

## 6 Propulsione

### 6.1 Meccanica della propulsione Bibliografia

Scopo di questo capitolo è fornire un quadro dei vari sistemi propulsivi utilizzati in campo aeronautico.

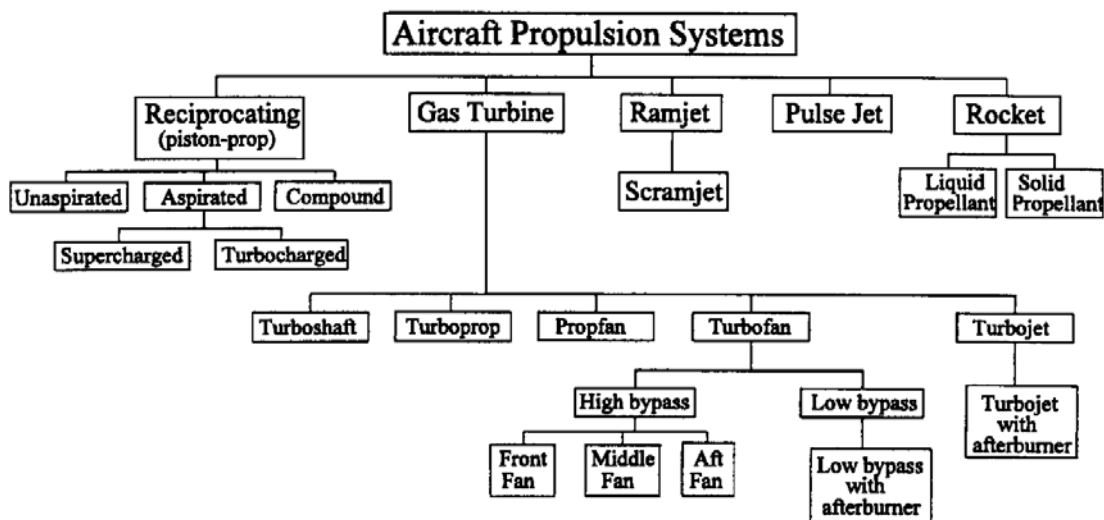


Figura 6.1 Sistemi propulsivi in campo aeronautico[1]

Vengono presentati alcuni aspetti teorici di base alla propulsione. Nei capitoli successivi verranno meglio analizzati i principali sistemi propulsivi adottati e il modo col quale l'elica trasforma potenza ad un albero in forza traente. Vengono anche analizzati gli effetti della variazione delle condizioni atmosferiche, pressione, densità, temperatura sulle prestazioni del sistema propulsivo ed elencati i parametri sui quali si agisce per modulare l'erogazione della potenza, fornendo un quadro di insieme di come possano influenzare le prestazioni di un velivolo.

### 6.1 Meccanica della propulsione

I propulsori aeronautici sono costituiti da unità motrici a combustione interna, quasi esclusivamente di tipo alternativo o a turbina, e le cui prestazioni dipendono in misura considerevole dalle condizioni ambiente di temperatura e di pressione, dato che in essi si utilizza quale comburente (salvo che nel caso di propulsori a razzo) l'ossigeno atmosferico, mostrando in linea di massima cali considerevoli al crescere della quota. Mentre nel motore a getto la conoscenza della spinta fornita dalla massa gassosa eiettata è sufficiente per determinare la potenza disponibile erogata dal propulsore, nel caso di propulsori motoelica (che in altre parole forniscono all'albero dell'elica una potenza meccanica che determina la rotazione di questa) la conoscenza della trazione o della potenza disponibile presuppone la conoscenza delle caratteristiche dell'elica.

La propulsione aeronautica è invariabilmente basata sul teorema della quantità di moto e sul principio di azione e reazione, poiché la spinta fornita da un qualunque propulsore è conseguenza dell'eiezione di una massa gassosa, accelerata dal sistema propulsivo. Nell'ipotesi di fenomeno stazionario la trazione  $T$  di cui si può disporre risulta<sup>1</sup>

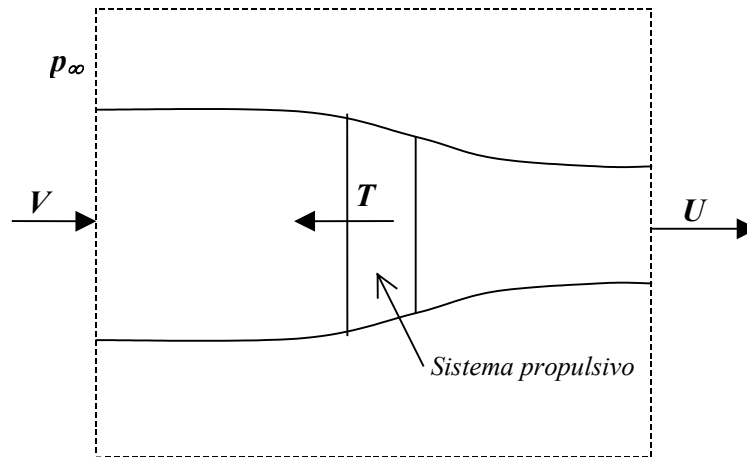


Figura 6.1.1

$$T = \dot{m}(U - V) = \dot{m}\Delta V \quad (6.1.1)$$

dove

$T$  = trazione

$\dot{m}$  = portata in massa elaborata dal propulsore

$\Delta V$  = variazione di velocità che il propulsore imprime al fluido eiettato

$U$  = velocità di eiezione della massa fluida elaborata dal propulsore

$V$  = velocità di captazione della massa fluida elaborata dal propulsore

Si ritiene inoltre che la variazione di velocità che il propulsore determina nella massa fluida elaborata sia la medesima per tutte le particelle fluide, e che siano assenti fenomeni dissipativi. Si può infine ricordare che la forza esercitata dal propulsore sulla massa fluida, onde incrementarne la velocità di  $\Delta V$ , è uguale e contraria alla forza che la massa fluida esercita sul propulsore, il quale viene conseguentemente spinto in direzione contraria a quella del vettore  $\Delta V$ , trasmettendo quindi la forza  $T$ , come trazione, all'aeromobile su cui è installato.

Il sistema propulsivo, che installato su un aeromobile avente la velocità  $V$  fornisce la trazione  $T$ , sviluppa una potenza propulsiva, o potenza utile o potenza disponibile

$$P_A = TV = \dot{m}(U - V)V = \dot{m}\Delta V V \quad (6.1.2)$$

mentre la potenza complessiva sviluppata dal propulsore è pari alla variazione di energia cinetica per unità di tempo<sup>2</sup>

$$P = \frac{1}{2} \dot{m}(U^2 - V^2) \quad (6.1.3)$$

La differenza è la potenza perduta, vale a dire l'energia cinetica che va dispersa nella massa fluida elaborata nell'unità di tempo e che non può essere convertita in potenza utile.

<sup>1</sup> L'espressione della trazione qui riportata è semplificata nei suoi termini perché si riferisce ai valori asintotici della velocità e vengono trascurate tutte le resistenze. Una scrittura più rigorosa sarà argomento dei corsi specifici sui sistemi propulsivi. In questa sede interessa solo evidenziare i due elementi essenziali, portata e velocità della massa fluida elaborata dal propulsore.

<sup>2</sup> E' una ovvia applicazione del principio di conservazione dell'energia.

E' così possibile definire il rendimento propulsivo  $\eta_P$ , cioè il rapporto tra la potenza utile e la potenza totale

$$\eta_P = \frac{P_A}{P} \quad (6.1.4)$$

che, ovviamente, si vorrebbe fosse il più alto possibile essendo la potenza complessiva frutto della combustione di carburanti o dell'utilizzo di altre fonti di energia.

Occorre tuttavia rilevare che la portata in massa  $\dot{m}$ , elaborata nell'unità di tempo dal propulsore, sarà in generale costituita dalla somma di una portata  $\dot{m}_1$ , che il sistema propulsivo elabora dopo averla captata dall'ambiente, e di una portata  $\dot{m}_2$  che il propulsore elabora prelevandola dall'aeromobile, la quale costituisce quindi la portata di combustibile (o di propellente) erogata dall'impianto di alimentazione del propulsore stesso, e la cui velocità di captazione  $U$  è ovviamente nulla.

Una analisi dei tipi di propulsione possibili permette di definirne tre tipi fondamentali, e precisamente:

- propulsore ad elica, in cui la portata in massa eiettata nella unità di tempo  $\dot{m}$  è praticamente coincidente con  $\dot{m}_1$  potendosi al confronto trascurare l'apporto rappresentato dalla portata in massa del combustibile  $\dot{m}_2$
- esoreattore, in cui la massa eiettata nell'unità di tempo è principalmente, ma non esclusivamente, rappresentata da  $\dot{m}_1$  ed in cui l'apporto di  $\dot{m}_2$  può quindi non essere trascurabile. Rientrano in questa categoria turboreattori, autoreattori, statoreattori, pulsoreattori
- endoreattore, in cui la massa eiettata nell'unità di tempo è rappresentata dalla sola  $\dot{m}_2$  senza che il sistema propulsivo utilizzi alcuna massa prelevata dall'ambiente esterno. Esponente tipico dei propulsori di questa categoria è il motore a razzo. Tale tipo di propulsore non viene preso in esame.

### 6.1.1 Propulsore ad elica

La trazione risulta

$$T = \dot{m}_1(U - V) = \dot{m}_1 \Delta V \quad (6.1.5)$$

mentre potenza utile, potenza complessiva e rendimento propulsivo sono rispettivamente

$$P_A = TV = \dot{m}_1(U - V)V \quad (6.1.6)$$

$$P = \frac{1}{2} \dot{m}_1(U^2 - V^2) \quad (6.1.7)$$

$$\eta_P = \frac{P_A}{P} = \frac{\dot{m}_1(U - V)V}{\frac{1}{2} \dot{m}_1(U^2 - V^2)} = \frac{\dot{m}_1(U - V)V}{\frac{1}{2} \dot{m}_1(U - V)(U + V)} = \frac{2V}{(U + V)} = \frac{2}{1 + U/V} = \frac{2}{2 + \Delta V/V} \quad (6.1.8)$$

Risulta evidente che, per ottenerci una trazione, occorre che  $\Delta V$  sia positiva (cioè che l'elica acceleri verso l'indietro la portata in massa elaborata), e che il rendimento propulsivo risulta tanto più elevato quanto minore è  $\Delta V$  in rapporto a  $V$  (o quanto più prossima a  $V$  risulta  $U$ ). E' del resto ovvio che nel caso sia  $\Delta V = 0$  (cioè  $U = V$ ), dato che sono per ipotesi nulli fenomeni dissipativi dovuti a resistenze passive, l'elica non è funzionante e quindi, come noto, il suo rendimento è pari ad 1, come per tutte le macchine in riposo.

Il rendimento dell'elica decresce al crescere del rapporto  $U/V$ .

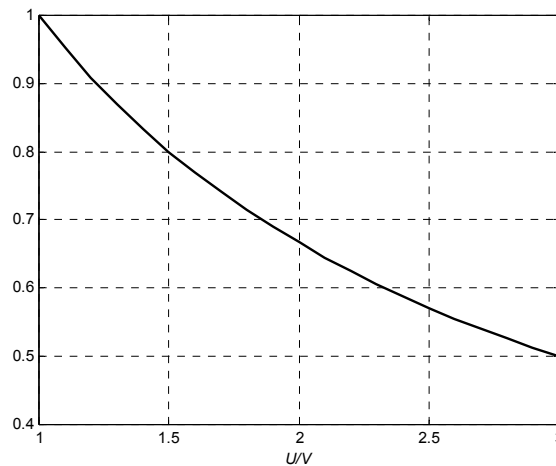


Figura 6.1.2 Rendimento del sistema propulsivo ad elica

### 6.1.2 Esareattore

Ricordando che la massa fluida eiettata nell'unità di tempo è costituita dalla somma di una  $\dot{m}_1$  (aria captata dall'ambiente) e di una  $\dot{m}_2$  (combustibile bruciato), la variazione di quantità di moto in gioco nel fenomeno risulta

$$T = \dot{m}_1(U - V) + \dot{m}_2 U = (\dot{m}_1 + \dot{m}_2)U - \dot{m}_1 V \quad (6.1.9)$$

mentre potenza utile, potenza totale e rendimento propulsivo diventano

$$P_A = TV = (\dot{m}_1(U - V) + \dot{m}_2 U)V \quad (6.1.10)$$

$$P = \frac{1}{2}\dot{m}_1(U^2 - V^2) + \frac{1}{2}\dot{m}_2 U^2 \quad (6.1.11)$$

$$\eta_P = \frac{P_A}{P} = \frac{\dot{m}_1(U - V)V + \dot{m}_2 UV}{\frac{1}{2}\dot{m}_1(U^2 - V^2) + \frac{1}{2}\dot{m}_2 U^2} \quad (6.1.12)$$

con l'espressione del rendimento che, opportunamente elaborata, si può riscrivere come

$$\eta_P = \frac{P_A}{P} = 2 \frac{\frac{\dot{m}_1 + \dot{m}_2}{\dot{m}_2} \left( \frac{U}{V} - 1 \right) + 1}{\frac{\dot{m}_1 + \dot{m}_2}{\dot{m}_2} \left( \frac{U^2}{V^2} - 1 \right) + 2} \quad (6.1.13)$$

Indicando con  $\alpha$  il rapporto tra la massa dei gas di scarico eiettati nell'unità di tempo, somma di aria e dei prodotti di combustione, e la massa di combustibile bruciato nell'unità di tempo (rapporto che per un normale turboreattore assume valori compresi tra 50 e 100, si ha

$$\eta_P = 2 \frac{1 + \alpha \left( \frac{U}{V} - 1 \right)}{2 + \alpha \left( \frac{U^2}{V^2} - 1 \right)} \quad (6.1.14)$$

che, per valori elevati di  $\alpha$  fornisce una espressione analoga alla 6.1.8.

### 6.1.3 Osservazione

La natura del legame che intercorre tra trazione ed efficienza si può intuire analizzando le espressioni di trazione ed efficienza. Il massimo dell'efficienza si ottiene per valori di  $U$  prossimi a  $V$ , che però ovviamente sembrano comportare bassi valori di trazione. Tuttavia questo risultato spiega in parte l'esistenza di vari sistemi propulsivi.

Un'elica col suo diametro relativamente grande, elabora una grande massa d'aria fornendo un minimo incremento di velocità. Alla luce di ciò, un'elica produce trazione elaborando alti valori di  $\dot{m}_1$  con bassi valori di  $\Delta V$ , e di conseguenza con elevati rendimenti. In effetti l'elica è il sistema propulsivo più efficiente ma la trazione fornita è limitata dalla velocità all'estremità della pala che, potendo raggiungere valori vicini e superiori a quelli del suono, induce l'insorgere di sistemi di onde d'urto all'estremità della pala che, aumentando la resistenza, comportano un aumento della coppia resistente, una riduzione del numero di giri del motore, una diminuzione di potenza e di trazione fornita ed in ultima analisi di efficienza del sistema propulsivo.

Questo rende l'elica un sistema propulsivo non adeguato per velivoli che presentano velocità di crociera superiori a 0,6 Mach.

All'opposto un motore a getto produce la trazione elaborando una quantità ridotta di aria ma con un elevato incremento di velocità. In questo caso la portata d'aria elaborata risulta inferiore a quella elaborata dall'elica, ma l'incremento di velocità risulta decisamente superiore. Sotto questo punto di vista è il sistema propulsivo adatto al volo transonico e supersonico anche se il rendimento risulta inferiore.

In quest'ottica si intuisce lo sviluppo dei motori turbofan, motori con una grossa elica multipala azionata da un motore a turbina, che sono progettati per sviluppare una trazione pari a quella sviluppabile dai motori a getto ma con una efficienza paragonabile ai propulsori ad elica.

Prima di entrare nel dettaglio dei singoli sistemi propulsivi, si riporta in figura 6.1.3 il campo di impiego dei vari sistemi propulsivi in funzione della quota e del numero di Mach di volo.

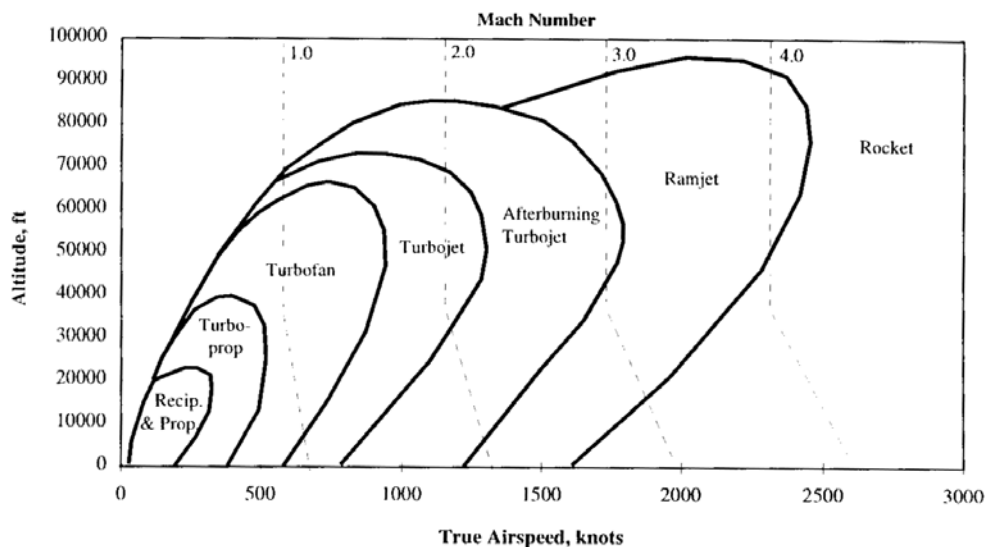


Figura 6.1.3 Involuppo dell'impiego dei sistemi propulsivi [1]

## Bibliografia

- [1] Asselin, M., *An introduction to aircraft performance*, London, AIAA, 1997, Cap.2