

Produzione dell'Energia Elettrica

Turbine Idrauliche

La turbina idraulica è un tipo di Turbomacchina definita come **Macchina Motrice**, ovvero una macchina capace di trasformare energia da una fonte primaria (in questo caso l'energia contenuta nel fluido) in energia meccanica (e successivamente, mediante un alternatore, in energia elettrica).

In funzione delle caratteristiche del corso d'acqua e del salto geodetico, ovvero della "caduta" a disposizione prima della turbina, differenti tipi di turbine vengono utilizzati.

Essenzialmente esistono tre diversi tipi di turbine, estremamente differenti tra di loro in quanto a caratteristiche e campi di impiego, e si individuano:

- **Turbine Pelton**
- **Turbine Francis**
- **Turbine Kaplan**

Le caratteristiche in maggiore dettaglio di ciascuna di queste turbine verranno descritte nel seguito del post e nel successivo.

Criteri di scelta della turbina

La scelta della turbina dipende strettamente dalle caratteristiche morfologiche del corso d'acqua, in particolare dalla portata e dal salto geodetico, ovvero la differenza di quota tra il punto di presa dal corso d'acqua e la turbina.

In presenza di elevati salti e piccole portate (dai 300 agli oltre 1000 metri), turbine come la Pelton sono preferibili in quanto permettono di ottenere la migliore resa,

Per bassi salti (ordine della decina di metri) ed elevate portate viene spesso preferita la turbina Kaplan in quanto si tratta di una turbina assiale capace di elaborare elevate portate, ed inoltre in grado di operare ad elevato rendimento anche con valori di portata dell'ordine del 20-30% di quella nominale.

In condizioni intermedie la scelta è spesso rappresentata dalla turbina Francis, ovvero una macchina a flusso centripeto, caratterizzata da un campo di regolazione in genere assai modesto.

Esistono ovviamente delle "zone di sovrapposizione" tra le varie turbine, pertanto la scelta viene ponderata in funzione di un insieme di fattori tecnico-economici.

Turbine Pelton

La turbina Pelton rappresenta forse la più particolare turbina idraulica in quanto la parte captatrice del fluido non presenta una classica forma "a pala", sia essa radiale o assiale, bensì una forma a "cucchiaio", in particolare a "doppio cucchiaio". Un esempio di turbina Pelton è raffigurato nella seguente immagine:

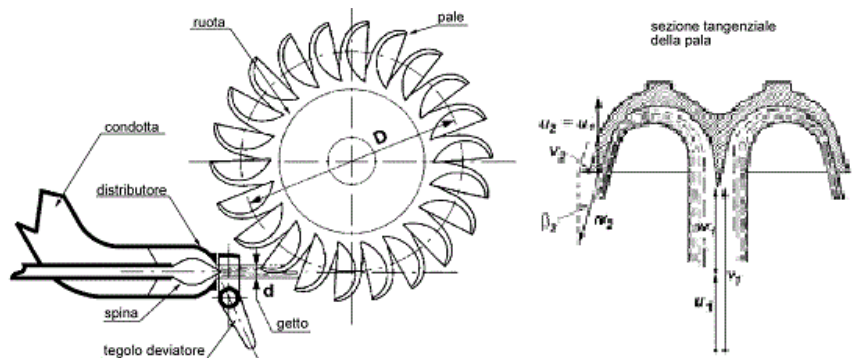
Dall'immagine è possibile anche eseguire un confronto visivo tra la girante ed una normale persona in termini dimensionali, considerando che le ruote Pelton raggiungono dimensioni anche più elevate rispetto a quella mostrata.



La turbina Pelton opera grazie alla trasformazione dell'energia potenziale del bacino di monte in energia cinetica senza operare variazioni di pressione del fluido attraverso l'impiego di uno o più ugelli progettati opportunamente.

Per tale ragione la turbina Pelton è definita una macchina "ad Azione".

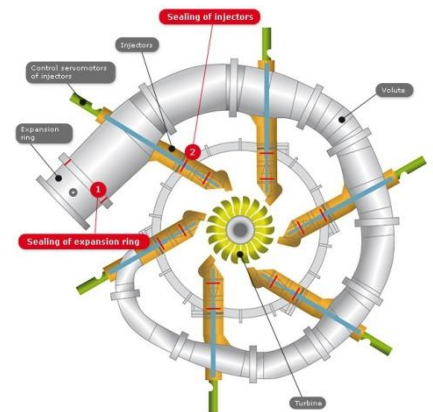
La particolare forma della palettatura consente di deviare il flusso in modo da invertirne la direzione (ad eccezione di una piccola componente dovuta alla necessità di non colpire le palettature successive con il getto deviato, ma scaricarlo nella cassa:



La turbina Pelton è caratterizzata da un elevato rendimento, inoltre è una macchina "parzializzata", in quanto non tutte le pale ricevono contemporaneamente il flusso essendo presente un numero di ugelli inferiore al numero totale delle pale, come intuibile dallo spaccato di una installazione di tale turbina:

In figura destra è visibile l'ugello con il "tegolo deviatore", ovvero un dispositivo che permette di deviare dal getto una porzione di esso per favorire una rapida regolazione della portata, non ottenibile altrimenti senza evitare fenomeni conosciuti come "colpo d'ariete" agendo esclusivamente sulla spina Doble, ovvero su una spina di forma adeguata che scorre all'interno dell'ugello e ne permette la variazione della sezione di passaggio in modo da ridurre (od aumentare) la portata del getto.

Il numero di ugelli installabili dipende fortemente dalle dimensioni della girante, in quanto una girante di grandi dimensioni dispone di maggiore spazio per gli ugelli; il numero di questi non supera solitamente i sei.



<https://www.youtube.com/watch?v=Jd5BN7SPkqI>

Turbina Francis

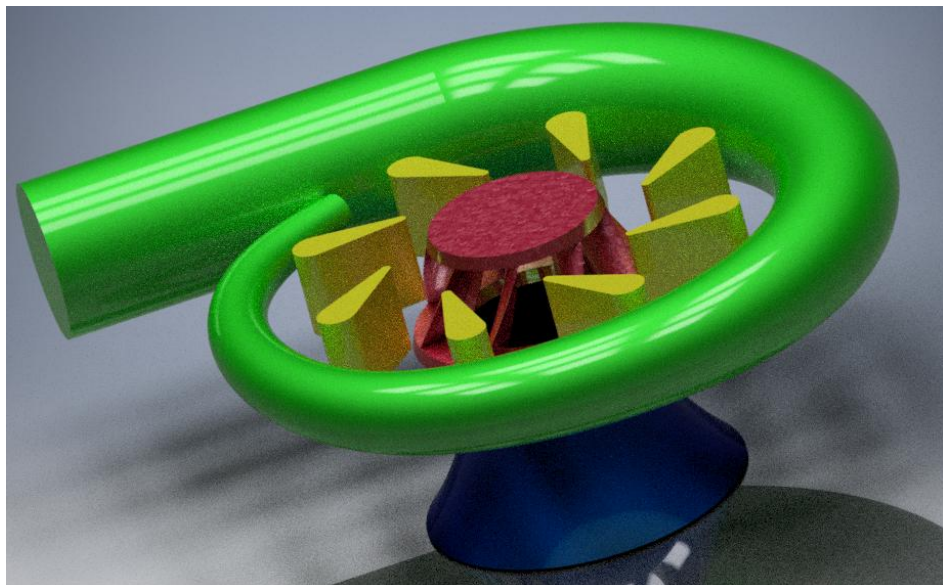
La turbina Francis è una turbina a flusso centripeto, ovvero una turbina nella quale il fluido entra radialmente e fuoriesce assialmente alla girante stessa, ruotando perciò di 90° durante il suo transito attraverso la girante.

Le caratteristiche di questa turbina in termini di geometria la rendono adeguata ad operare in un range di salti geodetici compresi tra 10 e 400 metri con portate elaborate tra 2 e 50 m³/s.

L'elevato range di portate e salti alle quali tali turbine possono operare ne ha reso possibile una enorme diffusione a livello mondiale rendendola la turbina idraulica maggiormente impiegata negli impianti idroelettrici.

La turbina Francis, a differenza della turbina Pelton è una turbina "a reazione" in quanto l'energia potenziale del fluido viene convertita in energia cinetica in parte nello statore (o distributore) ed in parte nel rotore (e da questa percentuale deriva il "grado di reazione"), mentre nelle macchine ad azione questa conversione avviene integralmente nel distributore.

La regolazione della portata viene effettuata attraverso una palettatura statorica (deviatori di flusso) a geometria variabile posta radialmente alla girante in corrispondenza della sezione di ingresso delle pale rotoriche, e l'insieme viene racchiuso in una cassa a forma di chiocciola, come visibile nella seguente immagine:



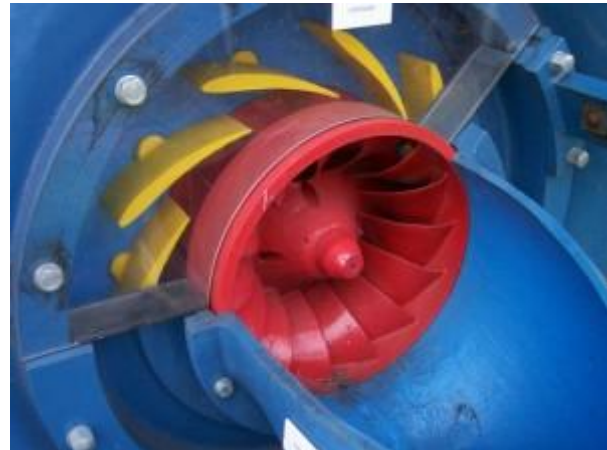
La palettatura rotorica è la parte più interna ed è indicata in rosso, mentre la palettatura statorica è rappresentata in giallo.

L'acqua entra nella sezione verde e viene scaricata lungo la direzione perpendicolare all'asse di rotazione del rotore.

La necessità di regolazione della portata ed il conseguente impiego di uno statore a geometria variabile porta alla variazione dei triangoli di velocità del flusso in maniera considerevole, e pertanto ad un decremento del rendimento piuttosto sensibile ed alla conseguente bassa capacità di regolazione (ovvero all'adattamento alle variazioni di portata da elaborare), rendendo necessario selezionare la turbina in funzione di parametri di funzionamento dell'impianto piuttosto stabili.



Minima portata



Massima portata

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

Turbina Kaplan

La turbina Kaplan è una turbina a flusso assiale, ovvero una turbina nella quale il fluido entra in direzione assiale (rispetto all'asse di rotazione della girante) e fuoriesce sempre assialmente alla girante stessa, non subendo pertanto una rotazione durante il suo transito attraverso la girante come avviene per la turbina Francis.

In termine di salti geodetici al quale operare, per le turbine Kaplan ci si pone in genere al di sotto delle turbine Francis, in particolare le turbine Kaplan iniziano ad operare con salti utili massimi di 30

metri fino a salti estremamente ridotti; le portate elaborabili, in virtù dell'assialità della macchina, possono superare quelle delle turbine Francis.

Le turbine Kaplan vengono realizzate con le pale orientabili, così come il distributore, pertanto il flusso risulta indirizzato al variare della portata secondo una direzione ottimale dovuto all'orientamento sia delle pale statoriche che di quelle rotoriche e da questo deriva un rendimento piuttosto elevato sull'intero campo di funzionamento della turbina.

Anche la turbina Kaplan viene racchiusa in una cassa a forma di chiocciola ed allo scarico viene installato un diffusore:

Nella figura è immediato individuare la palettatura rotorica e quella statorica, la quale risulta piuttosto distante dal rotore e collocata prima della curva del condotto che porta il fluido dalla cassa di raccolta alla girante.

Per quanto detto poco sopra, la turbina Kaplan presenta un rendimento piuttosto elevato sull'intero campo di regolazione, pertanto si presta in maniera eccellente per lavorare con condizioni di portata variabili.

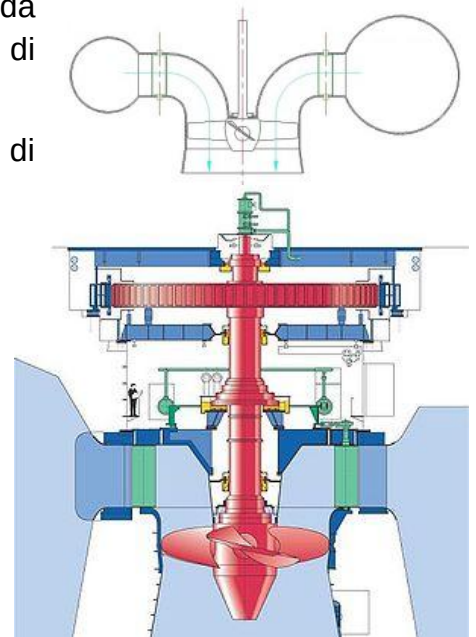
La possibilità di variare il calettamento delle pale rotoriche d'altra parte richiede la presenza di un sistema di orientamento delle pale all'interno della girante (interno all'ogiva) con conseguenti aumenti di costo rispetto ad una equivalente turbina "Kaplan" a pale fisse.

Analogamente alla turbina Francis anche la turbina Kaplan è una turbina a reazione, pertanto l'energia potenziale del fluido viene convertita in energia cinetica in parte nello statore (o distributore) ed in parte nel rotore.

Il numero di pale della girante è compreso tra 3 ed 8, in funzione della dimensione della macchina.

Anche per le turbine Kaplan viene utilizzato un diffusore allo scarico con lo scopo di recuperare parte dell'energia cinetica allo scarico trasformandola in energia di pressione.

<https://www.youtube.com/watch?v=XtERATiuf1o>



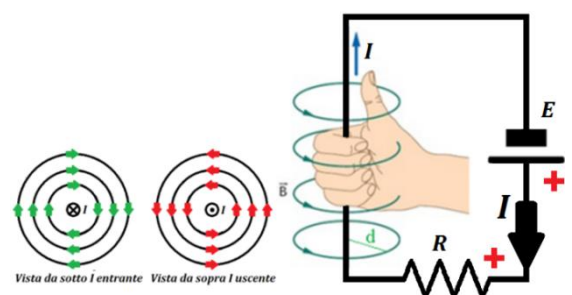
Campi Magnetici

Come sappiamo un filo percorso da una corrente elettrica genera un campo magnetico $\vec{H}$, ed il campo induzione magnetica $\vec{B}$ concentrici con il filo (le linee dei campi magnetici sono linee chiuse) e con direzione data dalla regola del cavatappi.

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} = \frac{I}{2\pi r} \hat{r} \quad \left[\frac{A}{m} \right] \quad \text{o} \quad \left[\frac{A_{spire}}{m} \right]$$

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} = \frac{\mu I}{2\pi r} \hat{r} \quad [T] \quad \text{Tesla}, \quad \left[\frac{Wb}{m^2} \right]$$

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad \text{permeabilità magnetica}$$



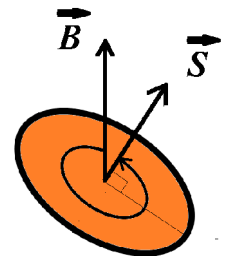
$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \quad \left[\frac{H}{m} \right] \text{ permeabilità magnetica nel vuoto}$$

μ_r permeabilità magnetica relativa

Flusso di un campo magnetico

Data una superficie S , la direzione della superficie è la perpendicolare al piano su cui giace la superficie stessa; Il flusso del vettore induzione magnetica è il prodotto scalare tra il vettore stesso e la perpendicolare alla superficie S (prodotto dei moduli moltiplicato il coseno dell'angolo compreso tra il primo e il secondo vettore)

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = B S \cos(\widehat{B, S}) \quad [Wb] \quad \text{Weber}$$



Interazioni tra Campi Elettrici e Magnetici

Abbiamo prima visto che se applichiamo un campo elettrico (prodotto dal generatore di tensione) ad un filo, questo crea un campo magnetico che:

se $\vec{E}$ è costante (cioè non varia nel tempo) allora $\vec{H}$ è costante;

se $\vec{E}$ è variabile nel tempo allora $\vec{H}$ è variabile nel tempo e con lo stesso tipo di legge (se $\vec{E}$ è sinusoidale allora $\vec{H}$ è sinusoidale)

Se invece "immergo" una spira, o un solenoide (con estremi aperti) in un campo magnetico posso creare una variazione del flusso Φ in 3 modi:

- posso variare il valore di $\vec{B}$
- posso variare la superficie della spira (o del solenoide)
- posso variare l'orientamento della spira (o del solenoide)

variando quindi il flusso del campo magnetico posso ottenere un campo elettrico (cioè una f.e.m. agli estremi aperti dell'elemento) ricavabile attraverso la:

Legge di Faraday - Neumann

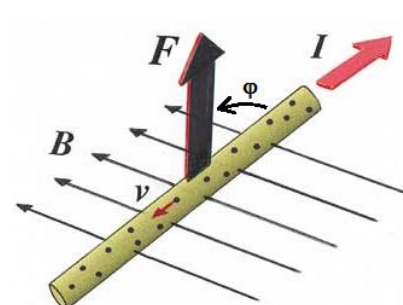
$$f.e.m. = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

se Φ è costante (cioè non varia nel tempo) allora la sua variazione è nulla e quindi $f.e.m. = 0 V$;

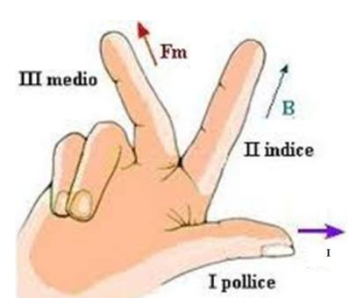
se Φ è variabile nel tempo allora la $f.e.m.$ è variabile nel tempo (se Φ è sinusoidale allora la $f.e.m.$ è sinusoidale);

se Φ aumenta nel tempo allora la $f.e.m.$ è con verso opposto a quello indicato (cioè si oppone alla variazione di flusso, per questo è anche detta forza controelettromotrice).

Forza di Lorentz



Se "immergo" un filo percorso da una corrente all'interno di un campo $\vec{B}$, allora questo filo subisce una forza (forza di Lorentz) uguale al prodotto tra la corrente, il valore di $\vec{B}$, la lunghezza del filo e il valore del seno dell'angolo compreso tra direzione della



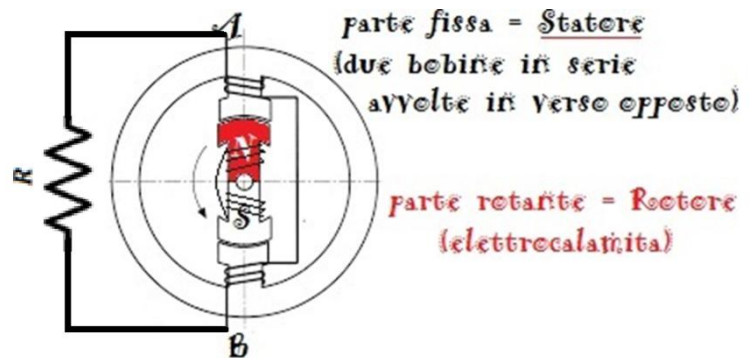
corrente e la direzione di $\vec{B}$ e con direzione ottenuta con la regola delle 3 dita della mano destra.

$$\vec{F} = I L B \sin(\widehat{I, B})$$

Alternatore

È una macchina elettrica che genera una tensione alternata a frequenza costante e si basa sul fenomeno dell'induzione magnetica (legge di Faraday – Neumann).

È costituito da uno statore fisso dove sono avvolti due gruppi di spire e da un rotore costituito da un magnete permanente o da una elettrocalamita, che è fatto ruotare da una turbina idraulica.



La forma e le dimensioni delle spire dello statore sono costanti nel tempo.

Il valore dell'induzione magnetica (generato dal magnete permanente o dall'elettrocalamita) è costante nel tempo.

Se la velocità angolare della turbina è costante nel tempo l'angolo tra i vettori induzione magnetica e spire statoriche varia in maniera lineare ($\alpha = \omega t$) quindi il flusso nella direzione dello statore è di tipo sinusoidale ($\Phi = N B S \cos(\omega t)$), ne segue che la f.e.m. prodotta è anch'essa di tipo sinusoidale $f.e.m. = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = \omega N B S \sin(\omega t)$ con frequenza direttamente proporzionale alla velocità del rotore.

I motivi che possono portare alla variazione della velocità della turbina sono due:

il primo è di natura idraulica, in quanto velocità e portata del fluido che fa girare la turbina può variare

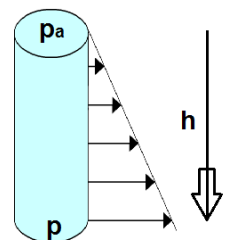
il secondo è di carattere elettromagnetico, in quanto se collego un carico all'uscita dell'alternatore questo assorbe una corrente che a sua volta genera un campo magnetico che si oppone a quello generato dal rotore producendo una forza (di Lorentz) agendo da freno.

Propulsori Per Movimentazione Aerea

Legge di Stevino

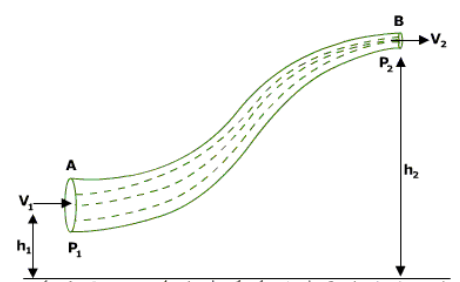
In idrostatica la legge di Stevino è un'equazione che permette di calcolare la pressione esistente ad ogni profondità (h) entro una colonna di fluido conoscendo la densità (d) dello stesso liquido.

$$p(h) = p_a + d g h$$



Legge Di Bernoulli

L'equazione descrive matematicamente l'effetto Bernoulli, per cui in un fluido ideale su cui non viene applicato un lavoro, per ogni incremento della velocità si ha simultaneamente una diminuzione della pressione o un cambiamento nell'energia potenziale del fluido



$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g h = \text{invariante}$$

L'equazione di Bernoulli è anche in grado di quantificare la portanza, ovvero la componente della forza normale al moto del fluido che agisce su un corpo immerso.

La portanza è data infatti dalla differenza di velocità che si ottiene volutamente dalla particolare forma dell'ala, che è costruita in modo da rendere la velocità dell'aria sulla faccia superiore maggiore di quella sulla faccia inferiore (perché compie un percorso maggiore nello stesso tempo).

Questa tecnica permette di generare una forza diretta verso l'alto data da una pressione sulla faccia inferiore maggiore di quella sulla faccia superiore.

$$p_i + \frac{1}{2} \rho v_i^2 + \rho g h = p_s + \frac{1}{2} \rho v_s^2 + \rho g h$$

$$(p_i - p_s) = \frac{1}{2} \rho (v_s^2 - v_i^2)$$

Questa ha l'effetto di una pressione $P = (p_i - p_s)$ che viene prodotta da una forza ed è direttamente proporzionale alla superficie inferiore dell'ala. Infatti, per definizione: $F = P A$



Le Eliche

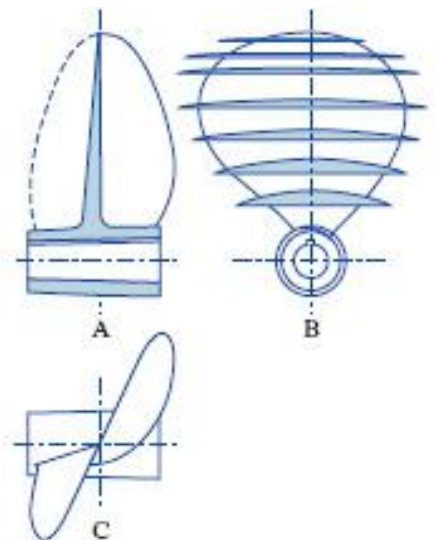
Può essere formata da due o più pale, l'elica, azionata da un motore, ruota ad alta velocità e riesce col suo profilo opportunamente sagomato ad accelerare il flusso d'aria all'indietro.

Questa accelerazione viene bilanciata da una spinta in avanti di tutto l'aereo (principio di azione e reazione).

L'elica deve avere la stessa portanza a partire dall'asse fino alla parte più distante dall'asse affinché eserciti la medesima spinta, ed è per questa ragione che si svergola l'elica cioè con un calettamento variabile che man mano diminuisce dal centro verso l'estremità del profilo dove la velocità è massima.

Le eliche aeronautiche possono avere sino a sei pale. In genere gli aerei meno potenti hanno due o tre pale mentre i turboelica hanno spesso anche quattro o sei pale. Per gli elicotteri il numero di pale varia da due a sei a seconda della potenza.

Le punte delle pale dell'elica non devono raggiungere la velocità del suono, infatti si usano spesso dei riduttori; se le punte delle pale superassero la velocità del suono le sollecitazioni sarebbero eccessive e si romperebbero. Per questo motivo ai motori più potenti, si montano delle eliche più piccole ma con più pale ...



Esoreattori

Viene utilizzato il flusso d'aria esterno presente nell'atmosfera; le tipologie sono: motoelica, turbogetto, turboelica, turbogetto a doppio flusso.

Endoreattori

Non utilizzano l'aria esterna come comburente (ossidante) ma utilizzano il combustibile e comburente trasportato; comunemente vengono chiamati razzi.

Motoelica

Si utilizza un'elica azionata da un motore endotermico per accelerare una portata d'aria (flusso).

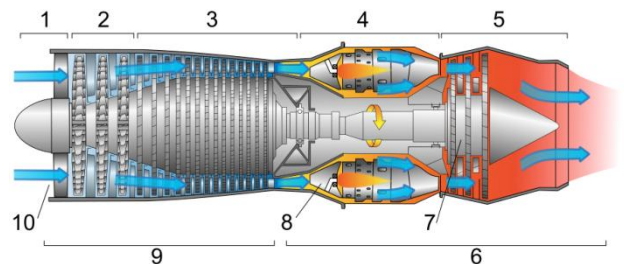
Motore Endotermico

4 tempi VS 2 tempi

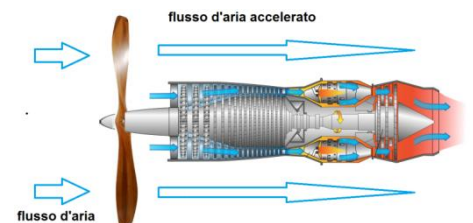
motori turbo

Turbogetto

La presa d'aria convoglia l'aria al compressore che la comprime ad alta pressione per immetterla nelle camere di combustione. Il combustibile pompato viene iniettato con degli ugelli polverizzatori nelle camere di combustione opportunamente sagomate e provviste di apposite candele. Il combustibile (nafta, kerosene,..) si incendia di continuo insieme al flusso compresso d'aria producendo un flusso ad alta temperatura e altissima velocità di espansione (gas combusti). Il flusso risultante andrà ad azionare le turbine del compressore e fornirà la spinta posteriore del motore. Una volta messo in moto il motore si usa il getto sia per azionare il compressore sia per fornire la opportuna spinta.



- 1) ingresso dell'aria;
- 2) compressore di bassa pressione;
- 3) compressore di alta pressione;
- 4) combustori;
- 5) scarico;
- 6) sezione calda;
- 7) turbina;
- 8) camera di combustione;
- 9) sezione fredda;
- 10) presa d'aria.



Turboelica

È la combinazione di un motoelica e di un turbogetto.

Si applica in ingresso del turbogetto un'elica di diametro maggiore del motore che verrà azionata dalle turbine.

La spinta è data dalla somma di quella dovuta al turbogetto e quella esterna del motoelica.

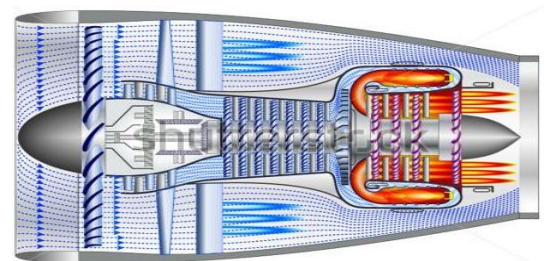
Turbogetto a doppio flusso (turbofan)

Si tratta di un turboelica provvista di eliche (ventole) chiuse all'interno del motore.

Turbofan A Flusso Caldo (a flussi associati)

Il flusso (secondario) proveniente dall'eliche si mescola con quello (primario) proveniente dal turbogetto prima dell'espulsione.

<https://www.youtube.com/watch?v=KjiUUJdPGX0>



Turbofan A Flusso Freddo (a flussi separati)

Il flusso delle ventole non si mescola con quello del turbogetto.

<https://www.youtube.com/watch?v=FZaQIQA5RGQ>

