

Lezione 1

Introduzione

I sistemi di trasporto di passeggeri e merci si sono evoluti nel corso dei secoli grazie all'impiego di diverse risorse energetiche, che sono state a loro volta utilizzate in modo diverso con lo sviluppo di diversi propulsori.

Il significato letterale di propulsione è "spinta in avanti". Questa definizione presuppone l'esistenza di una forza finalizzata ad ottenere un certo atto di moto di un corpo. Per sistema propulsivo si intende l'insieme di componenti necessari a generare e/o controllare la forza propulsiva in modo da realizzare un prefissato stato di moto di un corpo.

In generale tutti i sistemi propulsivi sono "a reazione" siano essi terrestri, navali, aerei o spaziali. Si perviene, infatti, all'ottenimento della forza propulsiva come ad una forza di reazione all'applicazione di una forza uguale e contraria sull'ambiente esterno (solido o fluido) e/o su sostanze trasportate a bordo ed espulse dal sistema stesso.

La disciplina della propulsione aerospaziale si occupa delle macchine in grado di fornire la forza propulsiva che permette il moto di veicoli nell'atmosfera e nello spazio cosmico. Nel primo caso si parla dei motori per aeromobili (settore aeronautico) nel secondo di propulsori spaziali. Va subito sottolineato che se per altre discipline l'aeronautica e l'astronautica si differenziano sensibilmente, non è del tutto così nel campo della propulsione, infatti i propulsori delle due aree, pur differenti, si basano su principi comuni.

La caratteristica comune a quasi¹ tutti i sistemi di propulsione aerospaziale è che la forza propulsiva, detta **spinta (thrust)**, si ottiene come risultato dell'incremento di quantità di moto di un fluido, detto **fluido propulsivo** (Fig. 1.1), il quale può avvenire o solo all'esterno del motore (eliche), o all'interno ma con fluido esterno (esoreattori), oppure all'interno con solo fluido originariamente stivato a bordo (endoreattori). Altra caratteristica comune richiesta a tutti i sistemi propulsivi aerospaziali è la leggerezza.

L'incremento della quantità di moto, necessario a generare la spinta, viene ottenuto a spese di energia resa disponibile. In generale si possono considerare quattro tipi di fonti energetiche nel campo della propulsione aerospaziale, anche se soltanto la prima, quella chimica, ha trovato larga diffusione, e fornisce energia alla quasi totalità dei propulsori aerospaziali. Di queste fonti soltanto le prime tre possono essere considerate *primarie*, e cioè disponibili a bordo senza trasformazioni in altri tipi di energia. Esse sono:

Energia Chimica E' la principale (e quasi unica) fonte di energia per la propulsione aerospaziale. Si tratta dell'energia sviluppata dalle reazioni chimiche di combustione che avvengono tra combusti-

¹Alcuni particolari sistemi di propulsione, quali ad esempio la vela solare, costituiscono un'eccezione.

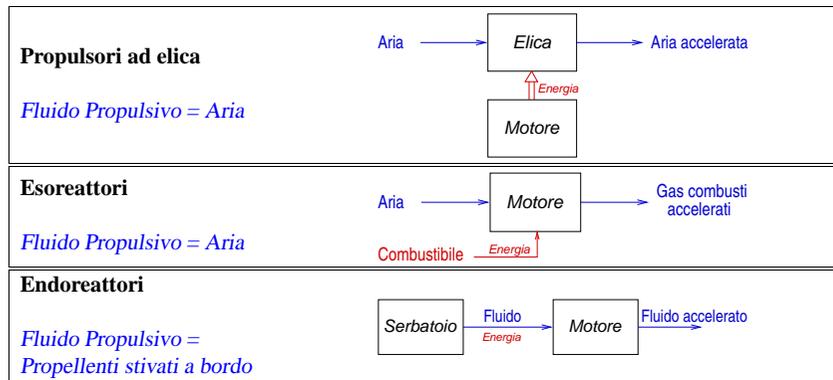


Figura 1.1: Sistemi per incrementare la quantità di moto del fluido propulsivo.

bile e ossidante. Il combustibile è prevalentemente un derivato del petrolio (quasi esclusivamente nei propulsori ad elica e ad esoreazione) ma può essere anche idrogeno (come nel caso di alcuni endoreattori) o altre sostanze. L'ossidante è costituito dall'ossigeno presente nell'aria nel caso di propulsori ad elica ed esoreattori, mentre è ossigeno puro o altre sostanze negli endoreattori.

Energia Nucleare La fattibilità e la possibile convenienza di propulsori ad endoreazione che sfruttano un reattore nucleare a fissione è stata dimostrata. Tuttavia, i rischi nel controllo di tale energia non ne hanno consentito finora l'impiego pratico. Attualmente però l'impiego dell'energia nucleare è oggetto di rinnovata attenzione.

Energia Solare L'energia solare può essere sfruttata per generare elettricità da utilizzare in propulsori elettrici, o concentrata mediante specchi per riscaldare un fluido operativo (con un'effetto analogo a quello che si ha nella combustione), oppure, in modo più avveniristico, per spingere vele solari. In ogni caso l'impiego è difficile a causa delle enormi superficie di pannelli solari (o degli specchi, o delle vele solari) per generare potenze significative. Nonostante queste difficoltà, l'energia solare è effettivamente utilizzata in alcuni satelliti e sonde.

Accanto ad esse merita di essere considerata un quarta fonte di energia, *secondaria*, che può essere prodotta a bordo da sorgenti primarie. Essa è:

Energia Elettrica L'energia elettrica ha finora trovato impiego molto limitato a causa dei tipicamente bassi rapporti spinta/peso. L'elevato peso di una configurazione in cui l'energia elettrica è immagazzinata esclusivamente in batterie porta ad escludere questa soluzione. L'energia elettrica è prodotta a bordo da altre sorgenti energetiche, che potranno essere considerate primarie (chimica, nucleare, solare). E' il caso per esempio delle celle a combustibile e delle batterie (chimica), dei generatori di elettricità a radioisotopi (nucleare), o dei pannelli solari (solare).

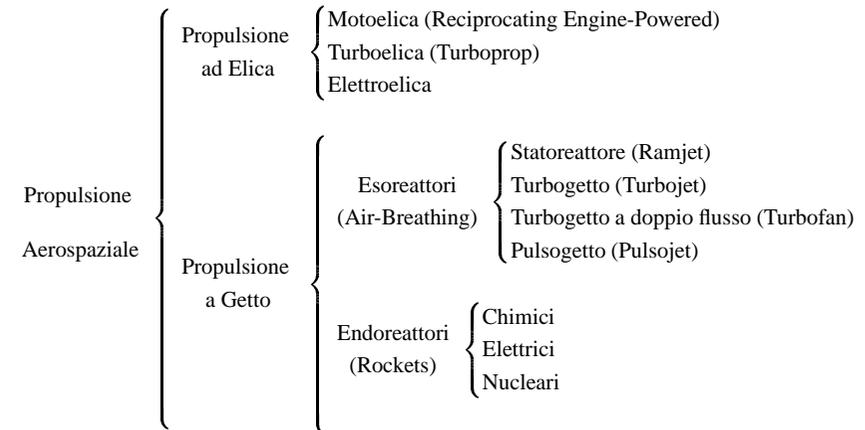


Figura 1.2: Classificazione dei propulsori aerospaziali.

1.1 Classificazione

I sistemi di propulsione impiegati in campo aerospaziale si dividono innanzitutto in due famiglie (Fig. 1.2). La prima è quella dei motori ad elica in cui la spinta è generata dall'incremento della quantità di moto dell'aria ottenuta attraverso la rotazione di un'elica. Essa è stata la prima ad essere impiegata in aeronautica, sebbene successivamente il suo impiego sia andato via via riducendosi grazie all'introduzione dei più vantaggiosi motori a getto, caratterizzati da un rapporto potenza/peso molto più elevato. La potenza all'albero dell'elica è stata inizialmente ottenuta con motori a combustione interna alternativi (Motoelica). Oggi l'impiego di motoelica è limitato a piccoli aerei da turismo. Infatti nella gran parte dei motori ad elica la potenza all'asse dell'elica è prodotta da un gruppo turbogas (compressore-camera di combustione-turbina) dello stesso tipo di quelli impiegati nei motori a getto. Tra l'altro, quest'ultimo tipo di motori è l'unico in grado di conferire abbastanza potenza ad un rotore da sollevare un elicottero (motori turboalbero), tranne che nel caso di elicotteri molto piccoli.

Il turboelica è in realtà un ibrido a metà strada tra i motori ad elica ed i motori a getto, in quanto parte della spinta è generata dall'espulsione dell'aria utilizzata dal gruppo turbina-compressore. Tuttavia, in genere esso viene classificato separatamente dai motori a getto.

La seconda famiglia è quella dei propulsori a getto.² Con questo nome si indicano tutti quei propulsori in cui almeno parte della spinta è ottenuta mediante l'espulsione di massa stivata a bordo dal veicolo. Nell'ambito della propulsione a getto bisogna poi subito distinguere tra i motori che sfruttano almeno in parte l'atmosfera come fluido propulsivo (si tratta degli esoreattori o *air-breathing engines*) e quelli invece in cui tutto il fluido propulsivo è stivato a bordo del veicolo (si tratta degli endoreattori o *rockets*). Questi ultimi sono i soli motori in grado di fornire una spinta al di fuori dell'atmosfera.

Gli esoreattori hanno avuto grande sviluppo nella seconda metà del secolo scorso divenendo il prin-

²Questi sistemi propulsivi vengono anche detti *a reazione*, sebbene tale definizione possa generare confusione in quanto anche negli altri casi la spinta è ottenuta per reazione.

cipale sistema propulsivo nel campo aeronautico. Dopo l'inizio dell'era dei motori a getto (*jet age*), l'interesse commerciale ha permesso infatti una notevole maturazione della tecnologia con lo sviluppo di motori più efficienti (come ad esempio i turbogetti a doppio flusso, oggi comunemente usati nella maggior parte degli aerei civili). Parallelamente, sono anche stati studiati esoreattori di diversa concezione che, sebbene non abbiano goduto del successo dei turbogetti, possono risultare interessanti per alcune applicazioni (è il caso degli statoreattori e dei pulsogetti).³

Gli endoreattori, pur essendo stati i primi propulsori a getto sviluppati nella storia, risultano poco adatti alla propulsione aeronautica a causa degli elevati consumi, e delle difficoltà di controllo. Al contrario, essi hanno avuto uno straordinario successo nel campo spaziale, dove si sono rivelati come l'unico sistema propulsivo in grado di portare carico utile al di fuori dell'atmosfera terrestre, grazie alla loro elevata spinta specifica ed alla capacità di fornire una spinta nel vuoto. Anche nel campo degli endoreattori sono stati sviluppati diversi concetti propulsivi (che possono essere divisi nelle famiglie degli endoreattori chimici, nucleari ed elettrici), alcuni finora rimasti sulla carta, ed altri invece di maggior successo.

La classificazione dei sistemi di propulsione aerospaziale vista in Fig. 1.2 riguarda soltanto i principali sistemi di cui si parlerà già di seguito con un maggior dettaglio, e per i quali si accennerà alle principali caratteristiche ed applicazioni. Tuttavia altri sistemi sono stati studiati e in particolare si è cercato di estendere il funzionamento dei propulsori a campi di velocità e di quota più vasti. Si accennerà ad esempio ad alcuni motori detti *combinati*, il cui sviluppo ha lo scopo di sfruttare in un unico sistema propulsivo le proprietà migliori dei sistemi più tradizionali nei diversi campi di quota e velocità di volo.

1.2 Propulsori ad elica

La prima famiglia di propulsori impiegati in aviazione è stata quella dei propulsori ad elica (Fig. 1.3). Tali propulsori sono caratterizzati da un motore che fornisce potenza ad un albero rotante, come nel caso dei motori di automobili o di motori per la generazione di potenza elettrica. Nel caso del propulsore aeronautico, la potenza conferita all'albero viene poi sfruttata per muovere un'elica, la quale a sua volta genera la spinta accelerando il fluido propulsivo, che è l'aria esterna. Il motore ad elica quindi richiede la presenza di un mezzo fluido in cui muoversi, e non può quindi essere utilizzato per la propulsione spaziale (si vedrà che in realtà presenta notevoli limitazioni anche in campo aeronautico).

Il primo e più semplice modo per generare la potenza necessaria all'elica è stato quello di impiegare motori a pistoni, già realizzati per applicazioni terrestri agli albori dell'aeronautica. Successivamente, con la sopravvenuta disponibilità di altri motori, la scelta è stata dettata dallo sviluppo e l'applicazione di motori per quanto possibile leggeri a parità di potenza. Oggi infatti, sebbene diversi tipi di motori siano disponibili per fornire potenza ad un albero, la scelta si restringe rapidamente quando si ricorda che nel campo aeronautico il rapporto potenza generata/peso del motore è decisivo. Per piccole potenze, le migliori prestazioni sono fornite dai motori a combustione interna alternativi (motore a pistoni), mentre per potenze elevate motori basati sul ciclo di turbina a gas sono più convenienti. Per potenze molto basse e particolari applicazioni, il motore elettrico può essere una soluzione interessante.

Sono stati quindi impiegati tre tipi di motori per conferire potenza all'elica:

A.) Motoelica: Motore a combustione interna alternativo (a pistoni) basato sul ciclo Otto o Diesel.

³In italiano è comune la notazione con il suffisso *-reattore* anziché *-getto* (cioè turboreattore invece di turbogetto, pulsoreattore invece di pulsogetto) che mette in evidenza la propulsione "a reazione". Ciò non vale per lo statoreattore per il quale la dizione *statogetto* non è usata. In inglese invece viene comunemente impiegato il nome con il suffisso *-jet*.

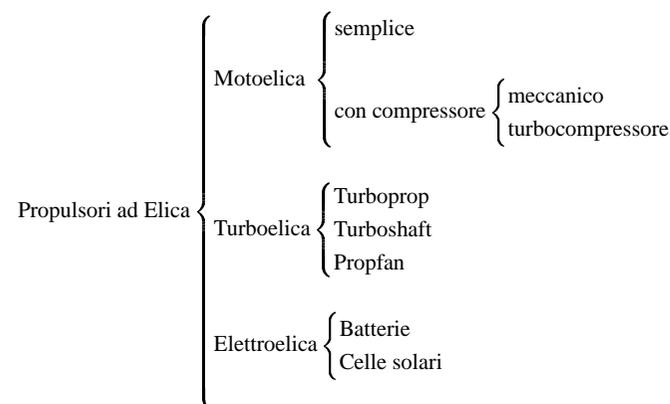


Figura 1.3: La famiglia dei propulsori ad elica.

B.) Turboelica/Turboalbero: Motore a combustione interna basato sul ciclo di turbina a gas (Brayton).

C.) Elettroelica: Motore elettrico alimentato ad energia solare (progetto sperimentale della NASA) o a batteria (modelli).

1.2.1 Motoelica

Il motore è simile a quello di un'automobile, ad accensione comandata (basato sul ciclo Otto) o ad accensione spontanea (basato sul ciclo Diesel). È stato il primo e l'unico impiegato fino quasi alla fine della seconda guerra mondiale. Inizialmente raffreddato ad acqua, venne poi soppiantato dai più leggeri motori raffreddati ad aria (pesanti il 30-40% di quelli raffreddati ad acqua). Successivamente miglioramenti ai motori raffreddati ad acqua portarono ad una competizione tra le due tipologie. Molti dei migliori caccia della seconda guerra mondiale utilizzavano motori raffreddati ad acqua, ma alla fine hanno prevalso quelli raffreddati ad aria. È nel campo aeronautico che è stata sviluppata la sovralimentazione dei motori a scoppio. Infatti le prestazioni di tali motori vanno riducendosi con la quota, cosa che può essere compensata con l'introduzione di sistemi di sovralimentazione. Sebbene in passato siano stati sviluppati motori di grande potenza (anche fino a 3000 kW), attualmente le motoeliche sono diffuse soltanto nel campo dell'aviazione leggera con motori da 4 a 8 cilindri, potenze di 75-300 kW (100-400 hp) e massa di 100-250 kg. Infatti le turboeliche vengono oggi utilizzate per motori più potenti. Va menzionato che questi motori sono impiegati anche per piccoli elicotteri.

1.2.2 Turboelica

Il primo aereo di linea con turboelica (*turboprop*) fu introdotto nel 1955. A quel periodo si può far risalire la fine del dominio dei motoelica. Infatti la turbina a gas presenta maggiore rapporto potenza/peso rispetto al motore a pistoni, e minore ingombro frontale (con conseguente minore resistenza aerodinamica). Il motore che fornisce potenza all'elica è ancora un motore a combustione interna, che utilizza



(a) Raytheon Beech Baron 58

(b) Motore Continental IO-550-C/300

Figura 1.4: Motoelica.

derivati del petrolio come combustibile e l'ossigeno dell'aria come ossidante, ma si basa sul ciclo di turbina a gas (ciclo Brayton-Joule), anziché sui cicli Otto e Diesel dei motoelica. La principale differenza è che compressione ed espansione sono ottenute da macchine rotative anziché alternative, e che la combustione avviene in modo continuo anziché ciclico (Fig. 1.5).

Un altro aspetto peculiare è quello che la spinta, oltre che dall'elica, viene fornita in parte anche dal getto del fluido espulso dopo essere stato utilizzato per generare la potenza all'albero.

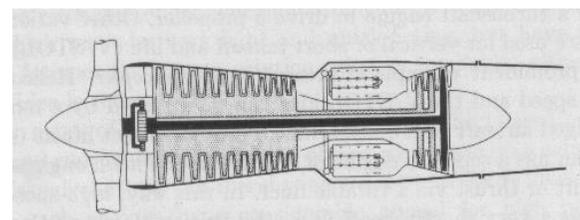
Si può dire quindi che in realtà la turboelica è un sistema misto in cui la spinta viene generata in parte dall'elica (la maggior parte), e in parte dal getto. In ogni caso la portata elaborata dall'elica è di gran lunga superiore a quella elaborata dalla turbina a gas (generatore di gas). I principali componenti di una turboelica sono indicati in Fig. 1.5. L'elica è mossa dalla potenza fornita all'albero dal gruppo turbogas, tuttavia le dimensioni dell'elica, molto maggiori di quelle di compressore e turbina, rendono necessaria l'introduzione di un riduttore (i rapporti di riduzione sono dell'ordine di $\sim 15 : 1$) per contenere la velocità di rotazione dell'elica.

Attualmente la turboelica trova largo impiego nei motori ad elica di elevata potenza. Essa viene impiegata per aerei di trasporto regionale, dove non sono richieste le elevate velocità di crociera dei motori a getto. Per queste moderate velocità i turboelica consentono di avere una migliore efficienza (minor consumo). Il turboelica è inoltre il motore principalmente (quasi esclusivamente) usato nel campo degli elicotteri, dove peraltro prende il nome di turboalbero (*turboshaft*) a causa del diverso utilizzo dell'elica (portante in questo caso). Si parla di turboalbero, anche perché, diversamente dai turboelica, tutta l'energia viene fornita all'elica, senza utilizzare l'energia del getto.

La caratteristica di una turboelica (o turboalbero) è principalmente la potenza che essa può fornire all'albero. Questa può giungere fino a 9000 kW, valore quindi decisamente più alto di quello relativo ai più potenti motoelica realizzati.



(a) ATR42



(b) Sezione di turboelica

Figura 1.5: Turboelica.

1.2.3 Elettroelica

L'idea di impiegare un motore elettrico per fornire potenza ad un'elica risale agli inizi dell'aeronautica. Infatti dopo il motore a vapore, il motore elettrico è stato il secondo tipo di motore installato su un aeromobile, il dirigibile *La France* nel 1884. Si trattava di un motore della potenza di 6.3 kW, alimentato da una batteria. Solo successivamente furono introdotti i motori a combustione interna alternativi.

Recentemente è stato riproposto l'impiego dei motori elettrici per particolari applicazioni. E' ad esempio il caso del Progetto Helios allo studio della NASA (Fig. 1.6) dove 14 eliche (del diametro ciascuna di 1.8 m), mosse da altrettanti motori elettrici per una spinta di 48.9 N ciascuno e una potenza di 1.5 kW. La peculiarità del sistema è quella di generare elettricità tramite celle solari dell'ultima generazione. Inoltre, parte dell'energia elettrica generata dalle celle solari è immagazzinata in batterie che permettono le operazioni, per qualche ora, anche di notte.

L'interesse di un sistema di questo tipo è di realizzare un veicolo in grado di volare indefinitamente (senza limiti di autonomia) ad una quota molto più bassa di quella dei satelliti.



Figura 1.6: Il motore elettroelica del progetto Helios (NASA).

1.3 Esoreattori

Con lo sviluppo dei motori a reazione “air-breathing” (che respirano aria) o esoreattori, è stato possibile superare i limiti della propulsione ad elica, divenuti ben evidenti quando la velocità di volo è cresciuta fino ad avvicinarsi alla velocità di propagazione del suono.

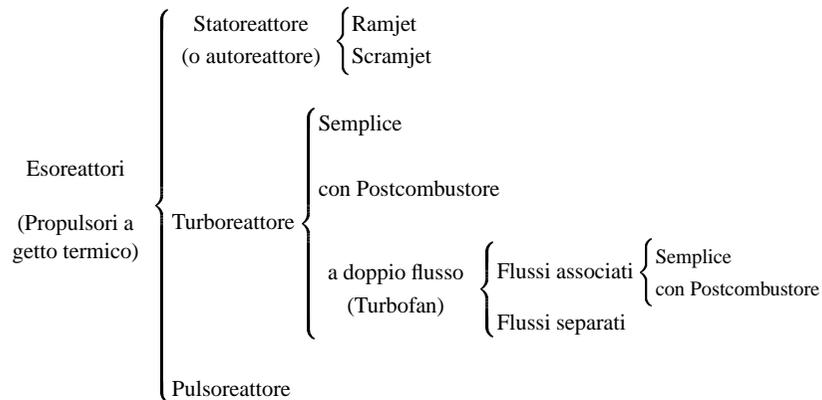


Figura 1.7: La famiglia degli esoreattori.

Gli esoreattori sono caratterizzati dal fatto che il fluido propulsivo è costituito principalmente dall’aria che fluisce nel motore, mentre nei motori ad elica il fluido propulsivo è costituito da aria esterna (non quella che entra nel motore). Per una parte minore contribuisce al fluido propulsivo anche il combustibile stivato a bordo, che viene bruciato con l’aria. Nel motore entrano dunque una portata d’aria

dall’esterno, ed una portata di combustibile dal veicolo. La portata totale di fluido, la quale ha subito un’alterazione della sua composizione chimica a causa delle reazioni di combustione, costituisce il fluido propulsivo. Gli esoreattori possono essere di tipi diversi a seconda delle modalità di funzionamento, cioè come viene elaborato il fluido all’interno del motore, e come è condotta la combustione (Fig. 1.7).

In particolare si possono distinguere tre principali classi di esoreattori, che sono basati su due diversi cicli termodinamici. Il primo è il ciclo termodinamico di turbina a gas (Brayton-Joule), già visto per la turboelica (Fig. 1.5b) e costituito idealmente da: compressione adiabatica, riscaldamento isobaro (combustione) ed espansione adiabatica. Parte del lavoro di espansione compensa quello speso per la compressione, e quello restante viene convertito in energia cinetica del getto al fine di generare la spinta. A seconda della presenza o meno di turbomacchine nelle fasi di compressione ed espansione, si distinguono le due classi di esoreattori basati su questo ciclo:

1. Compressione-espansione senza turbomacchine: STATOREATTORE (AUTOREATTORE).
2. Compressione-espansione con turbomacchine: TURBOREATTORE (TURBOGETTO).

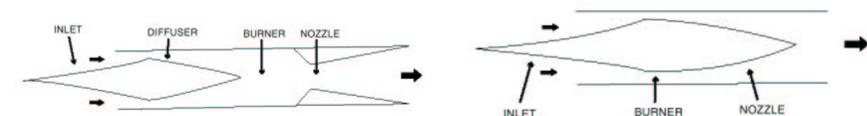
Il rimanente ciclo termodinamico da considerare è invece un ciclo intermittente in cui compressione, combustione ed espansione del fluido propulsivo si ripetono ciclicamente grazie ad un sistema di apertura e chiusura di valvole. Questo ciclo fornisce la terza classe di esoreattori:

3. PULSOREATTORE (PULSOGETTO).

1.3.1 Statoreattore

Lo statoreattore (o autoreattore, o *ramjet*) è concettualmente molto semplice. In esso la compressione del fluido propulsivo avviene esclusivamente attraverso il rallentamento dell’aria che entra nella presa dinamica. Per tale ragione esso non è in grado di fornire spinta a punto fisso (cioè a velocità nulla), ed ha il suo campo d’impiego per $2 < M < 4$. Per valori più elevati della velocità di volo (in particolare per $M > 5$) non è più possibile rallentare in modo efficiente il flusso fino a velocità subsoniche prima di entrare in camera di combustione; si può tuttavia ancora realizzare uno statoreattore se si riesce a far avvenire la combustione in un flusso a velocità supersonica. In tal caso si parla di *Scramjet* (Supersonic Combustion Ramjet), la cui fattibilità tuttavia deve ancora essere dimostrata⁴.

Il loro impiego è limitato ad alcune applicazioni militari e veicoli sperimentali.



(a) Ramjet (Combustione subsonica)

(b) Scramjet (Combustione supersonica)

Figura 1.8: Tipi di statoreattore.

⁴Nell’estate del 2002 scienziati australiani dell’Università del Queensland hanno sostenuto di aver realizzato per la prima volta una combustione supersonica in volo, per pochi secondi.

1.3.2 Turboreattore

Il turboreattore (o turbogetto) è basato sul ciclo di turbina a gas, come lo statoreattore. La differenza sta nel fatto che la compressione viene effettuata da un compressore, mosso da una turbina, la quale ultima sfrutta l'energia fornita al fluido propulsivo dalla combustione. All'uscita dalla turbina il gas è ancora ad una pressione superiore a quella ambiente, e può essere quindi accelerato in un ugello. In questo modo il fluido propulsivo viene espulso ad una velocità più elevata di quella con cui entra nel motore, generando così la spinta. La presenza di una macchina per la compressione permette il funzionamento anche da fermo (a punto fisso), a differenza dello statoreattore. Questa proprietà lo rende molto più versatile, e le ottime proprietà di prestazioni come spinta, consumo specifico, rapporto spinta/peso, hanno imposto questa famiglia di motori come la più diffusa nel campo dell'aviazione sia civile sia militare. Si possono quindi riassumere le seguenti proprietà:

- La spinta si ottiene dal getto
- Elevata potenza specifica (per unità di peso del motore)
- Ridotto ingombro frontale
- Elevata efficienza
- Limata richiesta di interventi di manutenzione (oltre a quella pianificata)

Il propulsore a getto basato sul ciclo di turbina a gas è stato brevettato per la prima volta da Frank Whittle in Gran Bretagna nel 1930, ma è stato necessario aspettare fino al 1941 perché fosse realizzato il primo velivolo propulso da un turbogetto. Successivamente alla fine della seconda guerra mondiale è andato affermandosi grazie alla sua elevata spinta specifica ed al basso consumo specifico alle alte velocità. Da questa famiglia di propulsori, senz'altro la più diffusa, hanno avuto origine diversi tipi di propulsori, i principali dei quali sono descritti in Fig. 1.9 e nel seguito.

Turbogetto semplice

Per turbogetto semplice si intende il turboreattore base, costituito da presa dinamica, compressore, camera di combustione, turbina e ugello. Anche in questo schema semplice, che è stato il primo ad essere adottato agli inizi degli anni '40 del secolo scorso, si possono distinguere diverse configurazioni. Infatti per migliorare la risposta del motore alle variazioni di potenza, controllata variando la quantità di combustibile iniettata in camera di combustione, può essere utile separare un gruppo compressore-turbina di alta pressione e un gruppo compressore-turbina di bassa pressione. In tal caso ogni gruppo è connesso attraverso un albero, e si avranno quindi in generale uno o più alberi coassiali. Il turbogetto semplice è meno efficiente del turboelica alle basse velocità di volo, mentre diventa superiore alle alte velocità subsoniche. Di conseguenza, il suo tipico campo di applicazione è oggi quello dei velivoli supersonici. Infatti nel campo delle alte velocità subsoniche, che è quello dell'aviazione commerciale, il turbogetto a doppio flusso (vedi sotto) è più efficiente sia del turboelica sia del turbogetto semplice, e viene quindi preferito. I turbogetti semplici impiegati oggi hanno spinte comprese tra 0.5 e 200 kN.

Turbogetto con postcombustore

Per mantenere la temperatura entro valori tollerabili dalle palette della turbina, si adotta nel turbogetto una miscela complessivamente "povera", cioè con eccesso di aria. Sussiste quindi la possibilità di

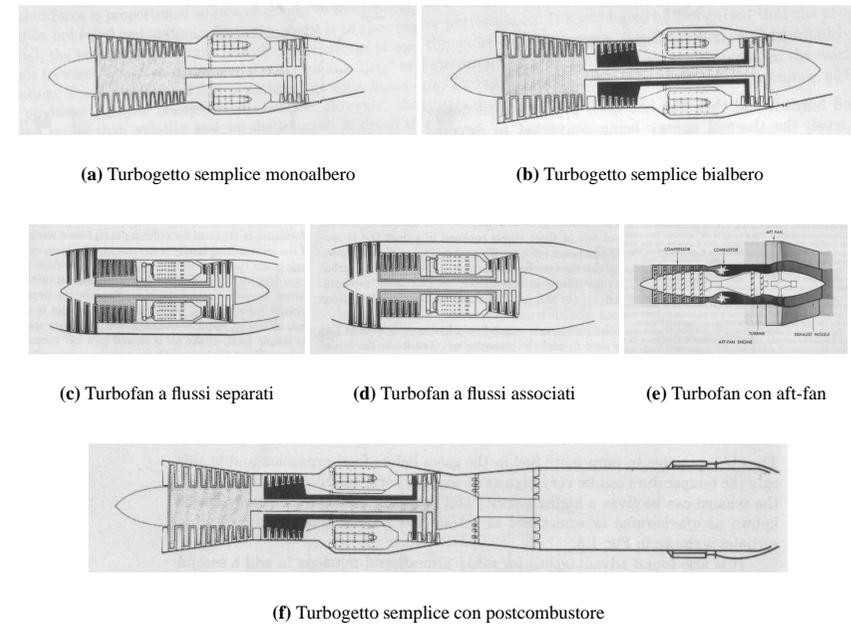


Figura 1.9: Configurazioni di turboreattori (da [1]).

utilizzare l'aria in eccesso per effettuare una seconda combustione, iniettando ancora combustibile dopo l'espansione in turbina. La postcombustione permette di avere temporaneamente una maggiore spinta, con conseguenti possibili applicazioni militari, ma anche nel campo dell'aviazione civile supersonica. È questo ad esempio il caso dei propulsori del Concorde, dove il postcombustore è impiegato per fornire la maggiore spinta richiesta nelle fasi critiche. L'impiego del combustore deve tuttavia essere limitato nel tempo, a causa dell'incremento del consumo specifico quando il postcombustore è acceso.

Turbogetto a doppio flusso (Turbofan)

Il turbogetto semplice, sebbene in grado di fornire spinta a punto fisso, risulta più efficiente del turboelica soltanto alle elevate velocità di volo subsoniche, a causa della diminuzione di efficienza dell'elica in queste condizioni. Per estendere il campo di impiego dei turboreattori e per migliorarne l'efficienza in tutto il campo subsonico, è stato introdotto il turboreattore a doppio flusso (*turbofan*) che cerca di sfruttare i vantaggi sia del turboelica sia del turbogetto. In sostanza, parte dell'energia disponibile a valle della turbina che muove il compressore, anziché essere utilizzata unicamente per accelerare la corrente principale nell'ugello, viene sfruttata per muovere un'elica intubata (detta "fan", cioè ventola) che comprime un'ulteriore portata d'aria, successivamente accelerata in un ugello. In questo modo si ha una minore accelerazione di una maggiore portata d'aria rispetto al turbogetto semplice, cosa che come si

vedrà implica una riduzione dei consumi. Inoltre il fatto che l'elica sia "intubata" permette di rallentare il flusso che la investe, eliminando così la riduzione di prestazioni dell'elica investita da correnti con velocità superiore a $M = 0.6$. Si hanno quindi due flussi d'aria: il principale che passa attraverso

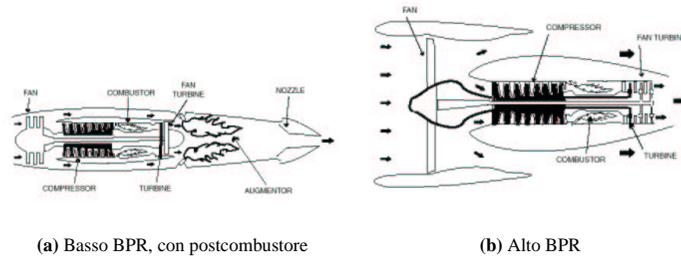


Figura 1.10: Diversi tipi di turboreattore a doppio flusso.

compressore, camera di combustione e turbina e il secondario che invece, dopo essere stato compresso dalla ventola, viene poi espulso in ugello. Sono possibili due soluzioni: se il flusso secondario viene espulso separatamente da quello primario si parla di turbofan a flussi separati, se invece i due flussi vengono miscelati prima di essere espulsi si parla di turbofan a flussi associati.

Il turbofan è il propulsore più diffuso negli aerei da trasporto civili, grazie al basso consumo specifico e al buon funzionamento a velocità transoniche. Oltre ai parametri principali, spinta e consumo specifico, un parametro tipico del turbofan è il rapporto di by-pass (BPR), e cioè il rapporto tra le portate d'aria secondaria e principale. Sulla base del BPR si distinguono due tipologie di turboreattori a doppio flusso: quelli a basso rapporto di bypass, e quelli ad alto rapporto di bypass. I primi sono caratterizzati da una portata d'aria del flusso secondario all'incirca pari, o inferiore a quella del flusso primario. Questa era la soluzione impiegata nei primi turbofan degli aerei di linea degli anni '60 come il Boeing 727, che aveva tre turbofan JT8D della Pratt & Whitney. I turbofan a basso BPR sono oggi impiegati nei moderni aerei da combattimento (essi consentono anche più facilmente la postcombustione).



Figura 1.11: Turbofan a flussi separati CF6-80E1 della General Electric (BPR=5.2) installato su un Airbus A330.

I turboreattori a doppio flusso con BPR pari a 5 o superiore sono classificati come turbofan ad alto

BPR. Tali propulsori, introdotti inizialmente su veicoli militari da trasporto, sono entrati nel campo delle aerolinee civili alla fine degli anni '60 con l'introduzione degli aerei ad alta capacità come il Boeing 747, il McDonnell-Douglas DC-10 e il Lockheed L-1011 Tristar. Le spinte coprono il campo compreso tra 5 e 500 kN. Tra le proprietà che hanno portato al successo dei turbofan ad alto BPR (Fig. 1.11), va ricordata quella di essere molto meno rumorosi.

Si vedrà che la scelta e l'ottimizzazione del rapporto di by-pass dipende dalla particolare applicazione sotto esame. Se l'obiettivo è avere spinte specifiche elevate, è conveniente adottare un basso BPR, nonché la postcombustione. Se l'obiettivo invece è ottenere basso consumo e inquinamento acustico, conviene adottare alti BPR.

1.3.3 Pulsoreattore

Il pulsoreattore è un propulsore di notevole semplicità costruttiva (Fig. 1.12), in cui la compressione dell'aria captata avviene per azione dinamica, senza che sia necessario un compressore. Il funzionamento è regolato dall'apertura e chiusura di valvole a lamelle poste a valle della presa d'aria: le lamelle si chiudono per l'aumento della pressione causato dall'accensione del combustibile iniettato, a intermittenza, tramite gli iniettori, nella camera di combustione, e si aprono successivamente per la depressione provocata dalla fuoriuscita della massa di gas combusti dall'ugello di scarico. Molto rumoroso e di rendimento propulsivo assai basso, il pulsogetto viene avviato a terra mediante un getto di aria compressa; fu impiegato nel 1944 dalla Germania sulle bombe volanti V1. Successivamente è stato impiegato talvolta su aeromodelli o velivoli guidati a distanza.

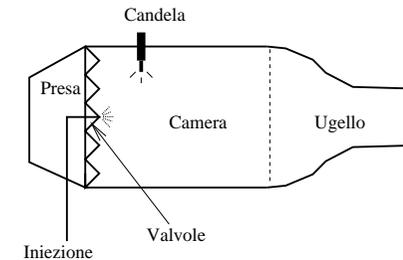


Figura 1.12: Schema di un pulsoreattore.

La sua semplicità, ed il suo peso contenuto, sono dovuti all'assenza di compressore e turbina, mentre il funzionamento ciclico consente di raggiungere temperature di combustione più elevate, rispetto al caso dei motori a combustione continua, dell'ordine di quelle raggiungibili nei motori a pistoni. Tuttavia il funzionamento ciclico stesso porta ad una forte rumorosità ed a vibrazioni. Il ciclo del pulsogetto è caratterizzato idealmente da combustione a volume costante, con frequenza di accensione proporzionale alle dimensioni del motore ($40 \div 300$ Hz). Tra i problemi che ostacolano l'impiego dei pulsoreattori, figurano anche la presenza di gas residui in camera di combustione (che può portare alla pre-accensione di miscela fresca), e la depressione in camera di combustione (che richiama aria dallo scarico). Va comunque ricordato che, pur essendo semplice quasi come lo statoreattore, il pulsogetto è tuttavia in grado di fornire spinta a punto fisso e fino a $M = 0.85$.

1.4 Endoreattori

La propulsione a getto è stata impiegata da quasi 800 anni per armi o fuochi di artigiano. In questo caso si parla di razzi, cioè di veicoli propulsi per endoreazione. Tuttavia lo studio e l'impiego scientifico di tali propulsori risale agli inizi del novecento, precedendo quindi un poco lo sviluppo degli esoreattori. Nella storia degli endoreattori (rockets) si considerano tre padri fondatori, il russo K. Tsiolkowsky, lo statunitense R. Goddard ed il tedesco H. Oberth.

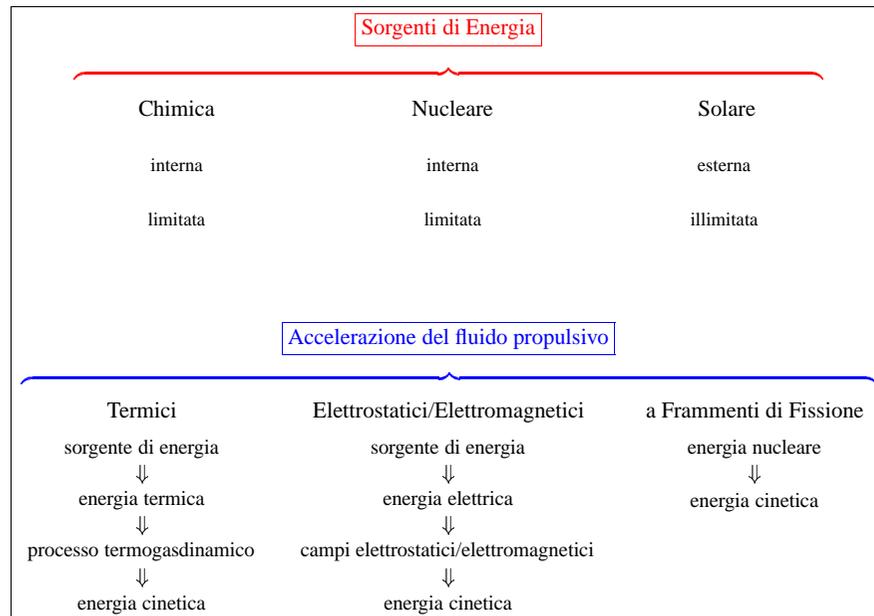


Figura 1.13: Sorgenti di energia e principi per l'accelerazione del fluido propulsivo negli endoreattori.

Sia i motori ad elica che gli esoreattori necessitano del mezzo atmosferico per poter operare. Gli endoreattori, invece, sono in grado di fornire spinta anche nel vuoto. Sebbene gli endoreattori di uso corrente utilizzino una gamma piuttosto ristretta di opzioni (sia in termini di sorgenti di energia che processi di accelerazione del fluido propulsivo), è opportuno ricordare che in linea di principio sia le sorgenti sia i processi di accelerazione possono essere innumerevoli; su queste basi si può operare una classificazione delle famiglie di endoreattori.

In sostanza l'energia proveniente dalla sorgente primaria subisce trasformazioni, fino ad essere convertita in energia cinetica del getto. Una prima classificazione degli endoreattori è quindi basata sul tipo di energia primaria considerata: chimica, nucleare o solare (Fig. 1.13). Oltre a quanto già detto in precedenza, si osserva qui che per i primi due tipi si tratta di energia "interna" al veicolo, cioè immagazzinata a bordo e quindi limitata alla quantità effettivamente imbarcata, mentre nel caso dell'energia solare si parla di una fonte energetica "esterna" al veicolo e quindi, in linea di principio, illimitata.

Una seconda classificazione degli endoreattori è invece basata sul processo di accelerazione del fluido propulsivo. Si ricorda infatti che negli endoreattori la spinta viene generata dall'accelerazione di un fluido propulsivo stivato a bordo ed in questo senso, anche nel caso di sorgente di energia illimitata, le possibilità di funzionamento del motore sono limitate dalla disponibilità di fluido propulsivo. Si distinguono così endoreattori termici, elettrostatici/elettromagnetici e a frammenti di fissione nucleare. Nei primi l'energia primaria viene conferita al fluido propulsivo in forma di energia termica per ottenere velocità di efflusso elevate (più di quanto ottenibile dalla semplice espansione di gas freddo). Negli endoreattori elettrostatici/elettromagnetici l'energia primaria viene trasformata in energia elettrica, necessaria alla generazione di campi elettrostatici o elettromagnetici in grado di accelerare un fluido propulsivo elettricamente carico. Infine negli endoreattori nucleari a frammenti di fissione, i prodotti stessi della reazione nucleare costituiscono il fluido propulsivo espulso ad alta velocità.

Questo corso si limiterà allo studio delle principali caratteristiche dei soli endoreattori termici chimici.

1.4.1 Endoreattori termici

Secondo la classificazione vista in Fig. 1.13 tra gli endoreattori termici, cioè quelli in cui l'energia primaria viene utilizzata per fornire energia termica al fluido propulsivo - successivamente trasformata in energia cinetica del getto nell'ugello, si possono distinguere i propulsori a seconda del tipo di energia primaria impiegata. Nella classificazione si considera come energia primaria anche quella elettrica; in realtà quest'ultima viene prodotta a bordo a spese di una delle sorgenti primarie (chimica, nucleare, solare), tuttavia è opportuno mettere in evidenza il passaggio attraverso l'energia elettrica, che è poi utilizzata per riscaldare il fluido propulsivo. Gli endoreattori termici si dividono quindi in endoreattori:

1. **CHIMICI.** Il fluido propulsivo viene riscaldato attraverso le reazioni di combustione che avvengono al suo interno.
2. **NUCLEARI TERMICI.** L'energia generata da una reazione nucleare viene utilizzata per riscaldare il fluido propulsivo.
3. **ELETTROTERMICI.** L'energia elettrica disponibile a bordo (da sorgente nucleare, solare, o chimica), viene utilizzata per riscaldare il fluido propulsivo.
4. **SOLARI TERMICI (Solar Thermal Rockets).** L'energia solare, captata tramite specchi, viene utilizzata per riscaldare il fluido propulsivo.

Endoreattori chimici

Gli endoreattori termici chimici, detti brevemente endoreattori chimici, sono quelli comunemente impiegati nei sistemi di lancio e nella gran parte dei motori di manovra orbitale e di controllo dell'assetto di satelliti. L'energia chimica è immagazzinata nei propellenti stivati a bordo, i quali per effetto delle reazioni di combustione si trasformano in un gas ad alta temperatura che costituisce il fluido propulsivo.

Come propellente si intende quindi la sostanza che dopo aver subito trasformazioni (cambiamenti di stato, reazioni chimiche, riscaldamento, ... a seconda del tipo di endoreattore) va a costituire il fluido propulsivo, cioè il gas che viene accelerato dall'endoreattore nell'ugello. Nel caso di un endoreattore chimico il fluido propulsivo è costituito dagli stessi prodotti di combustione derivanti dalla reazione tra il combustibile e l'ossidante utilizzati, i quali definiscono perciò il rilascio di energia e la composizione della miscela dei prodotti di reazione.

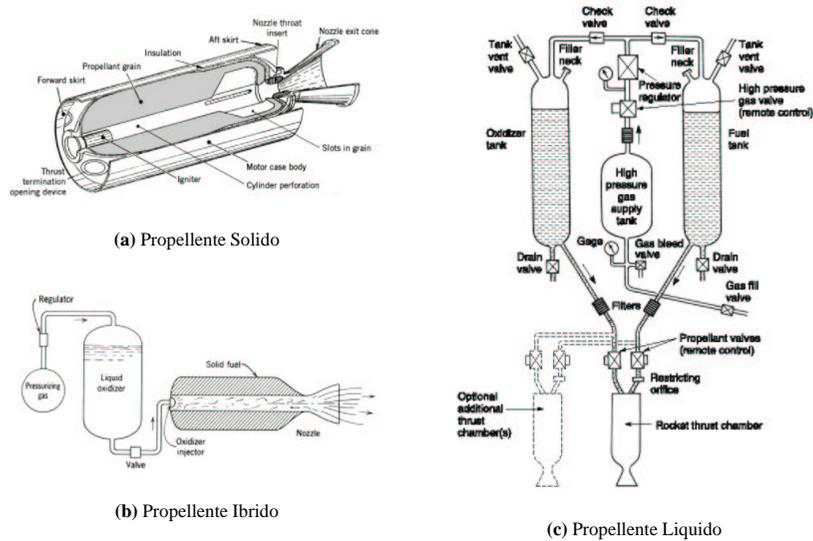


Figura 1.14: Endoreattori termici chimici (da Ref. 2).

Il propellente può essere stivato a bordo in diversi modi. Se è immagazzinato allo stato solido e bruciando passa allo stato gassoso, si parla di propellente solido. Se è immagazzinato allo stato liquido, in serbatoi, si parla di propellente liquido. Se il propellente è immagazzinato in parte allo stato solido e in parte allo stato liquido, si parla di endoreattori a propellenti ibridi.

Nel caso di endoreattori a propellente solido, il propellente contiene al suo interno tanto il combustibile quanto l'ossidante, e la combustione, che consuma il propellente solido generando gas caldi come prodotti di reazione, avviene sulla superficie esposta del propellente (Fig. 1.14a). La caratteristica di tali endoreattori, largamente impiegati nei missili balistici e nei lanciatori, è l'estrema semplicità. Con endoreattori a propellente liquido si possono realizzare sistemi con prestazioni superiori, ma più complessi (Fig. 1.14c). In questo caso combustibile e ossidante possono essere immagazzinati nei serbatoi separatamente, oppure si può utilizzare un unico propellente il quale rilascia energia per effetto di una decomposizione (monopropellente). Il sistema di alimentazione, controllato da valvole e pompe (o gas ad alta pressione), costituisce un importante sottosistema degli endoreattori a propellente liquido. Anche questa famiglia è stata largamente impiegata nei sistemi di lancio e nei propulsori per la manovra e il controllo di assetto dei satelliti; in quest'ultimo caso si preferisce normalmente la soluzione monopropellente. Per alcune applicazioni può essere interessante un compromesso costituito dagli endoreattori a propellente ibrido (Fig. 1.14b). Si tratta tuttavia di un sistema finora raramente impiegato.

È stata realizzata un'ampia gamma di endoreattori chimici, caratterizzati da diversi propellenti, sistemi di alimentazione e dimensioni, con spinte che vanno dall'ordine del newton fino a quello dei milioni di newton. Essi inoltre sono attualmente l'unico sistema in grado di far decollare i pesanti veicoli per il lancio e immissione in orbita di satelliti.



Figura 1.15: Lo Space Shuttle, con endoreattori chimici sia a propellente solido (sinistra) sia a propellente liquido (sotto la navetta).

Endoreattori elettrotermici

L'energia elettrica generata a bordo (da sorgente nucleare, solare, chimica), viene utilizzata in questi endoreattori per riscaldare un fluido propulsivo. Si tratta di propulsori caratterizzati da basso consumo ma anche da basse spinte, e che possono essere di interesse per applicazioni su satelliti. Ad esempio, nel

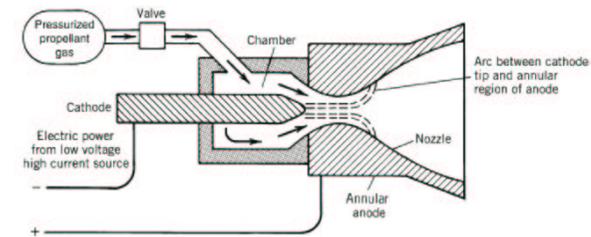


Figura 1.16: Endoreattore elettrotermico ad arco.

caso illustrato in Fig. 1.16, un arco elettrico scalda il fluido propulsivo a temperature elevate. Il fluido propulsivo può essere stivato come propellente allo stato liquido o gassoso. A causa della differenza di potenziale tra anodo e catodo si crea un arco elettrico che permette alla corrente elettrica di passare attraverso il gas che di conseguenza si scalda a temperature molto elevate. L'energia elettrica può essere generata a bordo a partire da sorgenti chimiche (p. es. celle a combustibile), solari o nucleari (p. es. generatori a decadimento di radioisotopi, già usati per produrre energia elettrica in sonde spaziali di

esplorazione della parte esterna del sistema solare dove l'energia solare disponibile è scarsa, o in satelliti militari).

Endoreattori nucleari termici

La fattibilità di endoreattori nucleari termici è stata dimostrata con una serie di test svolti negli USA tra la fine degli anni '50 e l'inizio dei '60. Sono caratterizzati da elevate prestazioni, ma sono stati abbandonati per ora a causa del loro elevato impatto ambientale. Potrebbero essere ripresi in considerazione per missioni umane verso Marte. Reazioni nucleari di fissione, fusione o decadimento radioattivo di un isotopo possono essere utilizzate per trasferire calore al fluido propulsivo (di solito H_2). Nello schema

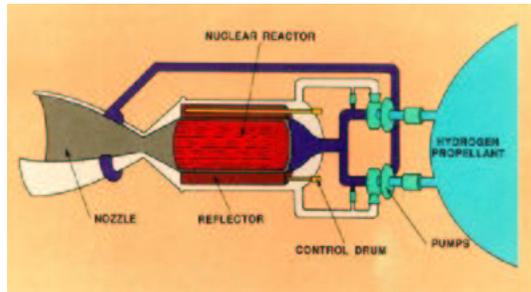


Figura 1.17: Endoreattore nucleare termico.

illustrato in Fig. 1.17 l'idrogeno, stivato allo stato liquido in un serbatoio, viene inviato in canali che allo stesso tempo raffreddano le pareti del reattore nucleare a fissione e scaldano l'idrogeno stesso. Il gas propulsivo ad alta temperatura viene poi inviato nell'ugello propulsivo dove viene accelerato. Si osservi che la temperatura massima del fluido deve necessariamente essere inferiore a quella del reattore, e quindi è limitata dalla massima temperatura ammissibile per i materiali che costituiscono il reattore. Con questo sistema si possono avere spinte elevate come quelle degli endoreattori chimici, ma con minore consumo di propellente. Il rapporto spinta/peso è tuttavia piuttosto basso in confronto ai valori tipici per endoreattori chimici (ancorché pur sempre molto più alto rispetto ai rimanenti tipi di endoreattori).

Endoreattori solari termici

Nello schema illustrato in Fig. 1.18 un grande specchio parabolico concentra l'energia solare su uno scambiatore di calore dove il fluido propulsivo (p. es. idrogeno) viene riscaldato; esso è poi accelerato nell'ugello propulsivo. I limiti di questo sistema sono: bassa spinta; impossibilità d'uso notturno (o in eclisse); uso possibile solo nella parte interna del sistema solare.

1.4.2 Endoreattori elettrostatici/elettromagnetici

Come per gli endoreattori elettrotermici, l'energia elettrica viene generata a bordo a partire da energia solare, chimica o nucleare. L'accelerazione del fluido propulsivo avviene attraverso il suo passaggio in campi elettrici o elettromagnetici. Perché questo sia ottenibile il fluido propulsivo deve avere la proprietà di essere elettricamente carico. Non si hanno i limiti dovuti alla massima temperatura sopportabile dai

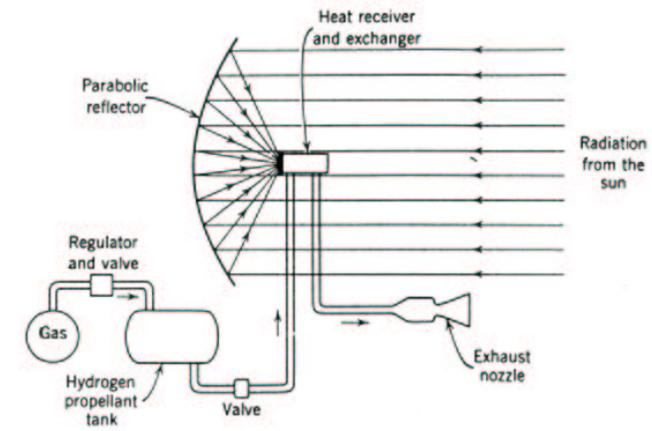


Figura 1.18: Endoreattore solare termico.

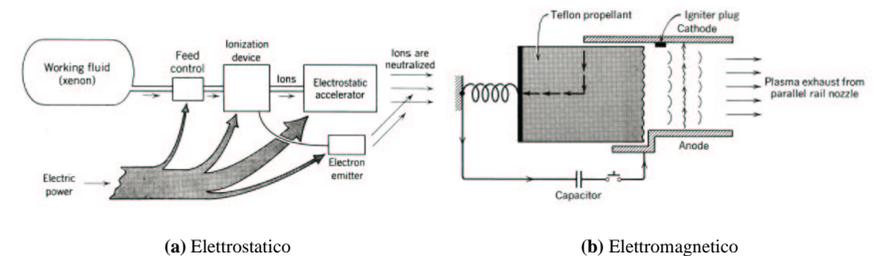


Figura 1.19: Endoreattori elettrostatici/elettromagnetici.

materiali che ci sono nel caso degli endoreattori termici. Questi endoreattori sono caratterizzati da bassi consumi, ma anche da rapporti spinta/peso molto bassi. Si distinguono quindi le due famiglie:

Endoreattori Elettrostatici Un campo elettrostatico accelera il propellente, costituito da ioni positivi di xenon, mercurio o cesio, od ancora da colloidali.

Endoreattori Elettromagnetici Un campo elettromagnetico accelera un plasma per effetto della forza di Lorentz.

Domande di verifica

1.1 Quali sono le principali sorgenti di energia impiegate nel campo della propulsione aerospaziale?

1.2 Cos'è il fluido propulsivo?

- 1.3** Cosa si intende per esoreattore?
- 1.4** Perché un esoreattore non può fornire spinta nel vuoto?
- 1.5** Perché un motore ad elica non può fornire spinta nel vuoto?
- 1.6** Cosa si intende per endoreattore?
- 1.7** Che differenza c'è tra motoelica e turboelica?
- 1.8** Descrivere schematicamente un endoreattore elettrostatico.
- 1.9** Descrivere schematicamente un endoreattore nucleare termico.
- 1.10** Descrivere schematicamente un endoreattore termoelettrico.
- 1.11** Quali sono i tipi di endoreattori chimici? In cosa differiscono?
- 1.12** Quali sono le tre principali classi esoreattori? Qual'è la più diffusa?
- 1.13** Lo statoreattore è:
- a) propulsore a getto;
 - b) propulsore a elica;
 - c) propulsore fissato al banco di prova;
 - d) endoreattore;
 - e) esoreattore.
- 1.14** Quali sono le differenze tra turboreattore e turbogetto?
- 1.15** Il turbogetto è un esoreattore?
- 1.16** L'esoreattore è un turbogetto?

Bibliografia

[1] D. G. Shepherd. *Aerospace Propulsion*. Elsevier, New York, USA, 1972.

[2] G. P. Sutton. *Rocket Propulsion Elements*. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA, sixth edition, 1992.