



---

# Metodi numerici per l'analisi e la previsione delle prestazioni di turbomacchine a sviluppo radiale per applicazioni industriali

---

*Curriculum:*

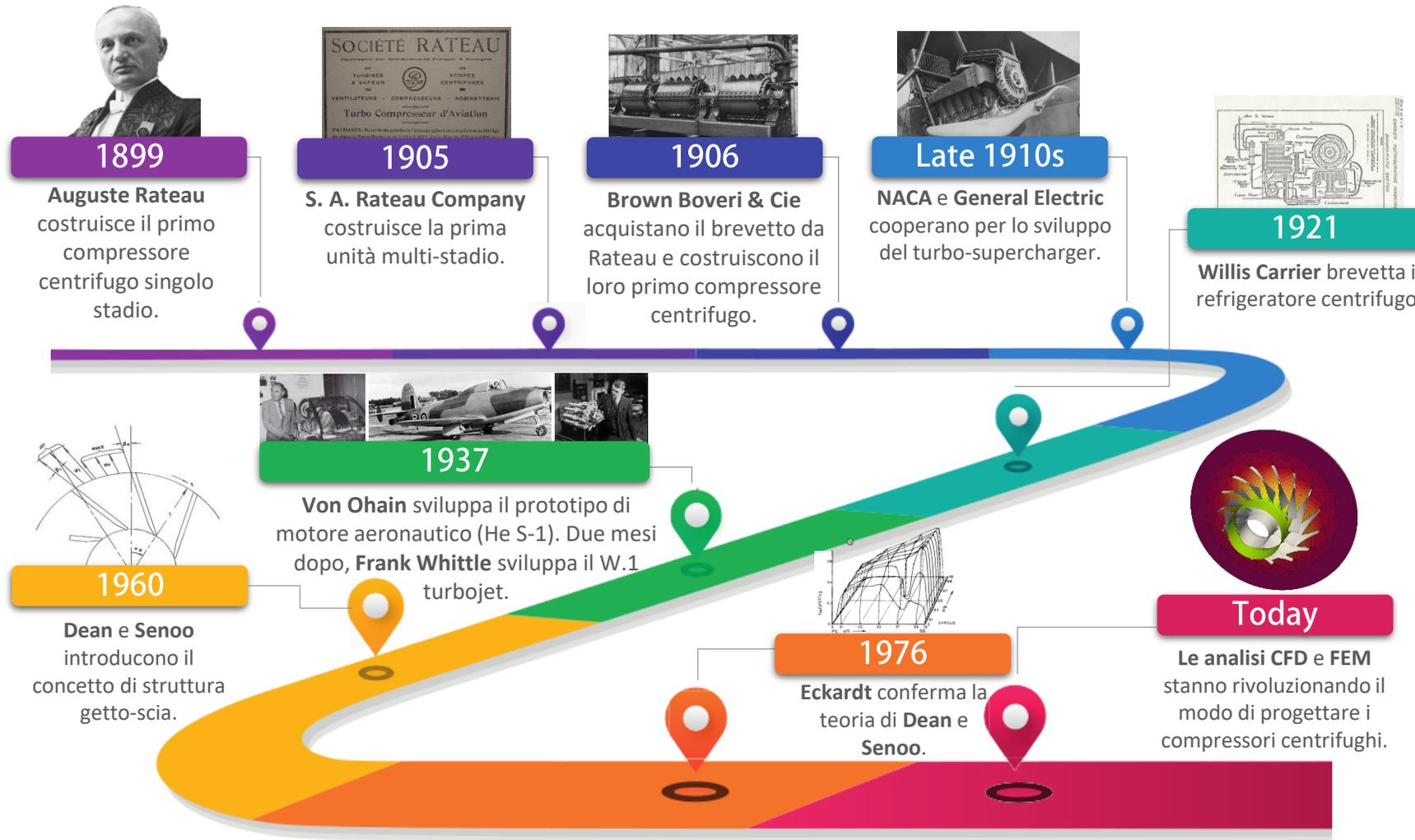
***Energetica e Tecnologie Industriali ed Ambientali Innovative***

***Relatore: Ing. Marco Bicchi***

***Ciclo: XXXV***

***Tutor: Prof. Andrea Arnone***

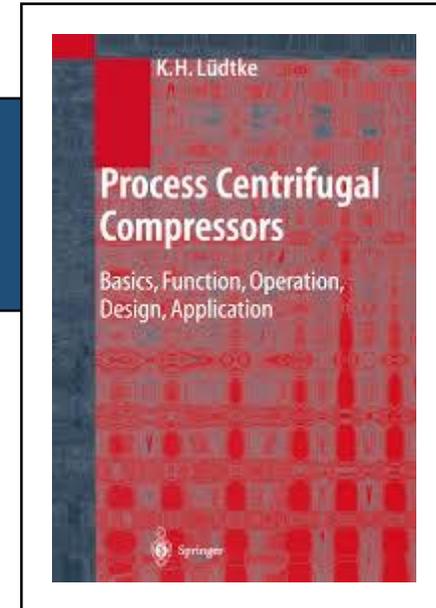
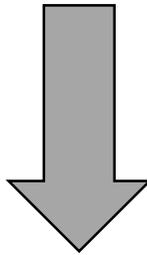
***Co-tutor: Prof. Michele Marconcini***



## Campi di applicazione del compressore centrifugo:

- turboexpander
- sistemi di sovralimentazione di motori
- sistemi di movimentazione di gas naturale
- raffinerie di petrolio
- impianti petrolchimici e chimici
- impianti di frazionamento dell'aria
- motori a getto
- unità ausiliarie di potenza
- cicli frigoriferi
- sistemi per la fornitura di aria compressa
- sistemi di pressurizzazione di aerei;
- estrattori di gas incondensabile
- altro

*“Compressor manufacturers do not invent the wheel anew from contract to contract but use instead a system of pre-engineered stages and impellers that have a more or less standardized geometry” [1].*



**Esistono approcci per la progettazione aerodinamica che prevedono l'utilizzo di famiglie pre-ingegnerizzate assieme a procedure di calcolo automatizzate?**

[1] LUDTKE, K. H., Process Centrifugal Compressors, Springer 2004.

## Identificazione

Articoli ottenuti ricercando in titolo, abstract e keywords “**centrifugal AND compressor\* AND industrial AND design**” sui principali database online (Scopus=329, Web of Science=140, Science Direct=16, IEEE=25)

510

Duplicati rimossi

179

## Screening

Articoli esaminati (titolo e/o abstract)

331

## Idoneità

Articoli ammissibili per lettura full-text

39

Articoli non consultabili in versione full-text

14

Articoli consultabili in versione full-text

25

## Inclusione

Articoli interessanti

15

Articoli rigettati

10

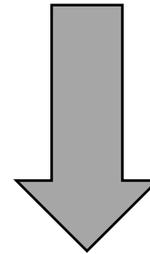
PRISMA Statement

In letteratura sono presenti molti metodi per il predesign di compressori centrifughi che utilizzano approcci semplificati. Tuttavia, sono pochi gli articoli che mostrano l'impatto sulla contrazione dei tempi di progettazione dell'utilizzo di famiglie pre-ingegnerizzate assieme ad analisi CFD automatizzate.



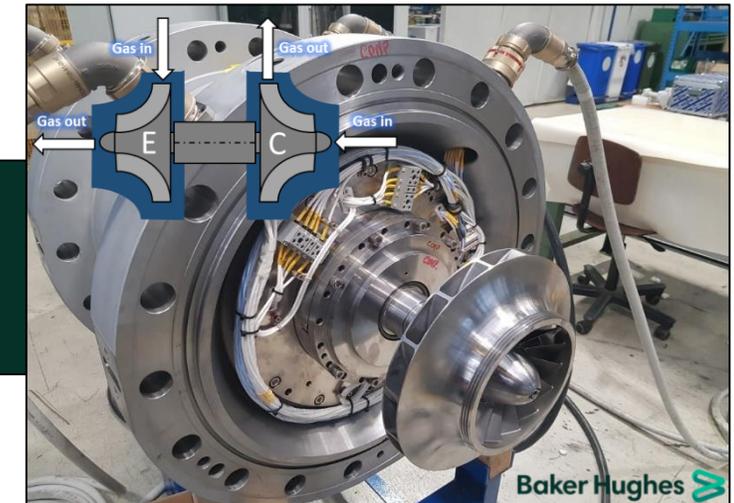
Sviluppo di uno strumento capace di:

1. **Fornire la geometria ad-hoc di un compressore centrifugo** (note l'esigenze del cliente in termini di  $\phi_{01}$ ,  $Mu_2$  e  $D_2$ );
  2. **Condurre in modo autonomo le analisi CFD** (con codice TRAF) per ottenere le curve di prestazione della macchina.
- Il *tool* aiuterà il designer, contraendo i tempi di progettazione preliminare, in favore di approfondimenti e ottimizzazioni successive.

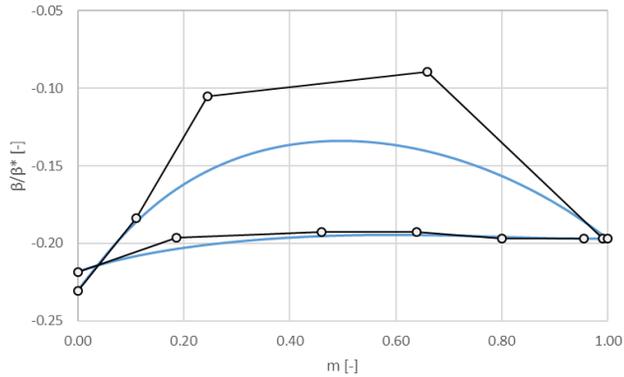


Collaborazione con Nuovo Pignone – Baker Hughes 

Progettazione di una nuova famiglia di giranti ad elevata efficienza per applicazioni di tipo *expander-compressor* da integrare come famiglia pre-ingegnerizzata all'interno del *tool* sviluppato.

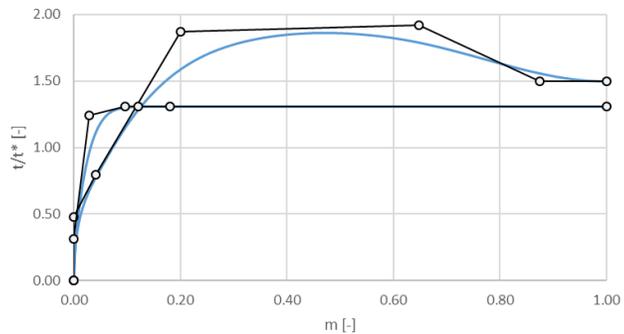


## Curve di Bézier del 5° ordine

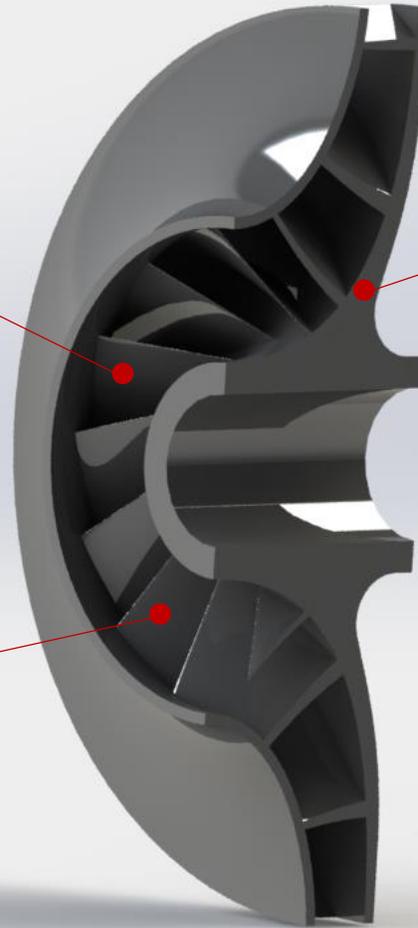


Distribuzione degli angoli di metallo delle pale (hub & shroud)

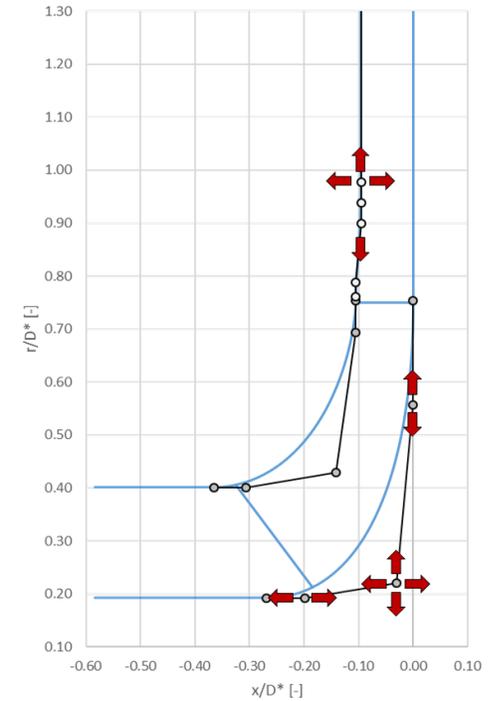
## Curve di Bézier del 6° ordine



Distribuzione degli spessori delle pale (hub & shroud)



## Curve di Bézier del 4° ordine

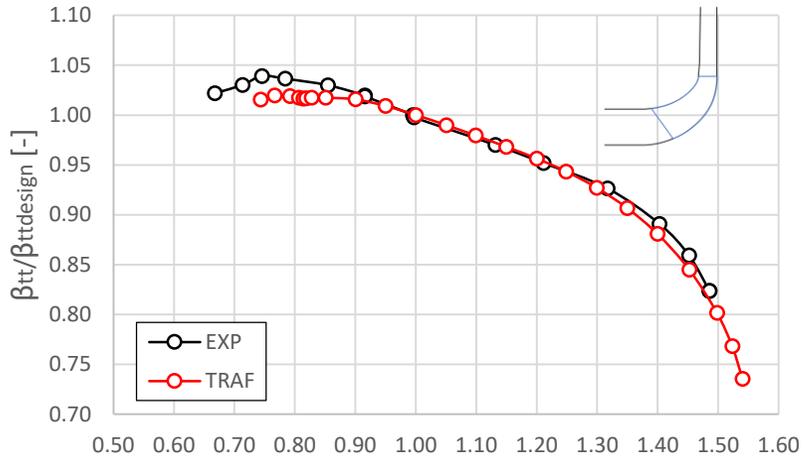


Distribuzione degli end-wall della girante con curve di Bezier del 4° (hub & shroud) in accordo con [2].

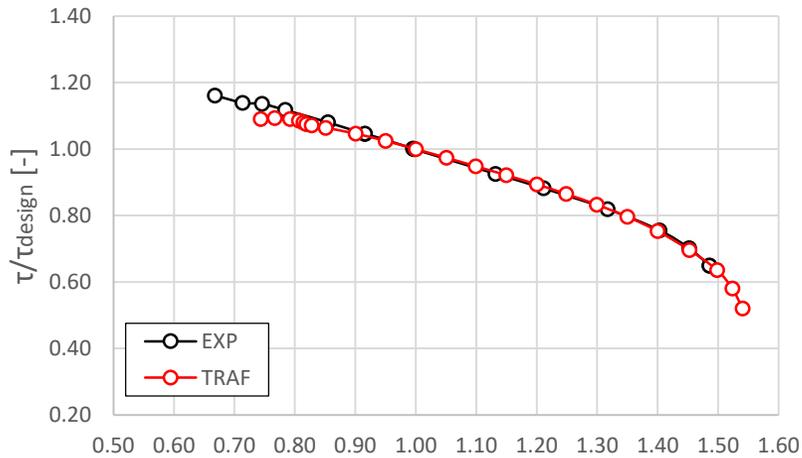
Distribuzione degli end-wall del diffusore liscio con curve di Bezier del 4° (hub & shroud)

[2] KIM, J. H., et al. Multi-objective optimization of a centrifugal compressor impeller through evolutionary algorithms. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2010, 224.5: 711-721.

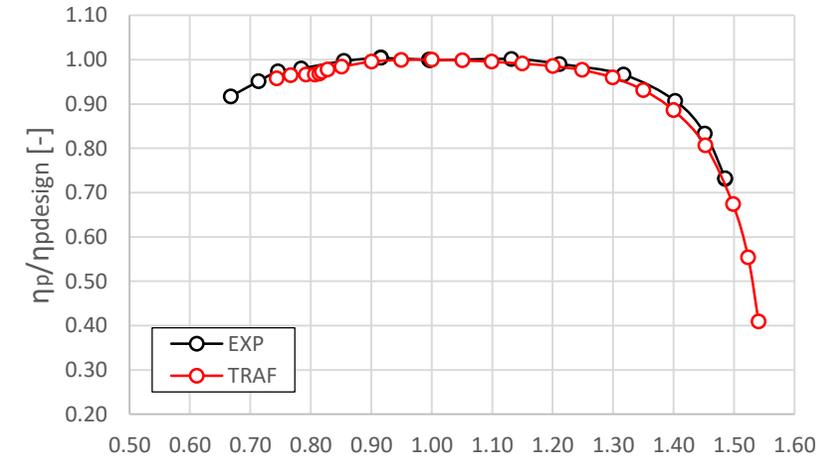
# Calibrazione dello strumento di calcolo



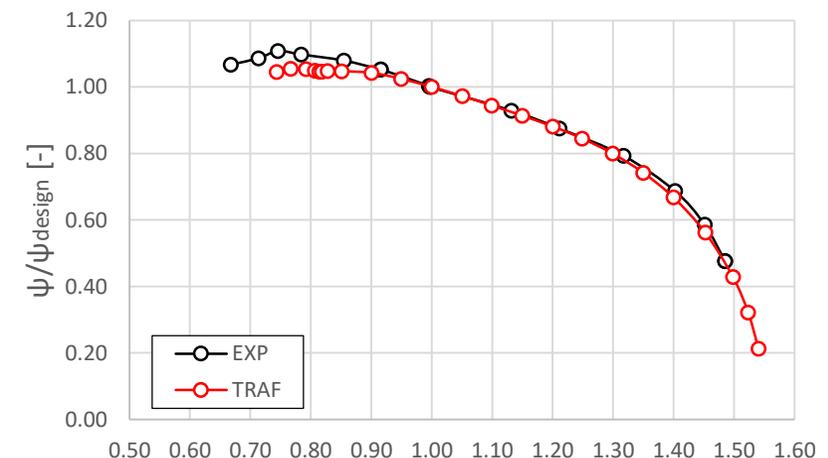
$\phi/\phi_{\text{design}} [-]$



$\phi/\phi_{\text{design}} [-]$



$\phi/\phi_{\text{design}} [-]$

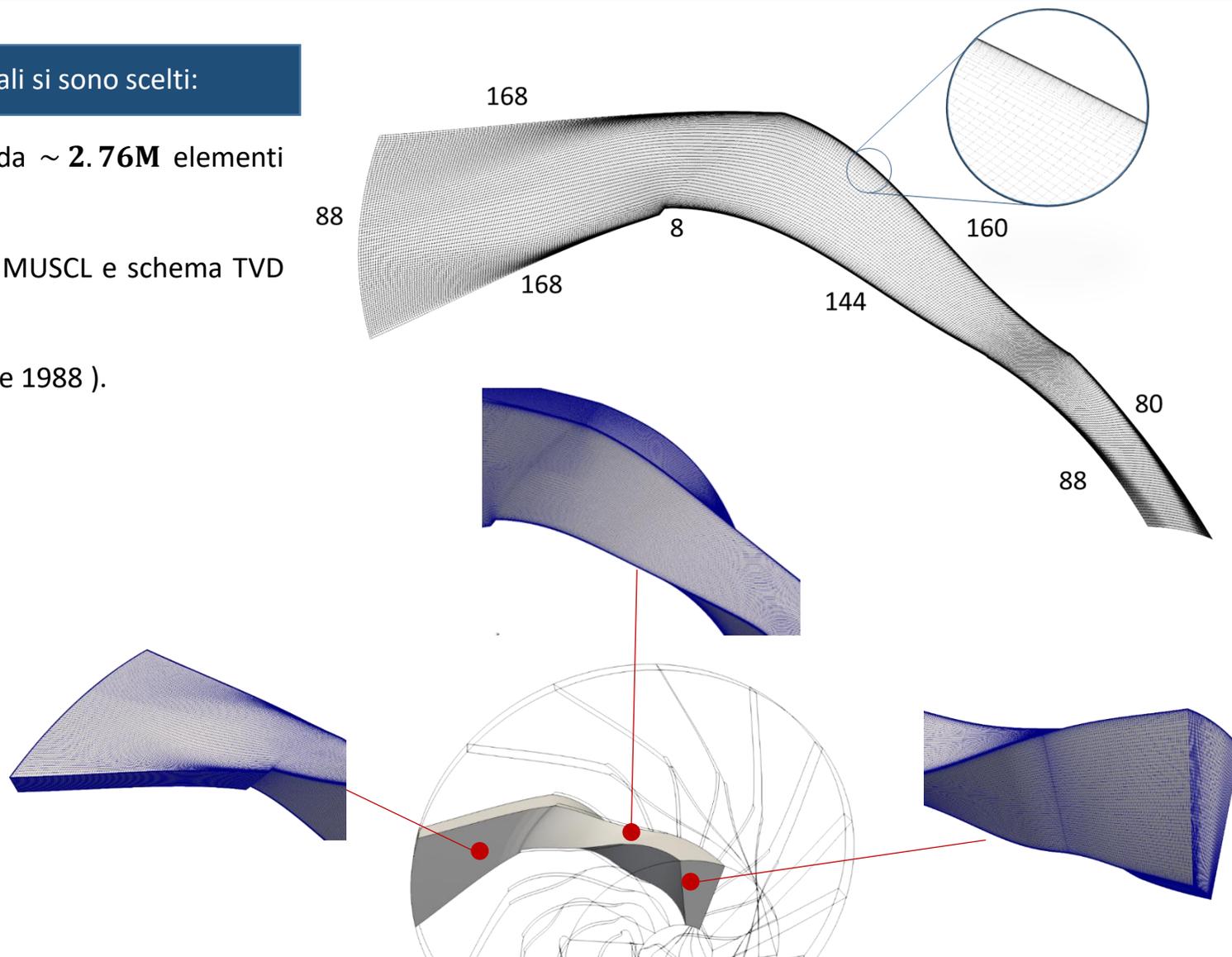
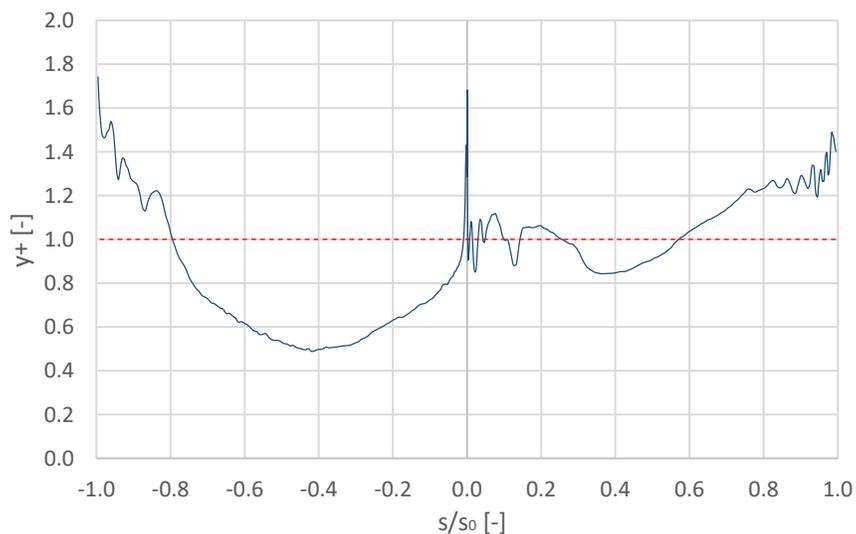


$\phi/\phi_{\text{design}} [-]$

Confronto tra dati sperimentali (Nuovo Pignone) e risultati numerici di una famiglia di giranti per applicazioni multistadio (stato dell'arte).

Dallo studio di *mesh sensitivity* e il confronto con dati sperimentali si sono scelti:

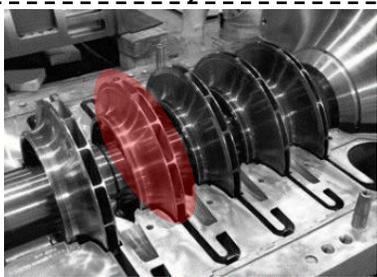
- Discretizzazione spaziale con griglia strutturata di tipo H da ~ **2.76M** elementi ( $y^+ \cong 1$  ottenuto con infittimento vicino alle pareti);
- **Metodo upwind** alla Roe del 2° ordine con estrapolazione MUSCL e schema TVD per la discretizzazione dei flussi convettivi;
- Modello di turbolenza **k- $\omega$  di Wilcox**, high-Reynolds (versione 1988 ).



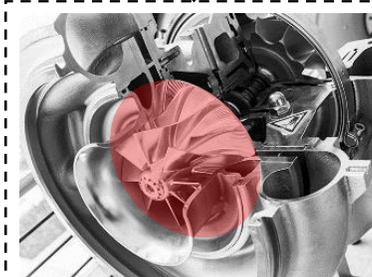
## Modifica rapporto D1h/D2 girante

Riduzione della rigidità della girante per ottenere uno stadio adatto ad applicazioni *overhung*:

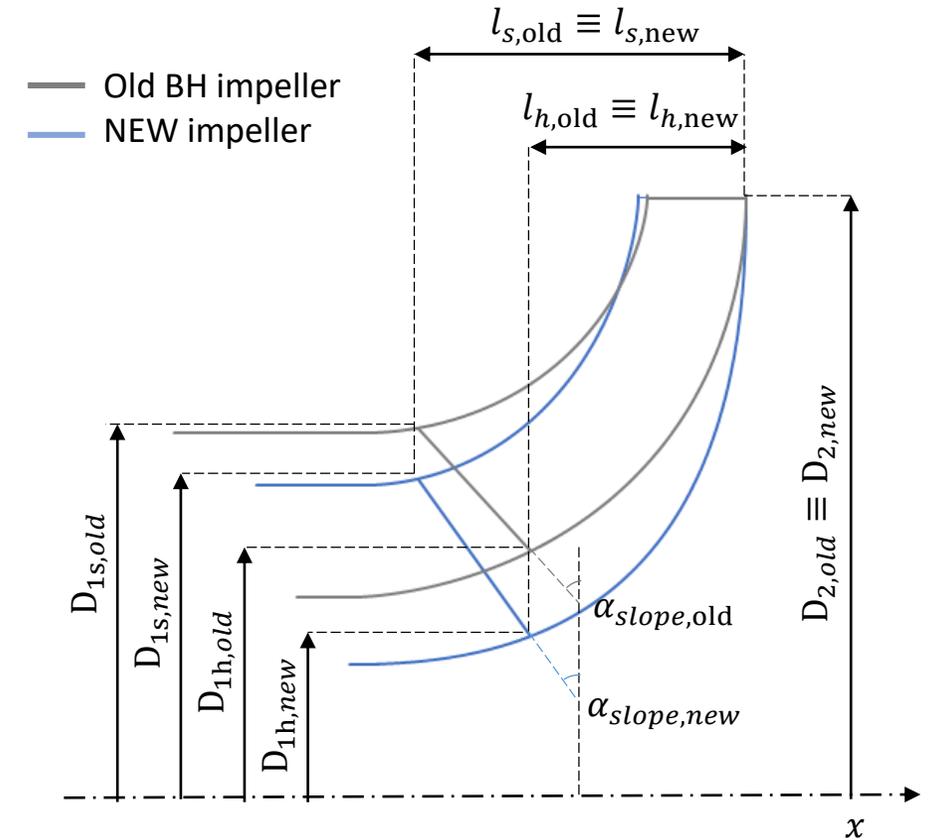
$$\frac{D_{1h,old}}{D_{2,old}} = 0.418 \rightarrow \frac{D_{1h,new}}{D_{2,new}} = 0.282$$



Valore tipico per applicazioni multi-stadio.



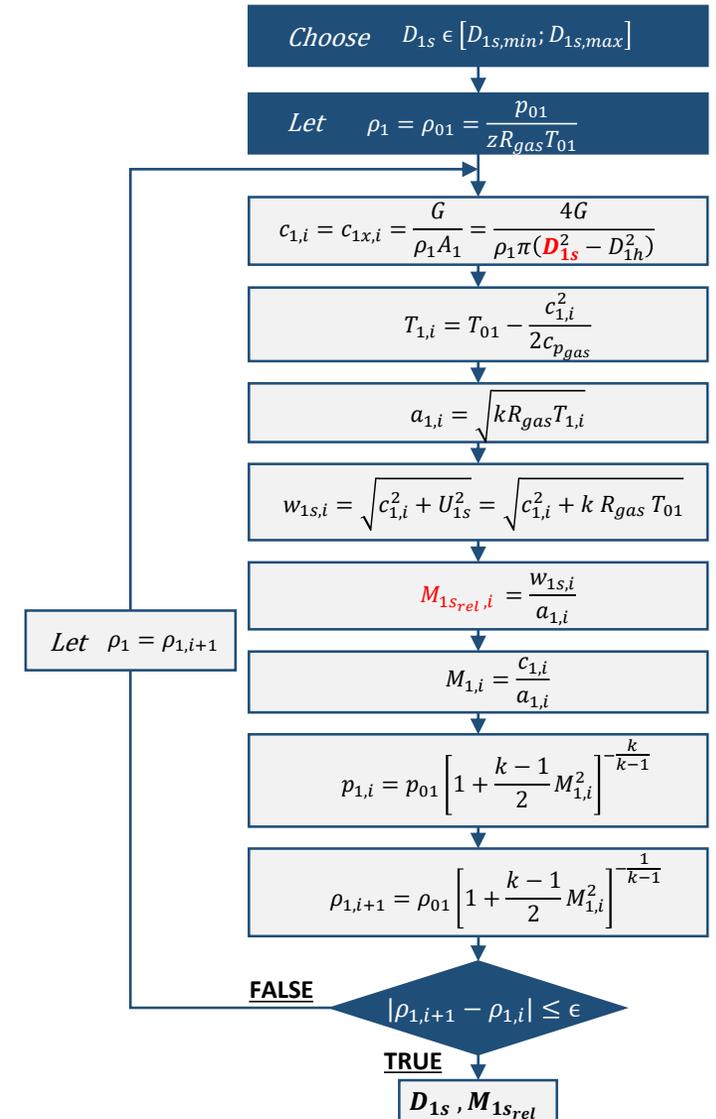
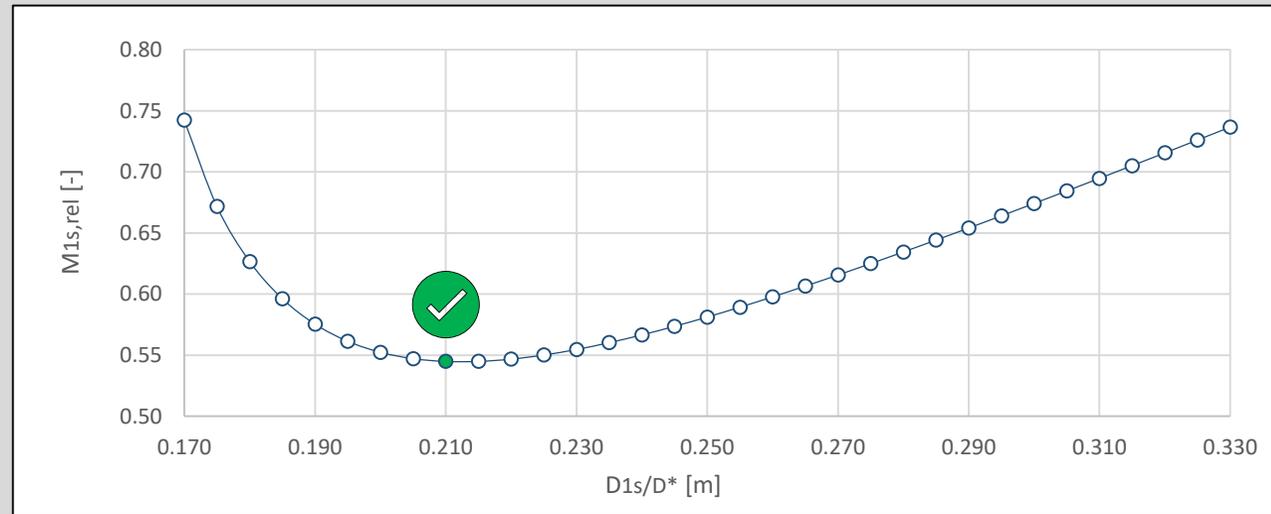
Valore tipico per applicazioni singolo stadio *overhung*.



Modifica rapporto D1h/D2 girante

Dimensionamento ingresso girante

Per ridurre le perdite e garantire alte efficienze, la sezione d'ingresso è stata dimensionata minimizzando il Mach relative di tip ( $M_{1s,rel}$ ) [3].



[3] DIXON, S. L. and HALL, C. A., Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery, 6° Edition, Elsevier 2010.

Modifica rapporto D1h/D2 girante

Dimensionamento ingresso girante

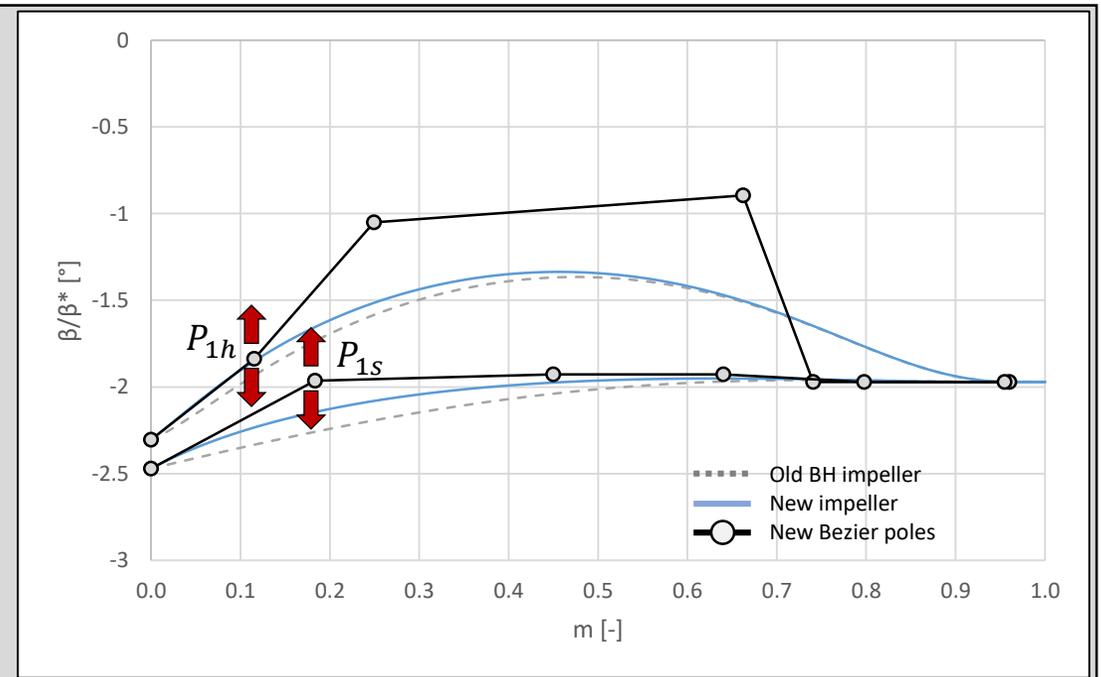
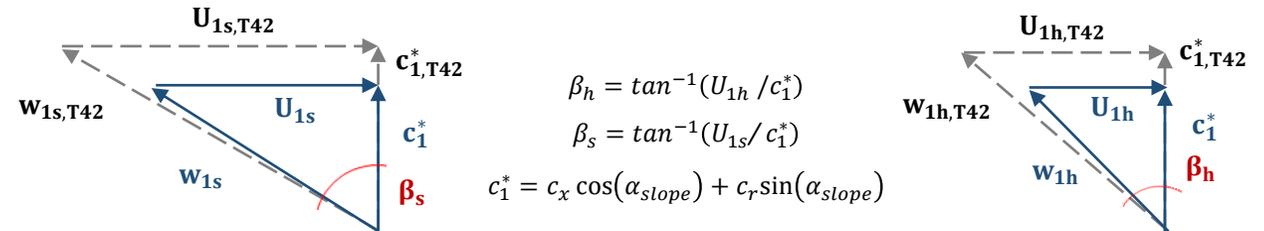
Correzione curvatura pale

La nuova sezione di ingresso e la riduzione delle velocità di trascinamento (causata dalla diminuzione dei raggi) ha prodotto una diversa distribuzione di velocità.

Per mantenere angoli di incidenza contenuti, è stato eseguito un re-design della camber line, secondo [3]:

$$\cos^2 \beta_s = 0.7 + 1.5/M_{1,r}^2 - \sqrt{(0.7 + 1.5/M_{1,r}^2)^2 - 1/M_{1,r}^2}$$

In particolare, solo il secondo polo di Bézier è stato modificato.



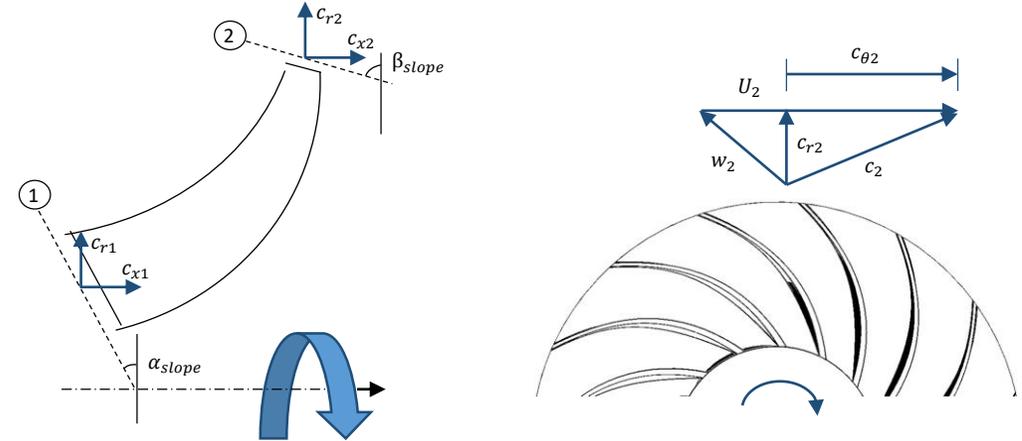
[3] DIXON, S. L. and HALL, C. A., Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery, 6° Edition, Elsevier 2010.

Modifica rapporto D1h/D2 girante

Dimensionamento ingresso girante

Correzione curvatura pale

Dimensionamento uscita girante



Il cambio di rigidezza e il relativo re-design hanno causato una variazione del rapporto  $w_2/w_{1s}$ . Per preservarne il corretto valore, l'altezza di uscita della girante  $b_2$  è stata modificata. La stima del rapporto  $w_2/w_{1s}$  è stata ottenuta con le equazioni seguenti:

$$\bullet c_1^* = c_{x1} \cos(\alpha_{slope}) + c_{r1} \sin(\alpha_{slope})$$

$$\bullet w_{1s} = \sqrt{c_{1,max}^{*2} + U_{1s}^2}$$

$$\bullet c_{2r}^* = c_x \cos(\beta_{slope}) + c_r \sin(\beta_{slope})$$

$$\bullet w_2 = \sqrt{c_{2r,av}^{*2} + w_{2\theta}^2} = \sqrt{c_{2r}^{*2} + (c_{2\theta,abs} - U_{2,av})^2}$$

# Design della nuova famiglia

Modifica rapporto D1h/D2 girante

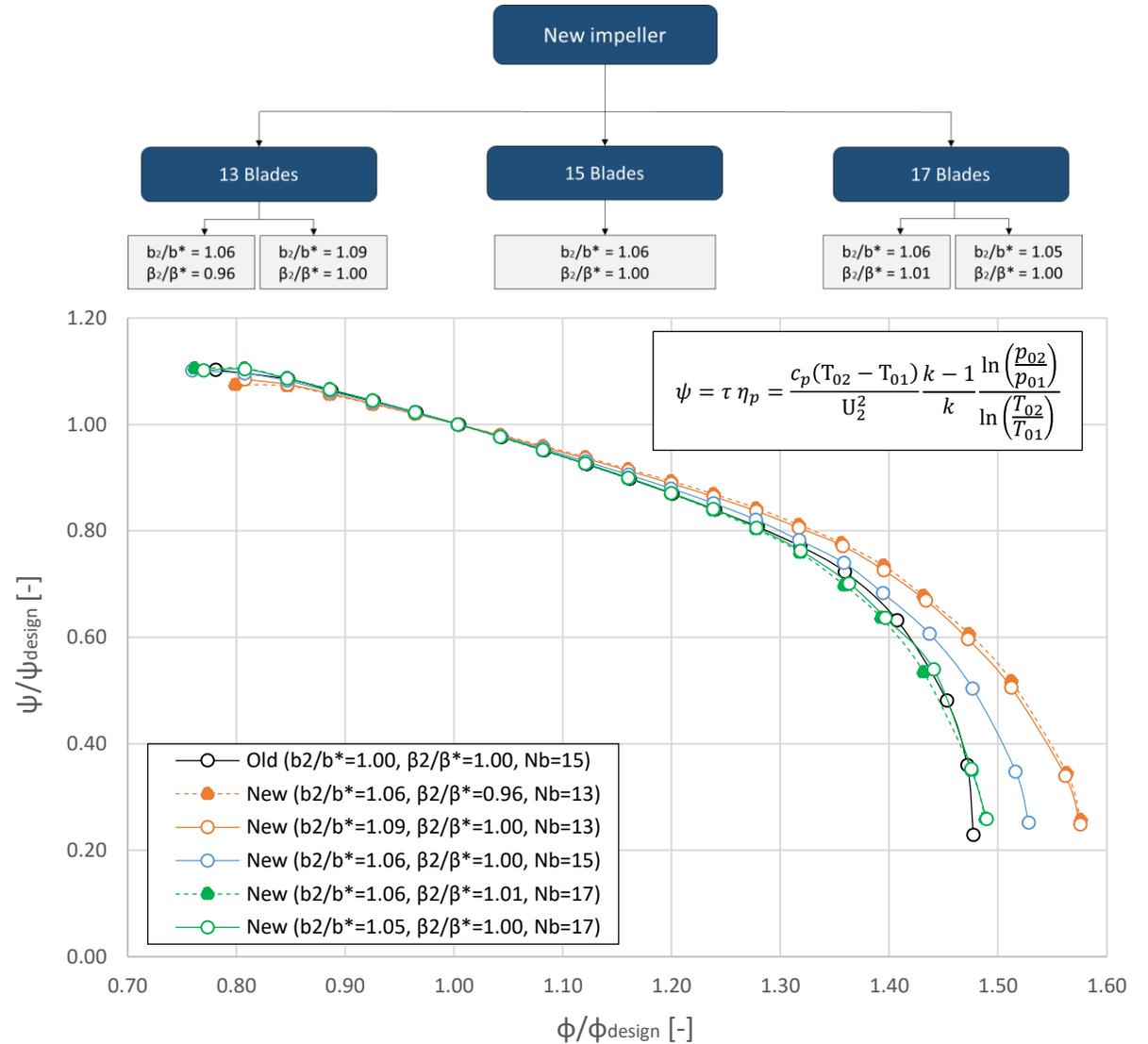
Dimensionamento ingresso girante

Correzione curvatura pale

Dimensionamento uscita girante

Valutazione effetto numero di pale e angolo uscita

Mantenendo invariato per ogni configurazione il rapporto  $w_2/w_1$ , sono stati studiati gli effetti del numero di pale ( $N_b$ ) e dell'angolo di *backsweep* ( $\beta_2$ ) sulle prestazioni e il campo operativo di ciascuna girante. A fianco se ne riporta un esempio.



# Design della nuova famiglia

Modifica rapporto  $D1h/D2$  girante

Dimensionamento ingresso girante

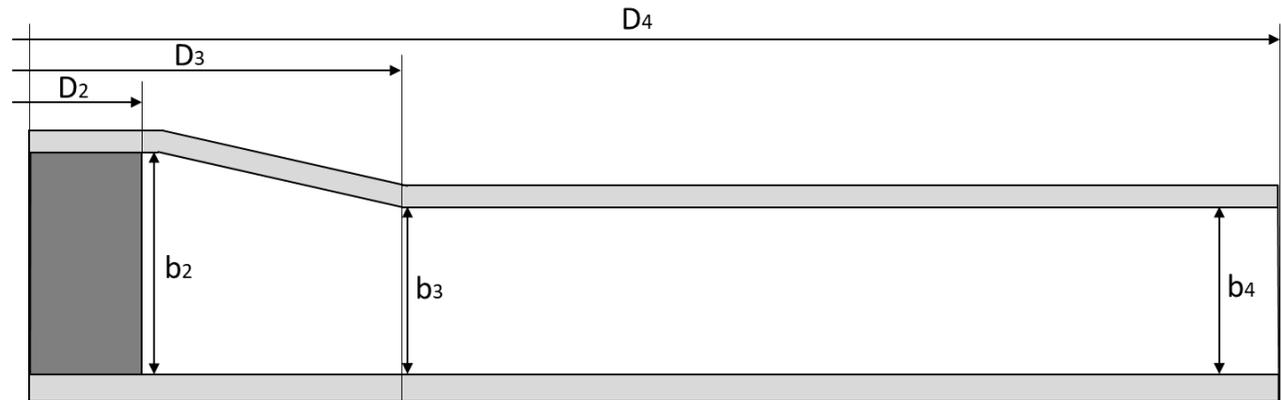
Correzione curvatura pale

Dimensionamento uscita girante

Valutazione effetto numero di pale e angolo uscita

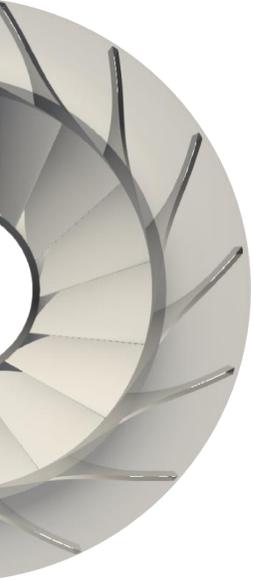
Valutazione effetto forma diffusore

Sono stati studiati gli effetti dovuti alle variazioni di  $D_3$ ,  $D_4$  e  $b_4$  (non riportato per brevità) su ogni girante. A fianco è mostrato un esempio.



	$\Delta\beta_{tt}$ [-]			$\Delta\eta_p$ [-]			
$\downarrow D3/D4 \rightarrow$	1.80 D2	2.00 D2	2.20 D2	$\downarrow D3/DR \rightarrow$	1.80 D2	2.00 D2	2.20 D2
1.20 D2	1.05%	0.84%	0.68%	1.20 D2	0.11%	-0.63%	-1.30%
1.25 D2	1.08%	0.88%	0.72%	1.25 D2	0.17%	-0.58%	-1.23%
1.30 D2	1.10%	0.91%	0.75%	1.30 D2	0.20%	-0.52%	-1.18%
	$\Delta\tau$ [-]			$\Delta\psi$ [-]			
$\downarrow D3/D4 \rightarrow$	1.80 D2	2.00 D2	2.20 D2	$\downarrow D3/DR \rightarrow$	1.80 D2	2.00 D2	2.20 D2
1.20 D2	2.75%	2.98%	3.30%	1.20 D2	2.87%	2.33%	1.96%
1.25 D2	2.77%	3.06%	3.33%	1.25 D2	2.95%	2.46%	2.06%
1.30 D2	2.80%	3.07%	3.36%	1.30 D2	3.01%	2.53%	2.14%

# Design della nuova famiglia



Modifica rapporto D1h/D2 girante

Dimensionamento ingresso girante

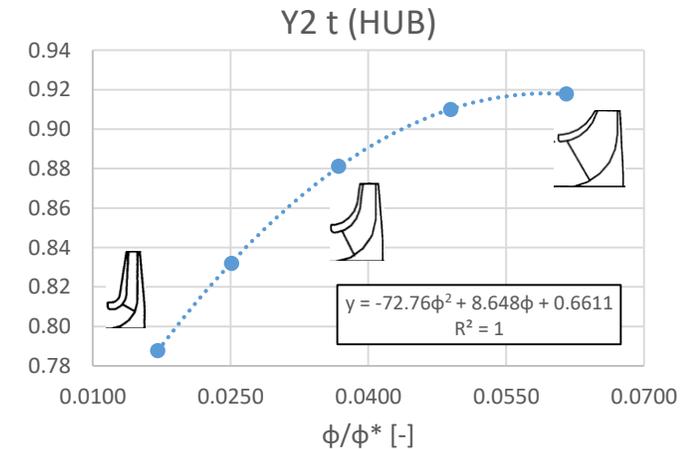
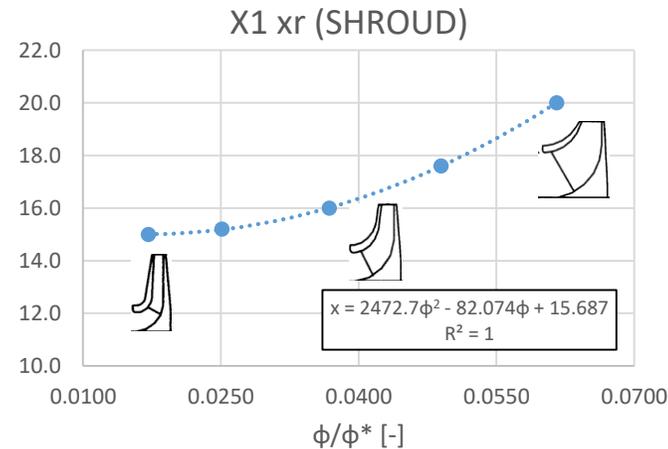
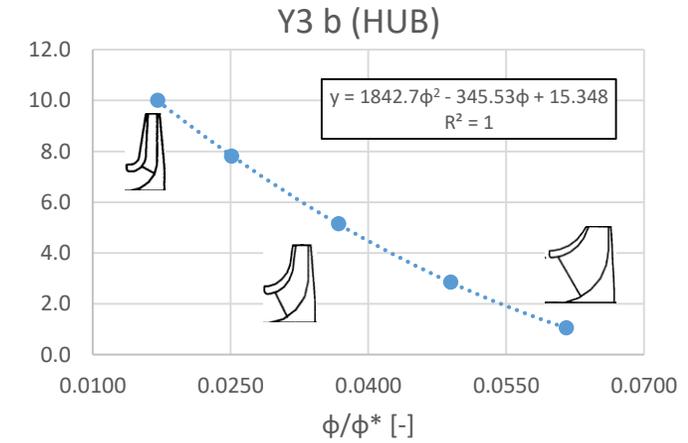
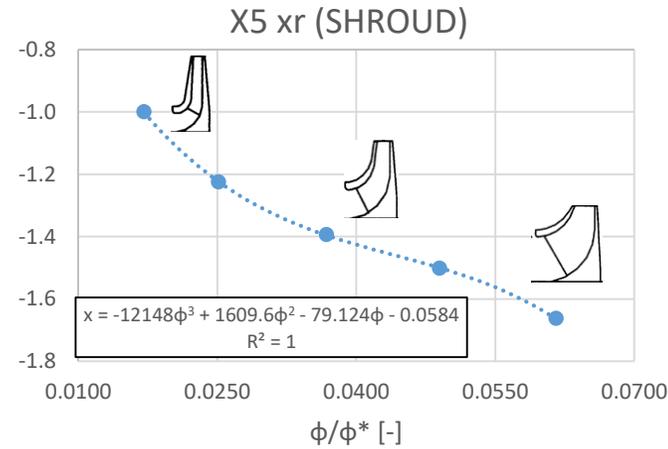
Correzione curvatura pale

Dimensionamento uscita girante

Valutazione effetto numero di pale e angolo uscita

Valutazione effetto forma diffusore

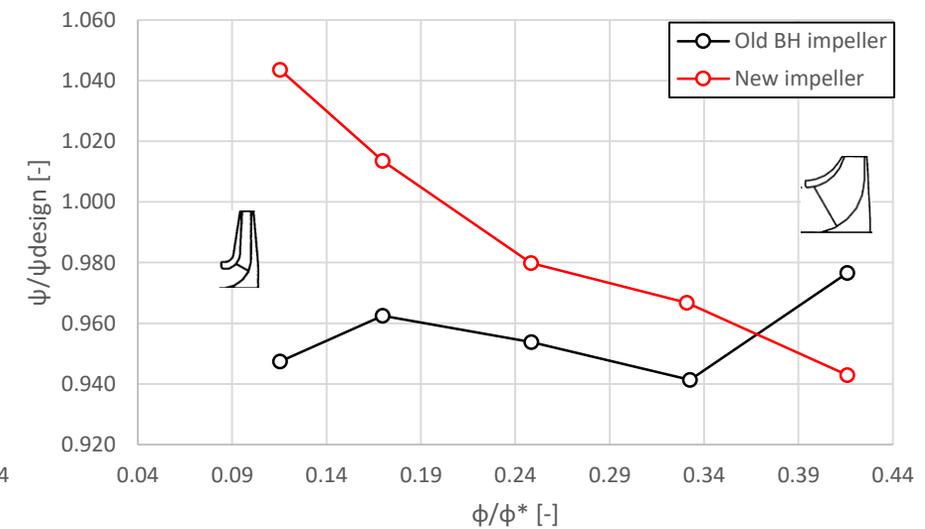
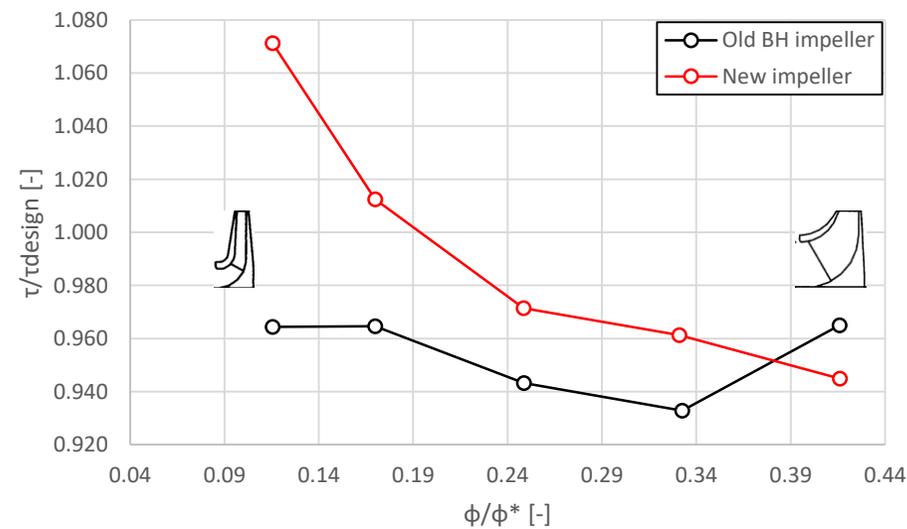
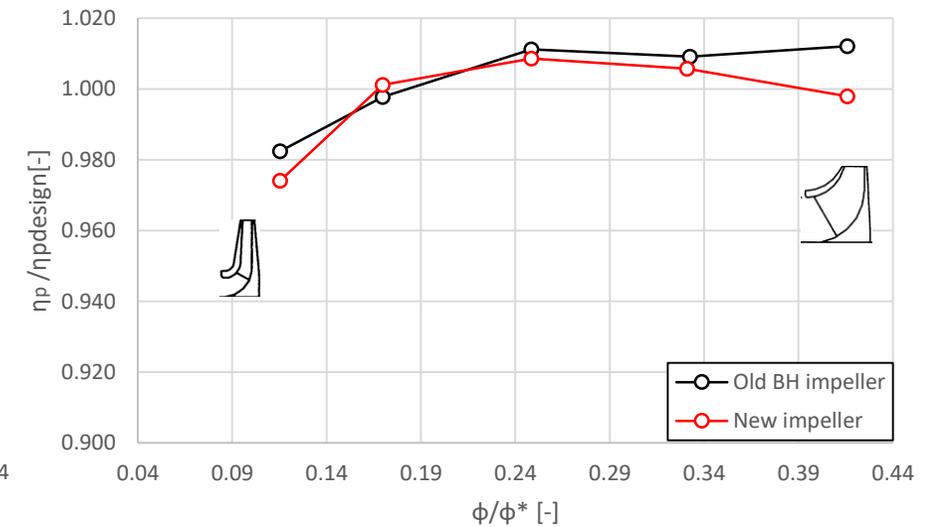
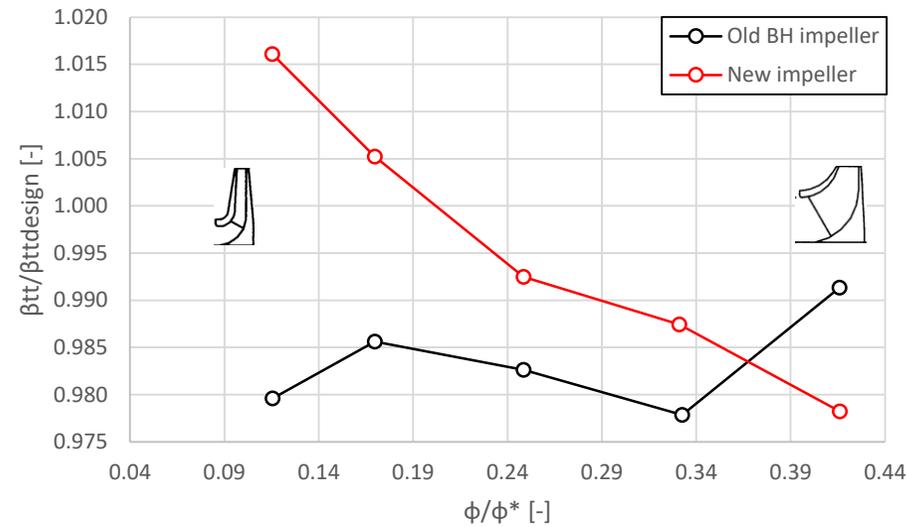
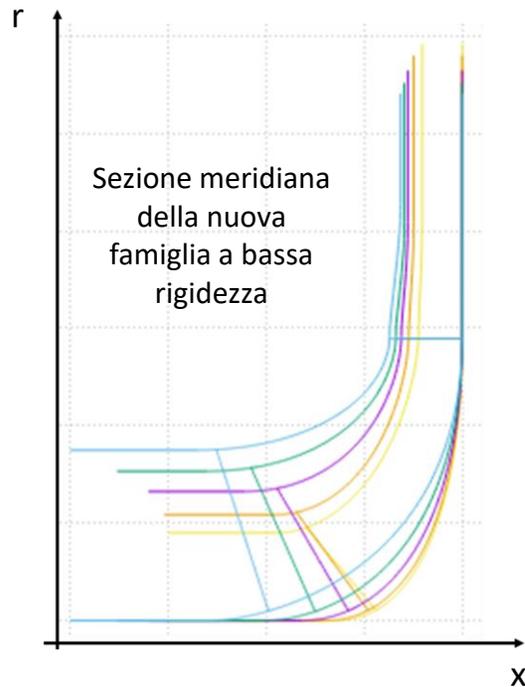
Smoothing dello stadio



La famiglia di compressori ottenuta è stata uniformata in modo da ottenere relazioni semplificate per la costruzione di un interpolatore automatico.

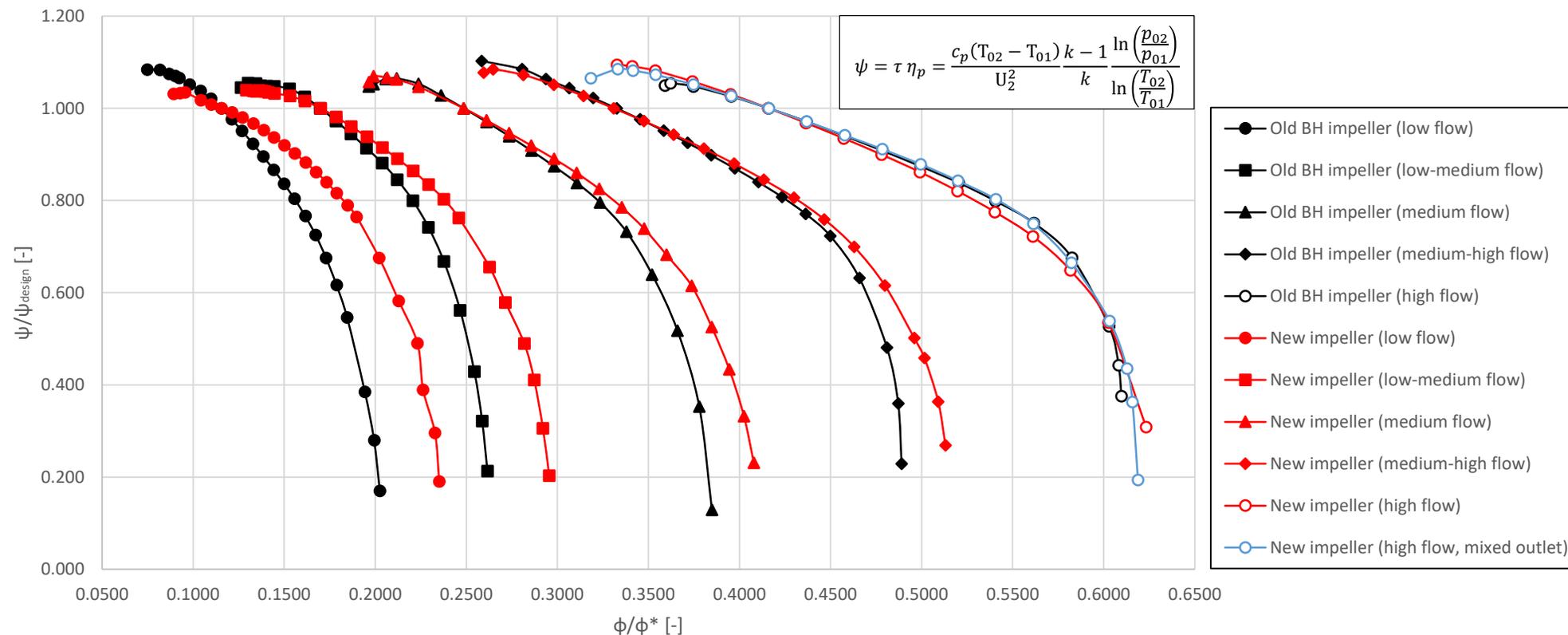
Confronto tra prestazioni al design di:

- **famiglia attuale** (BH) di giranti ad alta rigidezza
- **nuova famiglia** per applicazioni *overhung* a bassa rigidezza



Confronto tra prestazioni della nuova famiglia a bassa rigidezza (rosso e blu) e prestazioni della famiglia ad alta rigidezza iniziale BH (nero).

Prestazioni mostrate in termini di *head coefficient* che, contenendo informazioni su *work coefficient* e rendimento politropico, ben riassume i risultati ottenuti.



Prototipo del *tool* applicato per commessa reale

↓

Girante e relativi calcoli CFD ottenuti in **3 ore**



Il confronto tra prestazioni in termini di rapporto di compressione, work coefficient e rendimento politropico non viene riportato per brevità.

Completamento famiglia

Modello semplificato per *scroll*

Modellazione *fillet & leakage*

Studio sistema interpolazione

Completamento *tool* automatizzato

Step 1

Step 2

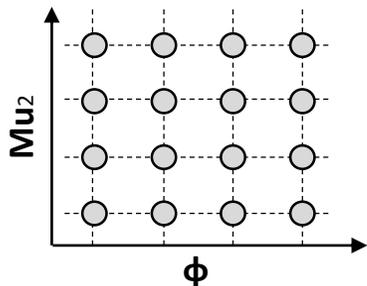
Step 3

Step 4

Step 5

**Dicembre 2020**

Sviluppo giranti con  $\text{Mu}_{2,\text{design}}$  diversi da 0.73.



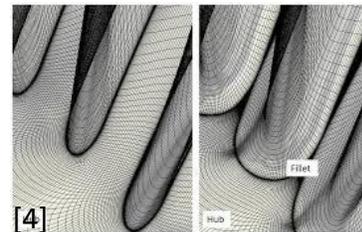
**Marzo 2021**

Studio di modello di *scroll* semplificato per l'analisi delle prestazioni della macchina.



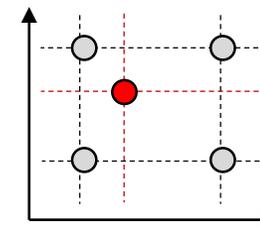
**Luglio 2021**

Aggiunta di *fillet* per migliorare la previsione del *choke* e studio degli effetti di ricircolo.



**Ottobre 2021**

Studio del sistema di interpolazione per l'estrapolazione di geometria e griglia di calcolo.



**Dicembre 2021**

Integrazione in un unico strumento di:

- generatore di geometria
- generatore di griglia
- esecutore automatico di analisi CFD
- sistema di post-processing

[4] OH, J., The Effects of Blade Fillets on Aerodynamic Performance of a High Pressure Ratio Centrifugal Compressor, 2016.



---

# Metodi numerici per l'analisi e la previsione delle prestazioni di turbomacchine a sviluppo radiale per applicazioni industriali

---

*Curriculum:*

***Energetica e Tecnologie Industriali ed Ambientali Innovative***

***Relatore: Ing. Marco Bicchi***

***Ciclo: XXXV***

***Tutor: Prof. Andrea Arnone***

***Co-tutor: Prof. Michele Marconcini***