qual deve ser interrompida para investigação do defeito.

Cabe destacar que os manuais de operação dos motores aeronáuticos a reação e das aeronaves especificam os sintomas e os procedimentos a serem adotados em caso de partidas não satisfatórias, particularmente o período de espera entre tentativas de partidas sucessivas.

Evento de fogo no motor

O perigo da ocorrência de fogo em um motor aeronáutico a reação no solo deve ser considerado e o operador deve estar sempre atento para tomar as providências cabíveis, principalmente nas operações de partida e corte do motor, nas quais se deve prestar especial atenção aos instrumentos do motor e sinais externos. Existem limites de temperatura especificados nos manuais de operação que devem ser observados.



No momento em que se inicia a queima da mistura de ar-combustível durante a partida, uma temperatura bastante elevada pode ser admitida por dois ou três segundos; contudo, caso a temperatura permaneça elevada além desse tempo, a partida deve ser interrompida.

No caso de princípio de fogo na parte interna do motor, que pode ser percebido pela elevação da temperatura dos gases de exaustão (EGT) ou pela observação da equipe de solo, o procedimento a ser adotado é a interrupção da partida e a ventilação interna por meio do acionamento do motor de partida “a seco”.

Em casos em que seja necessário o uso de extintores, esse uso deve ser feito com cuidado, apenas na parte externa do motor para não danificá-lo, visto que, para o fogo que ocorre na parte interna, existe o sistema de extinção de fogo que corta a alimentação de combustível e a corrente elétrica e em seguida libera um agente extintor.

É importante ressaltar que após a realização de qualquer procedimento de extinção de incêndio em um motor aeronáutico a reação não devemos tentar uma nova partida sem que a causa do fogo seja pesquisada e sanada.

Corte do motor

O corte do motor é feito com o posicionamento do manete em corte, cessando o suprimento de combustível, e somente deve ser efetuado após um período em marcha lenta suficiente para que sejam atingidas temperaturas adequadas para tal, pois um corte repentino, com o motor ainda quente, pode causar danos relacionados ao resfriamento não uniforme das diferentes partes que o compõem.

Ajustes de potência

Diferentemente dos motores aeronáuticos convencionais, nos motores a reação o manete de potência não tem atuação direta na quantidade de combustível injetada na câmara de combustão, mas sim com a Unidade Controladora de Combustível (FCU), que mantém a razão de pressão do motor – *Engine Pressure Ratio* (EPR) ou a porcentagem de rotação do Fan – N1 e a Temperatura Inter Turbinas (TIT) ou *Turbine Inlet Temperature*, temperatura na entrada da turbina, de mesma sigla, de acordo com programações predefinidas pelo fabricante do motor.



O piloto pode selecionar a porcentagem da rotação máxima com que deseje que o motor funcione e a FCU irá dosar o combustível injetado nas câmaras de combustão, conforme uma série de dados obtidos de diversos sensores, para que o motor se mantenha naquela rotação estabelecida.

Os regimes de operação dos motores aeronáuticos a reação utilizados em diferentes momentos do voo são determinados pelo fabricante e devem ser seguidos pelos operadores. Contudo, nem todos os regimes devem seguir, necessariamente, os mesmos indicadores de parâmetros. Por exemplo, a tração de decolagem pode ser fornecida com uma porcentagem da rotação máxima do motor, enquanto a tração de subida pode ser obtida pela temperatura interturbinas.

A operação cuidadosa de um motor aeronáutico a reação, seja na partida, ajuste de potência, procedimentos de verificação, corte e manutenção, segundo os parâmetros recomendados pelo fabricante e seguidos pela observância atenta dos instrumentos, garantirá melhor eficiência e, principalmente, maior vida útil desse motor.

Nesse sentido, os operadores tanto de aeronaves quanto de seus motores deverão conhecer as especificidades dos equipamentos que estão sob sua responsabilidade de forma a respeitar os limites operacionais previstos pelo fabricante, de forma a ter uma operação mais eficiente, confiável e segura.



Síntese

Neste estudo você identificou os componentes e acessórios dos motores aeronáuticos a reação que possibilitam a transformação da energia calorífica do combustível em energia mecânica por meio da aplicação do princípio da terceira Lei de Newton, ação e reação.

Também conheceu os diversos sistemas auxiliares necessários para o funcionamento desses motores, tais como o sistema de alimentação, sistema de partida e sistemas de segurança como os de proteção contra a formação de gelo e sistema de extinção de fogo.

Por fim, você aprendeu que a operação dos motores aeronáuticos a reação é extremamente cuidadosa e requer a observância de diversos procedimentos para evitar danos a esses motores.



Atividades de autoavaliação

- 1) Assinale, entre as alternativas a seguir, qual o tipo de compressor que é composto por ventoinha, difusor e coletor:
 - a) Axial simples.
 - b) Axial de dois estágios.
 - c) Centrífugo.
 - d) Centrípeto.

- 2) De acordo com nossos estudos referentes ao estol de compressor, assinale V ou F conforme as afirmativas sejam, respectivamente, verdadeiras ou falsas:
 - () O estol de compressor ocorre sempre com o estol da aeronave.
 - () O estol de compressor pode ser percebido por fortes ruídos ou zumbidos.

- () Não existem mecanismos para se reduzir incidência ou evitar o estol de compressor.
- () Um dos mecanismos para se evitar o estol de compressor é a variação do ângulo da palhetas do estator.

3) A partir do conteúdo estudado, descreva a diferença entre ar primário e secundário, os quais são admitidos pela câmara de combustão de um motor aeronáutico a reação.



Saiba mais

IZOLA, Dawson. **Motores a jato**. História, projeto, construção. Pulso-jato, turbina a vapor, ducted fan, turbo compressor 0.49. Coleção Correio Ciência, v. I). 2002.

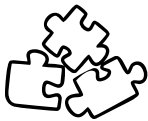
SZABÓ JUNIOR, Adalberto M. **Mecânico de manutenção de aeronaves**. 1ª Edição - (3ª reimpressão). 2009.

Princípios básicos de motores aeronáuticos a reação



Objetivos de aprendizagem

- Entender os princípios físicos que regem o funcionamento dos motores aeronáuticos a reação.
- Identificar os tipos de motores a reação utilizados na aviação.



Seções de estudo

Seção 1 Funcionamento dos motores aeronáuticos a reação

Seção 2 Tipos de motores aeronáuticos a reação



Para início de estudo

Nesta leitura você entenderá os princípios de funcionamento dos motores aeronáuticos a reação e verá que, apesar de apresentarem as mesmas fases de operação dos motores convencionais de aviação, possuem uma estrutura totalmente distinta daqueles.

Verá ainda que a obtenção do movimento de uma aeronave por meio de um motor a reação ocorre pelo princípio físico da ação e reação ao expulsar os gases de exaustão da queima da mistura ar-combustível. Para tanto, é necessário que toda uma estrutura seja montada de forma a obter o ar que impacta na aeronave durante o seu deslocamento, misturá-lo adequadamente ao combustível e manter uma queima contínua que proporcione um fluxo também contínuo de exaustão de gases.

Por fim, compreenderá que a obtenção de tração de uma aeronave a partir do princípio da ação e reação pode ser implementada por meio de dispositivos distintos, cada qual caracterizando um diferente tipo de motor a reação.

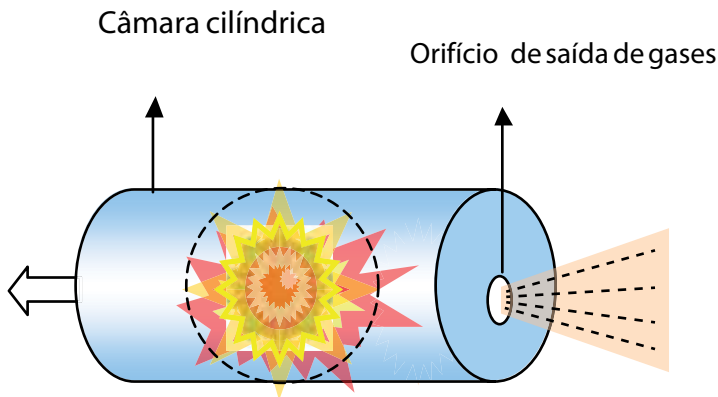
Seção 1 – Funcionamento dos motores aeronáuticos a reação

As diversas fases de funcionamento de um motor aeronáutico convencional como, por exemplo, a admissão, compressão e exaustão, ocorrem em um mesmo espaço físico, no entanto, em diferentes momentos. Já em motores aeronáuticos a reação a ocorrência de cada uma daquelas fases acontece em locais distintos, logo podem ocorrer simultaneamente.

O motor aeronáutico a reação, assim como o motor aeronáutico convencional, é, por definição, um motor térmico, pois transforma energia calorífica em energia mecânica. Esse processo acontece por meio da combustão explosiva de uma mistura ar-

combustível que ocorre em uma câmara horizontal, de formato cilíndrico, e com um orifício de saída dos gases, conforme ilustra a seguinte figura.

Figura 4.1 – Explosão com expansão esférica



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

Podemos observar nessa figura que a explosão no interior da câmara gera uma expansão brusca dos gases, os quais escapam dela por meio de um orifício em uma de suas extremidades. Com a saída dos gases, ocorre o fenômeno descrito pela terceira Lei de Newton, a qual declara que a toda ação corresponde uma reação de mesma intensidade e direção e de sentido contrário. Nesse caso, é a ação de escapamento dos gases que provocou uma reação de movimento do conjunto para o lado oposto.



Este é o princípio básico de funcionamento do motor a reação, e a partir de agora vamos estudar como os diversos dispositivos que compõem um motor aeronáutico a reação trabalham para manter esse fluxo contínuo.

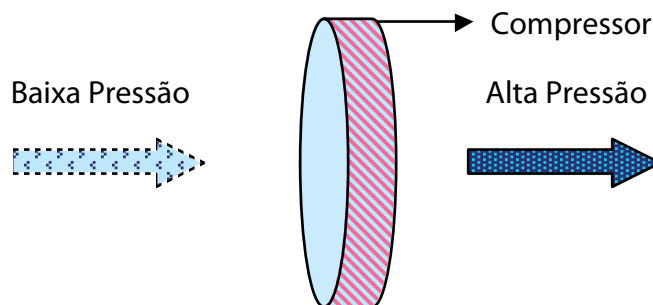
Para que o movimento se mantenha para o lado oposto ao do escapamento dos gases, devemos estabelecer uma divisão física entre a alta pressão interna no interior do motor e a baixa pressão externa do ambiente no qual ele funciona. Devemos também realimentar o interior do motor com mais combustível e ar, este que pode ser o que incide na parte dianteira do motor.



Como fazer com que o ar entre pela frente do motor e não interfira na diferença de pressão em seu interior?

A solução para manter a referida diferença de pressão está na utilização de um grande disco, denominado compressor, o qual aumenta significativamente a pressão do ar que passa por ele. Esse dispositivo, ilustrado esquematicamente na próxima figura, mantém uma alta diferença de pressão entre cada um dos semiespaços definidos pelo plano que o contém, ou seja, os semiespaços que existem antes e depois do disco.

Figura 4.2 – Compressor esquemático



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

Para funcionar da forma descrita, o compressor precisa girar em alta velocidade, por meio de um eixo que o liga a uma turbina na saída do motor. Esse processo inicia com o auxílio de um dispositivo externo de partida que possibilita o início da queima da mistura ar-combustível, queima esta que gera, além da reação e movimento, o escapamento dos gases que giram a mencionada turbina, que, por sua vez, gira o compressor, o qual alimenta de ar as câmaras de combustão e mantém a queima da mistura, sendo dispensado o dispositivo auxiliar.

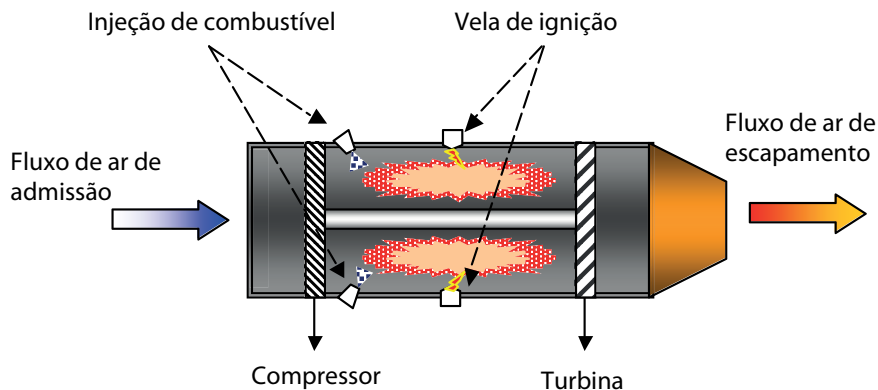
Além desse ar necessário para a queima, as câmaras de combustão devem receber combustível e, para dar início à queima da mistura de ar-combustível, é necessário que haja velas de ignição, as quais, após o início da queima, não são mais necessárias, a não ser que ocorra um apagamento inadvertido do motor ou um risco de apagamento.

Cabe destacar que o fluxo de gases, ao movimentar a turbina, sofre uma queda na sua velocidade. Essa queda é recuperada

por meio de um bocal propulsor que aumenta a velocidade por **expansão**.

A próxima figura ilustra um esquema com o princípio básico de funcionamento de um motor aeronáutico a reação.

Figura 4.3 – Motor a reação esquemático



É o processo que a possibilita diminuir a pressão estática de um fluido em movimento com o aumento da velocidade do mesmo. O processo inverso, ou seja, de aumentar a pressão aproveitando-se sua energia cinética e consequentemente diminuindo a velocidade, chama-se **difusão**.

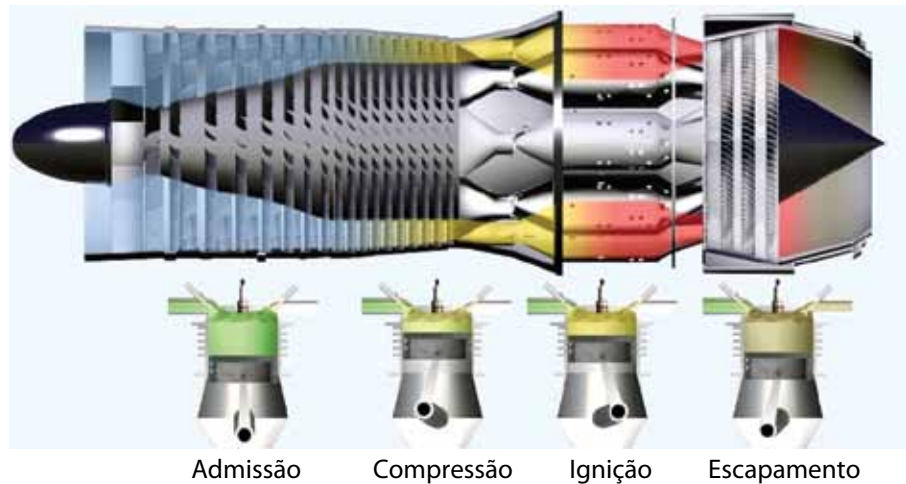
Fonte: Elaborado pelo autor (2013).



Como podemos relacionar esse esquema de motor aeronáutico a reação com o motor aeronáutico convencional?

Para que possamos entender a diferença entre esses motores de aviação vamos apresentar, por meio da figura a seguir, um esquema detalhado de um motor de aviação a reação, a partir do qual estabeleceremos uma relação com as fases de operação de um motor aeronáutico convencional.

Figura 4.4 – Fases do motor a reação



Fonte: Adaptado de ImageShack (2013).

Podemos observar na figura anterior que cada uma das fases operacionais dos motores de aviação a reação é realizada em um local distinto. Assim, elas poderão ocorrer de maneira contínua, ao contrário dos motores aeronáuticos convencionais, nos quais as referidas fases ocorrem em um mesmo local, e por isso são executadas ciclicamente.

Comparação entre as fases operacionais de motores de aviação

Na sequência vamos comparar algumas características inerentes às fases de operações dos motores de aviação a reação com as fases dos motores convencionais.

Admissão

Esta fase refere-se à admissão da mistura ar-combustível na câmara de combustão, sendo que nos motores aeronáuticos convencionais a mencionada mistura é admitida pela sucção causada pelo deslocamento do pistão para baixo, aumentando o volume do cilindro. Já nos motores a reação, esta fase se caracteriza pela captação de ar na entrada do motor, o qual

é admitido por meio do próprio deslocamento da aeronave e também pela ação do compressor, que succiona o ar à sua frente.

Compressão

A fase de compressão nos motores de aviação a reação diz respeito à sucção do ar frontal pelo compressor que é transferido para sua parte posterior em alta pressão. Esta fase é correspondente à subida do pistão nos motores aeronáuticos convencionais.

Ignição

A fase de ignição ocorre na câmara de combustão, sendo que em motores aeronáuticos a reação, em virtude de a injeção de combustível ser feita de forma contínua, a centelha da vela é necessária apenas para dar início à queima, não necessitando mais da vela depois do funcionamento estabilizado. Já em motores aeronáuticos convencionais, cada explosão necessita de uma centelha produzida pela vela, ou seja, temos um acionamento da vela a cada ciclo.



Em motores convencionais de aviação a queima da mistura de ar-combustível causa o deslocamento do pistão para baixo, e esse movimento é aproveitado como energia mecânica. Nos motores a reação, verificamos que a transformação de energia térmica em mecânica que ocorre pela expulsão dos gases, na próxima fase.

Escapamento

Na fase de escapamento, em motores de aviação a reação, os gases queimados se expandem rapidamente e, devido às paredes do tubo e pressão elevada no compressor, escapam pela parte traseira do motor. Essa saída dos gases é correspondente nos motores aeronáuticos convencionais ao momento em que o pistão sobe, expulsando os resíduos da queima.

O escapamento dos gases nos motores aeronáuticos a reação, além de causar a reação propriamente dita que vai impulsionar o motor para a frente e expulsar os resíduos da queima, faz com que a turbina gire e mova o compressor que está ligado a ela por meio de um eixo.

Performance de um motor aeronáutico a reação

Para que possamos comparar a performance de motores de aviação a reação entre si, é necessário que sejam utilizadas unidades de medida padronizadas, as quais geralmente são a libra-força (Lbf) e o quilograma-força (Kgf).

Entendemos aqui por performance a tração produzida por motores aeronáuticos a reação distintos funcionando em condições idênticas. Assim, um motor aeronáutico terá melhor performance caso produza maior tração nas mesmas condições de operação de outro motor aeronáutico com o qual é comparado.



Nos motores de aviação a reação a potência utilizada é função da velocidade de deslocamento, logo um motor em funcionamento, porém, parado, não estará desenvolvendo potência.

Cabe ressaltar que alguns fatores externos, como, por exemplo, pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ar, de acordo com a quantidade de ar admitido pelos motores, assim como a pressão de impacto da massa de ar na entrada do motor, influenciam a tração desenvolvida pelos motores de aviação a reação e, conseqüentemente, refletirá na performance dos mesmos.

Palharini (2011) descreve alguns desses fatores que influenciam na performance dos referidos motores, os quais são apresentados na seqüência.

Pressão atmosférica

A pressão atmosférica reduz à medida que a aeronave ganha altitude. Essa redução causa uma diminuição na densidade do ar e, conseqüentemente, na quantidade de oxigênio admitida pelo motor.

Temperatura do ar externo

A elevação da temperatura do **ar externo** diminui sua densidade, que é a relação entre massa e volume. Logo, a massa do ar admitido diminui com a elevação da temperatura, considerando-se o mesmo volume de ar admitido. Já a queda de temperatura do ar externo tem o efeito inverso, aumentando a densidade e com isso a massa de ar admitido pelo motor.

Umidade relativa do ar

Quando a umidade relativa do ar aumenta há uma elevação na porcentagem de vapor d'água no ar admitido no motor. A água no estado vapor é mais leve que o ar, dessa forma uma massa de ar que contém maior concentração de vapor d'água é menos densa que a mesma quantidade de ar seco.

Pressão de impacto do ar admitido pelo motor

Outro fator que influencia na performance pelo motor aeronáutico a reação é a velocidade de deslocamento, visto que à medida em que a velocidade da aeronave aumenta, há uma elevação na pressão de impacto do ar na entrada do motor causando uma leve redução da tração produzida, sendo que nas aeronaves supersônicas o efeito da pressão de impacto é maior.

É importante observar que em aeronaves supersônicas, além do aumento do impacto do ar com o motor, aparece o efeito de onda de choque, que influencia na tração.

É um fenômeno que surge quando um objeto se desloca em velocidade igual ou muito próxima à velocidade do som. As ondas sonoras produzidas pelo objeto, que são ondas de pressão de ar, não conseguem se propagar em relação ao objeto e se acumulam à sua frente, pois se deslocam na velocidade do som e o objeto que as produz está na mesma velocidade.

Seção 2 – Tipos de motores de aviação a reação

Apesar de todos os motores aeronáuticos a reação utilizarem o mesmo princípio físico da lei da ação e reação, uns se diferenciam dos outros por características definidas em projeto, pelo processo em que ocorre queima da mistura de ar-combustível na câmara de combustão ou então para gerar a barreira de pressão na parte

posterior do motor que vai forçar os gases a saírem pela parte traseira, provocando o movimento para a frente.

Motores aerotérmicos e não aerotérmicos

A primeira distinção entre os motores aeronáuticos a reação ocorre pela forma com que a mistura comburente e combustível é fornecida à câmara de combustão para a queima. Assim como nos motores de aviação convencionais, nos motores a reação a queima do combustível ocorre juntamente com um comburente, sendo que a forma como esse comburente é captado classificará os motores a reação em **aerotérmicos** e **não aerotérmicos**.

Os motores aerotérmicos utilizam como comburente o ar aspirado pelo próprio motor durante seu deslocamento na atmosfera. No que se refere aos motores a reação não aerotérmicos, como o motor foguete, provê seu próprio comburente, pois tem reservatório de oxigênio e assim não necessita do ar atmosférico para efetuar a queima. Este tipo de motor é utilizado para suprir necessidades específicas.

Os motores de artefatos espaciais, como foguetes e naves espaciais, que voam em altitudes com ar muito rarefeito ou mesmo fora da atmosfera, como não necessitam captar o ar atmosférico, não possuem entrada de ar ou compressores.

Historicamente, surgiram diferentes sistemas para a propulsão de aeronaves cuja transformação da energia térmica em mecânica ocorre por aplicação direta da lei da ação e reação quando da expulsão dos gases gerados na queima de combustível, sendo que na sequência são apresentados os principais tipos de motores aerotérmicos.

Tipos de motores aeronáuticos a reação aerotérmicos

Os sistemas para propulsão de aeronaves com motores aerotérmicos, no decorrer dos anos foram aperfeiçoados e adaptados às diversas aplicações, gerando assim diferentes tipos de motores a reação para aviação. Segundo Ribeiro (2013), os principais motores aeronáuticos a reação são os descritos a seguir:

Estado-jato ou estado-reator

Este é um tipo de motor a reação mecanicamente mais simples, no qual verificamos dois efeitos quanto à saída dos gases, denominados **expansão** e **difusão**.

Na expansão a velocidade de saída dos gases, perdida na movimentação da turbina, pode ser recuperada pelo estreitamento do bocal de saída aumentando a força de propulsão. Já a difusão, ao contrário, é uma redução da velocidade dos gases e conseqüente aumento da pressão.

No motor estado-jato a difusão é utilizada para fazer o aumento da pressão na entrada da câmara de combustão. Assim, o estado-jato não tem peças móveis, mas requer uma velocidade deslocamento inicial de cerca de 250 **KT**, ou seja, este motor é utilizado para aumentar a velocidade de artefatos que já estejam se deslocando. Esses motores foram utilizados, por exemplo, para impulsionar bombas motorizadas, que já eram lançadas com a velocidade inicial da aeronave que a transportava.

É a abreviatura de Knots, unidade de velocidade que representa uma milha náutica (NM) por hora, ou aproximadamente 1,86 km/h.



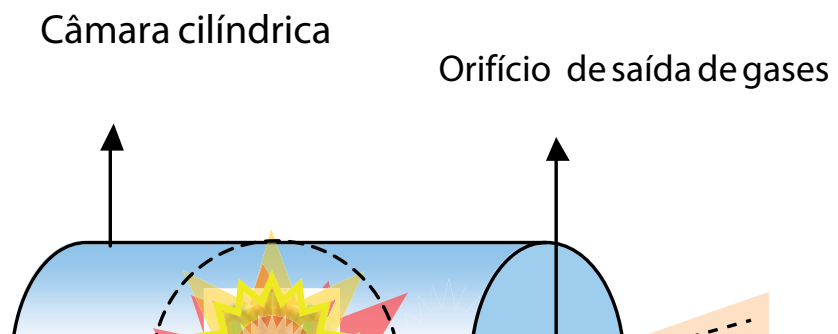
Em virtude de suas características, esse motor somente foi usado como **meio de incremento de tração** em aparatos como aeronaves, bombas, foguetes, veículos lançadores, entre outros, os quais já dispunham de outro tipo de motor ou de velocidade inicial proveniente de outro meio.

O princípio de funcionamento do estado-reator, nome também utilizado para o estado-jato, ilustrado pela figura na sequência, pode ser empregado em motores híbridos, que são motores a reação que utilizam os princípios de funcionamento de mais de um motor a reação específico.

Cabe observar que motor híbrido não é a combinação de dois motores, mas um mesmo motor que se utiliza de princípios diferentes, ou seja, possui a mesma câmara de combustão, o mesmo escapamento, entre outros.

Por exemplo, como o motor estato-jato não consegue operar com velocidade de deslocamento inferior a 250 Kt, o movimento inicial de uma aeronave com motor híbrido, que se utilize do princípio do estato-jato, deve ser proporcionado pelo princípio de funcionamento de um outro tipo de motor, até que a velocidade inicial seja atingida e ela possa se deslocar segundo os princípios do estato-jato.

Figura 4.5 – Estato-jato



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

Na figura apresentada observamos o esquema de um estato-jato no qual podemos perceber que a câmara de combustão está separada da entrada de ar apenas pelos bicos injetores de combustível e velas de ignição. Assim, o funcionamento desse motor é impossível a baixas velocidades, pois a expansão dos gases se daria também pela frente, o que não ocorrerá em velocidades maiores que 250 Kt, pois o impacto do ar na frente do motor impede que os gases saiam por esse local.

Pulso-jato

O motor pulso-jato foi empregado nas bombas alemãs V-1 durante a Segunda Guerra Mundial, e funciona em ciclos pulsantes. Por isso é também conhecido por **motor intermitente** ou **motor ressonante**. Este motor possui na entrada um sistema de válvulas que se mantêm fechadas por ação de molas.

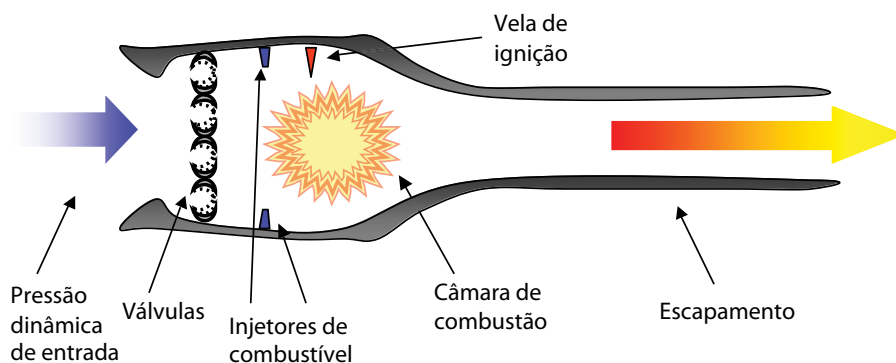
Na fase de admissão, o forte impacto do ar na entrada do motor associado à redução da pressão na parte interna do motor ocorrida após a combustão produz uma diferença de forças maior que a ação de molas que mantinha as válvulas fechadas, fazendo com que as válvulas se abram, permitindo a entrada de mais ar para dar prosseguimento à combustão.

No que se refere à fase de compressão, a mesma ocorre por difusão e, em seguida, temos a expansão com o fechamento das válvulas, e, por fim, o escapamento dos gases. O ciclo pulsante deste motor é aproximadamente **50 Hz** que, apesar de torná-lo extremamente barulhento, proporciona uma tração contínua, mas com alto consumo de combustível.

Essa é a abreviatura de Hertz, medida de frequência equivalente a um ciclo por segundo.

A figura seguinte ilustra um modelo esquemático do motor pulso-jato.

Figura 4.6 – Pulso-jato



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

Podemos observar nessa figura uma parede formada por um sistema de válvulas que separa a câmara de combustão da entrada do motor as quais se abrem na fase de admissão e se fecham na fase de expansão.

Turbo-jato

A estrutura de um motor aeronáutico turbo-jato pode ser considerada como base para outros tipos de motores a reação, visto que representa a implementação do conceito do

funcionamento dos motores a reação propriamente dito, nos quais a barreira de pressão na parte frontal é feita por meio de um compressor, que por sua vez é movido pela turbina localizada na parte posterior, a qual é movida pela expansão dos gases.

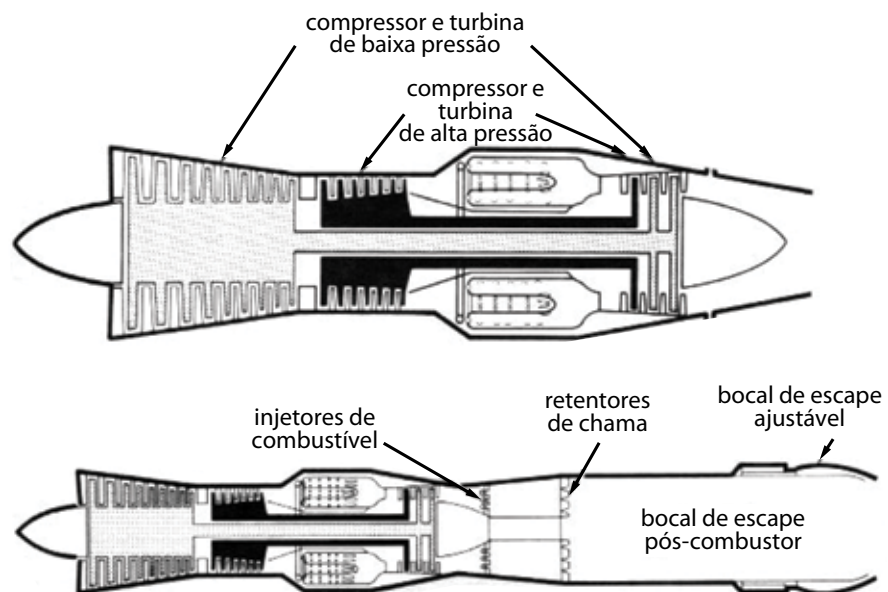


Em virtude de os motores turbo-jato terem sua força de empuxo produzida unicamente pela exaustão dos gases, são também chamados de jato puro.

Este tipo de motor a reação tem como uma de suas vantagens a possibilidade do recurso de pós-combustão, o qual injeta combustível no início do escapamento dos gases da combustão principal, produzindo empuxo extra quando necessário. Já a grande desvantagem deste motor é o alto consumo de combustível e ruído elevado quando em funcionamento.

A figura a seguir ilustra a estrutura do motor turbo-jato.

Figura 4.7 – Turbo-jato com e sem pós-combustão



Fonte: Ribeiro (2013).

Nessa figura observamos o esquema de um motor turbo-jato no qual podemos identificar o compressor de baixa pressão, o compressor de alta pressão, as câmaras de combustão, a turbina e o escapamento. Particularmente na figura que ilustra o mesmo

motor com sistema de pós-combustão, verificamos uma seção de bicos injetores de combustível para pós-combustão, um sistema de retentores de chama e o bocal do pós-combustor.

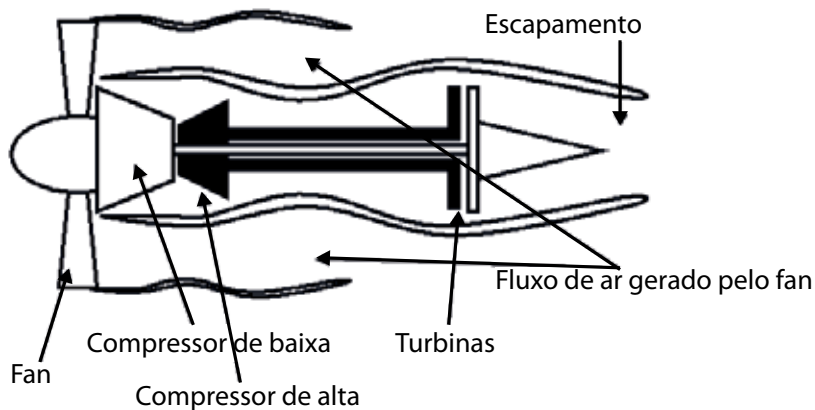
Turbo-fan

Este tipo de motor a reação, atualmente, é o mais utilizado na aviação comercial devido às visíveis vantagens sobre o jato puro. O motor turbo-fan tem como uma de suas características uma ventoinha (fan) associada ao eixo do compressor, a qual é, basicamente, uma hélice totalmente carenada.

Esta hélice tem um diâmetro bem menor que o de uma hélice convencional, contudo, apresenta um número muito maior de pás que giram na mesma rotação que o conjunto compressor turbina. Assim, o fan gerará tração que pode ir de 30 a 80% da tração total do motor impulsionando uma grande massa de ar.

Do ar total admitido pelo sistema, cerca de um quinto é empregado na queima do combustível na câmara de combustão do motor e na refrigeração dessas câmaras. A próxima figura ilustra a estrutura de um motor turbo-fan.

Figura 4.8 – Turbo-fan



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

Cabe ressaltar que o turbo-fan é mais silencioso e econômico que o turbo-jato, pois a maior parte do volume de ar por ele utilizado não participa da queima, mas sim da propulsão aerodinâmica

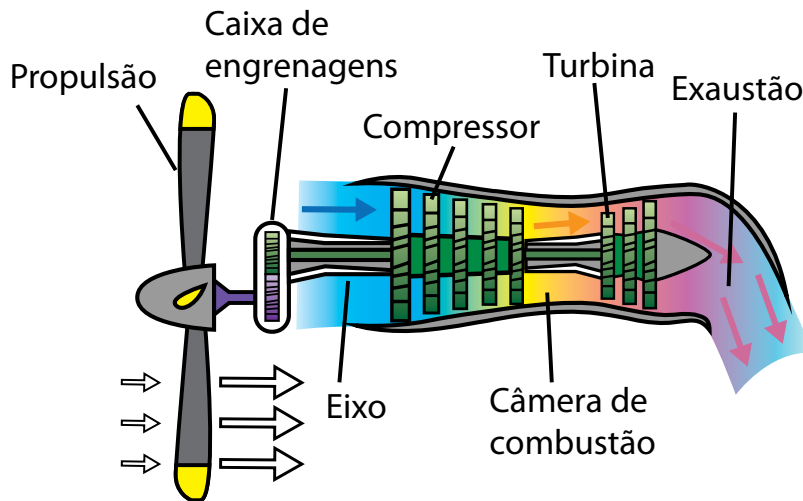
causada pela ventoinha, ou fan, sendo que o ar impulsionado se desloca em torno do motor, gerando uma barreira que ajuda na redução do ruído.

Turbo-hélice

Neste tipo de motor aeronáutico a reação, a turbina a jato tem a finalidade principal de fazer girar a hélice diretamente ou por meio de uma turbina livre. Os turbo-hélices geralmente são mais complexos e pesados que os turbo-jatos, pois possuem maior quantidade de peças móveis, porém fornecem maior tração em baixas velocidades e consumo de combustível bem menor em baixas altitudes.

A figura seguinte ilustra a estrutura de um motor a reação turbo-hélice.

Figura 4.9 – Turbo-hélice



Fonte: Santana (2008).

Verificamos na figura apresentada que a hélice é tracionada por uma caixa de engrenagens, sendo que em alguns modelos desses motores o escapamento dos gases move uma turbina livre que, por sua vez, move a hélice. Verificamos também que o escapamento dos gases não ocorre diretamente para trás, visto que esse escapamento em motores turbo-hélice não tem a finalidade de proporcionar propulsão. Essa característica permite que esses motores sejam mais compactos que os motores a jato puro.

Turbo-eixo

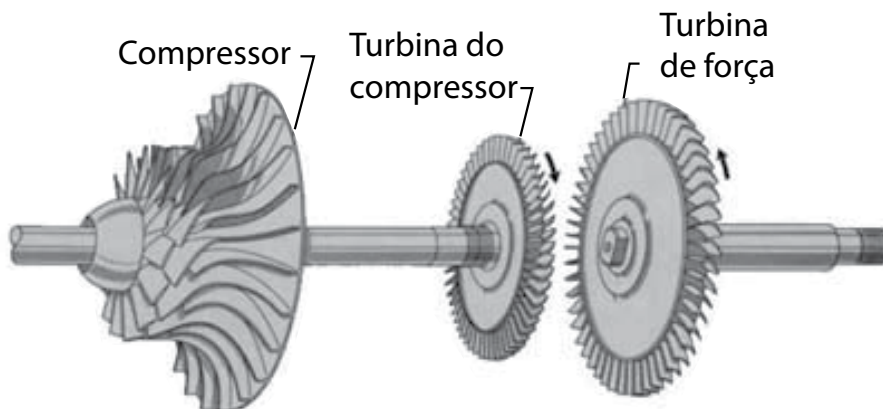
Da mesma forma que o motor a reação turbo-hélice, nos motores turbo-eixo a turbina principal tem a finalidade primária de acionar um eixo em detrimento à geração de propulsão por reação. Esse eixo, acionado pela mencionada turbina, pode movimentar qualquer dispositivo que não seja uma hélice.



O sistema de movimento do eixo é o mesmo sistema motor turbo-hélice, assim, podemos dizer até que o turbo-hélice é um caso particular do motor turbo-eixo quando aplicado em uma hélice.

Particularmente em aviação, este tipo de motor é utilizado em helicópteros para produzir o torque nos rotores principal e de cauda. Podemos observar na figura seguinte um modelo esquemático do motor turbo-eixo.

Figura 4.10 – Turbo-eixo esquemático



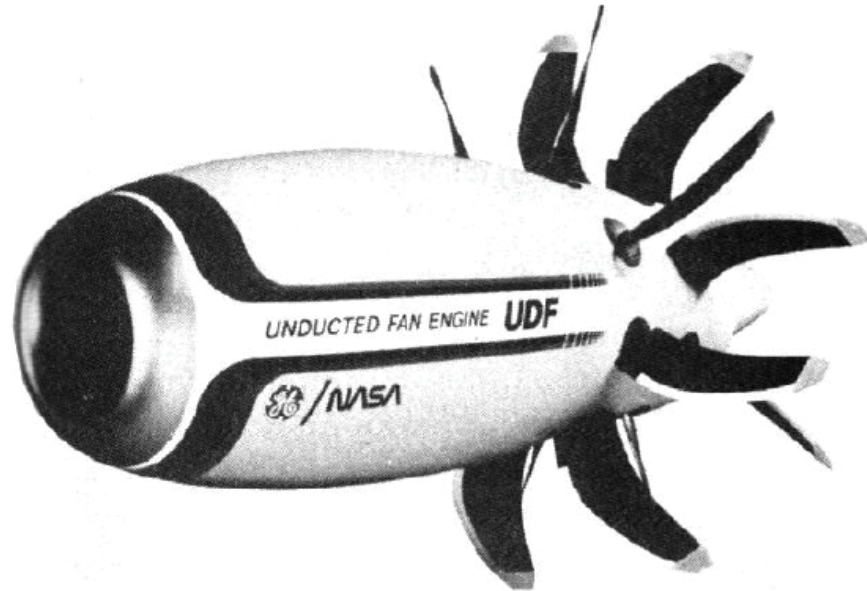
Fonte: Best Cars Web Site (2013).

Nesse esquema, ao contrário daquele que vimos na figura do motor turbo-hélice, temos o acionamento do eixo por meio de uma turbina livre, identificada nessa ilustração como “turbina de força”.

Prop-fan

A designação prop-fan é utilizada para classificar motores aeronáuticos a reação que utilizavam ventoinhas tipo os turbofans, porém descarenadas, dispostas na traseira em pares contrarrotativos, conforme observamos na figura a seguir.

Figura 4.11 – Prop-fan



Fonte: Ribeiro (2013).

É importante observar que este tipo de motor foi projetado para ter maior eficiência, porém apresentou alguns problemas relacionados às ventoinhas descarenadas. Desse modo será apresentado neste estudo apenas a título de conhecimento geral, visto que não é utilizado. De acordo com Ribeiro (2013, p. 16), “os motores prop-fan foram pesquisados na década de 80 como uma solução para o problema da crise de petróleo, já que apresentaria maior eficiência”.

Motores híbridos

Ao estudar os diferentes tipos de motores aeronáuticos a reação é possível constatar que cada um possui características próprias e apresentam melhor desempenho em determinadas situações. Sendo assim, na tentativa de aproveitar as vantagens desses

diferentes tipos de motores, ou ampliar a faixa de operação de um motor, foram projetados motores híbridos.

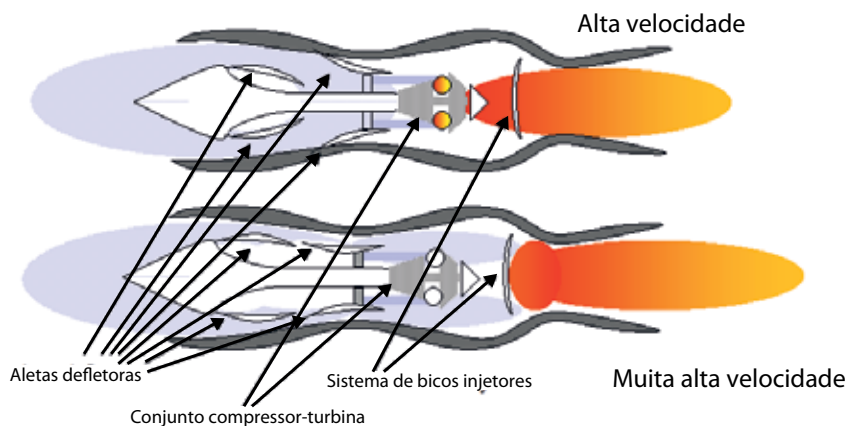


O motor híbrido **turbo-estato-reator** combina vantagens de um motor turbo-jato com a do motor estato-jato, que funciona a partir de uma determinada velocidade, a qual é obtida a partir da ação da parte turbo-jato do sistema.

Nas aeronaves com o motor **turbo-estato-reator**, ao ser atingida a velocidade adequada, um conjunto de aletas que integra o sistema do motor desvia o fluxo de admissão para que o sistema estato-jato passe a funcionar, possibilitando que a aeronave atinja velocidades muito superiores, caso utilizasse apenas o motor turbo-jato.

Podemos observar nas ilustrações a seguir as configurações do motor a reação turbo-estato-jato em situações em que a aeronave está respectivamente em **alta** e **muita alta velocidade**.

Figura 4.12 – Configurações do motor turbo-estato-jato



Fonte: Elaborado pelo autor (2013).

Outro tipo de motor híbrido é o **turbo-foguete**, o qual possui turbina e compressor e, ainda, um reservatório e sistema de injeção de oxigênio como o motor foguete. Dessa forma, pode operar em condições de baixíssima pressão atmosférica.

O referido motor possui entrada de ar e utiliza o ar admitido para resfriamento da seção quente do motor. A injeção de combustível,

que posteriormente é misturado com o ar, auxilia no resfriamento do motor. O ar admitido é comprimido e queimado em pós-combustão, isso torna o consumo de combustível desse motor muito elevado.



Síntese

Nesta leitura você conheceu conceitos básicos utilizados para o aproveitamento do fenômeno físico descrito pela terceira Lei de Newton, ação e reação, na produção de propulsão para uma aeronave, a qual é obtida por meio de motores aeronáuticos a reação.

Verificou que esses motores a reação possuem as mesmas fases de operação de um motor aeronáutico convencional, porém as executa de forma contínua, tratando as diferenças de pressão a partir do uso de um compressor que é acionado por uma turbina, dispositivo que aproveita a exaustão dos gases da combustão.

Por fim, compreendeu que os princípios básicos de funcionamento de um motor aeronáutico a reação possibilitam seu aperfeiçoamento e adaptação a diferentes situações, resultando em diferentes tipos de motores a reação.



Atividades de autoavaliação

- 1) A partir de nossos estudos referentes a motores aeronáuticos a reação, assinale nas alternativas a seguir (V) verdadeiro ou (F) falso:
- () No motor aeronáutico a reação, tal como no motor convencional, as diversas fases de funcionamento ocorrem no mesmo espaço físico.
 - () Em um motor de aviação a reação temos as mesmas fases de funcionamento de um motor aeronáutico convencional.
 - () O giro do compressor de um motor a reação é mantido pela turbina.
 - () Por suas características de funcionamento, nenhum motor aeronáutico a reação necessita de velas, como ocorre em um motor de aviação convencional.
- 2) No motor de aviação a reação, o compressor, após captar o ar atmosférico, aumenta a sua pressão para que o ar seja queimado junto com o combustível na câmara de combustão. Esta fase é comparável a qual dos processos de um motor aeronáutico convencional descritos na sequência?
- a) Descida do pistão para succionar a mistura ar-combustível para o cilindro.
 - b) Subida do pistão para comprimir a mistura ar-combustível no cilindro.
 - d) Expansão do pistão com a queima dos gases na câmara de combustão.
 - e) Subida do pistão para expulsar do cilindro os gases da queima.
- 3) A partir dos conhecimentos adquiridos em nossos estudos, relacione a primeira coluna com a segunda, de acordo com a característica descrita do tipo de motor de aviação a reação:
- | | |
|------------------|--|
| () Estato-jato | 1. A propulsão é produzida pela reação dos gases e por uma ventoinha ligada ao eixo de rotação do motor. |
| () Turbo-jato | 2. A força de empuxo é produzida unicamente pela expansão dos gases. |
| () Turbo-fan | 3. O aumento de pressão ocorre por difusão. Não possui partes móveis. |
| () Turbo-hélice | 4. A força dos gases de combustão é utilizada para mover uma hélice. |



Saiba mais

GUNSTON, Bill. **The Development of Jet and Turbine Aero Engines**. Haynes Publishing - 4 ed. 2006.

HOMA, Jorge M. **Aeronaves e motores**. Conhecimentos técnicos. 31. ed. São Paulo: ASA, 2012.



Para concluir o estudo

Quando observamos uma aeronave cruzar o céu com seu som característico, raramente pensamos que os motores que fazem com que ela se locomova são resultado de uma longa história construída por pesquisas, erros e acertos que envolveram custos incalculáveis.

Assim, no decorrer de nossos estudos conhecemos os princípios básicos de funcionamento dos motores aeronáuticos convencionais e a reação. A ideia foi a todo o momento fazer com que você entendesse as relações de volume, pressão e movimento que estão relacionados a cada evento que envolve o processo de transformação da energia calorífica acumulada no combustível em energia mecânica útil para propulsionar as aeronaves.

Dessa forma, espero que a partir de agora, ao ouvir o barulho de um motor aeronáutico, você considere que as reações que ocorrem dentro daquela máquina são a aplicação do conhecimento das leis físicas em prol de um objetivo muito bem definido e demonstram nossa capacidade de interpretar os acontecimentos que ocorrem no ambiente que nos cerca, explicá-los e produzi-los sob condições controladas a favor de nossa conveniência.

Sucesso em seus estudos!

Professor Hélio.

Referências



AVIATION HISTORY ONLINE MUSEUM. **Rolls-Royce Merlin**. 29 nov. 2006. Disponível em: <<http://www.aviation-history.com/engines/merlin.htm>>. Acesso em: 21 abr. 2013.

BEST CARS WEB SITE. **Entendendo a turbina a gás**. Disponível em: <<http://bestcars.uol.com.br/classicos/turbine-8.htm>>. Acesso em: 2 maio 2013.

BOEING. Boeing oferece programa de motores para seus clientes VIP do 747-8 Intercontinental. **Cavok asas de aviação**. Disponível em: <<http://www.cavok.com.br/blog/?p=32834>>. Acesso em: 30 jun. 2013.

EAGLESGATE. **Tipos de motores aeronáuticos**. Atualização 14 out. 2010. Disponível em: <<http://eaglesgate.com/tipomotores.htm>>. Acesso em: 22 abr. 2013.

FLYTECH. **Switch de ignição c/chave**. Disponível em: <<http://goo.gl/JIYZ0V>>. Acesso em: 20 abr. 2013.

HALLYDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentals of physics**. New York: Wiley, 1997.

IMAGESHACK. Disponível em:<<http://imageshack.us/photo/my-images/526/sessao.jpg/>>. Acesso em: 15 abr. 2013.

HOMA, Jorge M. **Aeronaves e motores**. Conhecimentos técnicos. 24. ed. São Paulo: ASA, 2004.

HOMA, Jorge M. **Aeronaves e motores**. Conhecimentos técnicos. 31. ed. São Paulo: ASA, 2012.

KADELLAR. North American T-6 Texan (motor: Pratt & Whitney R-1340). 24 jun. 2010. Disponível em: <<http://goo.gl/HU3MG>>. Acesso em: 21 abr. 2013.

MANUAL DO MECÂNICO DE MANUTENÇÃO AERONÁUTICA. **Grupo Motopropulsor**. Instituto de Aviação Civil – Divisão de Instrução Profissional. Edição revisada 23 out. de 2002.

MERCADO LIVRE. **Vela de ignição A3 turbo Golf Turbo Pfr6q Original Vw**. Disponível em: <<http://goo.gl/0vAetx>>. Acesso em: 20 abr. 2013.

PALHARINI, Marcos J. A. **Motores a reação**. São Paulo: Asa Edições, 2011.

REIS, A. V.; MACHADO, A. L. T.; TILLMANN, C. A. C. et al. **Motores, tratores, combustíveis e lubrificantes**. Pelotas: UFPel, 1999.

RIBEIRO, P. R. Motores a reação. **Apostilas da disciplina de manutenção de aeronaves**. Disponível em: <<http://www.demec.ufmg.br/Cea/livro2.htm>>. Acesso em: 2 maio 2013.

SANTANA, C. R. **Turboélice**. Disponível em: <<http://goo.gl/zcMVG>>. Acesso em: 2 maio 2013.

SEMPREFS. **Addon's para flight simulator**. Disponível em: <<http://semprefs.blogspot.com.br/2009/11/neiva-t-25-universal-fab-fsx-e-fs2004.html>>. Acesso em: 29 jun. 2013.

STREETCUSTOMS. **Motor de quatro tempos**: O que é isso? Street Customs Editorial. 15 maio 2012. Disponível em: <<http://goo.gl/ooWRH>>. Acesso em: 20 abr. 2013.



Sobre o professor conteudista

Hélio Luís Camões de Abreu é bacharel em Ciências Aeronáuticas pela Academia da Força Aérea e oficial aviador da reserva da Força Aérea Brasileira, entidade na qual se tornou operacional na aviação de patrulha marítima e na aviação de ataque. Possui MBA em Administração Pública pela Universidade Federal Fluminense (UFF). Exerceu, no decorrer de seus mais de trinta anos de serviço no Comando da Aeronáutica, diversas funções administrativas e acadêmicas, das quais cabe ressaltar a de Chefe da Seção de Motores Convencionais do Parque de Material Aeronáutico de Lagoa Santa, Instrutor no Grupo de Instrução Tática e Especializada, Comandante do Destacamento de Controle do Espaço Aéreo em Tanabi – SP e Oficial de Estado-Maior do COMAER em Brasília-DF. Durante o período em que serviu no Departamento de Controle do Espaço Aéreo, formou-se Inspetor de Aviação Civil, função que exerceu por quase dez anos, quando foi designado para prestar serviço na Missão da ONU para Estabilização do Haiti. Também é licenciado em Educação Física pela Escola de Educação Física do Exército e autor do livro *Voando Com Saúde*, um guia de condicionamento para o aeronavegante, editora Luzes, 2008.

Atualmente reside em Florianópolis – SC, ministra aulas em cursos de aviação e cursa Matemática e Computação Científica na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).



Respostas e comentários das atividades de autoavaliação

Unidade 1

1) Caminho de resposta:

A sequência correta é: F, F, V, F.

Falsa – Nos motores aeronáuticos convencionais existem pelo menos três tipos de anéis de segmento: compressão, controladores de óleo e raspadores de óleo.

Falsa – Cada anel de segmento de um motor convencional tem uma função distinta e é construído para aquela função, não sendo possível intercambiá-los.

Verdadeira.

Falsa – Um pistão de um motor aeronáutico convencional pode ter três anéis, um com cada função.

2) Caminho de resposta:

A sequência correta é: F, F, V, V.

Falsa – As aletas do cilindro de um motor aeronáutico convencional têm a função de dissipar o calor.

Falsa – Nos cilindros de liga leve dos motores aeronáuticos convencionais existe um revestimento interno feito de material mais resistente.

Verdadeira.

Verdadeira.

Unidade 2

1) Caminho de resposta:

A alternativa correta é a letra "c", pois a falha de um motor em voo representa um perigo incalculável, assim a confiabilidade do motor aeronáutico é fundamental.

As justificativas para as questões estarem erradas são apresentadas a seguir:

- a) Alguns tipos de motores são inadequados para a aviação por serem muito pesados, pouco confiáveis ou por não se comportarem adequadamente sob as diversas condições de voo.
- b) O rendimento é a relação entre a energia obtida e a energia total fornecida. Dessa forma, mesmo que um motor que tenha um excelente rendimento, mas que seja extremamente pesado, não é adequado para a aviação, pois boa parte da energia que gera será gasta para sustentar seu próprio peso.
- d) O motor aeronáutico deve levar seu combustível a bordo da aeronave, e um motor que não seja econômico necessita de uma quantidade muito grande de combustível para operar pelo mesmo período de tempo de um motor econômico. Assim, uma quantidade excessiva de combustível representa mais peso a ser sustentado.

2) Caminho de resposta:

A sequência correta é: V, F, V, F.

Verdadeira.

Falsa – Durante os quatro tempos de funcionamento do motor aeronáutico convencional a quatro tempos ocorrem seis fases: admissão, compressão, ignição, combustão, expansão e escapamento.

Verdadeira.

Falsa – Durante a fase de escapamento de um motor aeronáutico convencional a quatro tempos, a válvula de escapamento permanece aberta para permitir a saída dos gases queimados. A válvula de admissão também é aberta antecipadamente ao final dessa fase.

3) Caminho de resposta:

A alternativa que não corresponde ao acionamento das válvulas e vela de ignição do ciclo de um motor aeronáutico convencional a quatro tempos é a "b", pois a abertura e o fechamento das válvulas requerem um período de tempo para ocorrer e, por esse motivo, seu acionamento é antecipado para que elas estejam totalmente abertas ou fechadas ao início de cada fase.

4) Caminho de resposta:

A sequência correta é: F, V, V, F.

Falsa – Cada tempo de funcionamento do motor aeronáutico convencional a dois tempos corresponde ao movimento do êmbolo em um curso, ou seja, meia volta do eixo, logo, o ciclo do referido motor envolve apenas uma volta.

Verdadeira.

Verdadeira.

Falsa – O motor aeronáutico a dois tempos aquece mais que o motor aeronáutico a quatro tempos porque as combustões ocorrem com mais frequência.

Unidade 3

1) Caminho de resposta:

A alternativa correta é a “c”.

2) Caminho de resposta:

A sequência correta é: F, V, F, V.

Falsa – O estol de compressor e o estol da aeronave são eventos distintos e independentes. O estol de compressor está relacionado com a entrada do fluxo de ar no motor e o estol da aeronave diz respeito à passagem do fluxo de ar nas asas.

Verdadeira.

Falsa – Alguns mecanismos apresentados no texto são a sangria controlada do fluxo de ar no compressor, a variação do ângulo das palhetas do estator, a variação da área do bocal de descarga e o controle de rotação do eixo.

Verdadeira.

3) Caminho de resposta:

A diferença entre ar primário e secundário, que são admitidos pela câmara de combustão de um motor aeronáutico a reação, é que o ar primário é utilizado para a queima do combustível na referida câmara e o ar secundário para o controle de sua temperatura, fazendo a refrigeração ao passar pela parte externa da câmara.

Unidade 4

1) Caminho de resposta:

A sequência correta é: F, V, V, F.

Falsa – No motor aeronáutico a reação, cada fase ocorre em um espaço distinto.

Verdadeira.

Verdadeira.

Falsa – O motor aeronáutico a reação necessita de vela para iniciar a combustão.

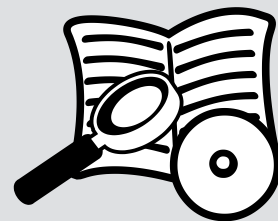
2) Caminho de resposta:

A alternativa correta é a letra “b”. A fase em que o compressor, após captar o ar atmosférico, aumenta a sua pressão para que o ar seja queimado junto com o combustível na câmara de combustão pode ser comparada à subida do pistão em um motor de aviação convencional, o qual comprime os gases para a queima tal como o compressor comprime o ar no motor aeronáutico a reação.

3) Caminho de resposta:

A sequência correta é 3, 2, 1, 4.

Biblioteca Virtual



Veja a seguir os serviços oferecidos pela Biblioteca Virtual aos alunos a distância:

- Pesquisa a publicações on-line
<www.unisul.br/textocompleto>
- Acesso a bases de dados assinadas
<www.unisul.br/bdassinadas>
- Acesso a bases de dados gratuitas selecionadas
<www.unisul.br/bdgratuitas>
- Acesso a jornais e revistas on-line
<www.unisul.br/periodicos>
- Empréstimo de livros
<www.unisul.br/emprestimos>
- Escaneamento de parte de obra*

Acesse a página da Biblioteca Virtual da Unisul, disponível no EVA, e explore seus recursos digitais.

Qualquer dúvida escreva para: bv@unisul.br

* Se você optar por escaneamento de parte do livro, será lhe enviado o sumário da obra para que você possa escolher quais capítulos deseja solicitar a reprodução. Lembrando que para não ferir a Lei dos direitos autorais (Lei 9610/98) pode-se reproduzir até 10% do total de páginas do livro.

UnisulVirtual

A sua universidade a distância



UNISUL

ISBN 9788578175610



9 788578 175610