

*Progetto di Macchine a Fluido*

*A.A. 2022-2023*

Docenti: Tiziano Ghisu\*, Pierpaolo Puddu

\*Professore Associato in Macchine a Fluido

Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Chimica e dei Materiali

Università degli Studi di Cagliari



## *Chi sono?*

- Mi chiamo Tiziano Ghisu
- Sono Professore Associato nel Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Chimica e dei Materiali dell'Università di Cagliari

## *In cosa consiste il mio lavoro?*

- **didattica**: Insegno “Progetto di Macchine a Fluido” e “Modellazione di Sistemi a Fluido”
- **ricerca**: mirata alla caratterizzazione e al miglioramento delle prestazioni delle Macchine a Fluido e alla comprensione dei fenomeni

## *Chi fa parte del mio Gruppo di Lavoro?*

Strutturati: Prof. Pierpaolo Puddu, Prof. Francesco Cambuli

Ricercatori: Fabio Licheri, Mario Carta

Dottorandi: Diego Lopez\*, Roberto Putzu, Antonio Masucci

---



*OBIETTIVI DEL CORSO*

- Fornire gli strumenti per l'analisi e il progetto delle macchine a fluido e il loro impiego ed esercizio nei principali processi energetici.
- Analizzare le principali caratteristiche costruttive e prestazionali delle macchine motrici ed operatrici.



## PROGRAMMA DEL CORSO

- ✓ Introduzione alle Macchine
- ✓ Analisi dimensionale e similitudine
- ✓ Cenni di gasdinamica
- ✓ Progettazione delle Turbomacchine Assiali
- ✓ Progettazione delle Turbomacchine Radiali
- ✓ Ottimizzazione

## Esercitazioni

- **Progetto di un ugello supersonico**
- **Progetto di un compressore assiale multistadio**
- **Progetto di una pompa centrifuga**



## TESTI DI CONSULTAZIONE:

- **Dixon, "Thermodynamics of Turbomachinery"**
- **J.D. Anderson , "Fundamentals of Aerodynamics"**
- **J.D. Anderson , "Modern Compressible Flow"**
- **C. Pfleiderer, H. Petermann, "Turbomacchine"**
- **Stepanoff, "Centrifugal and axial flow pumps"**
- **A. L. Jaumotte, "Turbomachines"**
- **Vavra, "Aerothermodynamics and flow in turbomachines"**

Sito web: [https://www.unica.it/unica/page/it/tiziano\\_ghisu](https://www.unica.it/unica/page/it/tiziano_ghisu)  
[https://www.unica.it/unica/page/it/pierpaolo\\_puddu](https://www.unica.it/unica/page/it/pierpaolo_puddu)

E-mail: [tiziano.ghisu@unica.it](mailto:tiziano.ghisu@unica.it), [pierpaolo.puddu@unica.it](mailto:pierpaolo.puddu@unica.it)



## MODALITA' DI SVOLGIMENTO DELL'ESAME

### 1) Discussione delle esercitazioni svolte

- Le esercitazioni dovranno essere consegnate almeno una settimana prima della data dell'orale. Dovranno essere concise (max. 30 pagine)
- Le esercitazioni contribuiscono per 1/3 al voto finale. Verranno valutate:
  - a) Adeguatezza della procedura di risoluzione
  - b) Adeguatezza delle assunzioni e delle ipotesi di lavoro
  - c) Correttezza dello svolgimento dei calcoli
  - d) Chiarezza nella rappresentazione dei risultati

### 2) Prova orale (2/3 del voto finale). Verranno valutate:

- a) Correttezza e completezza delle risposte
- b) Capacita' di analisi del problema
- c) Proprieta' di linguaggio
- d) Chiarezza espositiva

I punti a) e b) costituiscono condizione necessaria per il superamento della prova.



## *Indice*

- 1) Cosa sono le macchine a fluido?
- 2) Classificazioni e esempi
- 3) Motori primi
- 4) Evoluzione (storia) dei motori aeronautici
- 5) Similitudine
- 6) Introduzione alla Progettazione
  - Analisi sperimentali
  - Analisi numeriche



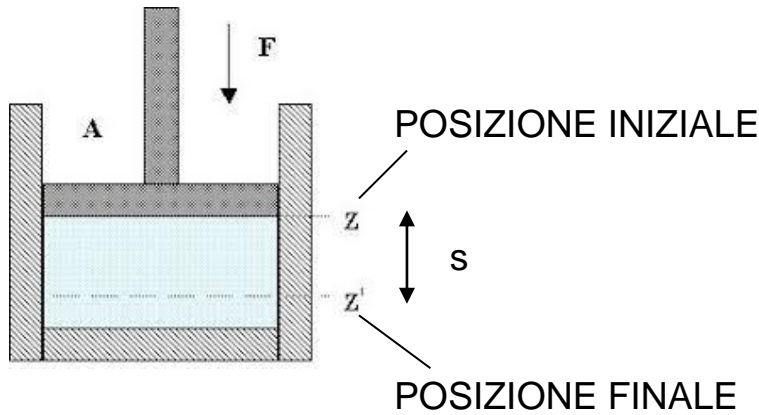
## Cosa sono le macchine a fluido?

### Definizione:

- ✓ Una **MACCHINA** è un qualsiasi apparato o complesso di organi che scambiando **lavoro** è capace di produrre un **effetto utile**

Per parlare di macchina dobbiamo di conseguenza:

- avere un elemento mobile come un pistone, un rotore, per avere scambio di lavoro
- avere trasformazione di energia da una forma ad un'altra



LAVORO

$$L = -(Fs)$$

VARIAZIONE DI ENERGIA

$$\Delta U = Q - L$$



## Cosa sono le macchine a fluido?

Nelle Macchine a Fluido la conversione di energia è possibile grazie alla presenza di un fluido che evolve all'interno della macchina

Definizione di Macchine a Fluido:

“un insieme di elementi fissi e **mobili** che interagiscono con un fluido di lavoro (liquido, vapore o gas) realizzando con esso uno **scambio energetico**”

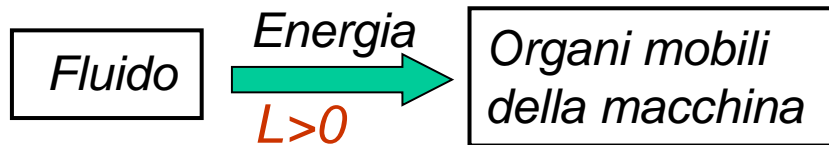
Possiamo utilizzare 3 criteri fondamentali per la classificazione delle Macchine a Fluido:

- 1) In base alla direzione del flusso di lavoro
- 2) In base al comportamento del fluido elaborato
- 3) In base alla modalità di trasferimento dell'energia



## Classificazioni ed esempi

### 1) In base alla direzione del flusso di lavoro



**MACCHINA A FLUIDO MOTRICE**  
(TURBINA)



**MACCHINA A FLUIDO OPERATRICE**  
(VENTILATORE)

*Nella turbina il lavoro transita dal fluido verso gli organi mobili della macchina mentre nella pompa tale scambio è invertito*

**PRIMO PRINCIPIO  
DELLA TERMODINAMICA**

VARIAZIONE DI ENERGIA

$$\Delta U = Q - L$$



## Classificazioni ed esempi

### 2) In base al comportamento del fluido elaborato:

- macchine idrauliche: il fluido si comporta come incompressibile

Il fluido evolvente è un liquido (acqua) oppure un gas che varia in modo non rilevante la propria densità

- macchine termiche: il fluido è comprimibile, quindi si hanno variazioni di densità importanti

Il fluido evolvente è un vapore o gas con variazioni di densità considerevoli



## Classificazioni ed esempi

### 3) In base alla modalità di trasferimento dell'energia

- macchine volumetriche: il fluido viene elaborato dalla macchina in un volume variabile nel tempo in modo periodico (flusso tipicamente instazionario, sistema aperto e sistema chiuso).

Si tratta di macchine in cui il lavoro viene scambiato tra il fluido e gli organi meccanici in modo «quasi statico» in quanto la velocità del fluido non influenza in modo sensibile il lavoro specifico (compressori e pompe a pistoni)

- macchine a flusso continuo o dinamiche (turbomacchine): Il fluido viene elaborato attraversando una successione di canali fissi (statori) e mobili (rotori). Il sistema è sempre aperto. Gli scambi di energia avvengono in modo continuo (flusso stazionario)

Nelle turbomacchine lo scambio di lavoro avviene grazie alla variazione di quantità di moto (o del momento della quantità di moto) del fluido. Gli effetti dinamici sono importanti.



## Classificazioni ed esempi

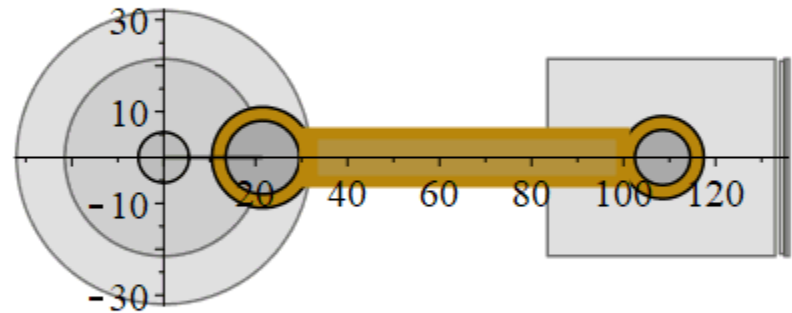
		Macchine idrauliche		Macchine termiche	
		Operatrici	Motrici	Operatrici	Motrici
Macchine volumetriche	ALT	pompe alternative	motori a pistoni	Compressori alternativi	Motori a combustione interna
	ROT	pompe ad ingranaggi	motori lobati	Compressori Roots	Motori pneumatici a lamelle
Macchine dinamiche		- Turbopompe - Ventilatori	Turbine idrauliche	Turbo-compressori	Turbine a gas e turbine a vapore



## Classificazioni ed esempi

- ✓ I sistemi che trasformano l'energia meccanica in altra energia meccanica non sono delle macchine ma solo dei meccanismi

Esempio: Manovellismo



## Classificazioni ed esempi

- ✓ I sistemi che trasformano una forma di energia in un'altra senza scambi di lavoro (es. Energia chimica in Energia termica) non sono macchine ma reattori

Esempi: reattore nucleare (sinistra) e camera di combustione



## Classificazioni ed esempi

- ✓ I sistemi che trasferiscono calore non sono macchine ma apparecchiature

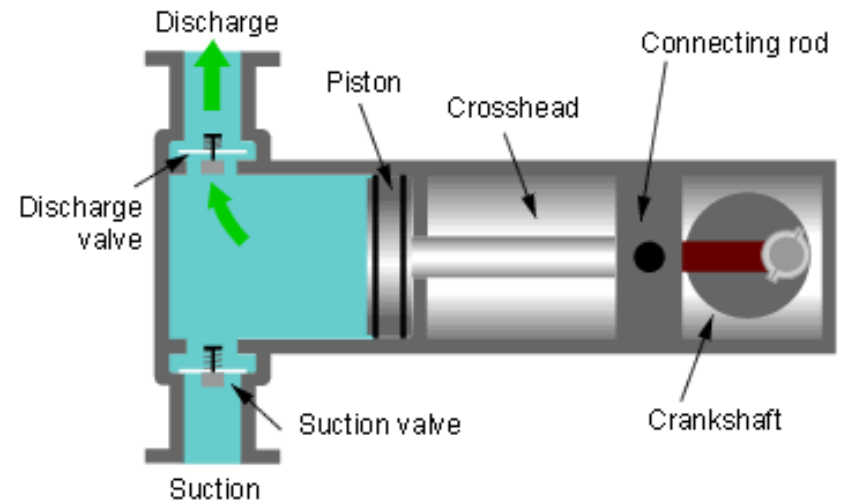
Esempio: scambiatori di calore



## Classificazioni ed esempi

Esempio: Macchine operatrici volumetriche (idrauliche o termiche)

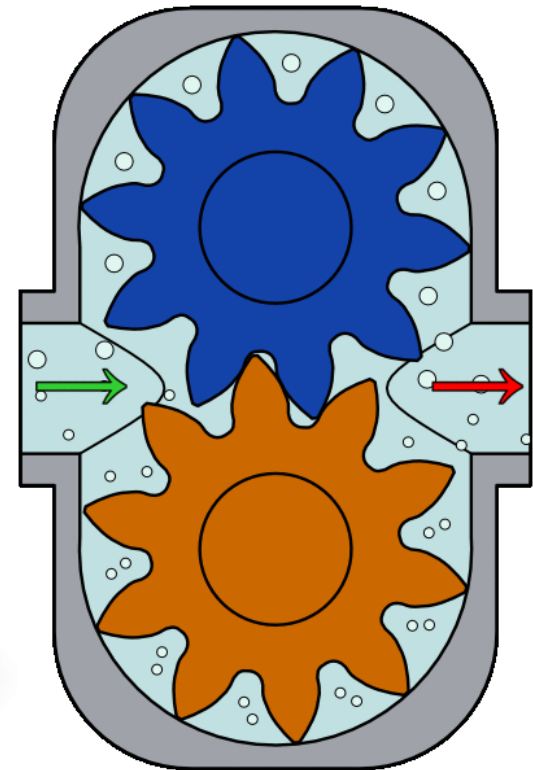
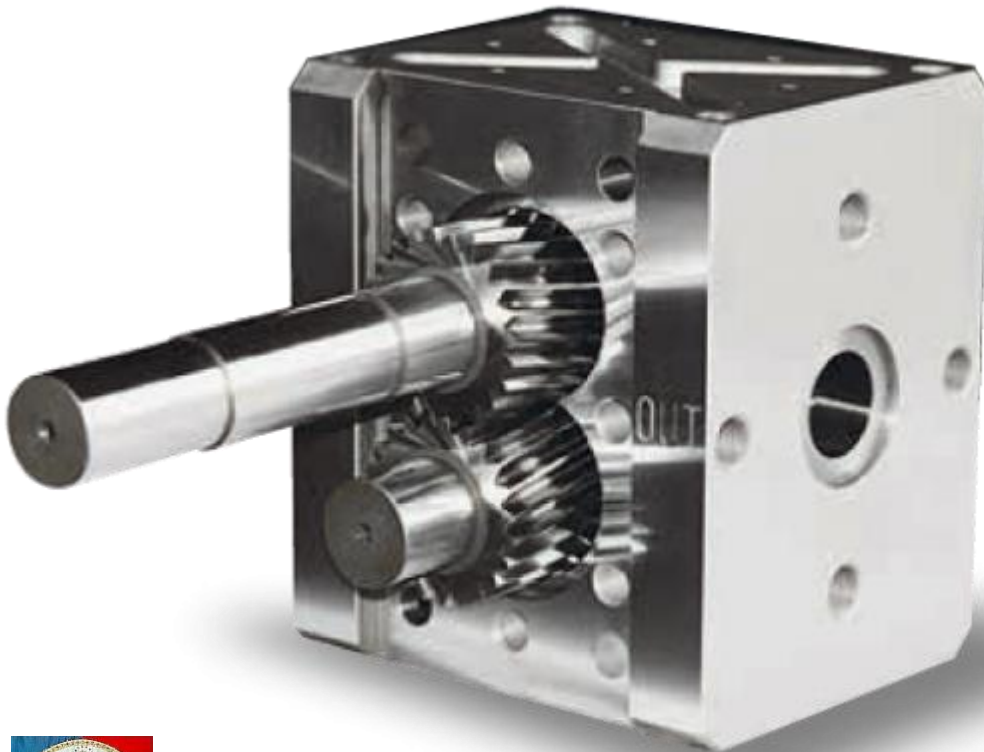
- Pompa (o compressore) alternativo o a pistone



## Classificazioni ed esempi

Esempio: Macchine operatrici volumetriche (idrauliche)

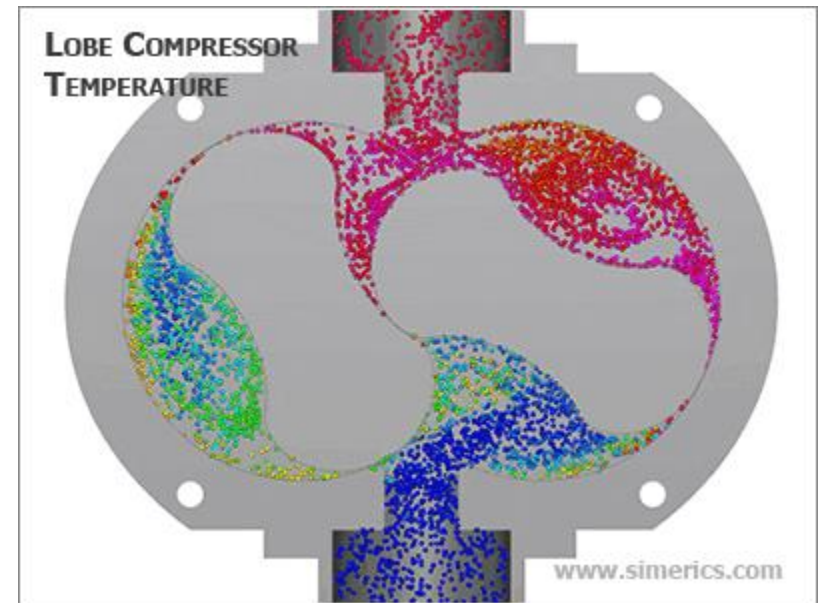
- Pompa a ingranaggi



## Classificazioni ed esempi

Esempio: Macchine operatrici volumetriche (idrauliche o termiche)

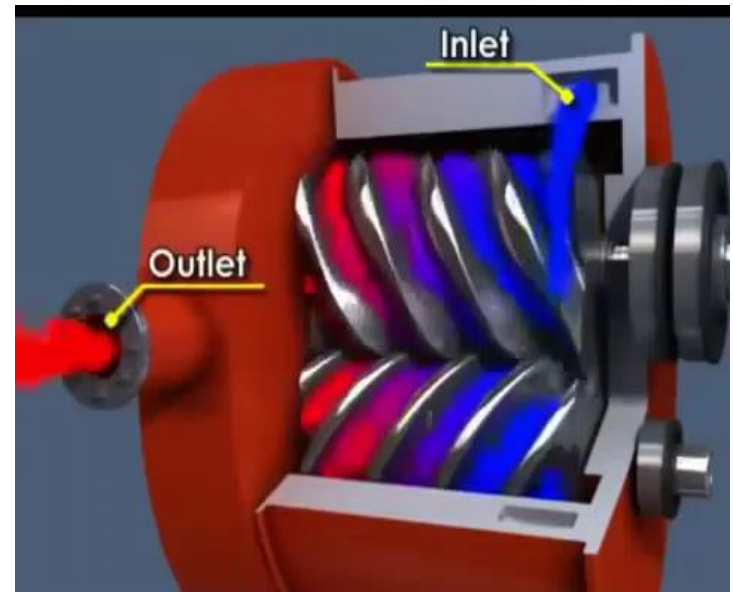
- Compresore roots



## Classificazioni ed esempi

*Esempio: Macchine operatrici volumetriche (idrauliche o termiche)*

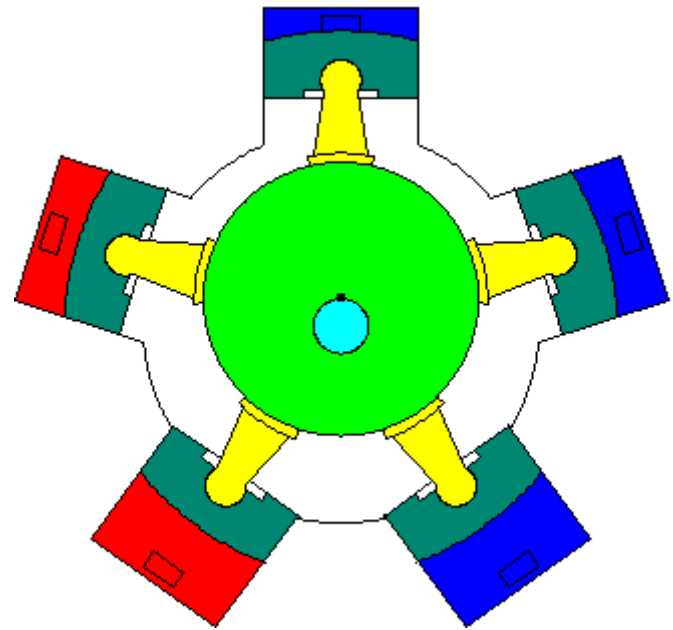
- Compressore a vite



## Classificazioni ed esempi

*Esempio: Macchine motrici volumetriche (idrauliche o termiche)*

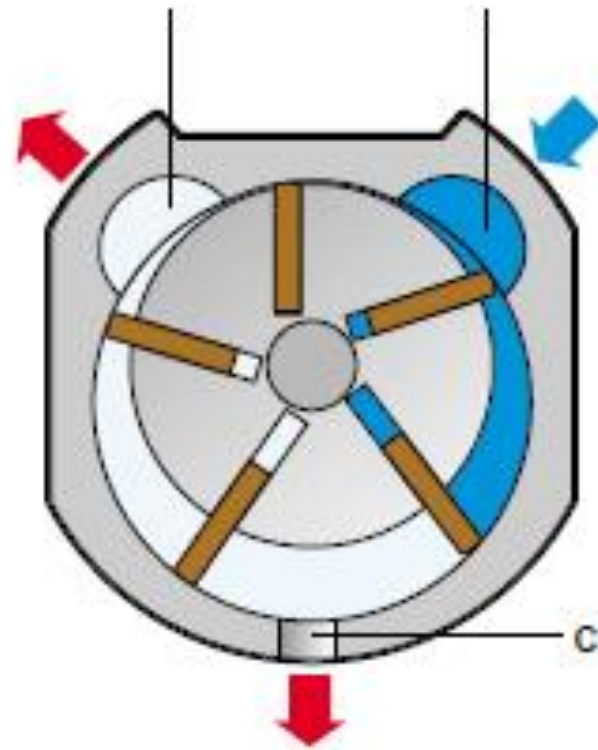
- Motori a pistoni



## Classificazioni ed esempi

Esempio: Macchine motrici volumetriche (idrauliche o termiche)

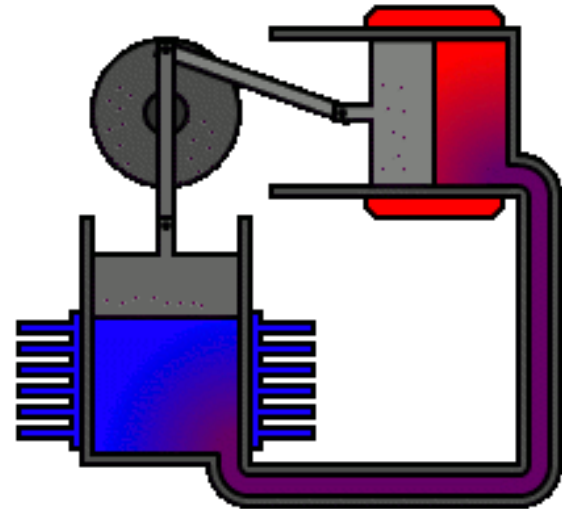
- Motori a lamelle



## Classificazioni ed esempi

*Esempio: Macchine motrici volumetriche termiche*

- Motore Stirling



Classificazioni ed esempi

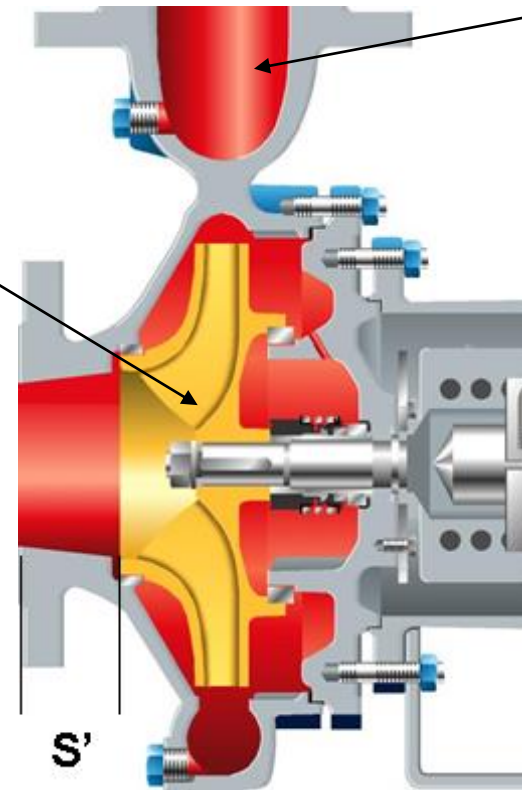
Esempio: Macchine operatrici dinamiche idrauliche

- Pompa centrifuga



ROTORE

VOLUTA



## Classificazioni ed esempi

*Esempio: Macchine operatrici dinamiche termiche*

- Compressore centrifugo

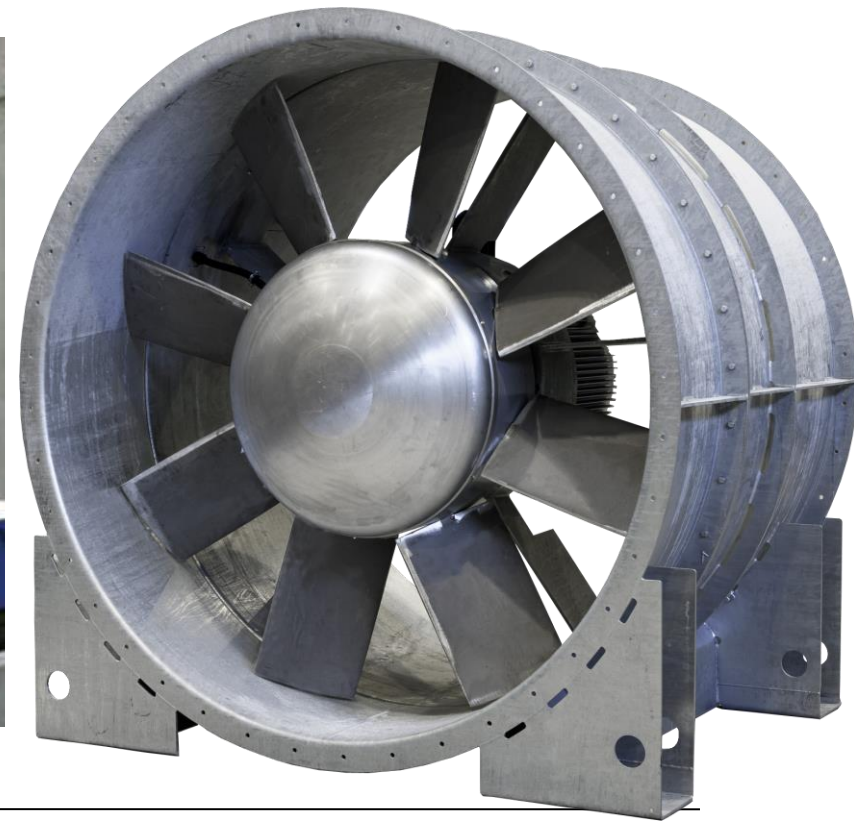


## Classificazioni ed esempi

### Esempio: Macchine operatrici dinamiche idrauliche

- Pompa assiale

- Ventilatore assiale



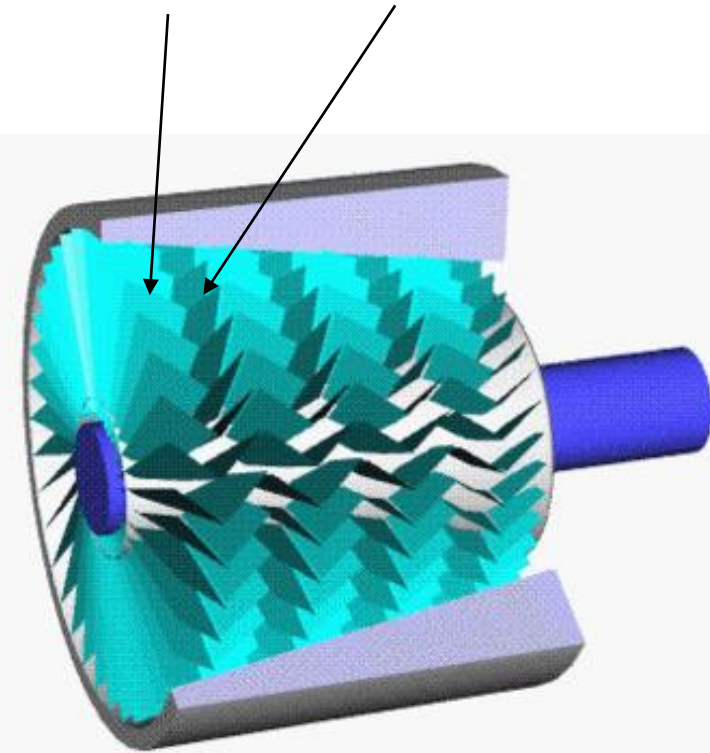
## Classificazioni ed esempi

### Esempio: Macchine operatrici dinamiche termiche

- Compressore assiale (multistadio)



ROTORE      STATORE



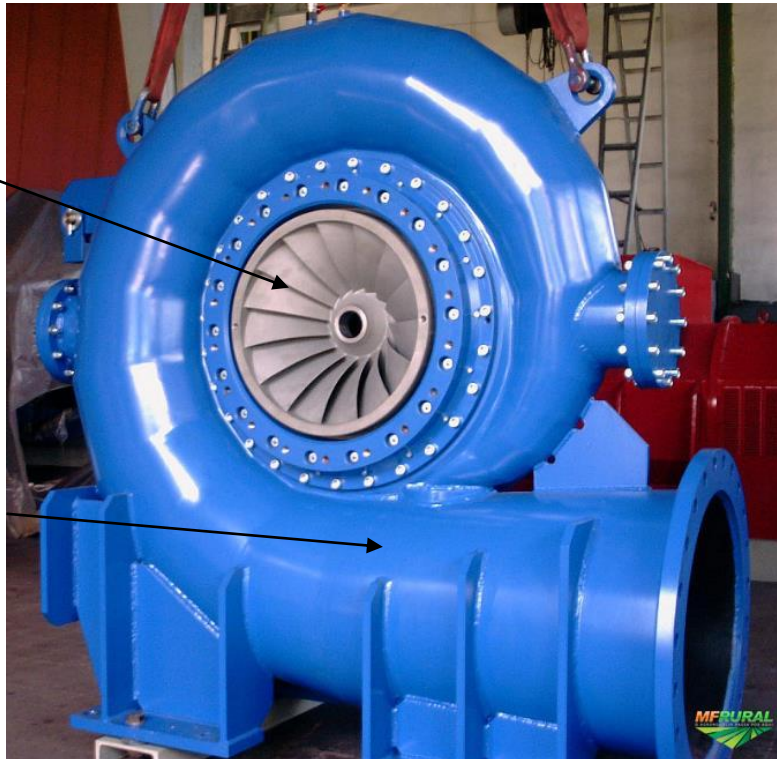
## Classificazioni ed esempi

### Esempio: Macchine motrici dinamiche idrauliche

- Turbina Francis (centripeta)

ROTORE

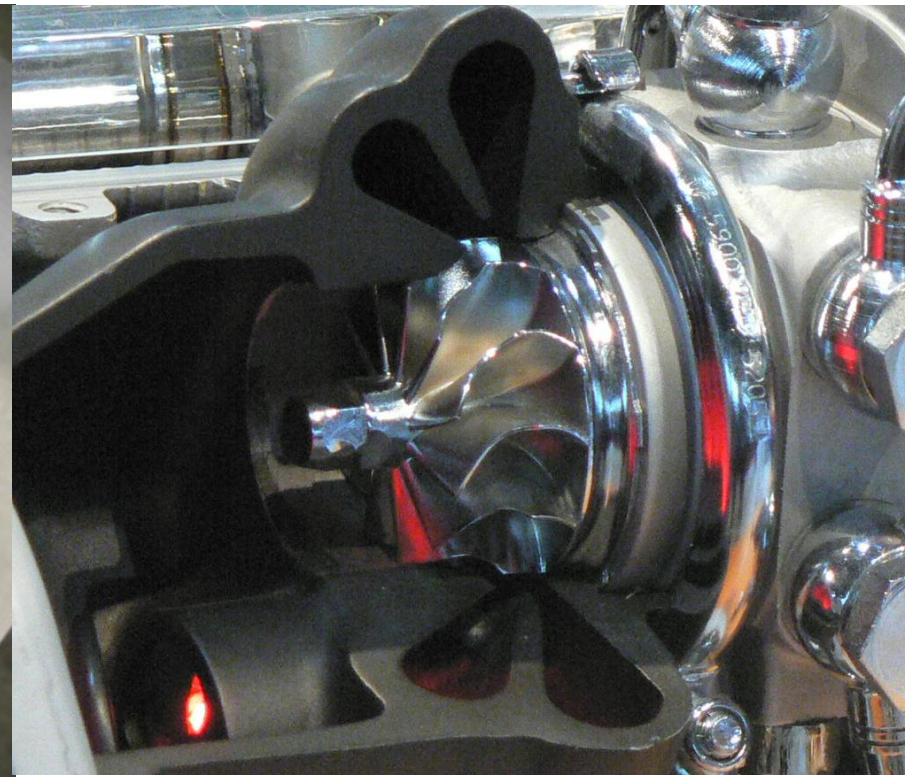
VOLUTA



Classificazioni ed esempi

*Esempio: Macchine motrici dinamiche termiche*

- Turbina radiale



Classificazioni ed esempi

*Esempio: Macchine motrici dinamiche idrauliche*

- Turbina Kaplan (assiale)



## Classificazioni ed esempi

### Esempio: Macchine motrici dinamiche termiche

- Misuratore  
di portata assiale



- Turbina assiale  
(a gas)



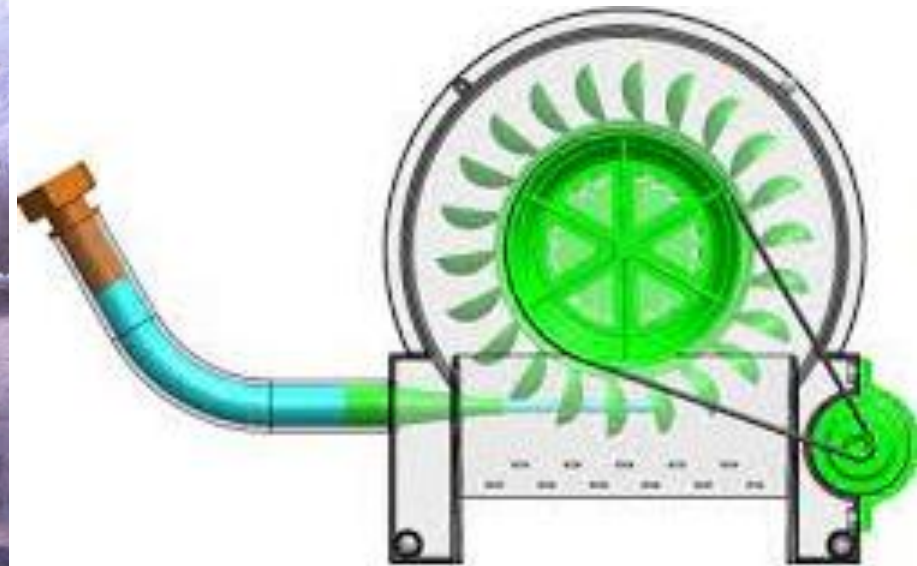
- Turbina assiale  
(a vapore)



## Classificazioni ed esempi

*Esempio: Macchine motrici dinamiche idrauliche*

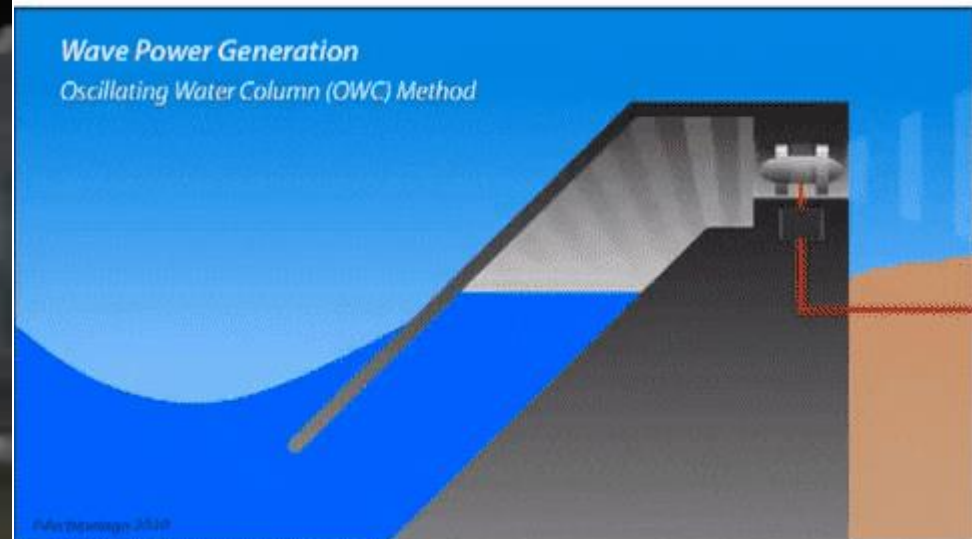
- Turbina Pelton (radiale)



## Classificazioni ed esempi

### Esempio: Macchine motrici dinamiche idrauliche

#### - Turbina Wells (assiale)



## Classificazioni ed esempi

### Esempio: Macchine motrici dinamiche idrauliche

#### - Generatori di flusso a marea (assiale)



Classificazioni ed esempi

*Esempio: Macchine motrici dinamiche idrauliche*

- Turbine eoliche (ad asse orizzontale o verticale)



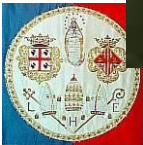
## Classificazioni ed esempi

Esempio: Macchine operatrici dinamiche (idrauliche o termiche)

- Eliche marine

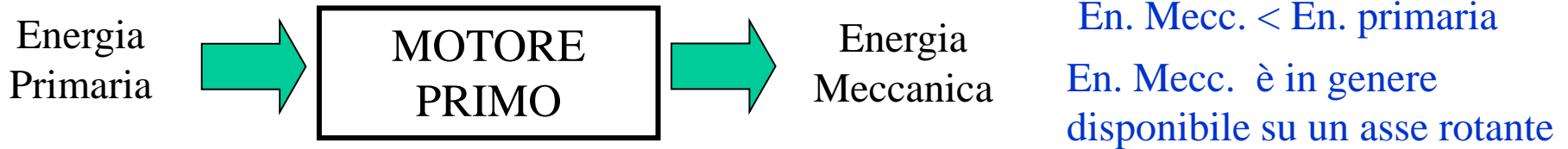


- Eliche aeronautiche (propellers)



## Motori Primi

Il motori primi convertono *energia primaria* (disponibile in natura, per esempio quella di un combustibile fossile) in *energia meccanica*



Il processo di conversione dell'energia puo' avvenire in un unico complesso di organi meccanici (*macchina* propriamente detta), come un **MOTORE A COMBUSTIONE INTERNA (MCI)**



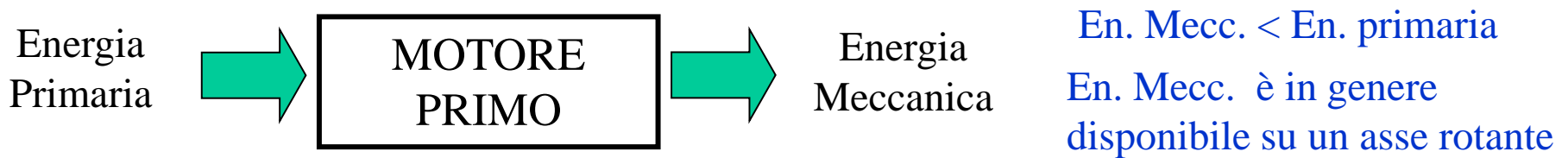
### Rolls-Royce Merlin

- 12 cilindri
- cilindrata 27 litri
- rapp. di compressione 6
- 3000 rpm (1.5 kg/s, 1320kW)

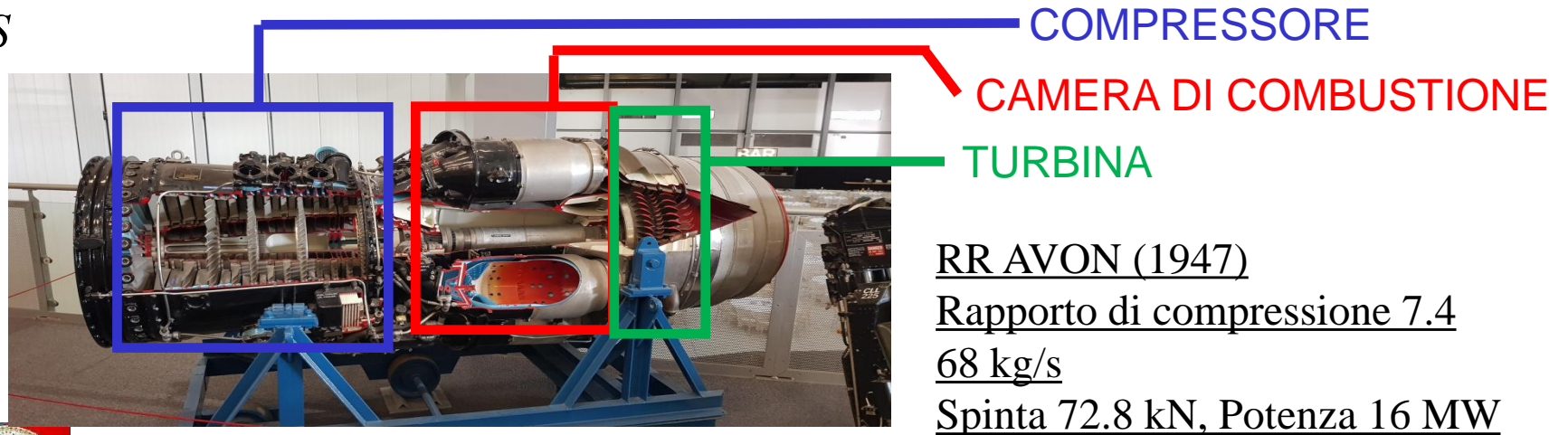


## Motori Primi

*Il motori primi convertono energia primaria (disponibile in natura, per esempio quella di un combustibile fossile) in energia meccanica*



*... oppure un più apparecchi tra loro interconnessi secondo le esigenze del processo stesso (in ciascuno di essi si svolge una fase del processo), come in una TURBINA A GAS*



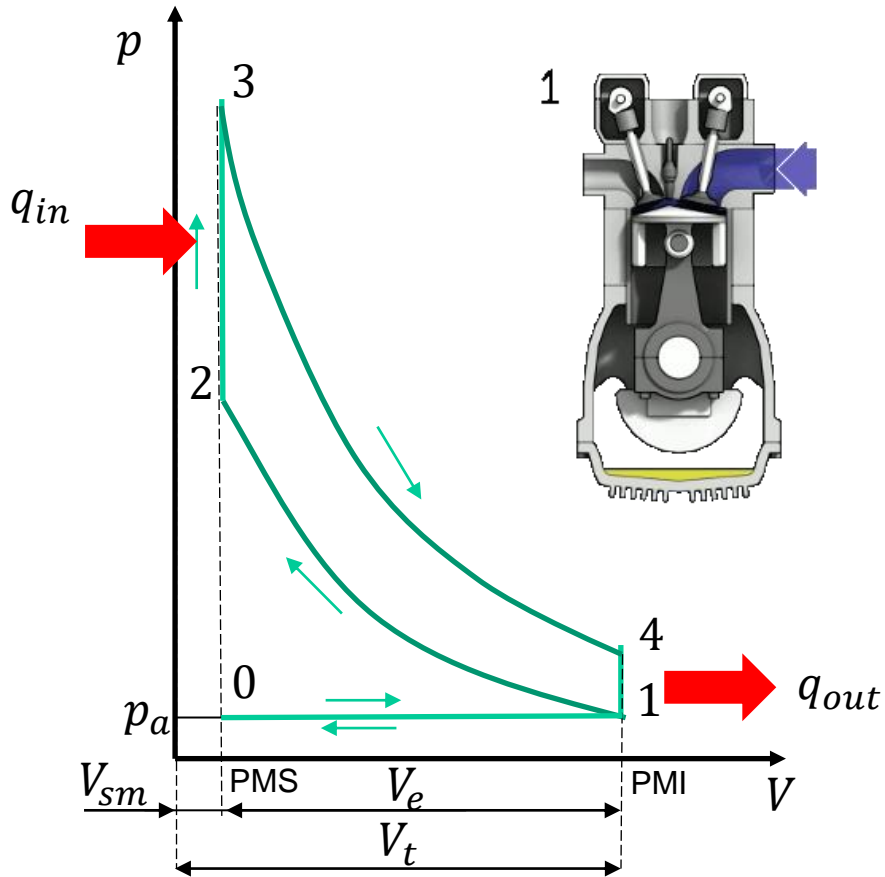
## Motori Primi - Cicli Termici

*I cicli termici sfruttano il fatto che in un'espansione (o in una compressione) un fluido cede (richiede) più energia (lavoro) se la temperatura è maggiore*

- *Sono basati sulla combinazione di 3 fasi essenziali (compressione, ingresso di calore, ed espansione) più carica e scarica*
- *Il lavoro fatto dal fluido della fase di espansione è maggiore di quello richiesto durante quella di compressione, generando un lavoro utile*



## Motori Primi – Ciclo OTTO (accensione comandata)



- 0 -> 1 aspirazione
- 1 -> 2 compressione isoentropica
- 2 -> 3 combustione isocora
- 3 -> 4 espansione isoentropica
- 4 -> 1(0) scarico

$$q_{in} = c_v(T_3 - T_2)$$

$$q_{out} = c_v(T_4 - T_1)$$

$$l = q_{in} - q_{out}$$

$$\eta = \frac{l}{q_{in}} = \frac{q_{in} - q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$$

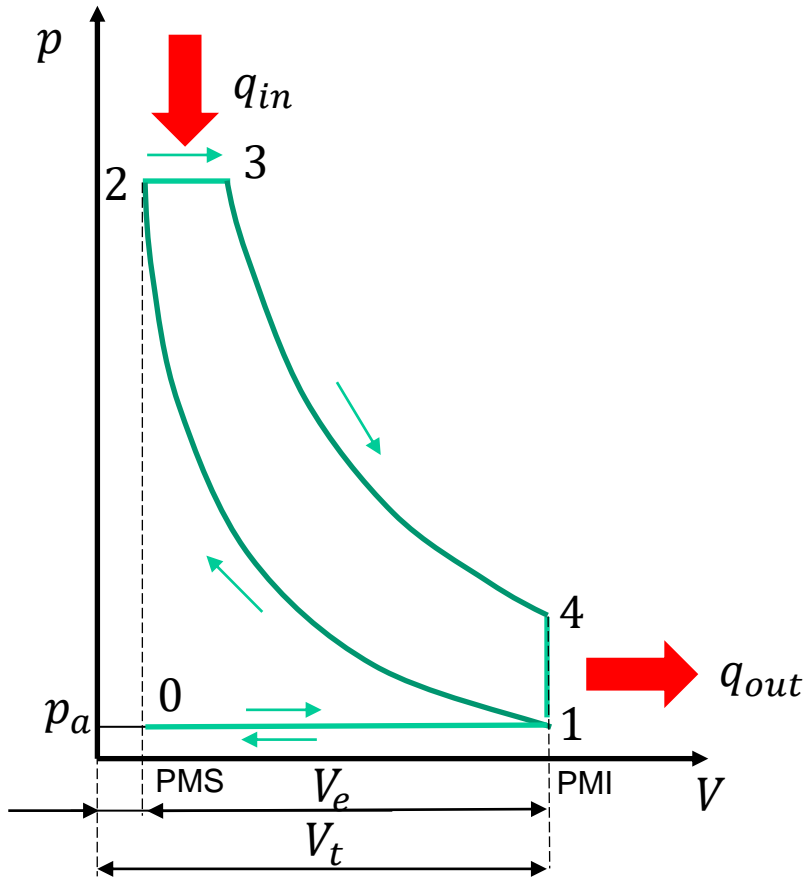
$$= 1 - \frac{T_1 (T_4/T_1 - 1)}{T_2 (T_3/T_2 - 1)}$$

$$= 1 - \frac{1}{\rho^{\gamma-1}}$$

$$\rho = \frac{V_1}{V_2} \text{ RAPPORTO DI COMPRESSIONE}$$



Motori Primi – Ciclo DIESEL (accensione spontanea)



- 0 -> 1 aspirazione
- 1 -> 2 compressione isoentropica
- 2 -> 3 combustione isobara
- 3 -> 4 espansione isoentropica
- 4 -> 1(0) scarico

$$q_{in} = c_p(T_3 - T_2)$$

$$q_{out} = c_v(T_4 - T_1)$$

$$l = q_{in} - q_{out}$$

$$\eta = \frac{l}{q_{in}} = \frac{q_{in} - q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{c_v(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)}$$

$$= 1 - \frac{T_1}{T_2} \frac{1}{\gamma} \frac{(T_4/T_1 - 1)}{(T_3/T_2 - 1)}$$

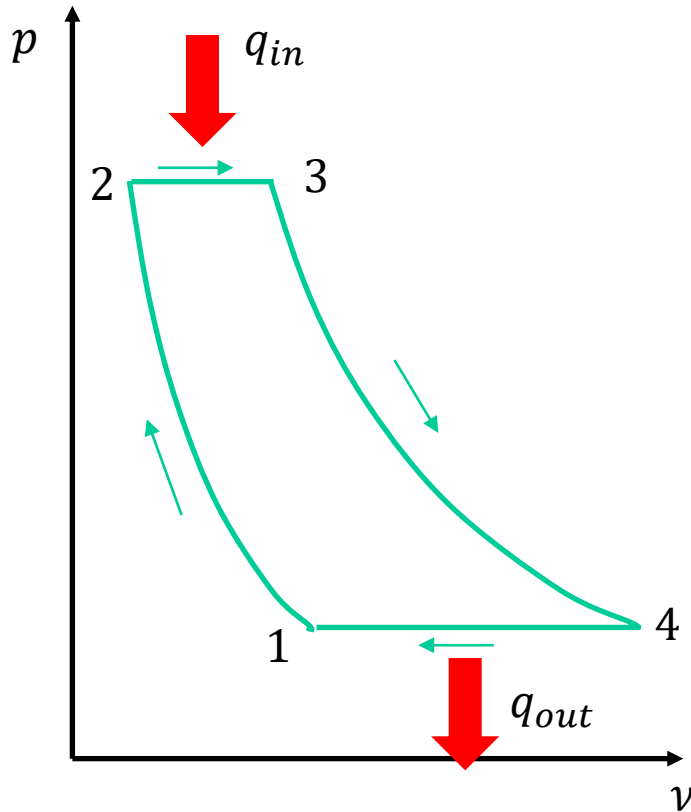
$$= 1 - \frac{1}{\rho^{\gamma-1}} \frac{r^\gamma - 1}{r - 1}$$

$$\rho = \frac{V_1}{V_2} \text{ RAPPORTO DI COMPRESSIONE}$$

$$r = \frac{V_3}{V_2} \text{ RAPPORTO VOL. DI COMBUSTIONE}$$



Motori Primi – Ciclo JOULE o BRAYTON



- 1 -> 2    compressione isoentropica
- 2 -> 3    combustione isobara
- 3 -> 4    espansione isoentropica
- 4 -> 1    scarico

$$q_{in} = c_p(T_3 - T_2)$$

$$q_{out} = c_p(T_4 - T_1)$$

$$l = q_{in} - q_{out}$$

$$\eta = \frac{l}{q_{in}} = \frac{q_{in} - q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{(T_3 - T_2)}$$

$$= 1 - \frac{T_1 (T_4/T_1 - 1)}{T_2 (T_3/T_2 - 1)}$$

$$= 1 - \frac{1}{\beta^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}$$

$\beta = \frac{p_2}{p_1}$  RAPPORTO DI COMPRESSIONE



## Evoluzione dei motori aeronautici



### Whittle W1.X (Powers Jets W1.X)

- 1 stage centrifugal compressor
- 10 reverse flow chambers
- 1 stage axial turbine
- spinta 3.8 kN thrust
- Pressure ratio 3.8
- vel. Rotazione 17,750 rpm
- Portata 9.3 kg/s
- Rapporto spinta-potenza 12 N/kg
- (3800 N, 320 Kg, ~ 791 kW)

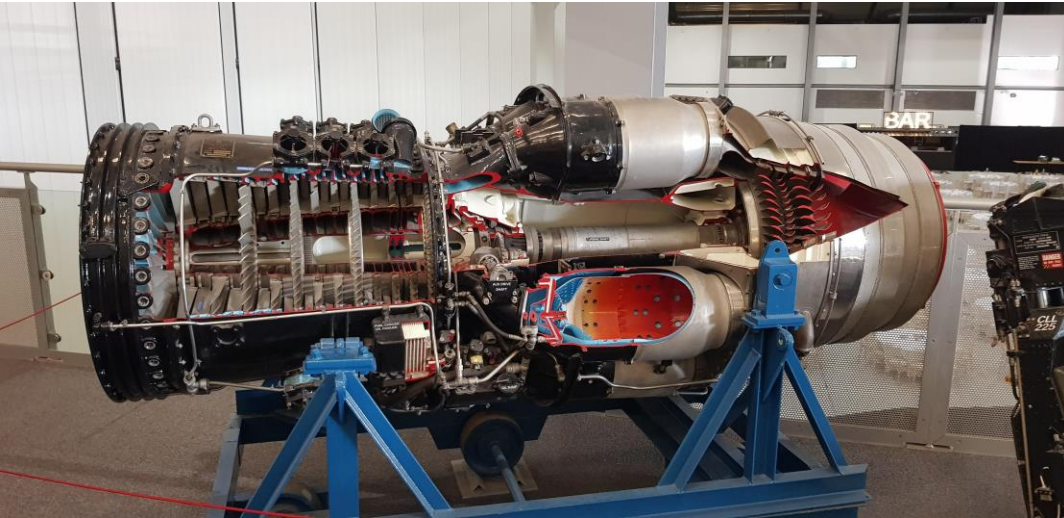


### Gloster E28

- 7 m x 8 m
- 1700 kg
- 750 km/h



## Evoluzione dei motori aeronautici



### RR AVON (1947)

- 15 stage axial compressor
- 10 combustion chambers
- 2 stage axial turbine
- Spinta 72.8 kN (16000 kW)
- 7900 rpm
- Portata 68 kg/s
- 56 N/kg
- Pressure ratio 7.45
- 3.2 m x 1 m

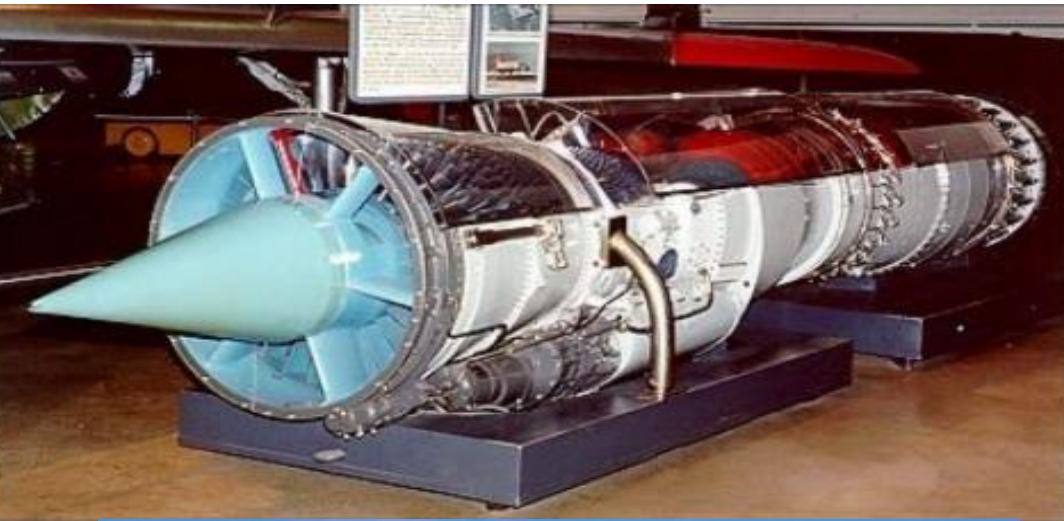


### DeHavilland Comet (1949)

- 34 m x 35 m
- 71000 kg
- 840 km/h



## Evoluzione dei motori aeronautici



### PW J57 (1950)

- 9+7 stage axial compressor
- 8 cannular combustion chambers
- 1+2 stage axial turbine
- 53.5 kN thrust, Potenza 14 MW
- 1905 kg
- Portata 75 kg/s
- 33 N/kg
- Pressure ratio 12.5
- 4 m x 1 m



### Boeing 707 (1957)

- 46 m x 44 m
- 67300 kg
- 972 km/h



## Evoluzione dei motori aeronautici



### Allison AR963 (1960)

- 5+12 stage axial compressor
- 10 cannular combustion chambers
- 2+2 stage axial turbine
- 91 kN thrust
- Portata 92.5 kg/s, Potenza 24.5 MW
- 50 N/kg
- Pressure ratio 16
- Bypass ratio 0.64
- 4 m x 1.1 m

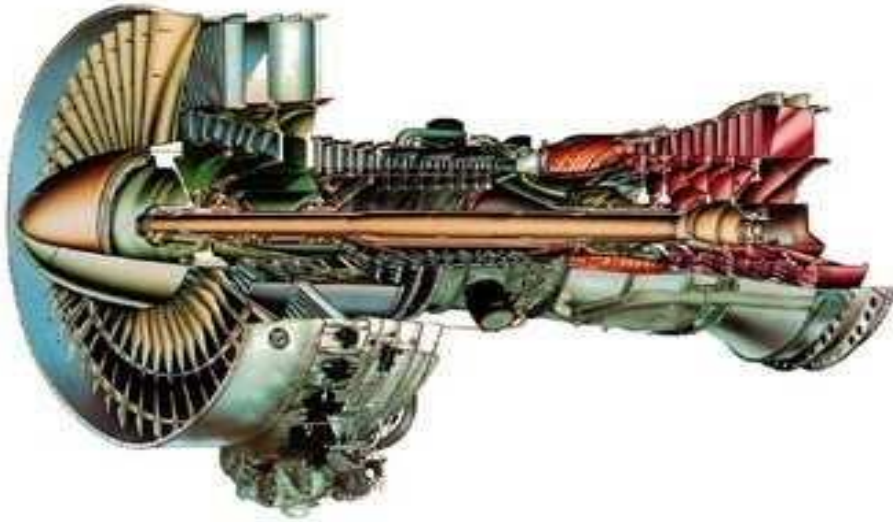


### Boeing 727 (1963)

- 46 m x 33 m
- 95000 kg
- 953 km/h



## Evoluzione dei motori aeronautici



### PW JT9D (1960)

- 4+11 stage axial compressor
- Annular combustion chambers
- 2+4 stage axial turbine
- 243 kN thrust (63 MW)
- Portata 698 kg/s
- 4056 kg
- Pressure ratio 26.7
- Bypass ratio 4.8
- 3.37 m x 2.37 m

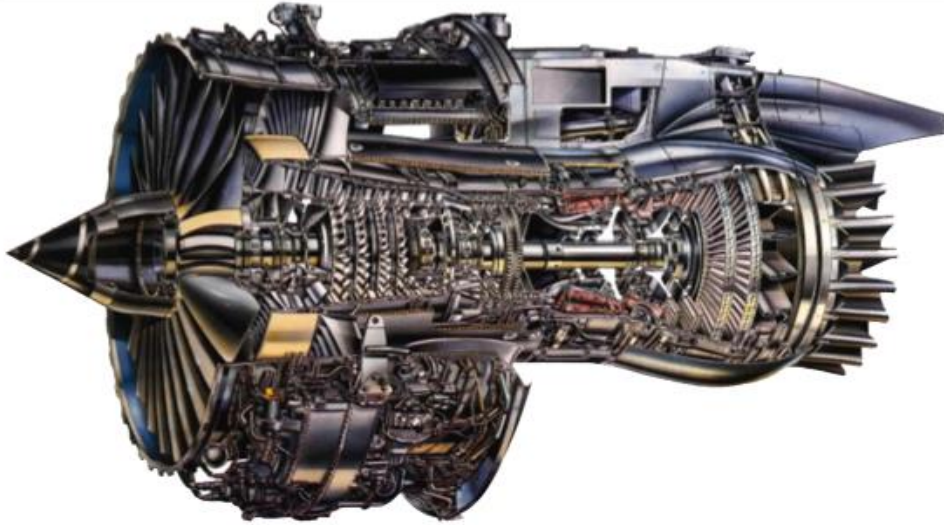


### Boeing 747 (1969)

- 79 m x 68 m
- 447000 kg
- 933 km/h



## Evoluzione dei motori aeronautici



### RR RB211 (1960)

- 1+7+6 stage axial compressor
- annular combustion chambers
- 1+1+3 stage axial turbine
- 253 kN thrust (Potenza 65 MW)
- 5790 kg
- Portata 626 kg/s
- Pressure ratio 32.8
- Bypass ratio 4.3
- 4.7 m x 2.19 m



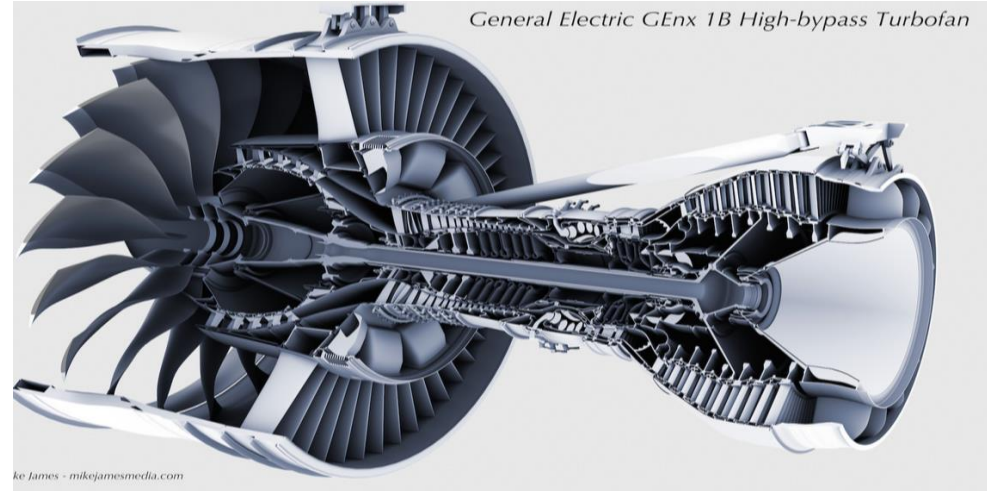
### Boeing 747 (1969)

- 79 m x 68 m
- 447000 kg
- 933 km/h



## Evoluzione dei motori aeronautici

General Electric GEnx 1B High-bypass Turbofan



### GEnx (2006)

- 4+10 stage axial compressor
- annular combustion chambers
- 2+6 stage axial turbine
- 296 kN thrust (74 MW)
- 5623 kg
- Pressure ratio 58
- Portata 1072 kg/s
- 53 N/kg
- Bypass ratio 9.3
- 4.3 m x 2.66 m

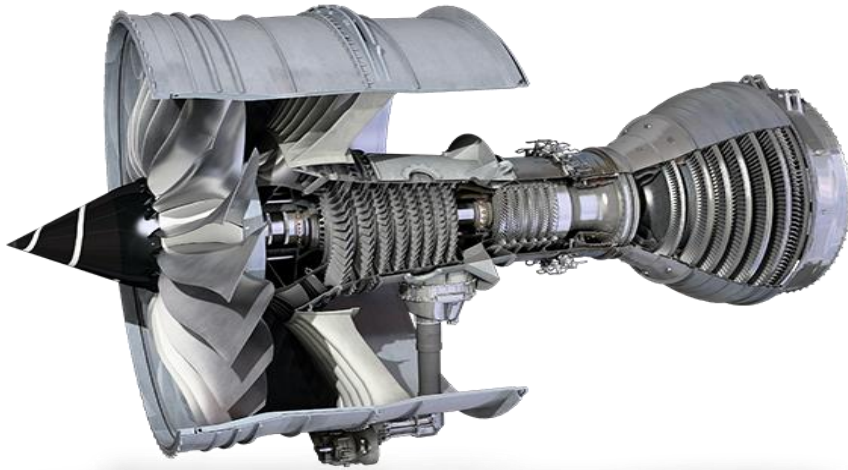


### Boeing 787 (2009)

- 68 m x 60 m
- 254000 kg
- 903 km/h



## Evoluzione dei motori aeronautici



### RR Trent 1000 (2006)

- 1+8+6 stage axial compressor (2600, 8937, 13391 rpm)
- annular combustion chambers
- 1+1+6 stage axial turbine
- 360 kN thrust (90 MW)
- 6120 kg
- 60N/kg
- Portata 1134 kg/s
- Pressure ratio 52
- Bypass ratio 10
- 4.7 m x 2.8 m

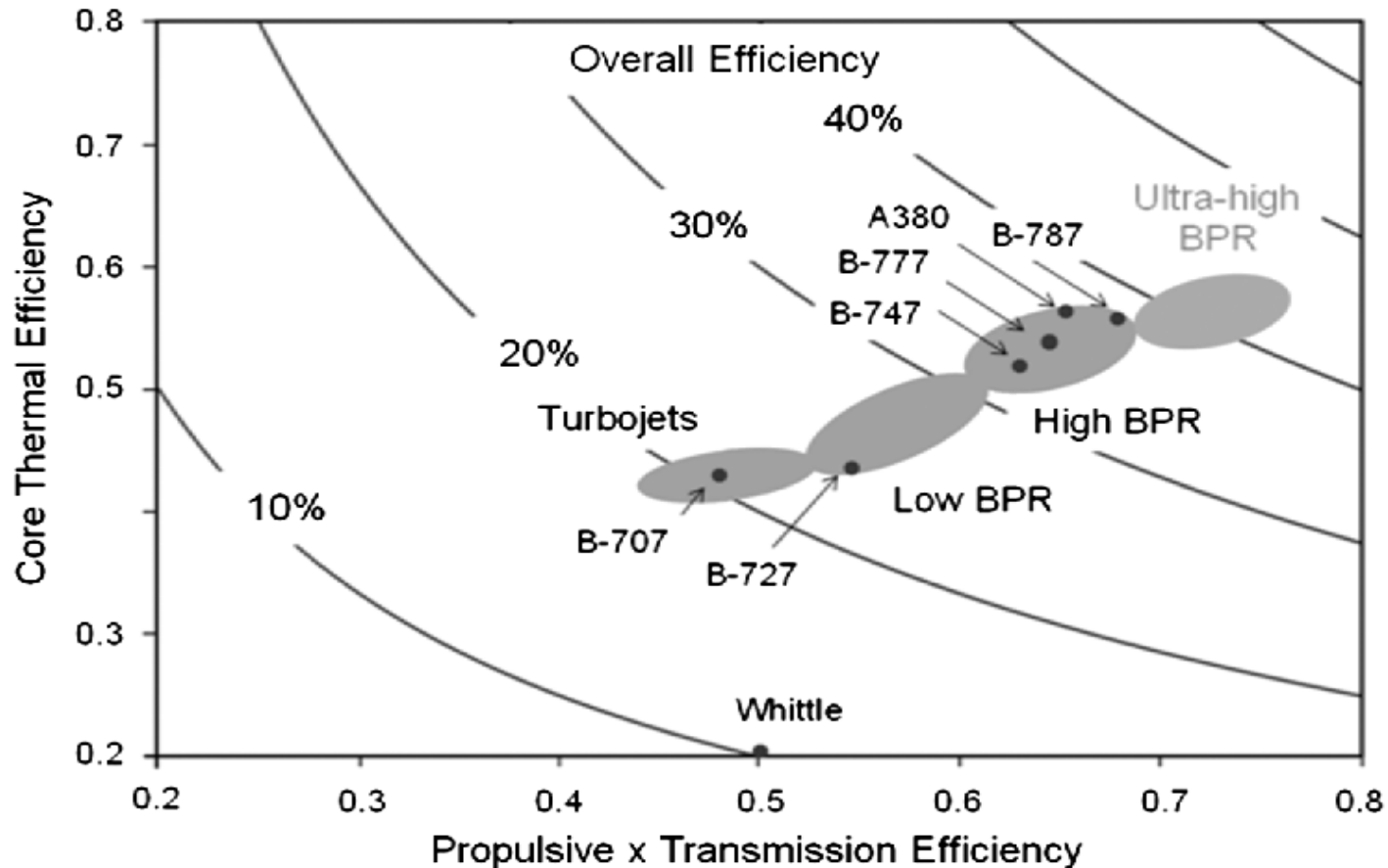


### Boeing 787 (2009)

- 68 m x 60 m
- 254000 kg
- 903 km/h



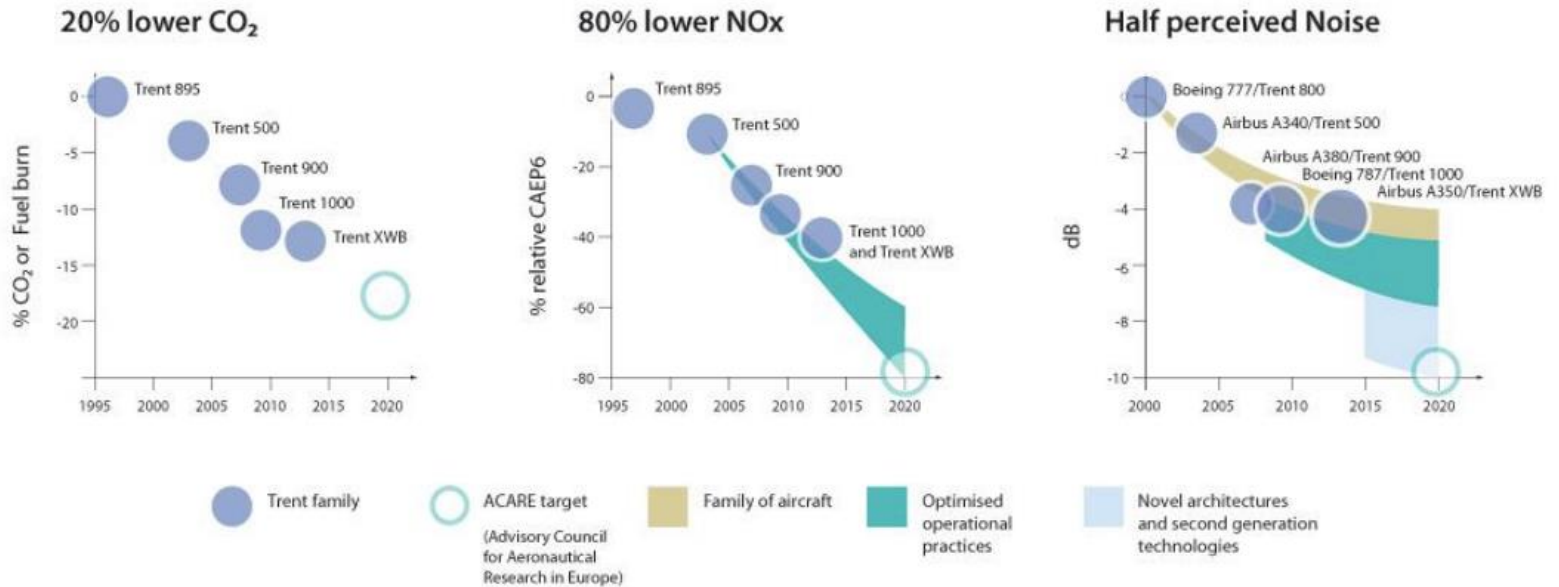
## Evoluzione dei motori aeronautici



**Fig. 2 Core thermal and propulsive efficiencies for commercial aircraft engines.**

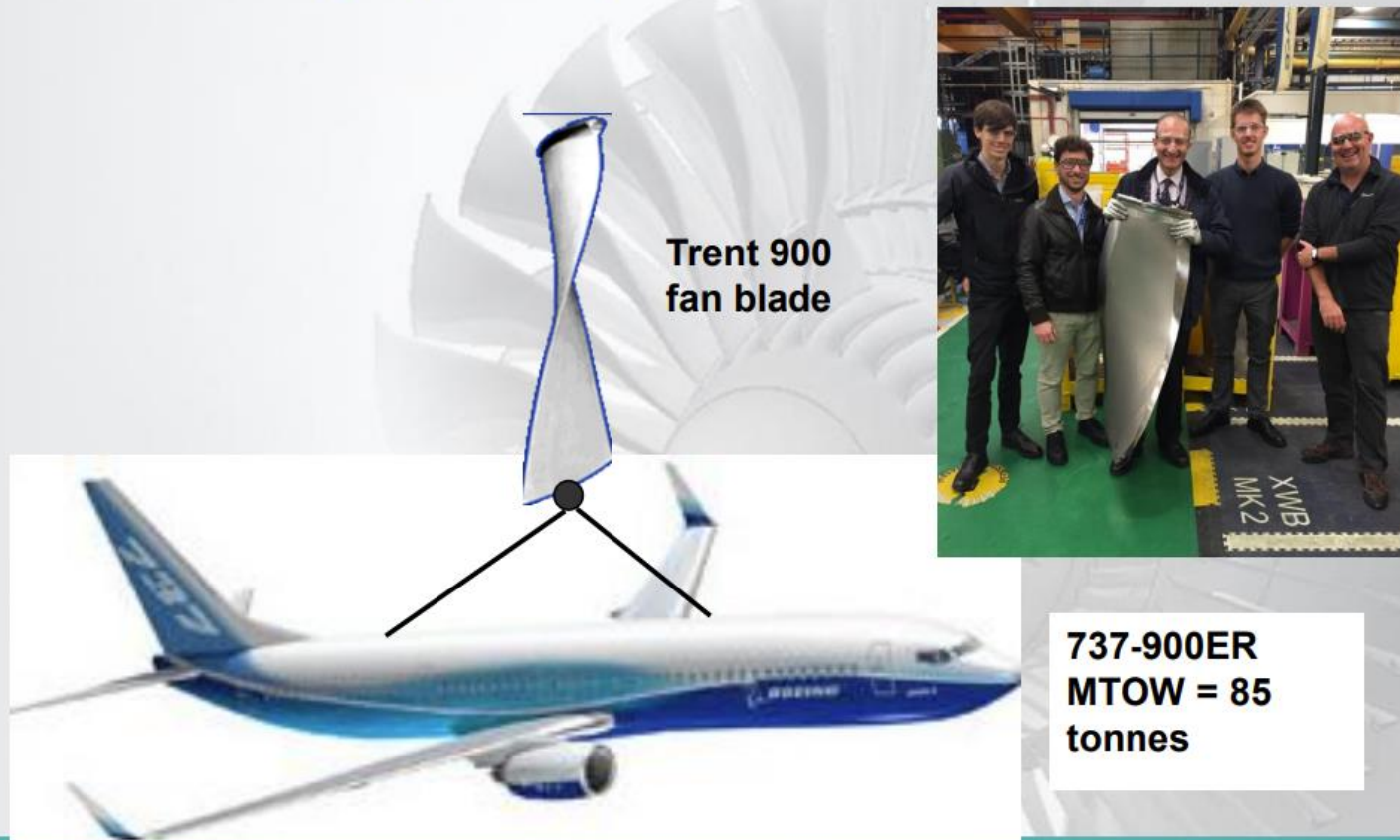


# ACARE targets for 2020: Reducing environmental impact



## Centrifugal loads on fan blades

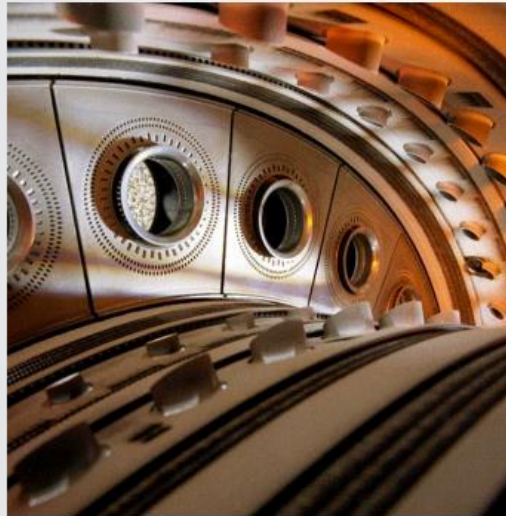
- The CF force on a Trent 900 fan blade is slightly greater than hanging a fully loaded 737-900ER to it.



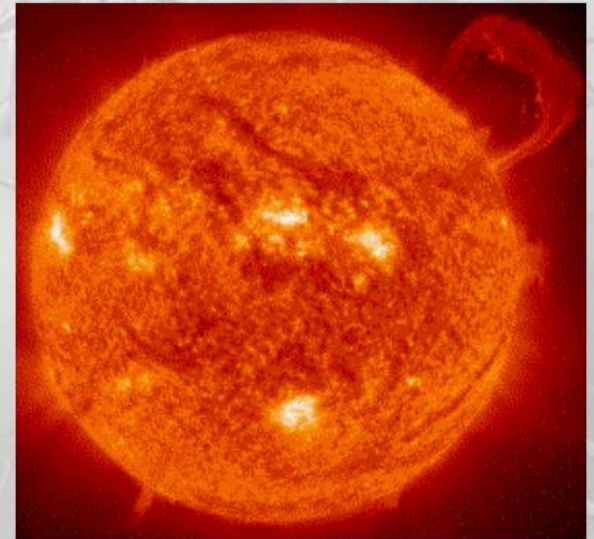
## Combustor

- The peak temperature of the combustor is ~2600K.
- This temperature is far higher than the melting point of all steel, titanium and nickel alloys that the gas turbine is made from.

**2600K**



**5800K**



**~ 45%**



## Power produced by a HP Turbine rotor

- At Take off the Trent 900 HP turbine produces 62,700HP. Each of the 70 blades then extract 896HP.



~ 120%



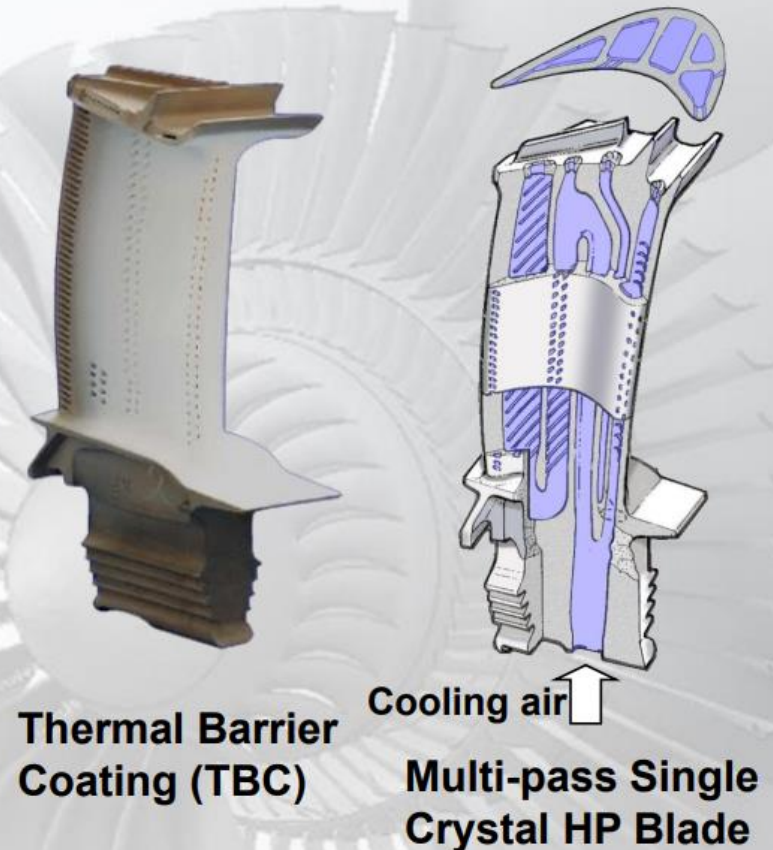
~ 90%



# State of the Art Turbine Technology <sup>9</sup>

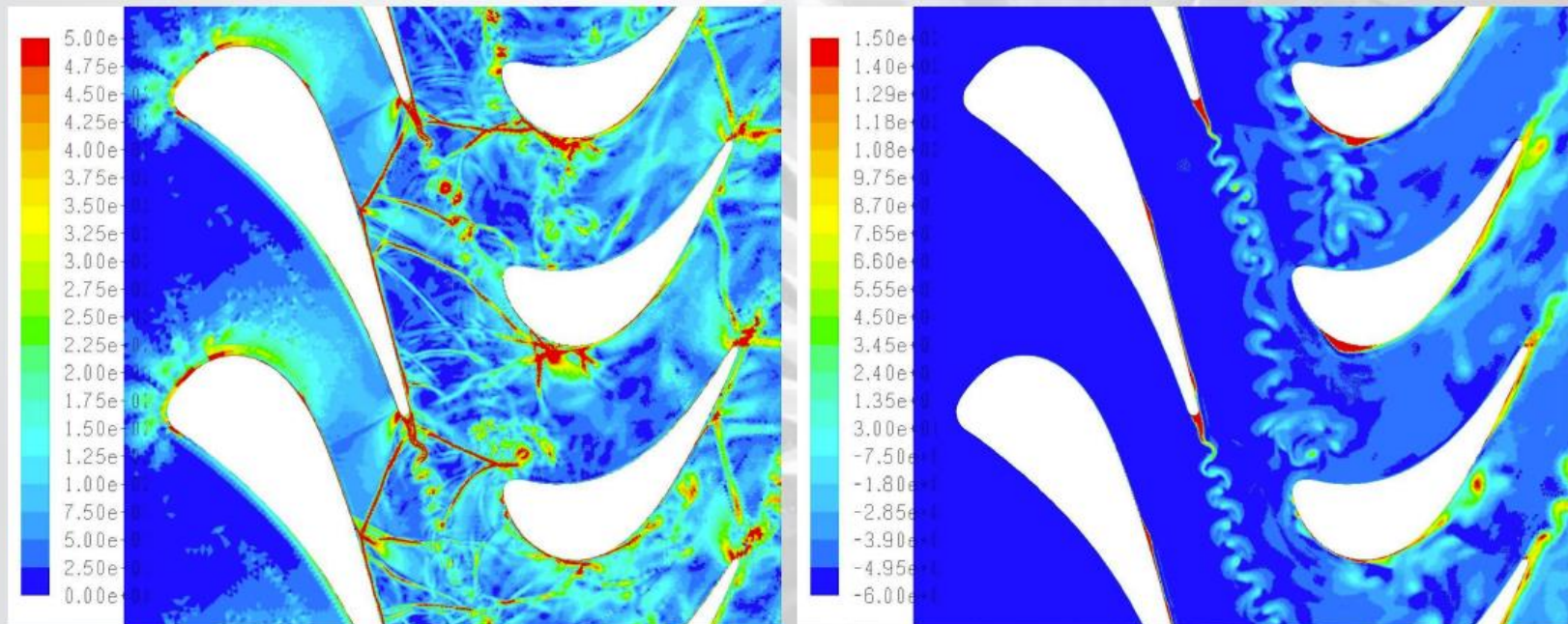
## High Pressure Turbine Blade

- Gas stream temperature - 1600°C
- Alloy melts at 1350°C
- Cooled with air at 650°C
- Rotating at 13,000 rpm
- Radial load equivalent to 3 double decker buses
- Each blade extracts 750 Horse Power from gas stream
- Operates for 5,000,000 flying miles
- TBC composition, structure and even *colour* controlled to influence heat transfer rate



## Shock BL Interaction

- 2D baseline high spatial and temporal resolution (2048 time steps per nozzle passing)



## Similitudine

La teoria della SIMILITUDINE riveste una notevole importanza nel campo delle macchine (e dell'ingegneria in generale) perchè consente di mettere in relazione il funzionamento di macchine dette SIMILI, riducendo sensibilmente il numero di prove necessarie per la loro caratterizzazione.

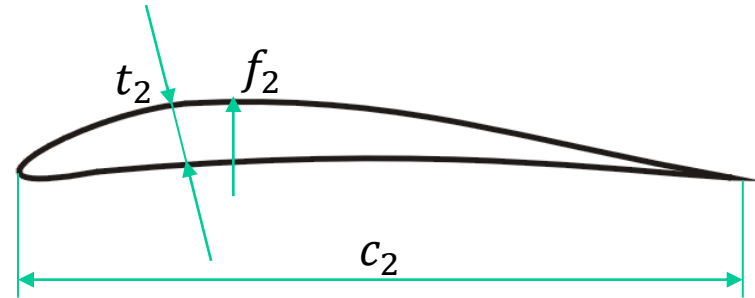
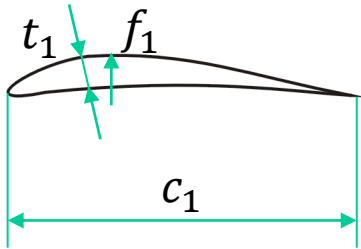
Esistono diversi tipi di similitudine.



## Similitudine

### 1) SIMILITUDINE GEOMETRICA

Tutte le dimensioni devono essere in scala (diametri, altezze, spessori).



$$\frac{c_2}{c_1} = \frac{t_2}{t_1} = \frac{f_2}{f_1} = \dots = \dots = \lambda$$

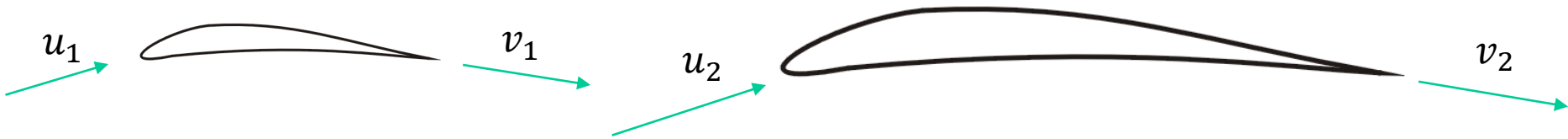
RAPPORTO CARATTERISTICO DELLA  
SIMILITUDINE GEOMETRICA



## Similitudine

### 2) SIMILITUDINE CINEMATICA

I rapporti tra le velocità in posizioni omologhe devono essere costanti.



$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{v_2}{v_1} = \dots = \dots = \gamma$$

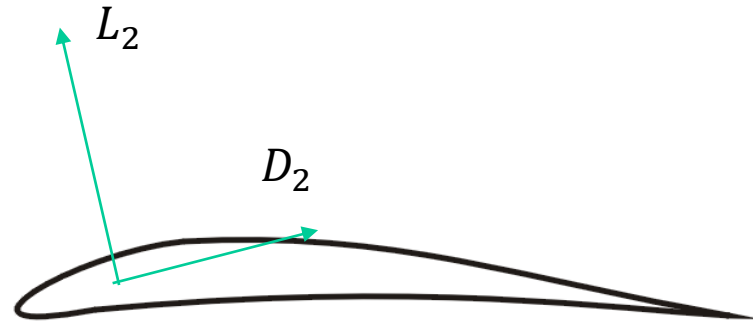
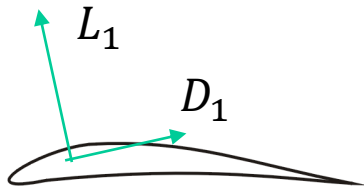
RAPPORTO CARATTERISTICO DELLA  
SIMILITUDINE CINEMATICA



## Similitudine

### 3) SIMILITUDINE DINAMICA

I rapporti tra le forze devono essere costanti.



$$\frac{L_2}{L_1} = \frac{D_2}{D_1} = \dots = \dots = \delta$$

RAPPORTO CARATTERISTICO DELLA  
SIMILITUDINE DINAMICA

Una importante conseguenza della similitudine dinamica e' che I numeri  
adimensionali sono uguali nei due casi

EFFICIENZA AERODINAMICA  $e_1 = \frac{L_1}{D_1} = e_2 = L_2/D_2$



## Similitudine

### 3) SIMILITUDINE DINAMICA

I rapporti tra le forze devono essere costanti.

Una importante conseguenza della similitudine dinamica e' che I numeri adimensionali sono uguali nei due casi

EFFICIENZA AERODINAMICA  $e_1 = \frac{L_1}{D_1} = e_2 = L_2/D_2$

COEFFICIENTI DI FORZA  $c_{l_1} = \frac{L_1}{\frac{1}{2}\rho u_1^2} = c_{l_2} = \frac{L_2}{\frac{1}{2}\rho u_2^2}$

NUMERI DI REYNOLDS  $Re_1 = \frac{\rho_1 u_1 c_1}{\mu_2} = Re_2 = \frac{\rho_2 u_2 c_2}{\mu_2}$

COEFFICIENTI DI COPPIA, POTENZA, ecc ...



## Similitudine

### TEOREMA DI BUCKINGHAM

Sfrutta l'analisi dimensionale per ridurre il numero di variabili indipendenti in un problema (semplificazione). Consente di semplificare un problema descritto da **n** variabili dimensionali, in una relazione tra **n-m** gruppi adimensionali (**m** grandezze fondamentali)

$$L = f(\rho, \mu, V, \alpha, c, a)$$



PORTANZA	$[L] = M \cdot L \cdot T^{-2}$
DENSITA'	$[\rho] = M \cdot L^{-3}$
VISCOSITA'	$[\mu] = M \cdot L^{-1} \cdot T^{-1}$
VELOCITA'	$[V] = L \cdot T^{-1}$
ANGOLO	$[\alpha] = -$
CORDA	$[c] = L$
VEL. SUONO	$[a] = L \cdot T^{-1}$

**7** variabili dimensionali, **3** grandezze fondamentali ( $L, T, M$ ), **4** numeri adimensionali



## INTRODUZIONE AL CORSO

---

VARIABILE	$L$	$c$	$\mu$	$\alpha$	$V$	$\rho$	$a$
G. FOND.	$M \cdot L \cdot T^{-2}$	$L$	$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-1}$	–	$L \cdot T^{-1}$	$M \cdot L^{-3}$	$L \cdot T^{-1}$

---

*Posso trovare I numeri adimensionali eliminando le grandezze fondamentali*

<i>Divido/moltiplico per <math>\rho</math></i>	$L/\rho$	$c$	$\mu/\rho$	$\alpha$	$V$	$a$
	$L^4 \cdot T^{-2}$	$L$	$L^2 \cdot T^{-1}$	–	$L \cdot T^{-1}$	$L \cdot T^{-1}$

<i>Divido/moltiplico per <math>V</math></i>	$L/(\rho V^2)$	$c$	$\mu/\rho V$	$\alpha$	$a/V$
	$L^2$	$L$	$L$	–	–

<i>Divido/moltiplico per <math>c</math></i>	$L/(\rho V^2 c^2)$	$\mu/\rho V c$	$\alpha$	$a/V$
	–	–	–	–

$$\frac{L}{\rho V^2 c^2} = F\left(\frac{\mu}{\rho V c}, \alpha, \frac{a}{V}\right)$$


---



## Similitudine

$$\frac{L}{\rho V^2 c^2} = F\left(\frac{\mu}{\rho V c}, \alpha, \frac{a}{V}\right)$$

$$\frac{L}{\rho V^2 c^2}$$

COEFFICIENTE DI PORTANZA

$$\frac{\rho V c}{\mu}$$

NUMERO DI REYNOLDS

$$\frac{V}{a}$$

NUMERO DI MACH

$$\alpha$$

ANGOLO D'ATTACCO



## Similitudine

Allo stesso modo, per caratterizzare una macchina non dovremo conoscere portata  $\dot{m}$ , velocità di rotazione  $\omega$ , potenza  $P$ , ecc, ma:

- Coefficiente di portata	$\phi = \frac{\dot{m}}{\rho\omega D^3}$	- Coefficiente di carico	$\psi = \frac{l_s}{(\omega D)^2}$
- Coefficiente di potenza	$\hat{P} = \frac{P}{\rho\omega^3 D^5}$	- Numero di Reynolds	$Re = \frac{\rho\omega D^2}{\mu}$
- Numero di giri adimensionalizzato	$N = \frac{\omega D}{\sqrt{RT}}$	- efficienza	$\eta = \frac{l_s}{l}$

$$\psi = F_1(\phi, Re, N)$$

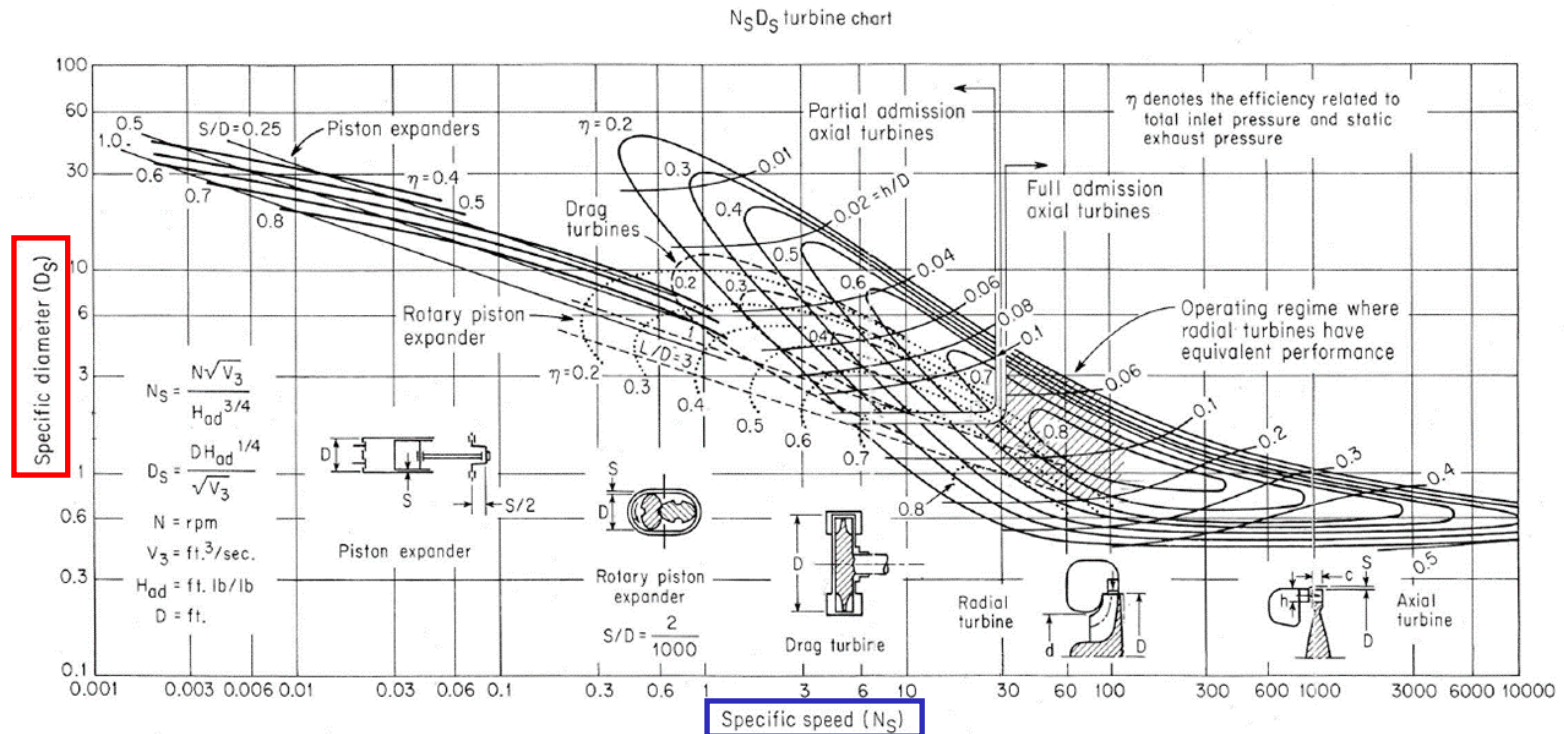
$$\hat{P} = F_2(\phi, Re, N)$$

$$\eta = F_3(\phi, Re, N)$$



## Similitudine

I parametri adimensionali sono fondamentali per la scelta di una macchina.



- Coefficiente di portata

$$\phi = \frac{\dot{m}}{\rho\omega D^3}$$

- Coefficiente di carico

$$\psi = \frac{l_s}{(\omega D)^2}$$



## Progettazione e analisi delle prestazioni

Gli **strumenti** utilizzati per la progettazione e l'analisi delle prestazioni delle macchine sono:

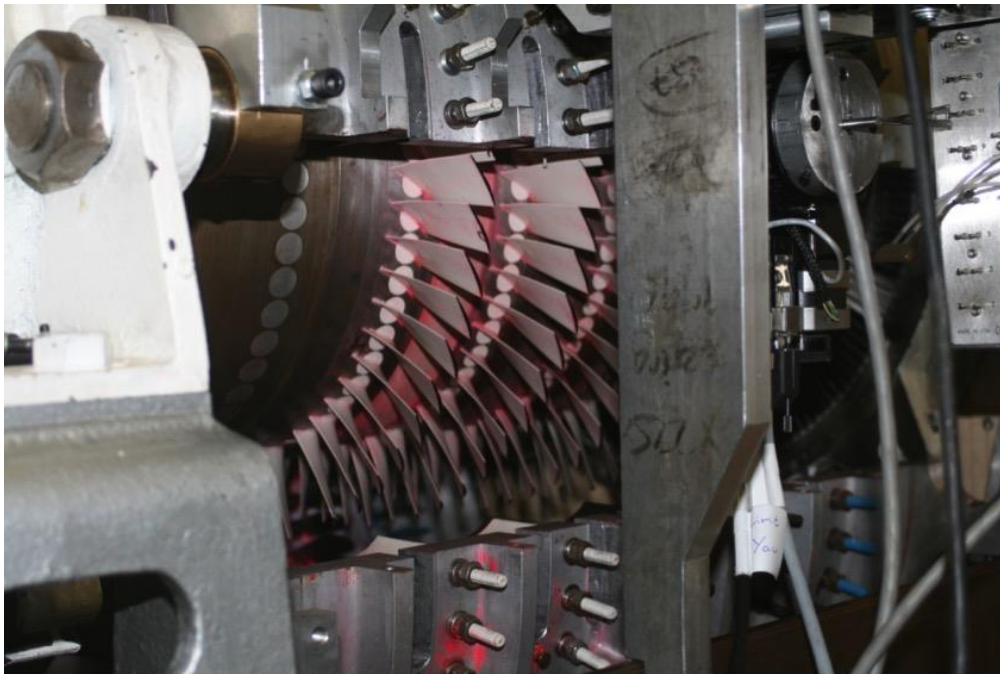
- 1) Le analisi sperimentali
- 2) Le simulazioni numeriche



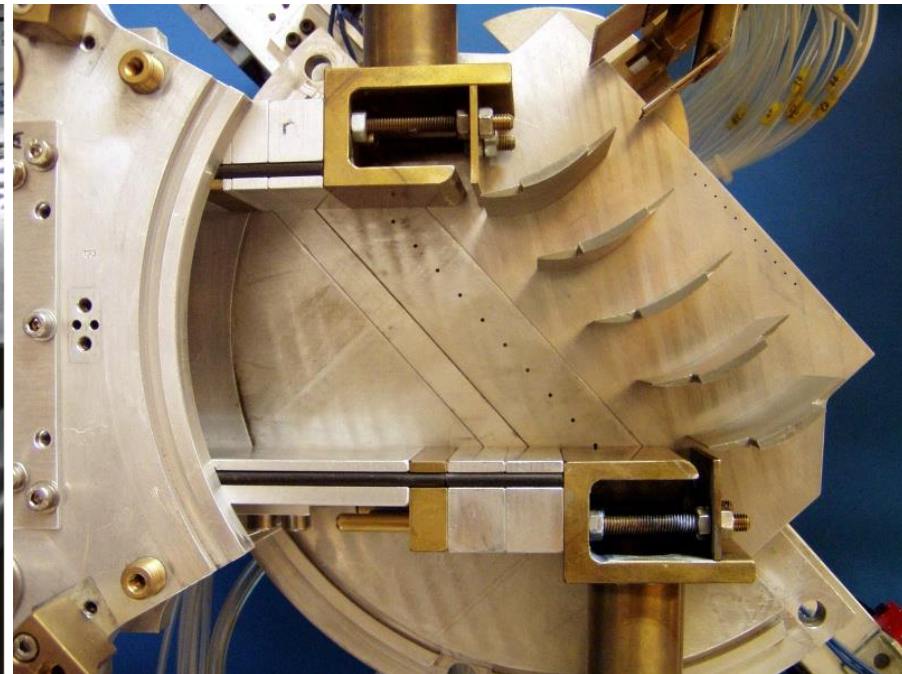
## Analisi Sperimentali

Vengono svolte direttamente sulle macchine o su configurazioni semplificate, misurando direttamente le grandezze utili per la caratterizzazione del flusso al loro interno.

### Compressore assiale



### Schiera di compressore



Analisi Sperimentali

Turbina strumentata

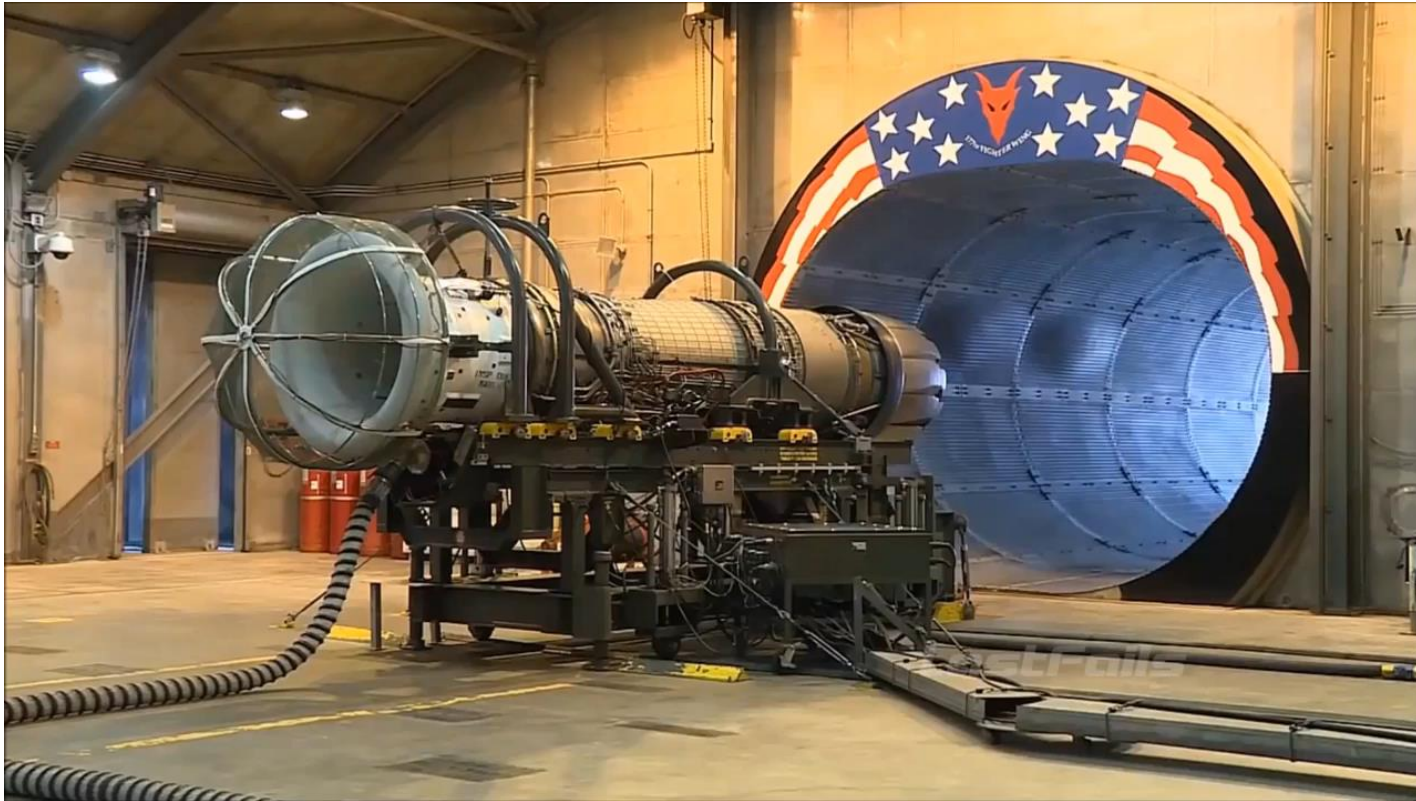


Schiera di turbina



## Analisi Sperimentali

... possono essere estremamente costose e pericolose ...



## Analisi Sperimentali

Le ONDE D'URTO si generano quando un oggetto si muove (moto relative) a una velocità pari a quella del suono (semplificazione)

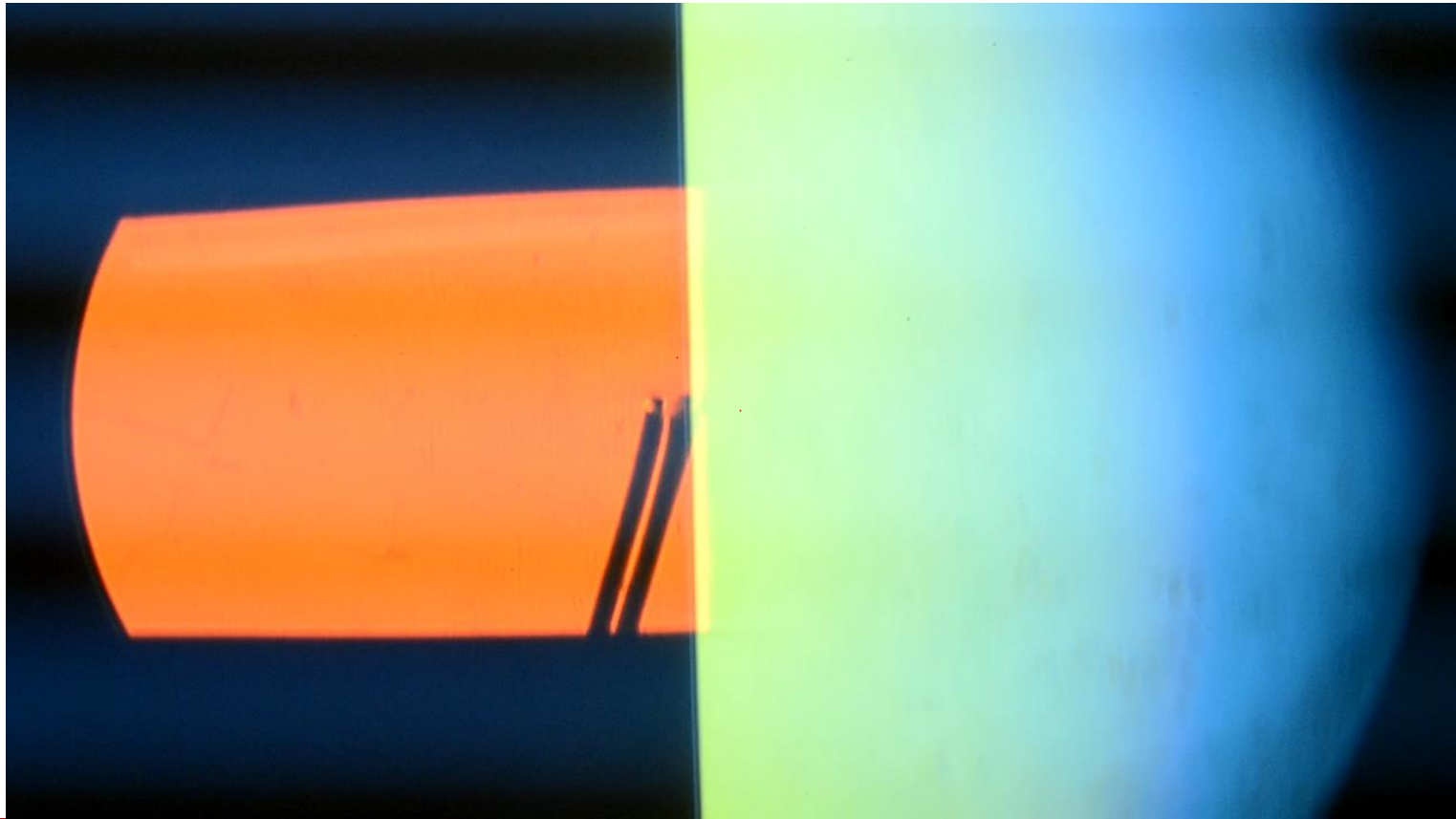


Possiamo avere onde d'urto anche negli ugelli di aerei supersonici (in figura, l'ugello del Concorde)



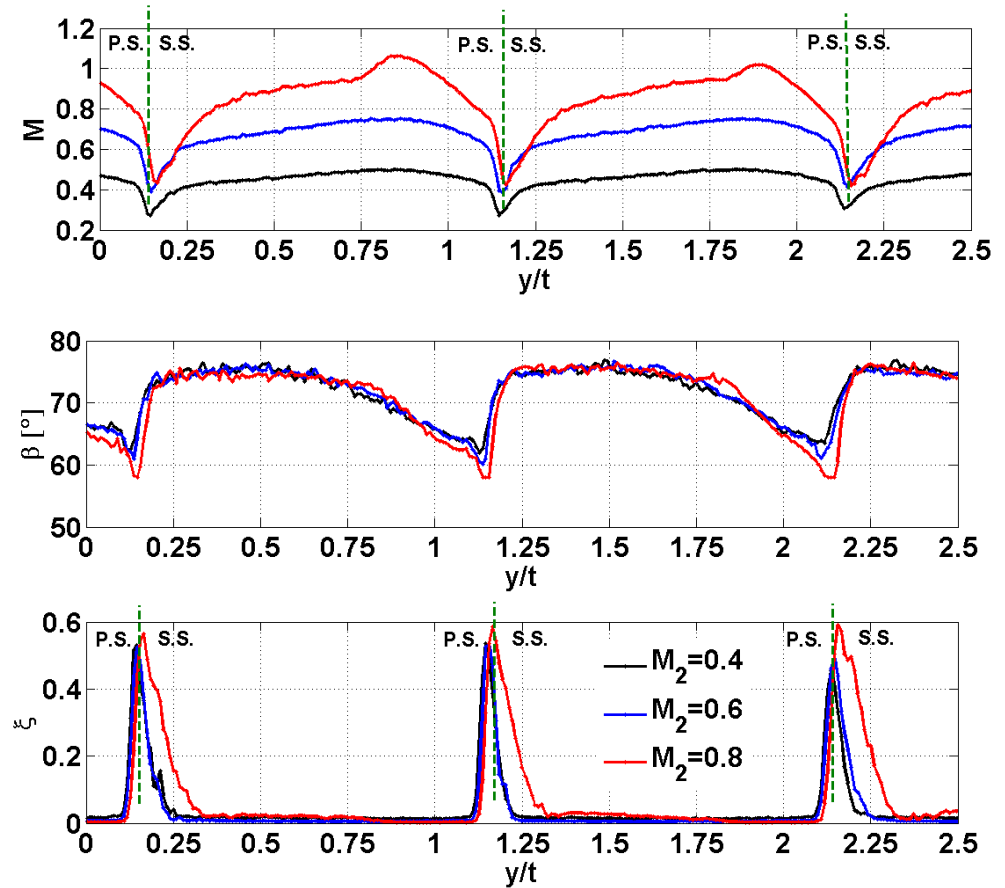
## Analisi Sperimentali

Nel video: visualizzazione con tecnica Shlieren di onde d'urto in un ugello  
(DIMCM, Universita' di Cagliari)



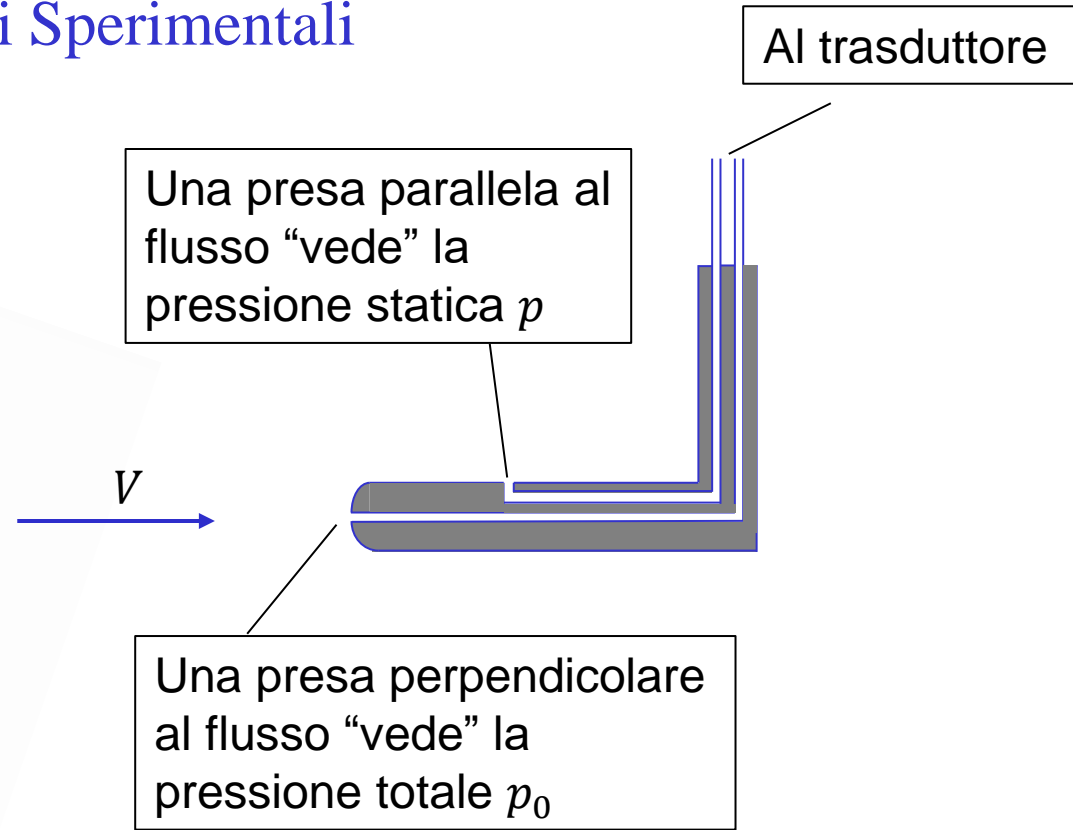
## Analisi Sperimentali

Valutazione delle prestazioni di una schiera di turbina



Analisi Sperimentali

TUBO DI PITOT



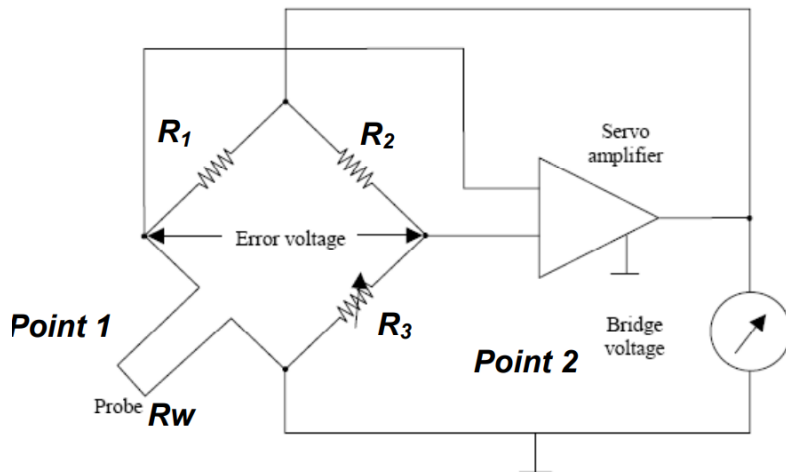
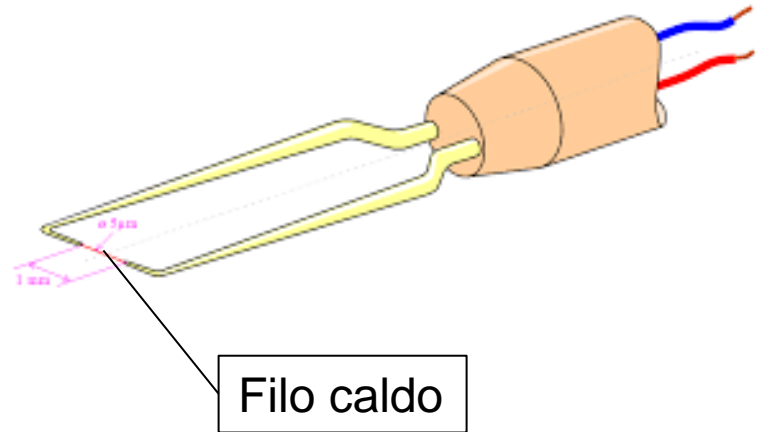
Legge di Bernoulli

$$p_0 - p = \frac{1}{2} \rho V^2$$



## Analisi Sperimentali

### ANEMOMETRO A FILO CALDO



Il funzionamento di un anemometro a filo caldo si basa su 2 idee:

- 1) Il ponte di Wheatstone (sinistra) e' bilanciato quando  $R_1/R_w = R_2/R_3$
- 2) La resistenza  $R_w$  (filo dell'anemometro) dipende dalla sua temperature, che a sua volta dipende dalla velocita' del flusso

Per mantenere l'anemometro a temperature costante e quindi mantenere il ponte bilanciato, devo variare la corrente nel circuito, che quindi diventa una misura indiretta della velocita' del fluido



## Simulazioni numeriche

Il comportamento di un fluido puo' essere descritto matematicamente tramite le **equazioni di Navier-Stokes** (dal nome degli scienziati che le hanno scoperte tra il 1820 e il 1850).



### Navier–Stokes Equations 3 – dimensional – unsteady

Glenn  
Research  
Center

Coordinates: (x,y,z)	Time : t	Pressure: p	Heat Flux: q
Velocity Components: (u,v,w)	Density: ρ	Stress: τ	Reynolds Number: Re
	Total Energy: Et		Prandtl Number: Pr

**Continuity:** 
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$$

**X – Momentum:** 
$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re_r} \left[ \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right]$$

**Y – Momentum:** 
$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re_r} \left[ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right]$$

**Z – Momentum** 
$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{Re_r} \left[ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right]$$

**Energy:**

$$\frac{\partial(E_T)}{\partial t} + \frac{\partial(uE_T)}{\partial x} + \frac{\partial(vE_T)}{\partial y} + \frac{\partial(wE_T)}{\partial z} = -\frac{\partial(up)}{\partial x} - \frac{\partial(vp)}{\partial y} - \frac{\partial(wp)}{\partial z} - \frac{1}{Re_r Pr_r} \left[ \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right] + \frac{1}{Re_r} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (u \tau_{xx} + v \tau_{xy} + w \tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y} (u \tau_{xy} + v \tau_{yy} + w \tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (u \tau_{xz} + v \tau_{yz} + w \tau_{zz}) \right]$$



## Simulazioni numeriche

Il comportamento di un fluido puo' essere descritto matematicamente tramite le **equazioni di Navier-Stokes** (dal nome degli scienziati che le hanno scoperte tra il 1820 e il 1850).



### Navier–Stokes Equations 3 – dimensional – unsteady

Glenn  
Research  
Center

Coordinates: (x,y,z)	Time: t	Pressure: p	Heat Flux: q
Velocity Components: (u,v,w)	Density: ρ	Stress: τ	Reynolds Number: Re
	Total Energy: Et		Prandtl Number: Pr

**Continuity:** 
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$$

Queste equazioni non hanno soluzione (conosciuta) in forma chiusa. Nel 2000 il Clay Mathematics Institute ha fissato un premio di un milione di dollari per chi trova soluzione a uno dei 7 problemi senza soluzione (le equazioni di NS sono tra questi).

$$\frac{\partial(E_T)}{\partial t} + \frac{\partial(uE_T)}{\partial x} + \frac{\partial(vE_T)}{\partial y} + \frac{\partial(wE_T)}{\partial z} = - \frac{\partial(Up)}{\partial x} - \frac{\partial(vp)}{\partial y} - \frac{\partial(wp)}{\partial z} - \frac{1}{Re_r Pr_r} \left[ \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right] + \frac{1}{Re_r} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (u \tau_{xx} + v \tau_{xy} + w \tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y} (u \tau_{xy} + v \tau_{yy} + w \tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (u \tau_{xz} + v \tau_{yz} + w \tau_{zz}) \right]$$



## Simulazioni numeriche

Fino a quando non si sarà scoperta la soluzione esatta delle equazioni di Navier-Stokes, l'alternativa è la soluzione numerica. Questa consiste in una soluzione approssimata delle equazioni su grossi computer (cluster).

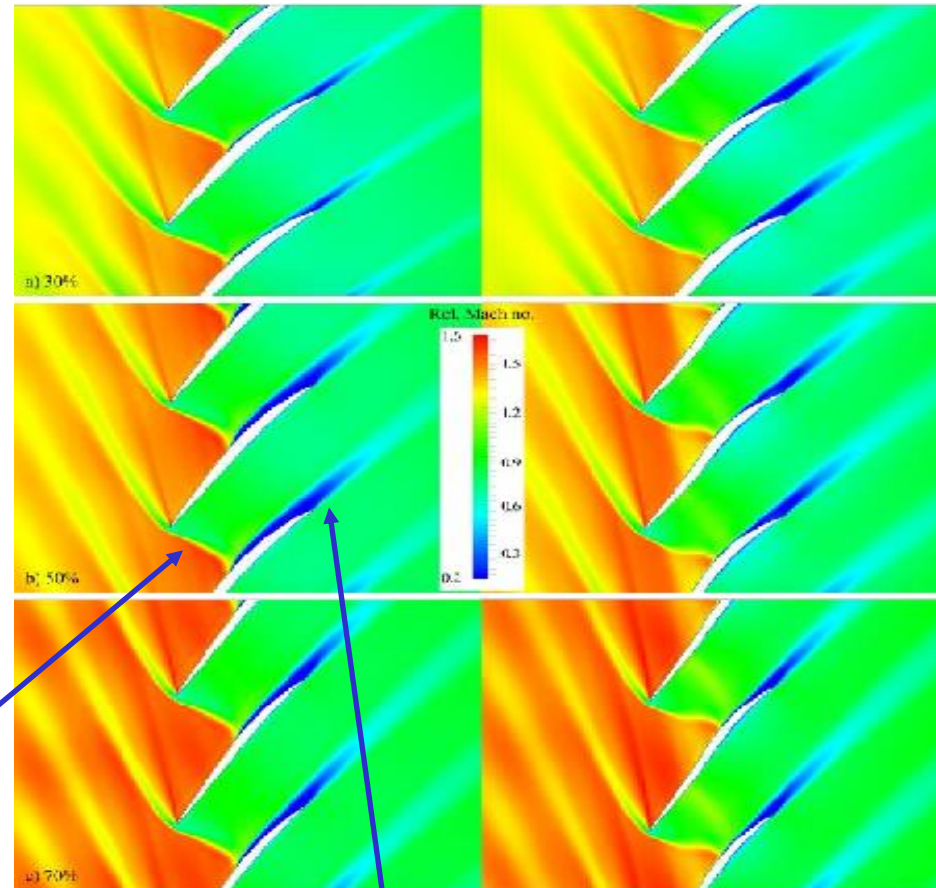
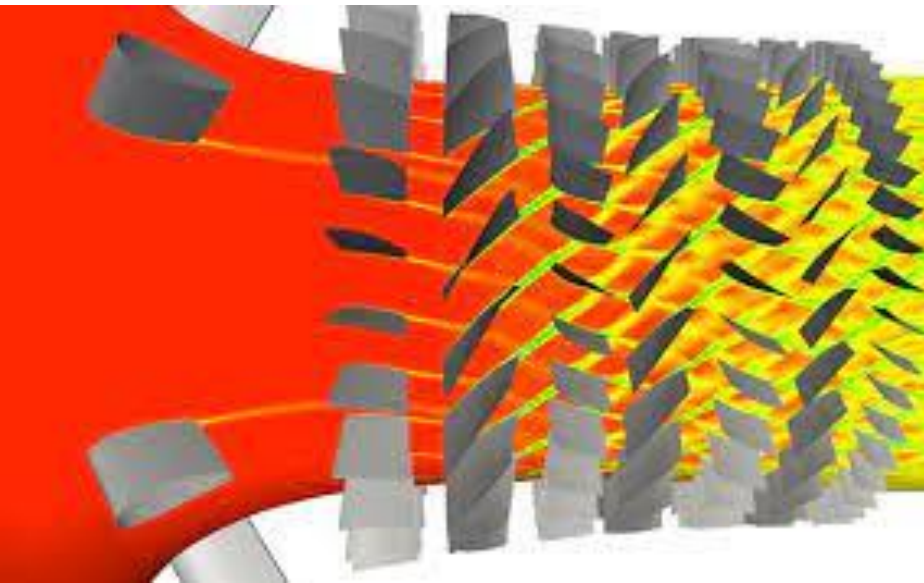
La soluzione del flusso in una pala di turbina che opera a un numero di Reynolds di  $5 \times 10^6$  richiederebbe  $10^{25}$  operazioni.

Il computer più potente al mondo (il Fugaku al Riken Center for Computational Science in Giappone) può fare  $4.4 \times 10^{17}$  operazioni al secondo. Quindi impiegherebbe circa 9 mesi.

Il Fugaku ha 7.63 milioni di cores, richiede una potenza di 30MW (potenza media assorbita da una cittadina di 30mila abitanti).



Simulazioni numeriche - Compressore



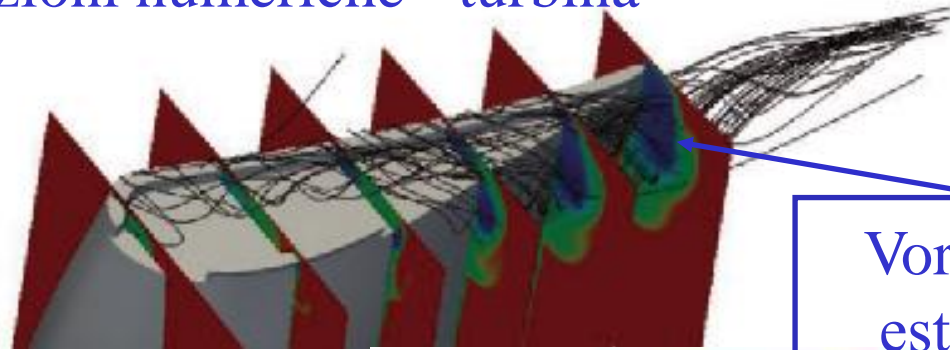
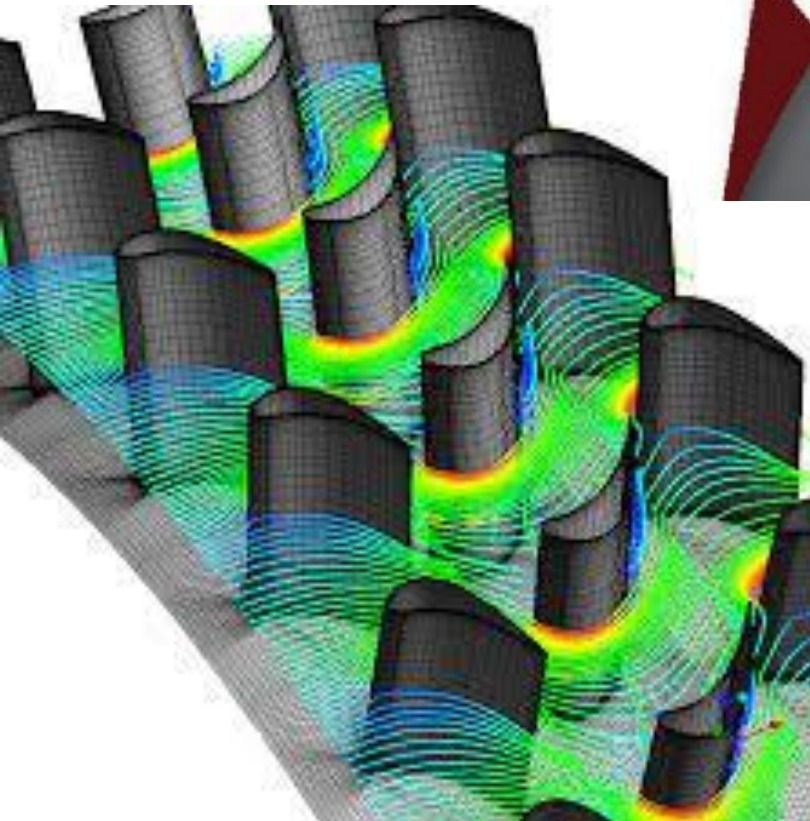
onde d'urto

separazione



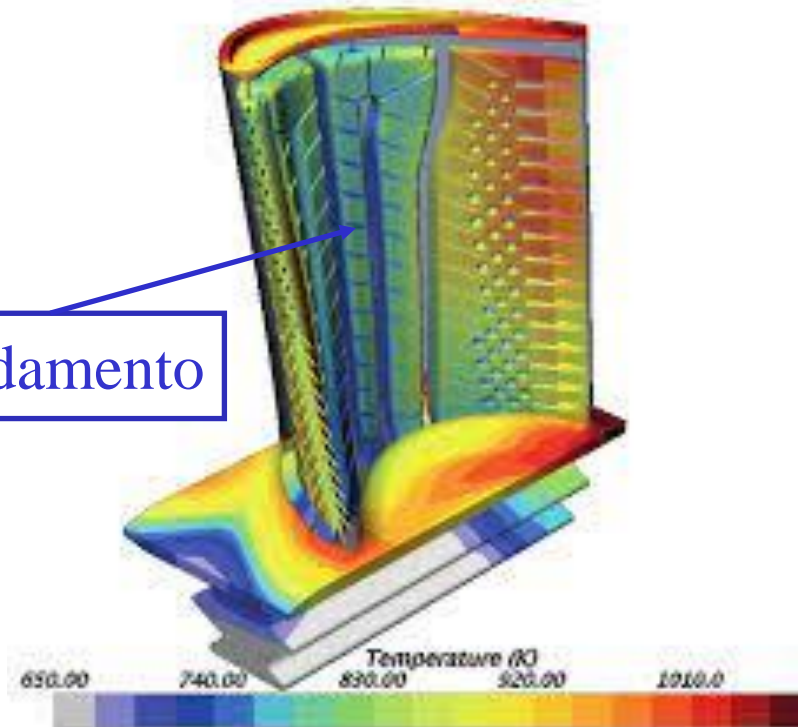
# INTRODUZIONE AL CORSO

## Simulazioni numeriche - turbina

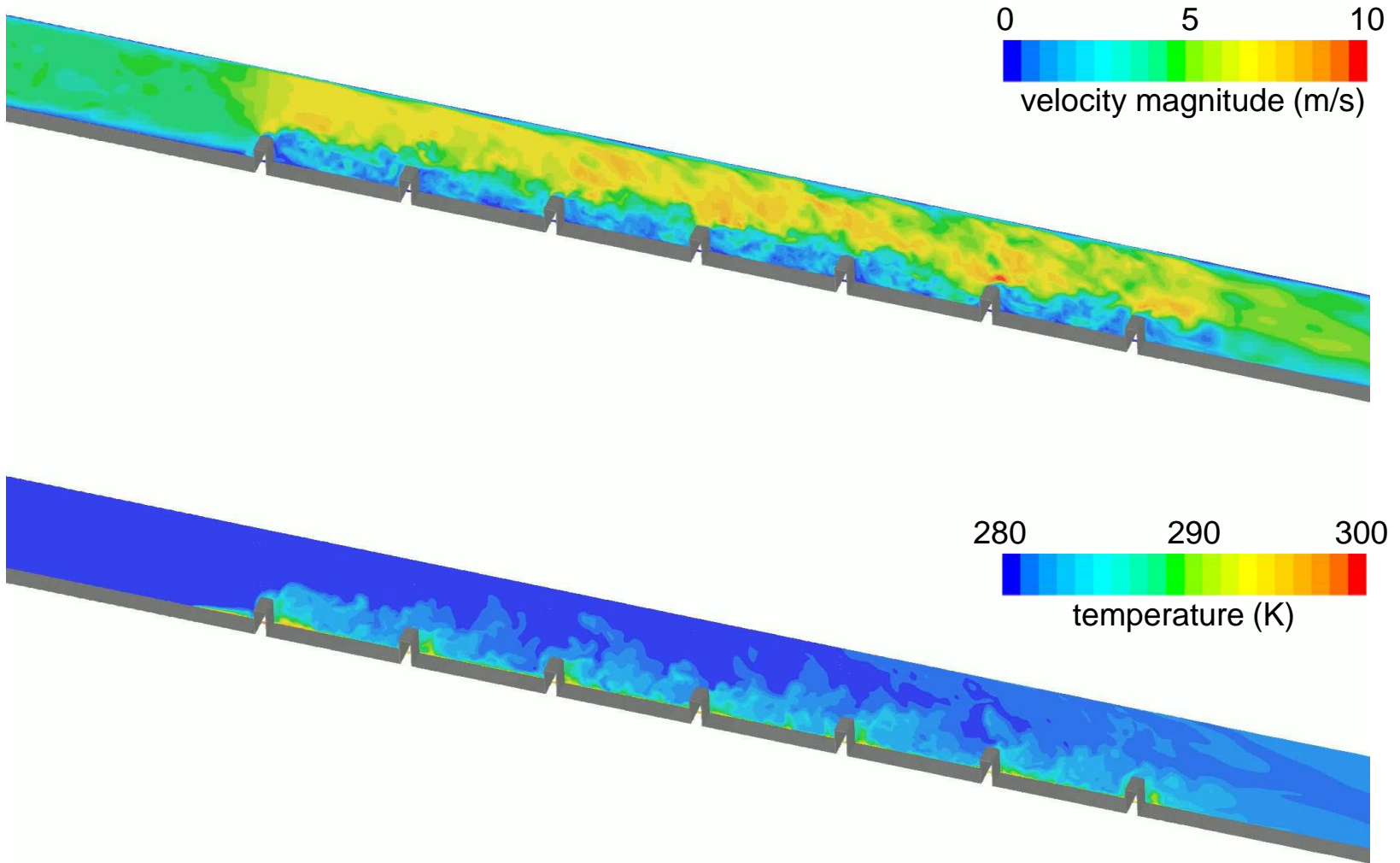


Vortice di  
estremita'

raffreddamento



## Simulazioni numeriche – Scambiatore di calore



*Grazie per l'attenzione*

