



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

DIEF

Dipartimento di
Ingegneria Industriale

XXXV Ciclo di Dottorato

Energie e Tecnologie Industriali ed Ambientali Innovative

**Design e studio aerodinamico di stadi
di Turbo-Expander per applicazioni
industriali**

Candidato:

Ing. Fabrizio Lottini

Tutore:

Prof. Andrea Arnone

Co-tutore:

Prof. Michele Marconcini

Anno I - 07/10/2020

Progetto di Ricerca

Design e studio aerodinamico di stadi di turbine radiali per Turbo-Expander

Obiettivi

Definire una procedura automatica per il design del flow-path e dei profili delle pale per stadi di Turbo-Expander; studiare l'aerodinamica dello stadio sia con strumenti 1D, che attraverso campagne CFD dedicate (steady, unsteady, gas reale)

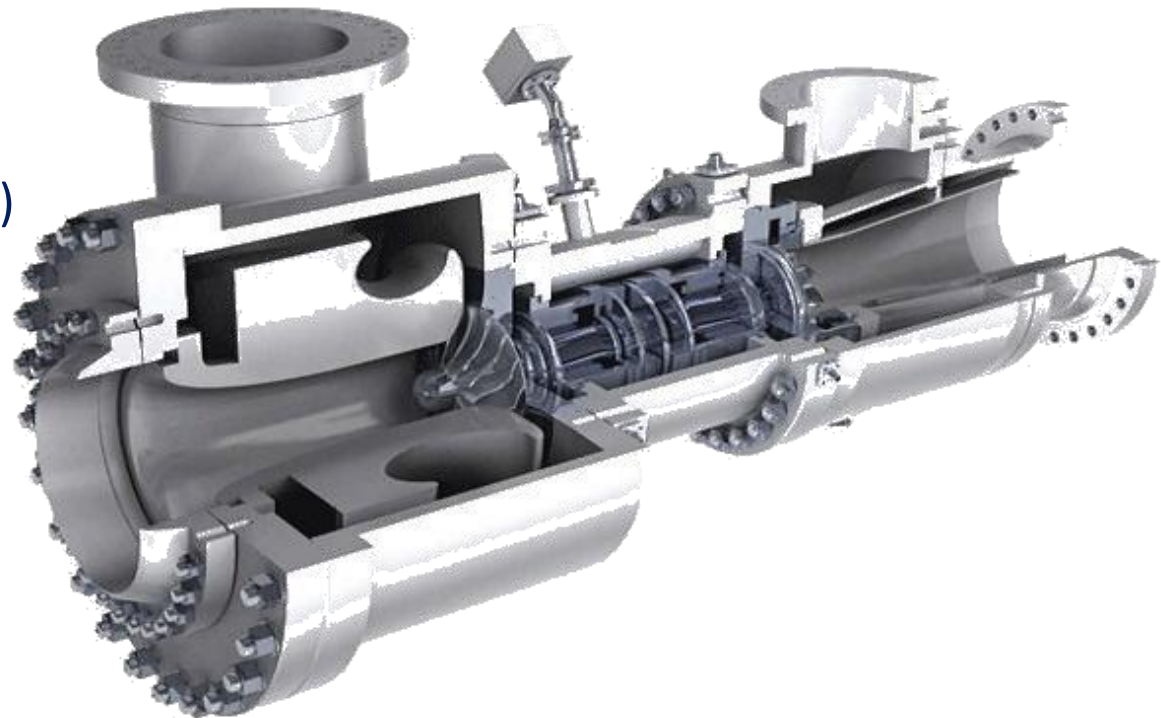
Aspetti da affrontare

- Automazione del processo di progettazione
- Standardizzazione di regole di progettazione per famiglie di Turbo-Expander
- Setup calcolo CFD (RANS/URANS, PG/RG)
- Previsione curve di funzionamento
- Ottimizzazione della geometria al design

Introduzione

Applicazioni:

- Purificazione del gas (Expander-Compressor)
- Refrigerazione (LNG, BOG)
- Energy storage
- Generazione di Potenza (Expander-Generator), *waste heat recovery*:
 - Impianti geotermici
 - ORC
 - PLD



Strumenti e metodi

- Linguaggio di programmazione *Fortran*
- Codice *TRAF* solutore utilizzato per i calcoli CFD
 - Calcolo steady RANS gas perfetto per valutazioni preliminari
 - Calcolo steady RANS gas reale

Obiettivi

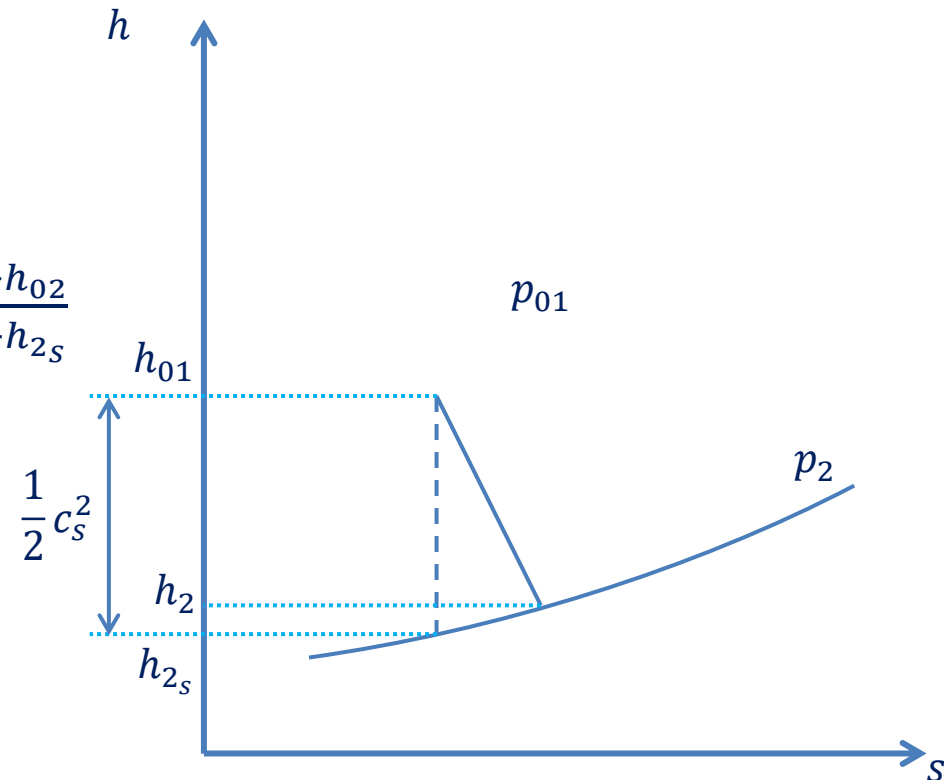
- Generare la geometria della ruota
- Generare la geometria degli ugelli
- Automatizzare il processo di design
- Verificare le prestazioni dello stadio attraverso calcoli CFD (design e off-design)

Attività 1^o anno di dottorato

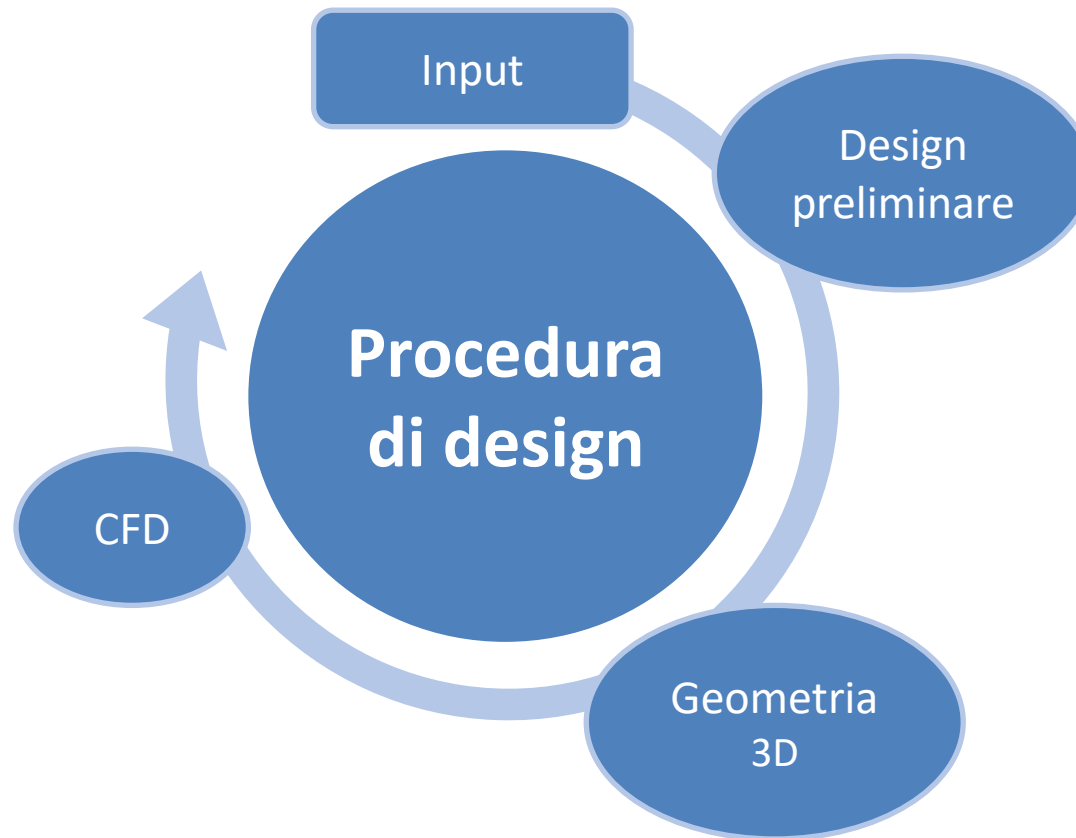
- Ricerca bibliografica con particolare focus su approcci di design di stadi di turbine radiali
- Definizione di un metodo di parametrizzazione per la geometria della ruota
- Messa a punto di un tool (*Fortran*) per la definizione della geometria della ruota, assegnato un set di input tradizionale
- Messa a punto di un tool (*Fortran*) per la definizione della geometria delle pale statoriche
- Studio aerodinamico dello stadio generato per validare la geometria appena creata:
 - Gas perfetto

Principali parametri degli Expander

- **rapporto u_1/c_s :** $c_s = 2\sqrt{h_{01} - h_{2s}}$ spouting velocity
- **coefficiente di flusso:** $\phi_{02} = \frac{4 \cdot Q_{02}}{\pi \cdot u_1 \cdot D_1^2}$
- **coefficiente di carico:** $\tau = \frac{h_{01} - h_{02}}{u_1^2}$
- **efficienza totale a statica:** $\eta_{TS} = \frac{h_{01} - h_{02}}{h_{01} - h_{2s}}$



Procedura di design



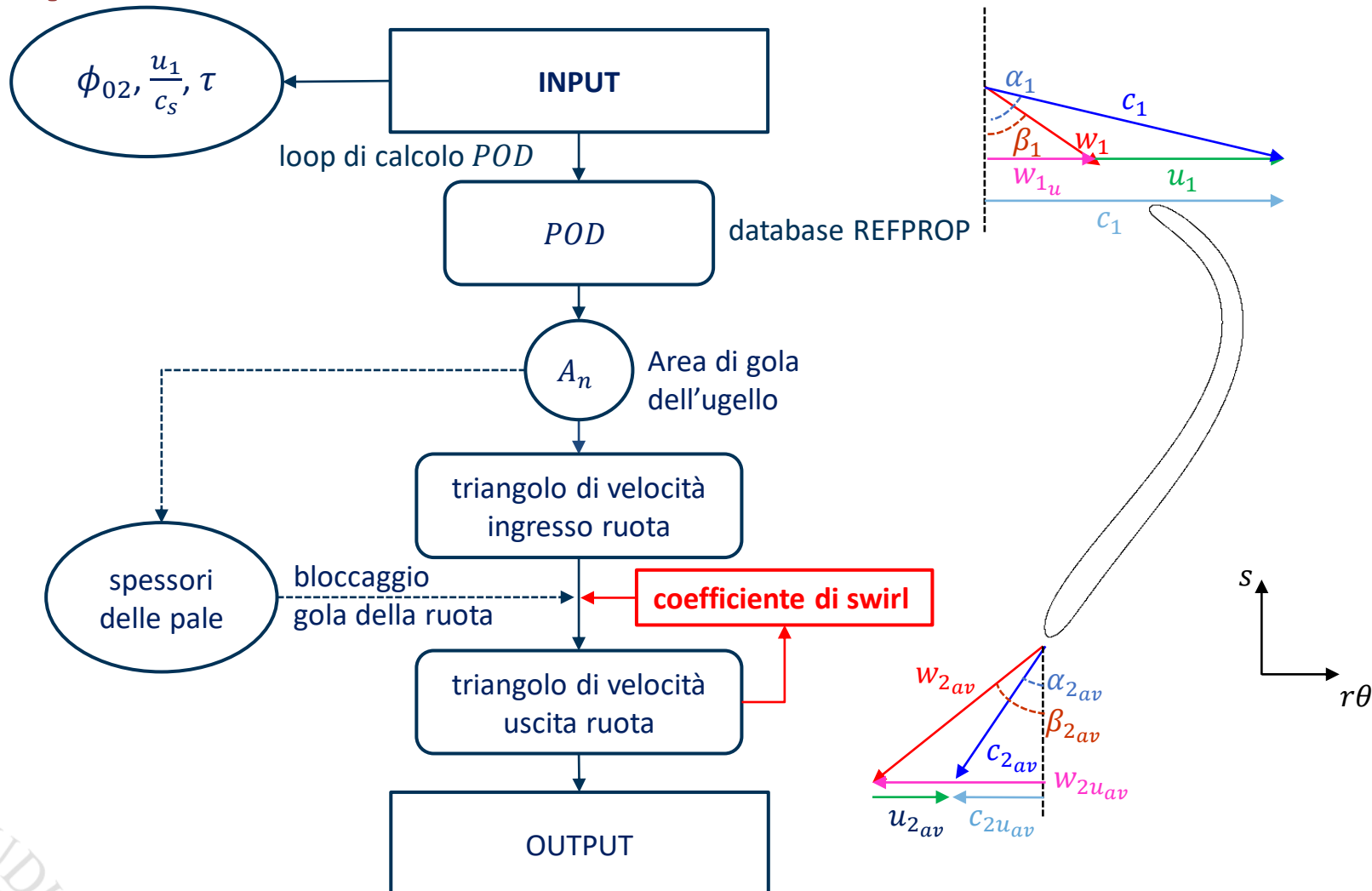
Design preliminare della ruota

Il design preliminare avviene a valle della selezione della macchina (D, η_{TS}, RPM)

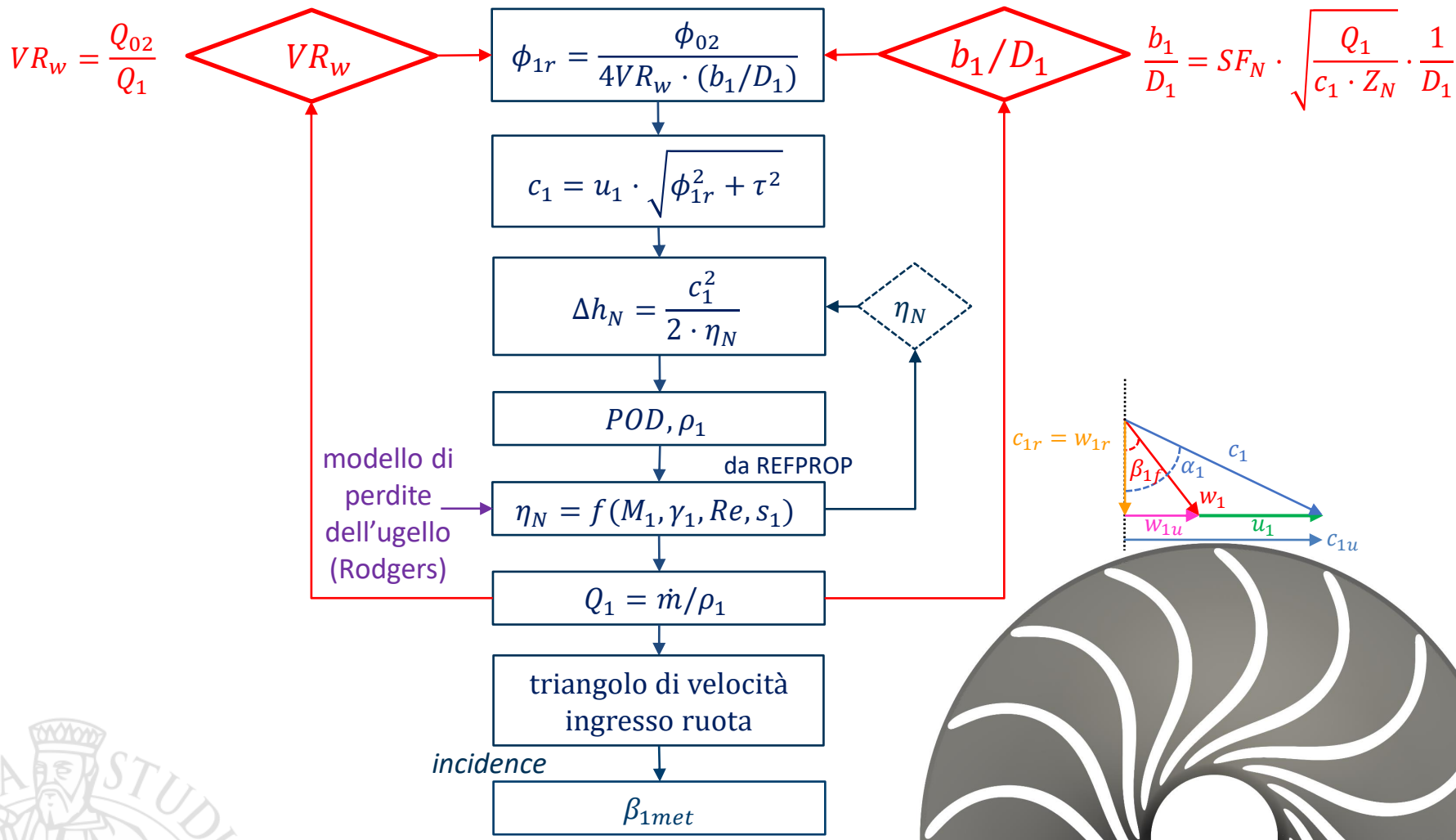
Pre-des input:

- pressione e temperatura totali in ingresso: p_{00}, T_{00}
- pressione alla flangia di uscita: p_{02}
- efficienza totale a statica: η_{TS}
- diametro esterno della ruota: D_1
- velocità di rotazione: RPM
- portata massica: \dot{m}
- Gas
- Scelte progettuali (incidenza, coefficiente di swirl, numero di pale...)

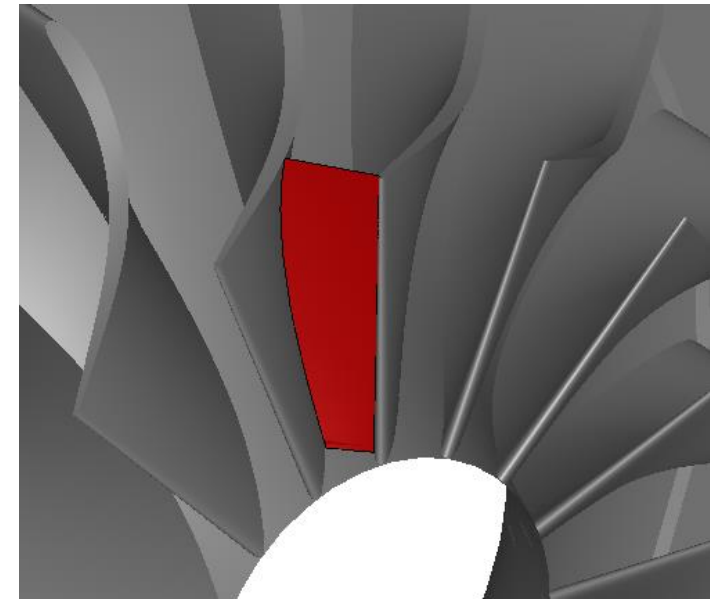
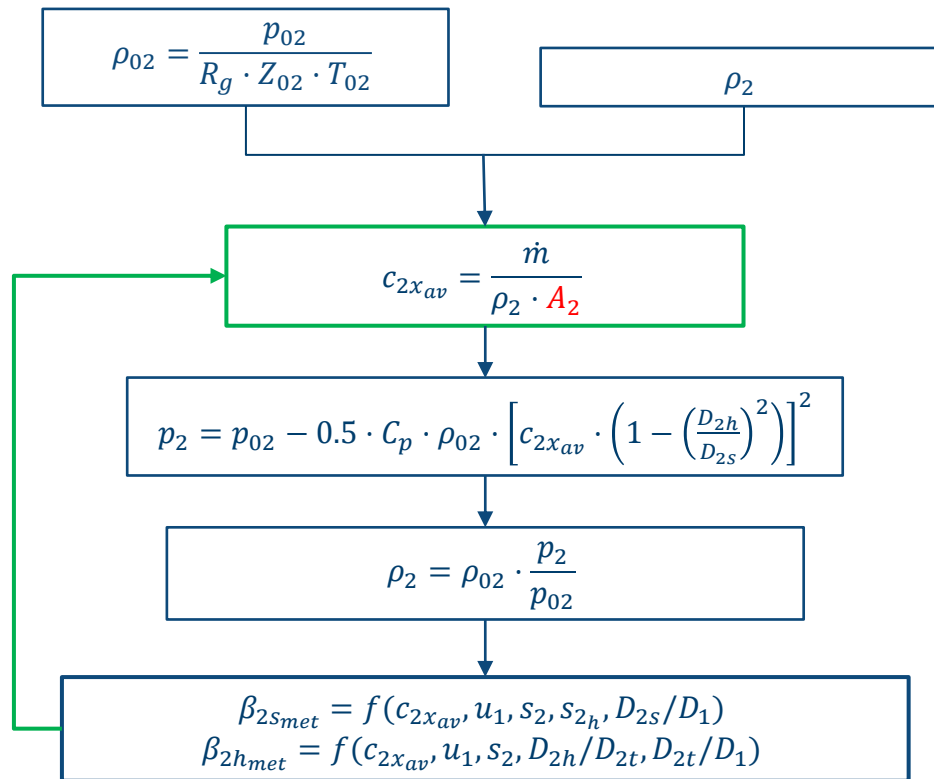
Design preliminare della ruota



Loop di calcolo della POD



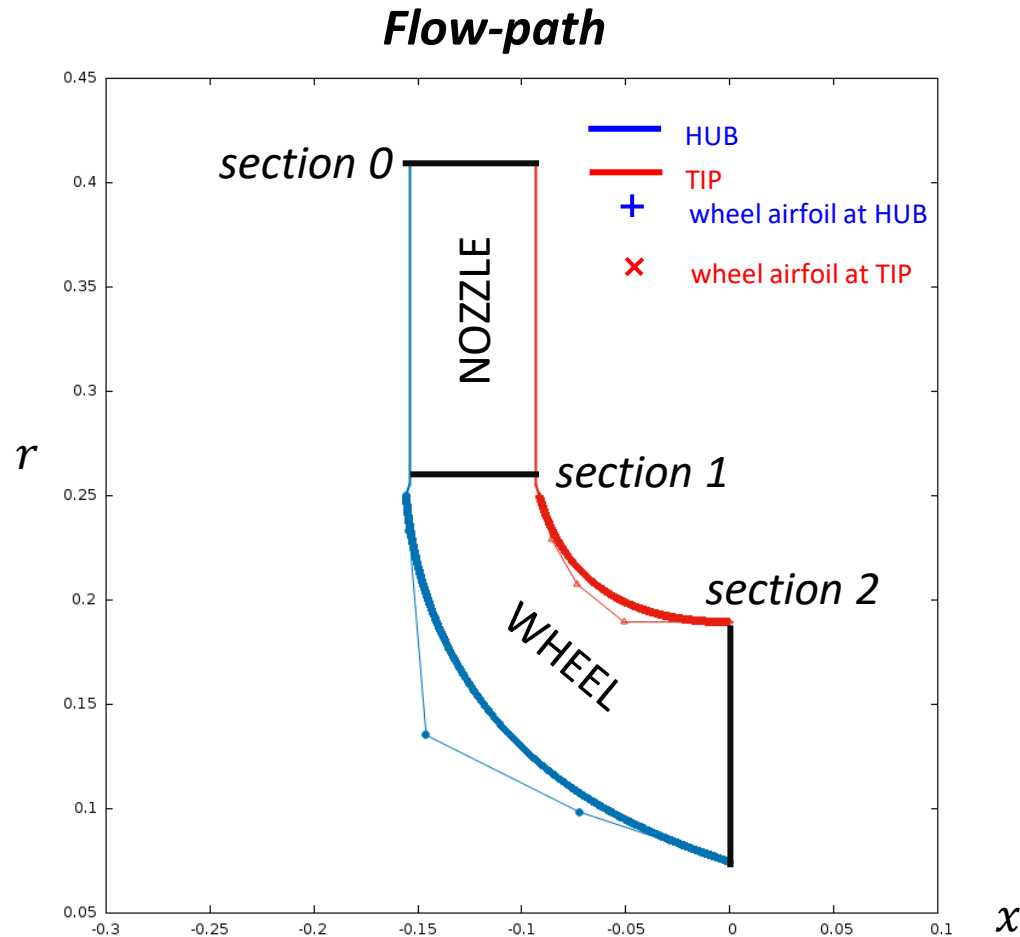
Triangolo di velocità uscita ruota



$$A_2 = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{2t}^2 - D_{2h}^2) - \frac{Z_{lb}}{4} \cdot (D_{2t} - D_{2h}) \cdot \left(\frac{t_{2t}}{\cos \beta_{2t_{met}}} + \frac{t_{2h}}{\cos \beta_{2h_{met}}} \right)$$

Design preliminare della ruota

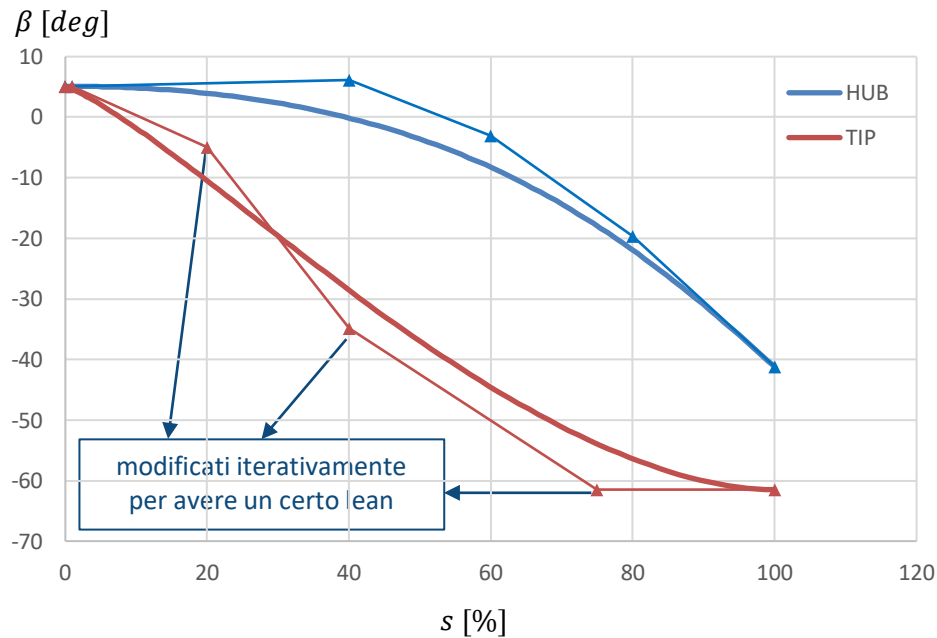
- Output



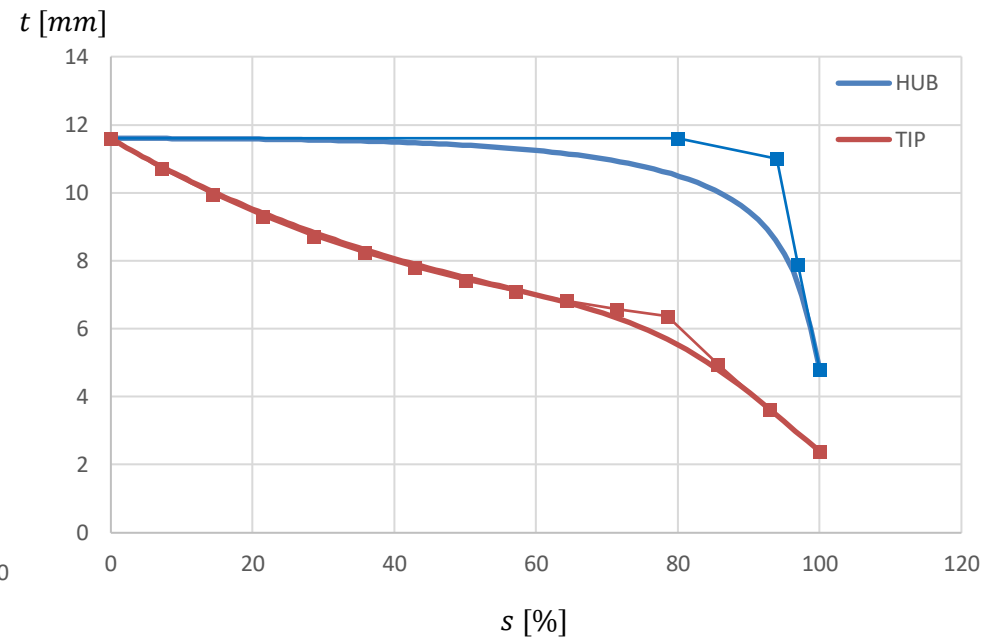
Design preliminare della ruota

- Output

Metal angle distribution

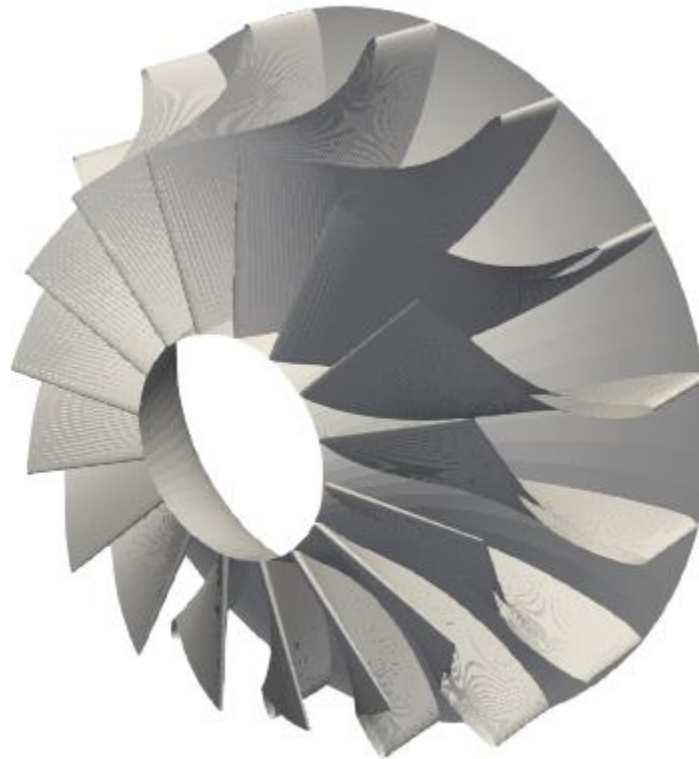


Thickness distribution



Design preliminare della ruota

- **Output**



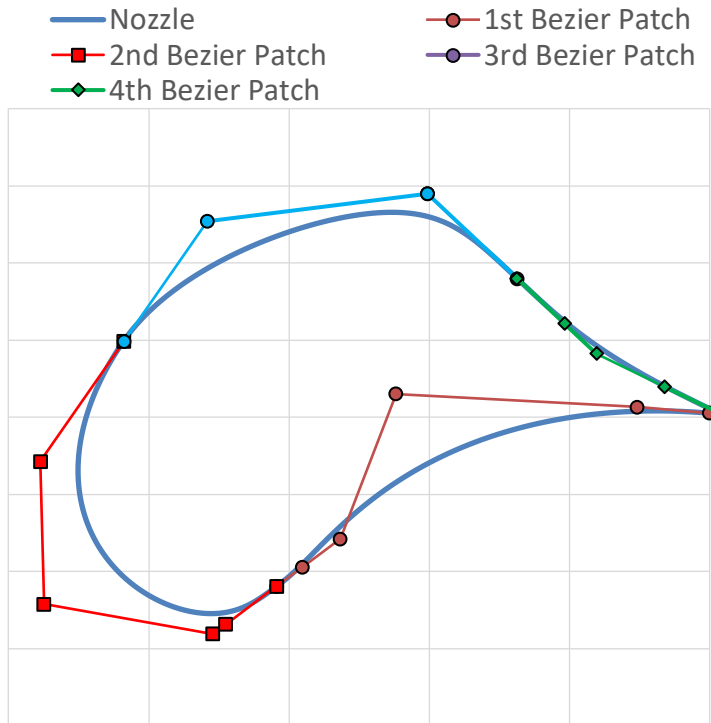
Design degli ugelli

Una volta generata la ruota si può procedere a disegnare i profili degli ugelli

Input:

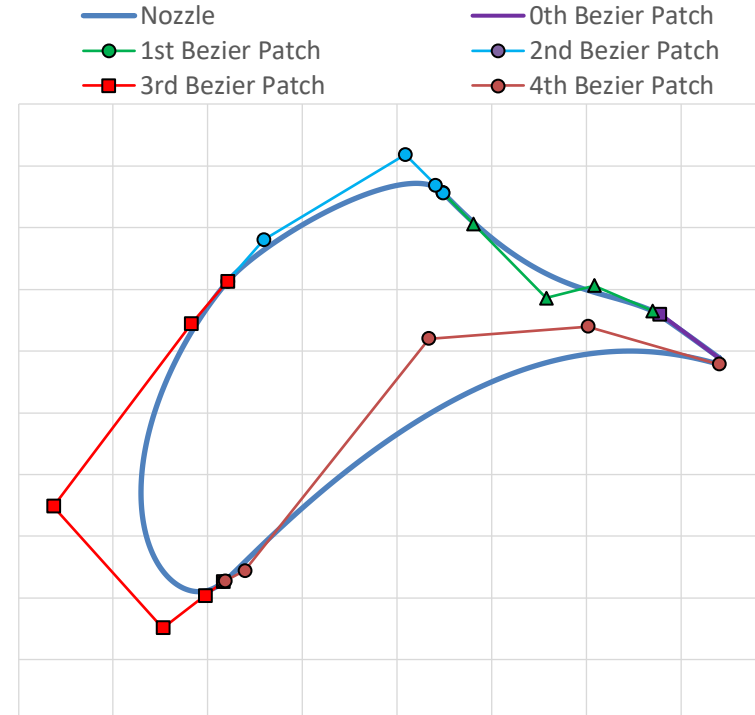
- Area di gola degli ugelli
- Altezza del flow-path in ingresso alla ruota b_1
- Numero di ugelli
- Diametro della ruota: D_1
- Raggio minimo per la posizione degli ugelli
- Scelte di progetto (posizione dei poli)

Design degli ugelli



L'ugello **semplicemente convergente** è costituito da 4 segmenti di spline (C2):

- Il 1st e 2nd segmento sono spline di 4th grado
- Il 3rd e 4th segmento sono spline di 5th grado



L'ugello **convergente-divergente** è costituito da 4 segmenti di spline (C2):

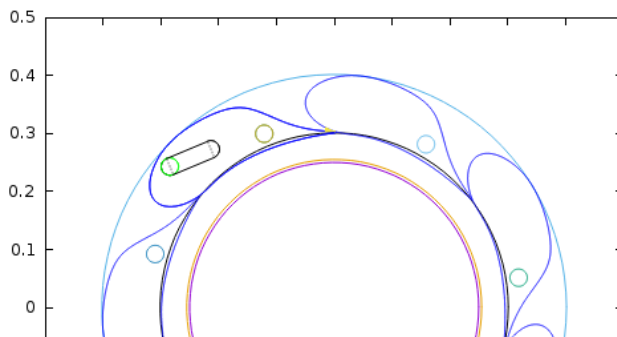
- Il 0th, 1st e 2nd segmento sono spline di 4th grado
- Il 3rd e 4th segmento sono spline di 5th grado

Design degli ugelli

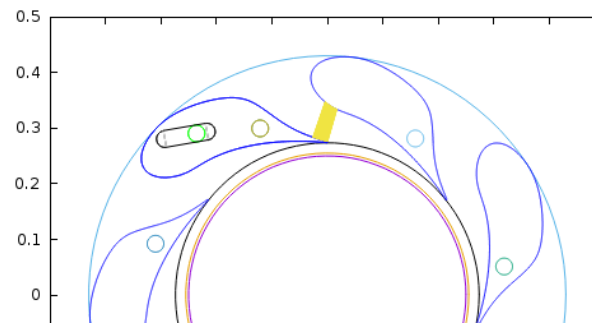
Lo strumento calcola automaticamente:

- l'angolo di ugello tutto aperto
- l'angolo di ugello tutto chiuso
- la posizione degli ugelli in modo che quando l'ugello è totalmente aperto sia rispettato un gap minimo tra ugello e ruota

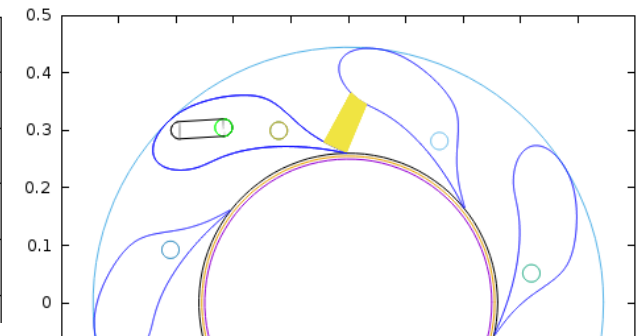
chiuso



design

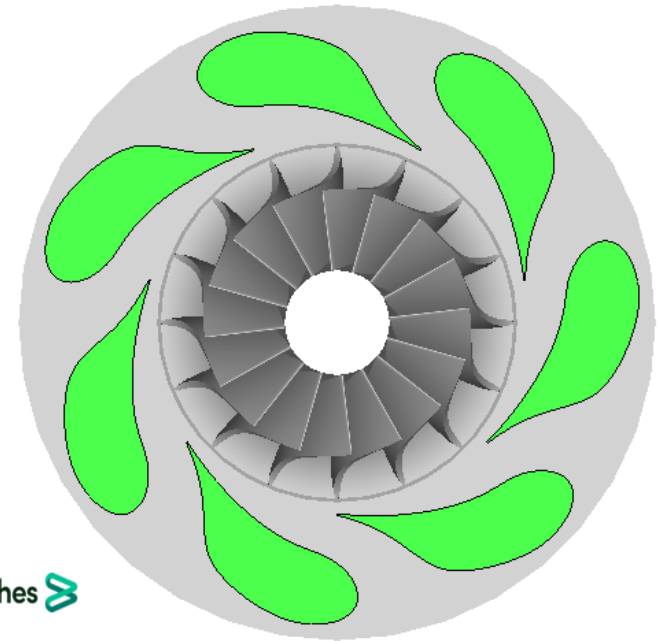


aperto



Procedura di design:

- rapida
- robusta
- automatica
- check immediato della geometria generata
- integrata con la CFD e con la catena di design meccanico



wheel.py (SALOME)

Wheel.App@503119392
Select Project or start new one
HIRTH APP
WHEEL APP
THRUST APP
ROT APP
REPORT APP
Baker Hughes

Select input options

Select WorkID/SSO
ProjectID (-WorkID@SSO>)

Wheel Option: 0-closed, 1-open
0 - closed

Wheel blades
16

Splitter Option (open wheel only): 0-no, 1-yes
0

Enable additional parameters
 Advanced Panel (for advanced Users)

Input TES WorkID number
TES-00330
[DOWNLOAD TES](#)

Select Stiffness from given range
0.27 0.297 0.30
Selected value of stiffness: 0.297

Nozzle blades
7

Splitter position
0.4 0.5 0.6 0.7 0.8

Wrong JSON file uploaded - use TES output JSON

Start with selection of thermo/mech input

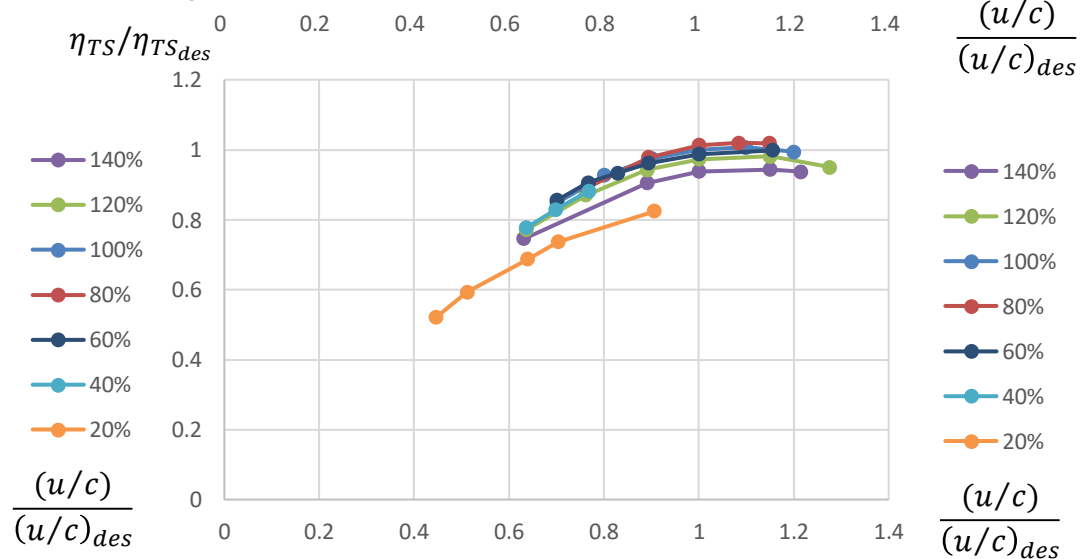
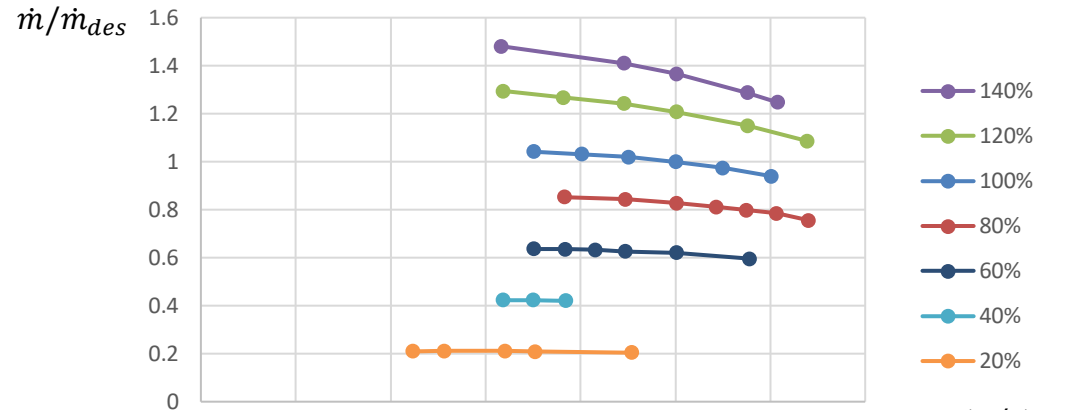
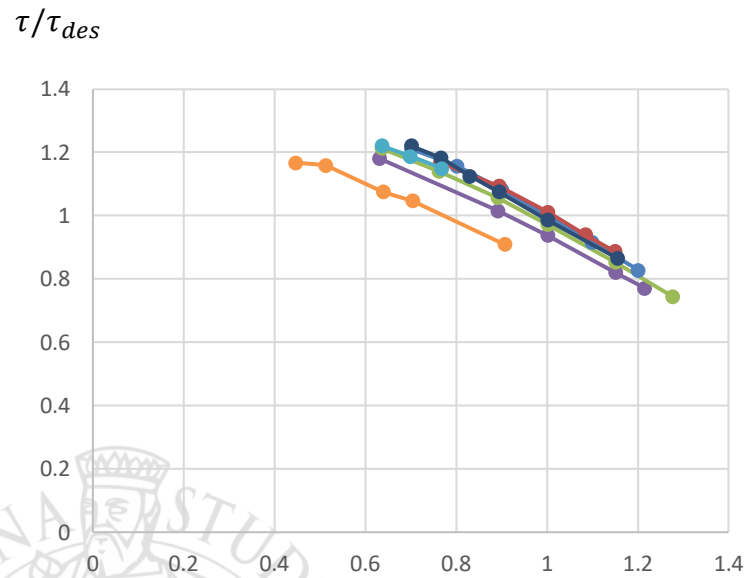
Advanced Panel Options

Ogiva: 0-no, 1-yes 0	Eye diameter scale 1	Axial span scale 1	Internal(?) width scale 1	T1H Scale 1	T1S Scale 1	T2H Scale 1
T2S Scale 1	Ak 1.05	bN/b1 1.055	Wheel Throat block 0.05	Nozzle shape factor 1	Incidence correction 0.6	SF correction -0.04
Exit radius 0.95	No. of points 1000	CLE 0	MCL 0	Exit lean 0	BA hub flag 1	BAh 10

Risultati calcoli stazionari multischiera

Analisi CFD per validare la geometria generata (design e off-design)

- Mesh H (~8 M di celle)
- Fillet
- Modello di turbolenza $k - \omega$
- Gas perfetto



Conclusioni

- Attività primo anno:
 - Ricerca bibliografica focalizzata sul design di turbine radiali
 - Realizzazione tool per generare geometria stadio
 - Calcoli CFD stazionari (PG/RG) per validare la geometria

- Proposta di attività per il secondo anno:
 - Proseguimento ricerca bibliografica focalizzata su tool 1D
 - Realizzazione tool 1D per studiare le prestazioni della geometria a u/c estremi
 - Confronti tool 1D con CFD
 - Standardizzazione regole di design per famiglie di macchine
 - Calcoli gas reale

Bibliografia

- [1] Biliotti, D., Scotti Del Greco, A., Cangioli, F., & Iurisci, G. (2019, June). A New Approach to Performance Mapping of Radial Inflow Turbines. In *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air* (Vol. 58561, p. V02BT44A019). American Society of Mechanical Engineers.
- [2] Bloch, H. P., & Soares, C. (2001). *Turboexpanders and process applications*. Elsevier.
- [3] Fiaschi, Daniele, Giampaolo Manfrida, and Francesco Maraschiello. "Design and performance prediction of radial ORC turboexpanders." *Applied Energy* 138 (2015): 517-532.
- [4] Glassman, Arthur J. "Computer program for design analysis of radial-inflow turbines." (1976).
- [5] Marconcini, M., Rubechini, F., Arnone, A., Del Greco, A. S., & Biagi, R. (2012, June). Aerodynamic investigation of a high pressure ratio turbo-expander for organic rankine cycle applications. In *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air* (Vol. 44748, pp. 847-856). American Society of Mechanical Engineers.
- [6] Meroni, A., Robertson, M., Martinez-Botas, R., & Haglind, F. (2018). A methodology for the preliminary design and performance prediction of high-pressure ratio radial-inflow turbines. *Energy*, 164, 1062-1078.
- [7] Moustapha, H., Zelesky, M. F., Baines, N. C., & Japikse, D. (2003). *Axial and radial turbines* (Vol. 2). White River Junction, VT: Concepts NREC.
- [8] Persico, G., and M. Pini. "Fluid dynamic design of Organic Rankine Cycle turbines." *Organic Rankine Cycle (ORC) Power Systems*. Woodhead Publishing, 2017. 253-297.
- [9] Riegels, F. W., & RANDALL, D. (1961). *Aerodynamische Profile. Aerofoil Sections. Results from Wind-tunnel Investigations. Theoretical Foundations...* Translated... by DG Randall. Butterworths.
- [10] Rodgers, C. (1987). Mainline performance prediction for radial inflow turbines. *Von Karman Inst. for Fluid Dynamics, Small High Pressure Ratio Turbines* 29 p(SEE N 88-14364 06-37).
- [11] Rubechini, F., Marconcini, M., Arnone, A., Scotti Del Greco, A., & Biagi, R. (2013). Special challenges in the computational fluid dynamics modeling of transonic turbo-expanders. *Journal of engineering for gas turbines and power*, 135(10).

Bibliografia

- [12] Sauret, E. (2012, November). Open design of high pressure ratio radial-inflow turbine for academic validation. In ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (Vol. 45233, pp. 3183-3197). American Society of Mechanical Engineers.
- [13] Wasserbauer, C. A., & Glassman, A. J. (1975). Fortran program for predicting off-design performance of radial-inflow turbines.
- [14] Whitfield, A. (1989, June). The preliminary design of radial inflow turbines. In Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air (Vol. 79139, p. V001T01A049). American Society of Mechanical Engineers.



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

DIEF

Dipartimento di
Ingegneria Industriale

XXXV Ciclo di Dottorato

Energie e Tecnologie Industriali ed Ambientali Innovative

**Design e studio aerodinamico di stadi
di Turbo-Expander per applicazioni
industriali**

Candidato:

Ing. Fabrizio Lottini

Tutore:

Prof. Andrea Arnone

Co-tutore:

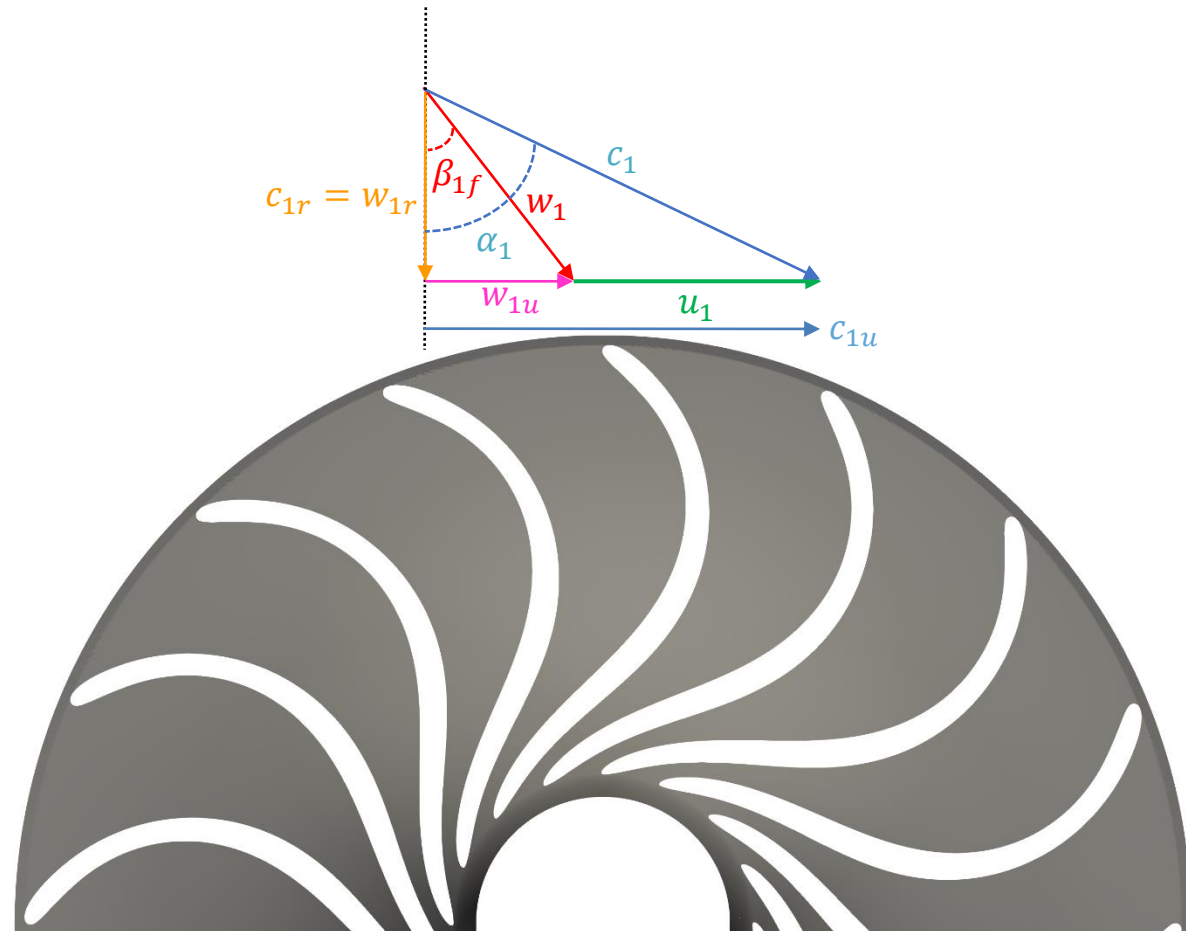
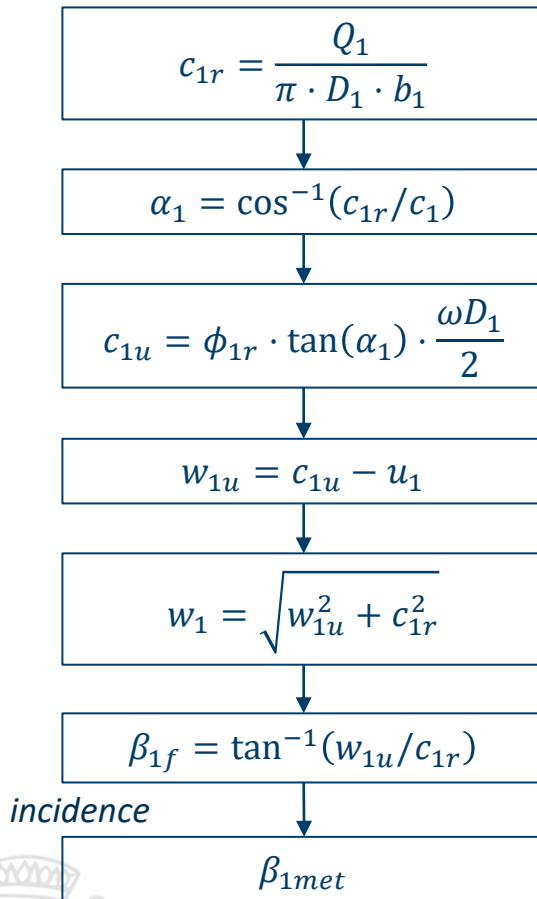
Prof. Michele Marconcini

Anno I – 07/10/2020



BACKUP SLIDES

Triangolo di velocità ingresso ruota



Triangolo di velocità uscita ruota

$$c_{2u_{av}} = s_2 \cdot u_1^2 / u_{2av}$$

$$\rho_{02} = \frac{p_{02}}{R_g \cdot Z_{02} \cdot T_{02}}$$

$$\rho_2$$

$$\dot{m}$$

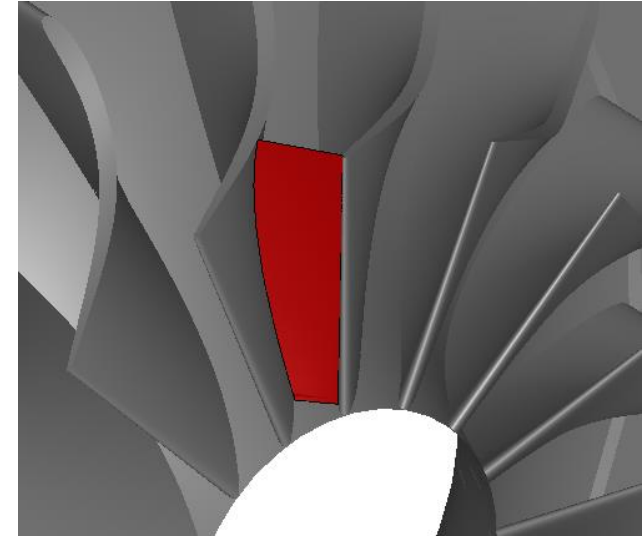
$$c_{2x_{av}} = \frac{\dot{m}}{\rho_2 \left[\frac{\pi}{4} \cdot (D_{2t}^2 - D_{2h}^2) - \frac{Z_{lb}}{4} \cdot (D_{2t} - D_{2h}) \cdot \left(\frac{t_{2t}}{\cos \beta_{2t_{met}}} + \frac{t_{2h}}{\cos \beta_{2h_{met}}} \right) \right]}$$

$$p_2 = p_{02} - 0.5 \cdot C_p \cdot \rho_{02} \cdot \left[c_{2x_{av}} \cdot \left(1 - \left(\frac{D_{2h}}{D_{2s}} \right)^2 \right) \right]^2$$

$$\rho_2 = \rho_{02} \cdot \frac{p_2}{p_{02}}$$

$$\beta_{2s_{met}} = f(c_{2x_{av}}, u_1, s_2, s_{2h}, D_{2s}/D_1)$$

$$\beta_{2h_{met}} = f(c_{2x_{av}}, u_1, s_2, D_{2h}/D_{2t}, D_{2t}/D_1)$$



- $u_{2av} = \frac{u_1}{D_1} \cdot D_{2av}$
- 02 condizioni alla flangia
- t_{2t} spessore pala al tip in uscita
- t_{2h} spessore pala al tip in uscita
- s_2 coefficiente di swirl
- s_{2h} coefficiente di swirl all'hub at hub