

# Prova finale (Macchine)

Giacomo Persico  
Alessandro Romei

May 10, 2017

---

## REGOLE ED ORGANIZZAZIONE

Il progetto è obbligatorio solo per gli studenti registrati al corso 'Prova finale (Macchine)' del terzo anno di Laurea in Ingegneria Meccanica; fornisce uno dei tre crediti di laurea richiesti come esame di laurea, e corrisponde a circa 24 ore di attività richiesta allo studente.

Gli studenti devono organizzarsi in gruppi, composti da 4-5 persone, che lavoreranno insieme per sviluppare il progetto.

Sono disponibili due argomenti: il disegno aerodinamico di una turbina eolica ad asse orizzontale ed il progetto termo-fluidodinamico di un compressore assiale multistadio. Nelle pagine successive vengono forniti i dati progettuali rilevanti e vengono proposte delle procedure di calcolo come supporto agli studenti. Vengono comunque lasciati diversi gradi di libertà, consentendo ad ogni gruppo di effettuare scelte differenti con l'obiettivo di ottenere le migliori prestazioni possibili per le macchine considerate.

La composizione dei gruppi e l'argomento scelto vanno comunicati al docente via e-mail ([giacomo.persico@polimi.it](mailto:giacomo.persico@polimi.it)) entro giovedì 25 Maggio 2017 (una sola e-mail per gruppo).

L'esame consta in una presentazione orale, effettuata da ogni gruppo 'al completo'. Verranno identificate almeno tre date, una in Luglio, una in Settembre e una in Febbraio, scelte in modo da consentire agli studenti laureandi di conseguire il titolo entro la scadenza più prossima. Le date saranno selezionate in base agli impegni di docenti e studenti, e comunicate prima possibile dal docente via e-mail.

Le attività della prova finale si svolgeranno nelle seguenti date:

- Giovedì 11/5, 16.15 - 18.15, aula B6.27;
- Giovedì 18/5, 16.15 - 18.15, aula B6.27;
- Giovedì 25/5, 16.15 - 18.15, aula B6.27;
- Giovedì 01/6, 16.15 - 18.15, aula B6.27;
- Giovedì 08/6, 16.15 - 18.15, aula B6.27;
- Giovedì 15/6, 16.15 - 18.15, aula B6.27;

---

## **PROGETTO 1**

### **PROGETTO AERODINAMICO DI UNA TURBINA EOLICA**

---

## DATI DI PROGETTO

Allo scopo di contribuire a soddisfare la domanda di energia elettrica di un piccolo comune di montagna viene considerata la possibilità di installare una turbina eolica ad asse orizzontale. Viene pertanto richiesto il progetto preliminare della macchina. Le condizioni operative sono le seguenti:

- Velocità (di progetto) del vento in ingresso alla macchina:  $V_\infty = 10$  m/s (uniforme)
- Temperatura di riferimento del sito:  $T = 15$  °C
- Altitudine (sul livello del mare):  $z_{sito} = 900$  m
- Potenza meccanica nominale all'albero della turbina (prima degli organi di trasmissione):  $\dot{W} = 40 \cdot (1 + i)$  kW, dove  $i$  = numero gruppo assegnato

## RICHIESTE

Si richiede di definire l'architettura della macchina (tipo e numero di pale) e di valutare:

- a) diametro esterno  $D$  e altezza di pala  $h$ .
- b) Velocità di rotazione della turbina  $n$ .
- c) Triangoli di velocità in ingresso al rotore in corrispondenza di almeno tre sezioni lungo l'altezza di pala (base, primaria, apice), dopo aver selezionato il profilo (o i profili) facendo uso di un database appropriato.
- d) L'evoluzione della corda  $C$  e dell'angolo di calettamento  $\gamma$  lungo l'altezza di pala.
- e) Il coefficiente di potenza  $C_P$  come indice dell'efficienza della macchina.
- f) I triangoli di velocità lungo l'altezza di pala e il coefficiente di potenza  $C_P$  in condizioni fuori progetto facendo funzionare la macchina disegnata in precedenza per velocità del vento di  $V_\infty = 8$  m/s e di  $V_\infty = 12$  m/s.

---

## NOTE DI PROGETTO

Allo scopo di valutare la potenza meccanica scambiata tra fluido e macchina, ovvero la potenza disponibile per la turbina, è possibile ricorrere alla teoria di Betz. Fatta questa valutazione, è possibile effettuare una prima stima (approssimata) delle caratteristiche (costruttive/operative) essenziali della turbina, facendo riferimento ai dati statistici disponibili per le turbine esistenti. Successivamente, è possibile sviluppare il progetto di dettaglio delle pale. In particolare, dopo aver scelto il profilo (i profili) delle pale, è possibile valutare i triangoli di velocità in ingresso lungo il raggio della macchina, insieme a corda  $C$  e angolo di calettamento  $\gamma$ . Concluso il progetto delle pale è possibile calcolare l'effettivo coefficiente di potenza  $C_P$  della macchina. Sarà necessario un affinamento del progetto in caso si riscontri una differenza tra le prestazioni effettive della turbina e quelle stimate tramite i dati statistici all'inizio della procedura di progetto.

Inizialmente è necessario individuare la potenza meccanica ideale (in assenza di attriti) estraibile dal vento in condizioni nominali. Tale valutazione può essere eseguita ricorrendo all'approccio del disco attuatore. In questo modo è possibile ottenere la velocità al disco di ottimo.

L'architettura della turbina può poi essere scelta in base a considerazioni legate a efficienza, affidabilità, costi, impatto ambientale. La scelta può essere basata sui dati riportati nel diagramma statistico di figura 1. Il rapporto  $r_e/r_i$  tra il raggio esterno e quello interno della macchina costituisce un parametro complementare che deve essere scelto nell'intervallo  $0.10 \leq r_e/r_i \leq 0.20$ , bilanciando esigenze economiche e strutturali. La definizione dell'architettura della macchina si conclude con la valutazione del diametro  $D$  e della velocità di rotazione  $n$ .

Da questo punto di vista è necessario tenere in considerazione la componente verticale del gradiente di pressione atmosferica, che può essere assunta pari a  $\partial P_{atm}/\partial z \simeq -10^{-4}$  bar/m. La parte successiva della procedura di progetto riguarda il progetto di dettaglio delle pale rotatorie.

Innanzitutto è necessario scegliere il profilo (i profili) delle pale. Sono disponibili due opzioni:

- i) scelta di un unico profilo adimensionale lungo l'altezza di pala;
- ii) scelta di un profilo che cambia lungo l'altezza di pala; in tal caso devono essere definiti 2 o 3 profili adimensionali principali (base-apice o base-primario-apice). Tali profili principali sono collocati in posizioni definite

---

con precisione in rapporto all'altezza di pala ( $r/r_e$ ). In tal caso è possibile applicare un'interpolazione (ad es. lineare) allo scopo di ottenere geometria e proprietà aerodinamiche dei profili per qualsiasi sezione lungo l'altezza di pala (sezioni/raggi diversi da quelli principali).

In entrambi i casi l'angolo di calettamento  $\gamma$  e la corda  $C$  del profilo (dei profili) lungo l'altezza di pala devono essere modificati allo scopo di mantenere ai diversi raggi le condizioni di progetto scelte.

### Scelta dei profili palari

Riguardo la scelta dei profili sono possibili due opzioni; selezionare profili NACA, ovvero profili aerodinamici di derivazione aeronautica (ali di aeromobili) ma adatti anche alla realizzazione di turbine eoliche, oppure scegliere profili specificatamente realizzati per pale di turbine eoliche.

In caso di profili NACA, si suggerisce l'adozione delle serie NACA 63-xxx, 64-xxx (eventualmente 65-xxx). I dati aerodinamici necessari (numerici o sperimentali) possono essere individuati in diversi database (accessibili dopo ricerca bibliografica). Ad esempio, una panoramica è contenuta nel seguente lavoro del DTU (Denmark Technical University):

- Wind Turbine Airfoil Catalogue, *Bertagnolio F. et al, 2001*.

In caso si preferiscano profili specifici per turbine eoliche, si suggeriscono due tipi di profili; quelli sviluppati al NREL (US National Renewable Energy Laboratory), ovvero i profili serie NREL S-xxx, e quelli sviluppati alla TUD (Technical University of Delft, The Netherlands), ovvero i profili della serie DU xx-W-xxx.

Il database NREL è molto ampio e facilmente accessibile al link:

<http://wind.nrel.gov/airfoils/>

Si noti che, in caso di scelta di un profilo di geometria variabile lungo l'altezza di pala, la posizione radiale dei profili principali (base-apice o base-primario-apice) è spesso suggerita all'interno del database. Si noti anche, che i dati aerodinamici sono quasi sempre forniti in funzione del numero di Reynolds.

---

Talvolta, vengono fornite serie di dati differenti a seconda dello stato superficiale di usura delle pale; pale lisce (smooth) ovvero con superfici esenti da usura/erosione o sporcamento, o usurate (rough). E' bene che il progetto preliminare sia eseguito con riferimento a pale di nuova costruzione, pertanto pulite e esenti da usura.

### Effetti 3D

I criteri di progetto finora considerati (basati sulle prestazioni aerodinamiche di profili bidimensionali) non tengono in considerazione le perdite legate a componenti di velocità normali al profilo e alle interazioni con il fluido circostante il tubo di flusso che attraversa la macchina (effetti di estremità). E' possibile tenere in considerazione questi effetti 3D lungo la pala attraverso un'appropriata correzione dei coefficienti aerodinamici. Come è ragionevole attendersi, tali effetti aumentano al diminuire dell'allungamento (aspect ratio) della pala il quale, essendo la corda della pala variabile, può essere calcolato come:

$$AR = \frac{h^2}{S_{blade}}$$

dove  $S_{blade}$  è l'area della superficie palare proiettata su un piano contenente la corda.

Sono disponibili diverse correlazioni (basate sul valore di AR) che permettono la correzione dei coefficienti di portanza (lift) e resistenza (drag) allo scopo di considerare gli effetti 3D. Essendo, di regola, la correzione del coefficiente di portanza  $C_L$  piuttosto modesta, è possibile, in prima approssimazione, considerare tale coefficiente invariato; viene invece proposta una correlazione per la correzione del coefficiente di resistenza  $C_D$  :

$$C_{L,3D} \simeq C_{L,2D} \quad C_{D,3D} = C_{D,2D} + \frac{C_{L,3D}^2}{\pi AR}$$

Si noti che tale correzioni su  $C_D$  richiede qualche iterazione per il corretto calcolo della corda.

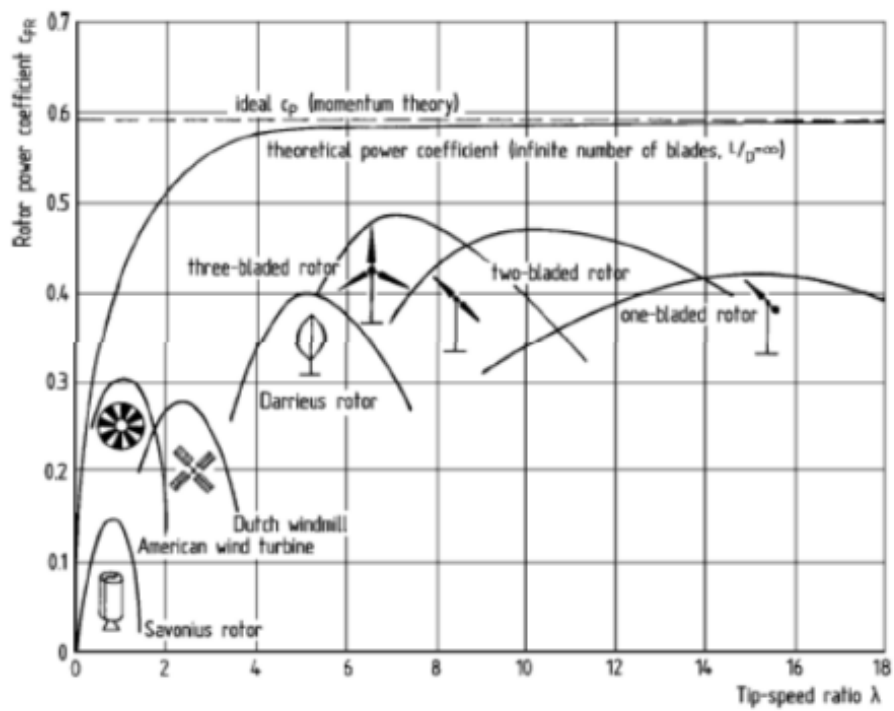


Figure 1: Diagramma statistico per turbine eoliche.  $C_P$  è il coefficiente di potenza,  $\lambda$  è il coefficiente di velocità all'apice (tip-speed ratio).



---

## PROGETTO 2

Progetto di un compressore assiale

---

## DATI DI PROGETTO

Si richiede il progetto preliminare di un compressore per motore aeronautico, che operi secondo le seguenti condizioni:

- Portata massica:  $\dot{m} = 92 - 2 \cdot i \text{ kg/s}$
- Rapporto di compressione complessivo:  $\beta = 10 + i/2$

in cui  $i$  = numero del gruppo

La macchina aspira aria ( $R = 287 \text{ J/(kgK)}$ ,  $\gamma = 1.4$ ) dall'ambiente esterno, in condizioni:

- Pressione:  $P = 0.85 \text{ bar}$
- Temperatura:  $T = 268 \text{ K}$

## RICHIESTE

Si richiede innanzitutto di definire uno stadio *intermedio*, e di determinare per tale stadio:

- a) velocità di rotazione e diametro medio
- b) triangoli di velocità
- c) altezza di pala

Il progetto dello stadio può essere esteso all'intera macchina secondo la logica di stadio ripetuto. Tuttavia, alcuni parametri cambieranno a causa della variazione del numero di giri specifico (e quindi dell'efficienza) lungo la macchina. Nel caso in cui le variazioni di efficienza risultino troppo alte, la macchina può essere suddivisa in due gruppi con diversa velocità di rotazione, per ognuno dei quali va applicata la procedura precedente (stadio intermedio e poi estensione al gruppo come stadio ripetuto). I due gruppi possono anche avere diverso diametro.

Nel calcolo, si tenga conto dei seguenti limiti:

- 
- i) massimo rapporto di compressione per stadio:  $\beta_{max} = 1.4$
  - ii) massima velocità periferica:  $u_{max} = 500m/s$
  - iii) rapporto di forma del canale meridiano:  $0.03 < b/D_m < 0.4$

Si richiede di determinare stadio per stadio l'evoluzione della configurazione geometrica, cinematica e termodinamica della macchina, e di determinare infine l'efficienza complessiva del compressore.

Relativamente alla palettatura del primo rotore, si richiede di valutare l'evoluzione dei triangoli di velocità lungo l'altezza di pala (usando la soluzione progettuale a vortice libero) e di scegliere il profilo della palettatura in almeno una delle sezioni rilevanti del compressore.

---

## NOTE DI PROGETTO

Premessa: la procedura riportata nel seguito è valida per un compressore a singolo albero; nel caso si opti per un multi-albero, è sufficiente applicare la stessa procedura ad ogni gruppo di stadi calettati sullo stesso albero.

Per un gruppo multi-stadio, poiché stadio per stadio cambia la portata volumetrica ma non il numero di giri, non è possibile garantire la perfetta similitudine tra gli stadi. Pertanto è opportuno focalizzarsi (e quindi ottimizzare i triangoli di velocità) su di uno stadio intermedio, e poi valutare cosa avviene agli stadi precedenti e successivi utilizzando la logica di stadio ripetuto (ovvero assumendo triangoli di velocità uguali stadio per stadio).

Dopo aver scelto valori appropriati per velocità e diametro specifici usando il diagramma di Balje dei compressori (riportato in Figura 2), è sufficiente assegnare il rapporto di compressione dello stadio intermedio per chiudere il problema. Stimando le condizioni termodinamiche dello stadio intermedio, si determina la portata volumetrica in ingresso allo stadio.

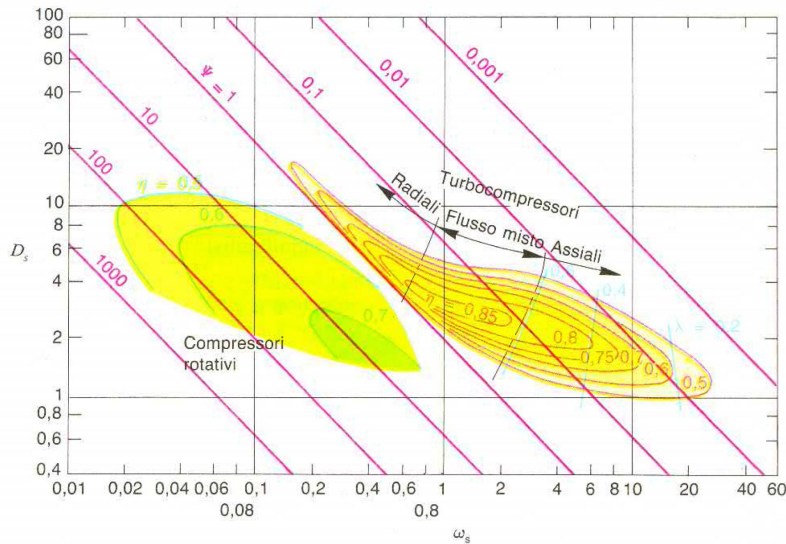


Figure 2: Diagramma di Balje per compressori

Il set di dati costruito con la procedura precedente consente di calcolare la velocità di rotazione, il diametro medio e l'efficienza dello stadio intermedio. E' ora possibile determinare i triangoli di velocità, assegnando il grado

---

di reazione e tenendo conto del rapporto di compressione assegnato. Inoltre, trattandosi di una macchina operatrice é necessario fare uso di un criterio che limiti la deflessione imposta nel rotore e nello statore (criterio di carico). Si suggerisce di utilizzare la correlazione proposta da Howell (riportata graficamente in Figura 3). Una volta che le velocità sono determinate, é possibile calcolare l'altezza di pala all'ingresso e all'uscita dello stadio.

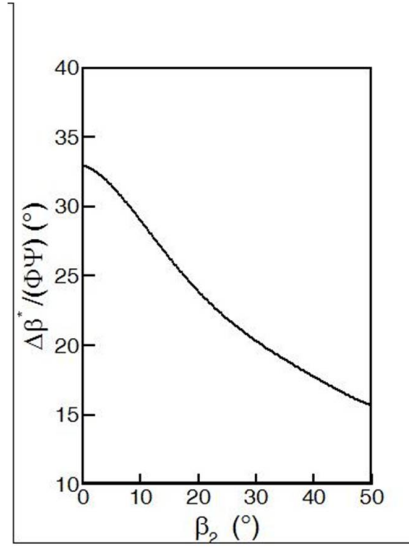


Figure 3: Correlazione di Howell.  $\Delta\beta$  é la deflessione cinematica e  $\beta_2$  é l'angolo del fluido all'uscita della schiera. Si noti che ci si riferisce al rotore, ma lo stesso diagramma é valido per gli ngoli assoluti a cavallo dello statore. I coefficienti  $\Phi$  e  $\Psi$  dipendono dal numero di Reynolds e dal numero di pale, e possono essere assunti pari ad 1 in via preliminare

Una volta che lo stadio intermedio é definito, si puó determinare la configurazione dell'intera macchina (o dell'intero gruppo se multi-albero) usando soluzioni progettuali di immediata applicazione: velocità meridiana costante lungo tutta la macchina e stadio ripetuto. Inoltre, il diametro medio di ogni gruppo puó essere assunto costante. Le prestazioni dei singoli stadi possono essere determinate valutando la velocità specifica stadio per stadio, e usando i diagrammi statistici. Si potrà quindi valutare il rapporto di compressione di ogni stadio (che varia avendo scelto di mantenere il lavoro costante), e in definitiva calcolare il numero di stadi in modo da garantire il valore di progetto del rapporto di compressione. Da questo si potrà infine verificare il

---

soddisfacimento del vincolo sull'altezza di pala lungo tutto lo sviluppo della macchina.

### Palettatura

La seconda parte del progetto riguarda lo studio del rotore del primo stadio, valutando in primo luogo l'evoluzione radiale dei triangoli di velocità ed in secondo luogo dimensionando la palettatura (almeno per una sezione, per esempio a midspan).

Relativamente al calcolo degli effetti radiali, si suggerisce di utilizzare una soluzione a vortice libero, ovvero una soluzione per la quale il prodotto  $r \times V_t = \text{costante} \rightarrow V_t(r) = \text{cost}/r$ . Tale soluzione garantisce lavoro uniforme lungo l'altezza di pala (e dunque salto entalpico totale uniforme); inoltre, si dimostra che, in ipotesi isentropiche, la soluzione a vortice libero garantisce  $V_m(r) = \text{cost}$ . Utilizzando come soluzione di riferimento quella alla mezzzeria (già nota dal calcolo dello stadio intermedio), si può procedere alla determinazione dei triangoli lungo l'intera altezza di pala (facendo attenzione alla configurazione dei triangoli nelle sezioni estreme di apice e base della pala).

Il calcolo dei profili (da fare almeno nella sezione di mezzzeria del rotore) è ottenibile assegnando un valore ragionevole per la solidità  $\sigma$  della schiera, definita come rapporto tra la corda del profilo e il passo angolare (si ricorda che il passo angolare è strettamente connesso al numero di pale). In prima approssimazione si può assegnare  $\sigma = 1$ . Dalla solidity e dai triangoli di velocità è possibile dedurre i valori di angolo di incidenza e angolo di deviazione utilizzando la procedura NACA (correlazioni di Lieblein) e, dunque, determinare lo scostamento tra angoli cinematici ed angoli geometrici. Noti gli angoli geometrici si selezionerà il profilo NACA idoneo per ottenere il triangolo di velocità desiderato.