



¹Gerson de Souza Carvalho

²Ricardo Oliveira Silva

*Márcio Pinto Sérgio - Cap Esp Av

**Rosinaldo Silva Alves Bonfim - 2 SBMA

A EVOLUÇÃO DOS MOTORES NO CENTENÁRIO DA AVIAÇÃO

RESUMO

A evolução das pesquisas no cenário aeronáutico levou à construção de diversos motores a reação tais como: turbojato, estatojato, pulsojato, jato puro, turbofan, propfan os quais equipam aeronaves de todo o mundo. Esses propulsores admitem o ar atmosférico em sua parte anterior e expõem os gases da combustão por sua parte posterior. Essa expulsão gera uma grande força de empuxo a qual é perfeitamente explicada pela terceira lei de Newton, chegando a conduzir aeronaves em diversos regimes de velocidades, desde subsônicas até supersônicas; cumprindo, assim, com êxito a função à qual foram propostos.

Palavras-chave: motor a reação; motor a jato; turbina; seção difusora; zona de combustão; escapamento; ação e reação; evolução; gases; turbojato; estatojato; pulsojato; propfan.

1- CFOE AV. Servia em 2005 no Parque de Material Aeronáutico dos Afonsos (PAMAAF) como Coordenador da Linha de Manutenção, Licenciado em Matemática.

2 - CFOE AV. Servia em 2005 no Segundo do Terceiro Grupo de Aviação como Encarregado do Setor de Equipamento de VÔO. Licenciado em Pedagogia.

* - Leitor Técnico - Capitão Especialista em Aviões serve no Centro de Instrução e Adaptação da Aeronáutica (CIAAR) como Chefe da Subdivisão de Instrução.

* *- Colaborador - Segundo Sargento BMA, serve no Parque de Material Aeronáutico de Recife (PAMARF).

Na história da aviação sempre houve uma grande preocupação e uma busca incessante por meios que aperfeiçoassem o desempenho operacional das aeronaves. Com isso, surgem a cada dia, várias pesquisas no cenário aeronáutico que objetivam a otimização dos referidos meios. Neste cenário se inserem: a) os grupos moto-propulsores, dos quais fazem partes os motores alternativos (movidos a pistão), que são empregados em aeronaves operando em baixas altitudes e com velocidades reduzidas; b) os motores-foguete, os quais utilizam o princípio de queima de combustível sem a utilização do ar atmosférico e são empregados em artefatos bélicos e aeronaves estratosféricas (ônibus espaciais e foguetes etc.); e c) os motores de propulsão a jato usados em aeronaves que operam em altitudes elevadas, cobrindo a lacuna entre os motores alternativos e os motores-foguete. Estes equipamentos são de fundamental importância para o bom desempenho das aeronaves modernas e será o foco principal desta obra (FIG. 1).



Este Gloster Meteor F-8 pertenceu ao Esq. Pif-Paf (2/1 Gp.Av.Ca.). O padrão de pintura chamado "ovo estalado" foi usado a partir de 1962 com algumas variações.

FIGURA 1 – Primeiro avião a jato usado pela FAB (Gloster Meteor F-8)

A idéia de propulsão a jato não é tão recente como pode parecer. Os princípios físicos nos quais estão baseados os atuais motores a jato já haviam sido apresentados ao mundo há vários séculos. Documentos antigos afirmam que no início da Era Cristã, Hero de Alexandria, grande filósofo da época, apresentou um aparelho com o qual conseguia transformar a pressão do vapor d'água em energia mecânica (energia cinética). Este aparelho, a *eolípila de Hero* (FIG. 2), segundo a história, provavelmente, tenha sido o primeiro a demonstrar o princípio da ação e reação, princípio físico este que mais tarde passou a título de Terceira Lei de Newton e que rege o princípio da propulsão a jato.



FIGURA 2 – Eolipila de Hero

Nas últimas décadas, os motores a reação vêm sofrendo mudanças significativas a despeito de tecnologias que visam ao refinamento da aeronavegabilidade. Muitos, inclusive colegas da Força, não têm a noção exata e correta da importância desses propulsores que, na realidade, carregam o mais pesado que o ar. Este artigo irá abordar, de forma detalhada, esses propulsores e as partes que compõem esse "coração", que é de vital importância para as aeronaves de todo o mundo. Alguns motores a jato não possuem sequer uma peça móvel, no entanto carregam aeronaves a grandes distâncias e em altas velocidades. Neste trabalho, serão mostradas as várias peças integrantes dos propulsores turbojato, dentre elas a turbina, única peça móvel destes motores, que é capaz de transformar a energia cinética dos gases em propulsão e, pela sua grande importância funcional, é referida por alguns como sendo o próprio motor. Você conseguiria imaginar a FAB (Força Aérea Brasileira) sem aviões? Então, na mesma proporção em que os aviões estão para FAB, os motores estão para os aviões.

Com o passar dos anos, novas tecnologias foram surgindo dando lugar a novos propulsores mais complexos e mais econômicos. É sobre essas magníficas máquinas que o artigo tratará.

1. MOTOR TURBOJATO

Vamos iniciar falando sobre os motores turbojato, que também são conhecidos como "motor a jato puro", pelo fato de sua força propulsiva ser conseguida exclusivamente pelos gases expelidos, a alta velocidade, pelo tubo de escapamento. Este tipo de reator tem sua força de propulsão e funcionamento baseado na terceira lei de Newton: a toda ação corresponde uma reação igual e contrária. Assim, uma massa de ar é admitida e direcionada para o interior de um compressor, que irá aumentar a pressão desta massa antes de a mesma ser submetida a uma



expansão térmica, pela combustão, no interior de um compartimento fechado denominado de câmara de combustão (FIG. 3). Concluídas estas quatro fases (admissão, compressão, combustão e expansão), a massa de ar, agora dotada de grande velocidade em consequência da expansão (jato de ar quente), segue sua trajetória no sentido ântero-posterior em direção às turbinas e daí para o tubo de escapamento, para concluir a quarta e última fase do ciclo do motor turbojato: o escapamento. Contudo, antes do escapamento, a massa de ar quente (jato) dotada de energia cinética, ao passar pelas turbinas, transforma a energia cinética em mecânica, fazendo com que o conjunto de turbinas gire, movimentando todo o conjunto rotor, que é formado apenas pelo compressor e turbina unidos por um eixo, os quais consistem nas únicas peças móveis do motor turbojato. Os motores turbojato desenvolvem boa força propulsiva; porém, em baixa altitude e velocidade, consomem quantidade demasiada de combustível. Muitos aviões utilizaram estes motores, como por exemplo, os Caravelle e alguns modelos de LearJet. Hoje, na aviação comercial brasileira, não são mais usados. São motores muito barulhentos, devido ao choque do ar quente dos gases de escapamento com o ar frio da atmosfera. Em resumo, o funcionamento do motor turbojato consiste em admitir, comprimir e expandir uma massa de ar e fazer com que esta passe através de um conjunto de turbinas, momento em que ocorre a transformação de energia cinética (contida na massa de ar) em energia mecânica, fazendo com que o conjunto de turbinas adquira movimento de rotação, sendo este transferido a todo o conjunto rotor. Finalmente, a massa de ar é direcionada ao tubo de escapamento, de onde é expelida para a atmosfera em forma de jato, daí o fato de tal tipo de motor ser denominado de turbojato.

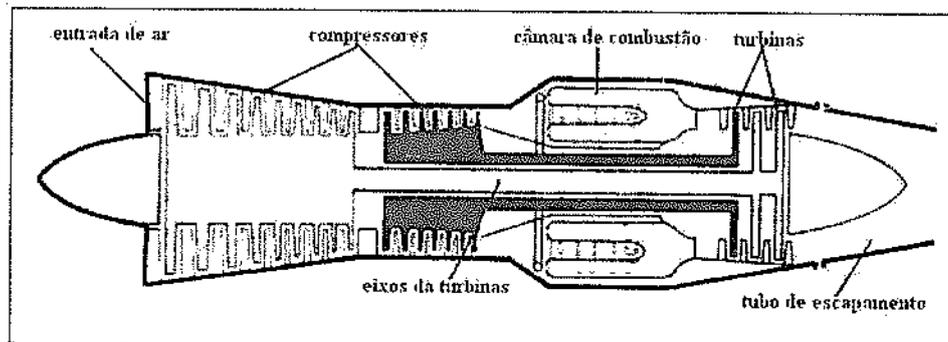


FIGURA 3 - Motor Turbojato



2. MOTOR PULSOJATO

Dando prosseguimento, o foco será dirigido sobre o propulsor pulsojato, também conhecido como motor intermitente, e veremos que é constituído por uma simples tubulação, além do sistema de um sistema válvulas controladoras, que são as únicas partes móveis do motor. Estas válvulas ficam na parte dianteira do motor e são fechadas por molas. A abertura das válvulas ocorre pela pressão de impacto e pela redução de pressão, quando o motor se desloca. Para o motor iniciar o funcionamento, é necessário pôr na câmara ar comprimido, que, misturado com o combustível, formará a mistura. Inicialmente uma vela produz a centelha para queimar a mistura, depois o calor acumulado no duto é responsável pela queima. Quando ocorre a queima, as válvulas são fechadas (pela pressão dos gases queimados, que atuam em todas as direções). Durante o escapamento, a pressão interna diminui, abrindo novamente as válvulas e admitindo novamente o ar que irá misturar-se com o combustível injetado continuamente (FIG. 4). Esse motor apresenta um ciclo pulsativo de aproximadamente 50 ciclos por segundo. Apesar do seu modo de funcionamento, a tração obtida é praticamente contínua. Este motor apresenta consumo muito elevado e desregrado. Esse tipo de motor de reação direta foi empregado para impulsionar as bombas alemãs. (bombas V1 e V2 - letra "V" é a inicial da palavra alemã *Vergeltungswaffe*, que significa arma da vingança).

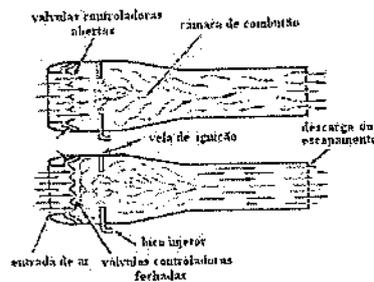


FIGURA 4 - Motor pulsojato

3. MOTOR ESTATOJATO

Na França, em 1938, o engenheiro francês René Leduc, apresentou pela primeira vez o motor que inicialmente recebeu o nome de "stato-reator" e que mais tarde foi denominado de "REACCION POR PRESSION DINÂMICA", mas, nos Estados Unidos, recebeu outras denominações, tais como: RAN-JET e ATHODYD (AERO THERMODYNAMIC DUCT).

Diferentemente do motor pulsojato visto anteriormente, o motor estatojato (FIG. 5) não possui absolutamente nenhuma peça móvel em sua composição, o que justifica seu nome. O ATHODYD não possui seu funcionamento fundamentado na sucessão de ciclos e sim no ciclo

aberto. Este motor é basicamente tido como motor suplementar, pois não funciona quando estacionário e é necessário estar animado de certa velocidade para que haja, em sua admissão, um fluxo de ar considerável para obter compressão pelo processo de difusão em sua seção difusora (cerca de 460 Km/h).

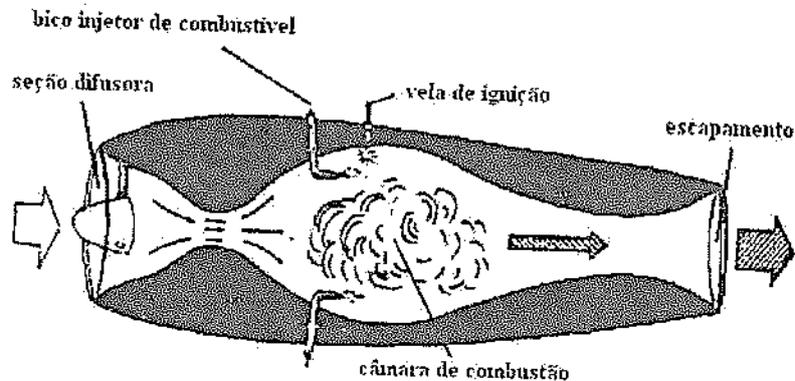


FIGURA 5 – Motor estatojato

Estruturalmente falando, o "stato-reator" é muito simples, pois é representado por um verdadeiro tubo, tendo variações de áreas no seu interior (em determinadas regiões). É dividido basicamente em três partes: seção difusora, câmara de combustão e conduto de escapamento. Na sua parte anterior (entrada de ar/admissão), possui um conduto interno que vai se afinando de maneira idêntica a um condutor convergente; em seguida, de maneira abrupta, esse conduto se transforma num tipo divergente. Esta região recebe uma marcação como sendo seção difusora do motor. A seção difusora termina exatamente onde se inicia a chamada zona de combustão ou câmara de combustão do motor. Esta é representada por uma pequena extensão de todo o conduto do motor e possui uma área de escoamento mais ou menos constante. É neste recinto que se processa a queima contínua da mistura ar/combustível ali pulverizado. Na região dos limites entre a seção difusora e a câmara de combustão, encontram-se instalados os bicos injetores ou pulverizadores de combustível; e, imediatamente após esses bicos, iremos encontrar uma peça que denominamos estabilizador de chamas, que, como o próprio nome já diz, tem a finalidade de estabilizar e uniformizar a chama contínua existente na câmara. Para que haja o acendimento do motor, também é necessário um dispositivo que produza faíscas. Temos então a vela de ignição que somente é necessária na partida do motor, pois após seu acendimento, a chama permanecerá continuamente até que seja desligado o motor. Na região onde termina a câmara de combustão, inicia-se o coletor de escapamento que é bem dimensionado, com a finalidade de otimizar o barulho inconveniente na área da descarga.



4. MOTOR TURBOFAN

Os motores tipo turbofan são atualmente os tipos de reatores mais usados na aviação comercial. São compostos de um motor turbojato, já apresentado anteriormente, interligados a uma espécie de ventoinha carenada de diâmetro maior - fan (FIG. 6). As pás desta ventoinha giram com velocidades da mesma ordem de grandeza que o motor (compressor-turbina) e produzem de 30 a 75% da força de tração do motor. Com estas características, o motor turbofan é capaz de impulsionar uma quantidade maior de massa gasosa do que um motor turbojato, uma vez que sua área de admissão também é maior. Apenas cerca de 20% da massa gasosa passa pelo interior do motor (compressor – câmara de combustão – turbina – escapamento) é queimada para produzir tração, o que minimiza o consumo de combustível e o torna mais silencioso que os demais. Com relação ao fan, existem motores com ventoinhas dianteiras e traseiras. Nos de ventoinha dianteira, a massa gasosa pode ser expelida para o exterior ou pode passar por um conduto, derivação, que leva esta massa ao coletor de escapamento aumentando assim a eficiência propulsiva (relação existente entre a velocidade do ar de admissão e a velocidade da massa de ar que abandona o tubo de escapamento). A relação dos volumes das massas de ar (que passam pelo exterior/interior do motor) é chamada de razão de derivação ou razão de by-pass. Na FAB este tipo de motor é utilizado nas aeronaves Learjet 55 e HS 800.

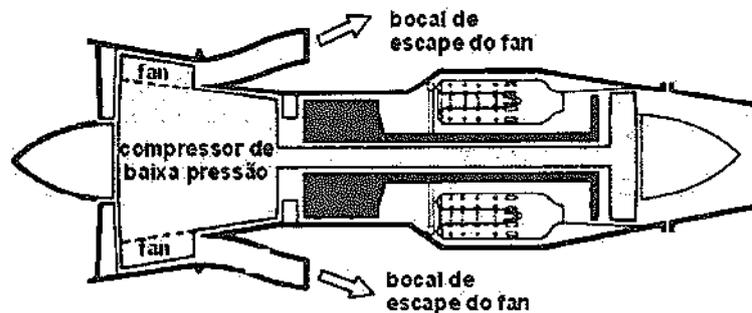


FIGURA 6 - Motor turbofan

5. MOTOR PROPFAN

Uma forma pesquisada para dar uma sobrevida aos aviões dotados de motores antigos e ultrapassados para os modernos padrões de ruído e consumo surgiu no início dos anos 80 e visava, além desta nova motorização para estes aviões já existentes, proporcionar o surgimento



de aviões especialmente projetados para este grupo propulsor, que tem um conceito misto entre o jato e o turbo-hélice.

Nessa época, a NASA iniciou pesquisas neste sentido e o estudo mais profícuo foi o realizado com a Hamilton-Standard (empresa fabricante de itens aeronáuticos), que desenvolveu uma nova hélice, na forma de alfanje, mais larga e com corda maior, de estrutura composta (estrutura constituída de mais de um tipo de material que, juntos, conferem características especiais ao produto, as quais não existiam com tais materiais isoladamente) e bem leve (FIG. 7). Nas pesquisas, o sistema foi dotado de uma outra hélice igual, contra-rotativa e, depois de registrado pela empresa como Prop-Fan, deu nome a estes tipos de motores:

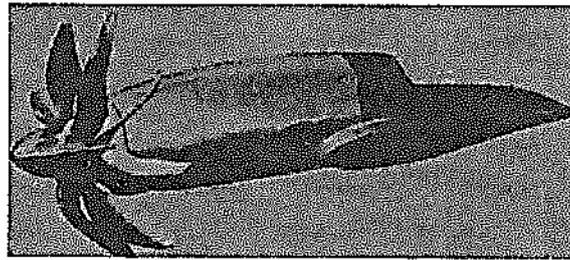


FIGURA 7 – Motor propfan

Para propelir um avião em velocidades entre o Mach 0.65 e 0.85, as lâminas propfan experimentam velocidades locais do fluxo perto ou acima do Mach 1. A maioria dos projetos propfan experimenta números de Mach (expressão relacionada à velocidade do som Mach 1= 1224 Km/h) supersônico na ponta da lâmina. Isto cria pequenas ondas de choque (ondas formadas pela grande velocidade de escoamento da massa de ar sobre superfícies aerodinâmicas) na superfície dessa lâmina, que causam resistência ao avanço e o ruído maiores. A fim de minimizar esses efeitos, as lâminas propfan compartilham das mesmas características do projeto que as superfícies de sustentação do avião supersônico (aviões que voam com velocidades acima de Mach 1).

Várias empresas testaram essa tecnologia, entre elas a Rolls-Royce e a General Electric, sendo que esta última, em parceria com a Boeing, utilizou-se de um 727-100, retirando os motores laterais normais da aeronave e instalando no lugar os UDF GE-36 (FIG. 8), que permitiam, sem a existência das caixas de engrenagens, operação em velocidades de até 0.85 Mach (1040 Km/h), com capacidade para reversão de passo (hélices de passo reverso são hélices cujas pás giram em torno do seu eixo, variando seu ângulo de ataque e, conseqüentemente, variando sua força de tração). O estudo mostrou que o consumo de combustível era 20% menor que os melhores turbofans da época.

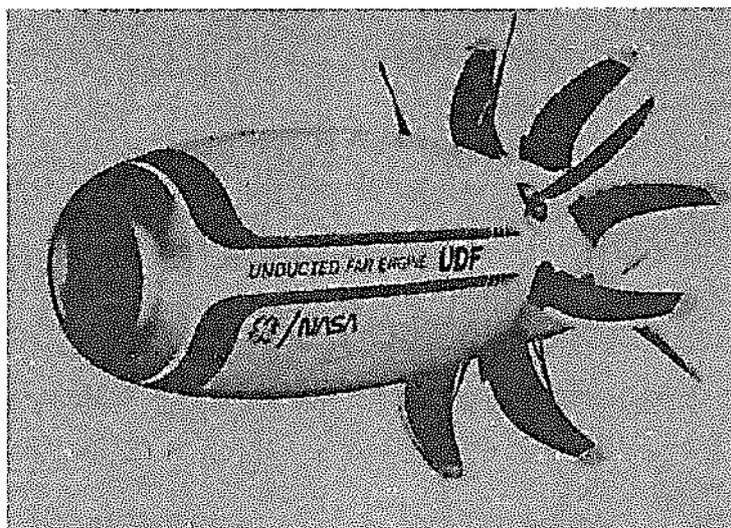


FIGURA 8 – Motor propfan UDF

Como foi mostrado neste artigo, motor a jato é qualquer motor que acelere ou descarregue um jato ou fluido em rápido movimento para gerar impulsão, conforme explica a terceira lei de Newton (ação e reação). Esta definição inclui turbo-reatores, turbofans ou foguetes, embora seja geralmente referida com relação a uma turbina a gás, utilizada para produzir um jato de gases de exaustão de alta velocidade, permitindo a propulsão. Além das diferenças anteriormente citadas entre os motores, existem diferenças de adequabilidades para os diferentes tipos de aeronaves que voam com diferentes velocidades-cruzeiro (velocidade econômica / velocidade predominante durante o voo) e em diferentes altitudes. Além da economia, a confiabilidade (o motor deve ser capaz de prover alta potência de saída), a durabilidade (operar por longos períodos entre revisões), a compactabilidade (grande potência, pouco volume e baixo peso) e o fácil acesso para a manutenção, são fatores determinantes para a implantação dos motores nas aeronaves em geral e, principalmente na Força Aérea. Foram vistos, também, tipos de propulsores utilizados nas diversas aeronaves que operam no mundo inteiro: pulsojato, estatojato, turbojato, turbofan e a mais recente tecnologia aplicada nos motores – propfan - que tem sido um grande ícone no tocante a motores modernos, uma vez que tornam o transporte mais agradável por seu baixo ruído e, o que é muito importante, seu consumo de combustível é significativamente menor.



REFERÊNCIAS

1. <http://members.aol.com/sciszek/propfan.htm>. Acessado em: 09/08/2006.
2. GUERRA, M.A. Portal Especializado em Manutenção de Motores Aeronáuticos. Tipos de Motores Aeronáuticos. Online Agosto 2004. Disponível em: <<http://www.geocities.com/egnnews/tiposmotores.htm>> Acessado em: 09/08/2006
3. Palharini, Marcos Jesus Aparecido, 1960. **Motores a reação**. 4.ed. (Rev.) São Paulo: ASA, 1999.
4. Soler, Newton Saintive. **Aerodinâmica de alta velocidade**. 7.ed. São Paulo: ASA, 2002.