

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

**Ottimizzazione robusta delle prestazioni fluidodinamiche dei  
moduli di raffreddamento, al variare dell'installazione e della  
configurazione richiesta dal cliente**



**Politecnico  
di Torino**

Relatore:

**Prof. Renzo Arina**

Tutor aziendali:

**Ing. Enrico Ribaldone**

**Ing. Diego Vicentini**

Candidato:

**Valentina Maria Scimenes**



---

# INDICE

---

<b>Prefazione</b>	<b>IX</b>
<b>1 Introduzione</b>	<b>1</b>
1.1 Cenni sul funzionamento delle ventole . . . . .	2
1.1.1 Curve caratteristiche e punto di lavoro della ventola . . .	3
1.1.2 Rendimento della ventola . . . . .	4
1.2 Problema in esame e approccio risolutivo adottato . . . . .	5
<b>2 Analisi di robust parameter design</b>	<b>7</b>
2.1 Descrizione del metodo di Taguchi . . . . .	7
2.1.1 Control factors e noise factors . . . . .	8
2.1.2 Matrici ortogonali . . . . .	9
2.1.3 Signal-to-noise ratio . . . . .	10
2.1.4 Media . . . . .	11
2.1.5 Limitazione del metodo di Taguchi . . . . .	11
2.2 Minitab . . . . .	12
<b>3 Scelta dei control factors</b>	<b>13</b>
3.1 Parametrizzazione geometrica della pala . . . . .	14
3.1.1 Considerazioni sulle funzioni di forma . . . . .	16
<b>4 Applicazione del metodo di Taguchi</b>	<b>19</b>
4.1 Scelta dei control factors levels . . . . .	19
4.2 DOE su Excel . . . . .	20
<b>5 Confronto RANS e DES</b>	<b>23</b>
5.1 Simulazioni RANS e DES nel punto di lavoro . . . . .	24
5.2 Matrici di correlazione . . . . .	25

<b>6</b>	<b>Curve di efficienza</b>	<b>29</b>
6.1	Punto di efficienza massima . . . . .	29
6.1.1	Configurazione senza back plate . . . . .	30
6.1.2	Configurazione con back plate . . . . .	32
6.2	DOE e configurazione di pala ottimale . . . . .	33
6.2.1	Efficienza massima . . . . .	34
6.2.2	Efficienza nel punto di lavoro . . . . .	36
6.2.3	Considerazioni sulle due configurazioni di pala ottimale .	37
<b>7</b>	<b>Simulazioni CFD</b>	<b>39</b>
7.1	Impostazione delle simulazioni . . . . .	39
7.2	Post-processing . . . . .	40
7.2.1	Calcolo dell'efficienza della ventola . . . . .	41
<b>8</b>	<b>Metodo di Taguchi in Minitab</b>	<b>43</b>
8.1	Risultati ottenuti . . . . .	43
8.1.1	Configurazione di pala ottimale . . . . .	45
8.1.2	Calcolo della variazione di efficienza . . . . .	46
<b>9</b>	<b>Ottimizzazione robusta multi-obiettivo</b>	<b>49</b>
9.1	Descrizione dell'ottimizzazione robusta multi-obiettivo . . . . .	49
9.2	Fronte di Pareto . . . . .	50
9.3	Algoritmi evolutivi . . . . .	51
9.3.1	Algoritmi genetici multi-obiettivo . . . . .	51
<b>10</b>	<b>Scelta dei parametri di input e degli obiettivi</b>	<b>53</b>
10.1	Definizione degli obiettivi . . . . .	53
10.2	Definizione dei parametri di input . . . . .	54
10.2.1	Riduzione dei parametri di input . . . . .	56
10.2.2	DOE fattoriale ridotto . . . . .	57
<b>11</b>	<b>Analisi statistica in Minitab</b>	<b>59</b>
11.1	Influenza dei parametri di input sulle efficienze . . . . .	59
11.1.1	Svolgimento dell'analisi in Minitab . . . . .	60
11.1.2	Modifica dei parametri di input . . . . .	63
<b>12</b>	<b>Ottimizzazione in modeFrontier</b>	<b>65</b>
12.1	Costruzione del workflow in modeFrontier . . . . .	65
12.2	Risultati dell'ottimizzazione . . . . .	67
<b>13</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>69</b>
13.1	Passi successivi . . . . .	70





---

## ELENCO DELLE FIGURE

---

1.1	Ventola montata con il supporto . . . . .	1
1.2	Ventola in aria libera . . . . .	2
1.3	Ventola in un sistema resistente . . . . .	3
1.4	Curve caratteristiche . . . . .	4
1.5	Punto di lavoro . . . . .	4
1.6	Ventola con pannello posto a valle . . . . .	5
2.1	L9(3 <sup>4</sup> ) . . . . .	9
3.1	Funzione di forma costante . . . . .	14
3.2	Funzione di forma lineare . . . . .	15
3.3	Funzione di forma quadratica . . . . .	15
3.4	Funzione di forma cubica . . . . .	16
4.1	Livelli scelti . . . . .	19
4.2	DOE su Excel . . . . .	20
4.3	Distribuzione di corda C1 . . . . .	21
4.4	Distribuzione di corda C2 . . . . .	21
4.5	Distribuzione di corda C3 . . . . .	21
4.6	Sovrapposizione delle distribuzioni di corda . . . . .	22
4.7	Variazioni di corda . . . . .	22
5.1	Confronto della pressione totale di inlet . . . . .	24
5.2	Confronto della pressione totale di inlet . . . . .	24
5.3	Confronto della coppia . . . . .	25
5.4	Confronto dell'efficienza . . . . .	25
5.5	Pressione totale di inlet . . . . .	26
5.6	Matrice di correlazione per la pressione totale di inlet . . . . .	26
5.7	Matrice di correlazione per il momento . . . . .	27
5.8	Matrice di correlazione per l'efficienza . . . . .	27

6.1	Portate testate . . . . .	30
6.2	Valori delle efficienze senza BP . . . . .	30
6.3	Curve di efficienza senza BP (1) . . . . .	31
6.4	Curve di efficienza senza BP (2) . . . . .	31
6.5	Confronto delle efficienze senza BP . . . . .	31
6.6	Valori delle efficienze con BP . . . . .	32
6.7	Curve di efficienza con BP (1) . . . . .	33
6.8	Curve di efficienza con BP (2) . . . . .	33
6.9	Confronto delle efficienze con BP . . . . .	33
6.10	DOE per l'efficienza massima . . . . .	34
6.11	SN ratio per l'efficienza massima . . . . .	35
6.12	Media per l'efficienza massima . . . . .	35
6.13	DOE per l'efficienza nel punto di lavoro . . . . .	36
6.14	SN ratio per l'efficienza nel punto di lavoro . . . . .	36
6.15	Media per l'efficienza nel punto di lavoro . . . . .	37
7.1	Scene vettoriali della velocità . . . . .	40
7.2	Andamento della pressione totale di inlet . . . . .	41
7.3	Andamento della coppia della pala . . . . .	41
7.4	Pale nella configurazione senza back plate . . . . .	42
7.5	Pale nella configurazione con back plate . . . . .	42
8.1	DOE in Minitab . . . . .	43
8.2	Signal-to-noise ratio . . . . .	44
8.3	Media . . . . .	44
8.4	Variazione di corda della pala ottimale . . . . .	45
8.5	Confronto tra la pala ottimale (blu) e quella base (grigia) . . . . .	46
8.6	Pala ottimale . . . . .	46
8.7	DOE con la pala ottimale . . . . .	47
9.1	Fronte di Pareto . . . . .	50
10.1	3 parametri relativi alla corda . . . . .	54
10.2	Esempio di Bézier cubica per la corda . . . . .	54
10.3	5 parametri relativi al calettamento . . . . .	55
10.4	Esempio di Bézier cubica il calettamento . . . . .	55
10.5	1 parametro relativo alla corda . . . . .	56
10.6	3 parametri relativi al calettamento . . . . .	56
10.7	DOE fattoriale ridotto . . . . .	57
11.1	Post-processing degli 8 casi senza BP . . . . .	59
11.2	Post-processing degli 8 casi con BP . . . . .	60

11.3	Influenza sull'efficienza senza BP . . . . .	61
11.4	Influenza sull'efficienza con BP . . . . .	61
11.5	Effetto Pareto nel caso senza BP . . . . .	62
11.6	Effetto Pareto nel caso con BP . . . . .	62
11.7	Parametri di partenza . . . . .	63
11.8	Parametri modificati . . . . .	63
12.1	Workflow in modeFrontier . . . . .	66
12.2	Efficienza con BP in funzione dell'efficienza senza BP . . . . .	67
12.3	Distribuzione di portanza . . . . .	67
12.4	Configurazione di pala ottimale . . . . .	68



---

## PREFAZIONE

---

La seguente tesi di Laurea Magistrale è stata realizzata presso l'azienda Johnson Electric di Asti, la quale si occupa della progettazione e produzione di componenti elettrici in ambito automotive, tra cui i moduli di raffreddamento. I moduli di raffreddamento rappresentano uno dei componenti principali di un'autovettura. Infatti questi hanno il compito di raffreddare il motore termico, in modo tale da garantire una temperatura di lavoro ottimale per il corretto lavoro del motore stesso.

Nello specifico, lo scopo di questo elaborato è proporre un approccio risolutivo al problema di riduzione delle prestazioni fluidodinamiche, che si verifica nel momento in cui, su richiesta del cliente, viene inserito un pannello (*back plate*) a valle della ventola. Questo pannello viene utilizzato per simulare la condizione reale di installazione dei moduli di raffreddamento nel sottoscocca dell'autovettura.

L'approccio risolutivo adottato prevede delle analisi statistiche e di robust design affiancate dalla CFD, in modo tale da individuare quella configurazione di pala ottimale che consente effettivamente di ridurre queste perdite di prestazioni.

Nel far ciò, si agirà inizialmente sulla corda della pala, e quindi sulla distribuzione di portanza, per vedere come una modifica di questo parametro possa migliorare l'efficienza in presenza del *back plate*. Dopodichè si andrà ad agire su ulteriori parametri, come il calettamento, tramite un'ottimizzazione robusta multi-obiettivo, così da trovare quella combinazione di parametri che permette di massimizzare l'efficienza nella configurazione con e senza *back plate*.

Tre strumenti importanti su cui si baseranno i risultati di questa tesi sono *Minitab*, il quale sarà utilizzato per le analisi statistiche e di robust design, *modeFrontier* per quanto riguarda l'ottimizzazione robusta multi-obiettivo, e infine *Ansys Fluent* per le simulazioni CFD.



---

## INTRODUZIONE

---

Il motore termico di un'autovettura ha il compito di convertire l'energia chimica, contenuta nel combustibile, in energia meccanica, tramite una reazione di combustione che si verifica all'interno del motore stesso. Durante questa reazione però, la temperatura interna raggiunge dei valori molto alti, e se da una parte questo incremento della temperatura permette di ottenere efficienze più alte, dall'altra rappresenta una problematica per l'integrità del motore. Conviene quindi ricorrere ai moduli di raffreddamento (*cooling fan assembly*) per raffreddare il motore termico, e mantenere la temperatura ad un valore ottimale.

Nello specifico, questo raffreddamento è reso possibile da un flusso d'aria che attraversa le ventole (*fan*).

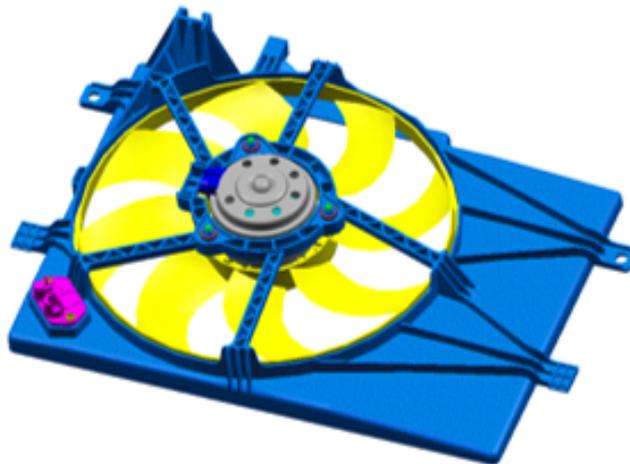


Figura 1.1: Ventola montata con il supporto

## 1.1 Cenni sul funzionamento delle ventole

Per quanto riguarda il funzionamento delle ventole, queste sono definite come delle "macchine rotanti", progettate per produrre un flusso d'aria aumentando la pressione.

Andando ad analizzare il comportamento dell'aria che attraversa la ventola, nell'ipotesi che questa si trovi in aria libera, si verifica la seguente situazione:

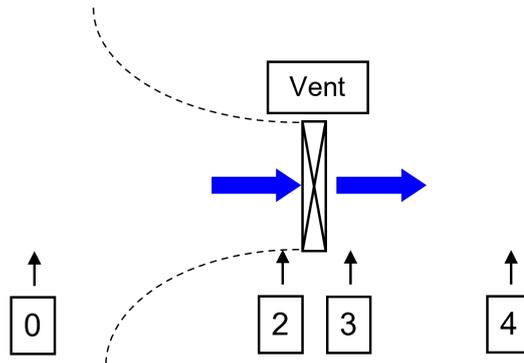


Figura 1.2: Ventola in aria libera

Ovvero:

- 0)** l'aria è ferma e a pressione ambiente
- 0-1)** l'aria accelera, la pressione statica diminuisce, e quindi la pressione totale rimane costante
- 2-3)** la ventola aumenta la pressione statica dell'aria, e di conseguenza aumenta la pressione totale:  $v_2 = v_3$ ,  $p_{s3} = p_{amb}$
- 3-4)** la pressione dinamica presente all'uscita della ventola viene dissipata, e quindi la pressione totale si riduce:  $p_{t4} = p_{t0} = p_{amb}$

Da cui è possibile definire il lavoro fornito alla ventola ( $L_{est}$ ), l'energia persa nella ventola ( $E_{pv}$ ), e l'energia cinetica residua ( $E_{cr}$ ).

$$L_{est} - E_{pv} = p_{t3} - p_{t2}$$

$$E_{cr} = p_{d3}$$

$$L_{est} - E_{pv} - E_{cr} = p_{s3} - p_{t2}$$

Nel caso in cui la ventola fosse invece in un sistema resistente, cioè in un sistema che provoca perdite di energia sul flusso che lo attraversa, si avrebbe la situazione rappresentata in Figura 1.3. Ovvero:

- 0)** l'aria è ferma e a pressione ambiente
- 1)** l'aria a velocità  $v_1$  ha una pressione  $p_{s1}$  inferiore rispetto a quello ambiente

- 1-2) il sistema resistente provoca una perdita di pressione statica:  $v_2 = v_1$   
 2-3) la ventola aumenta la pressione statica dell'aria, compensando la diminuzione avvenuta tra 0 e 2, e provocando quindi un aumento della pressione totale:  $v_2 = v_3, p_{s3} = p_{amb}$   
 4) l'aria è ferma e a pressione ambiente

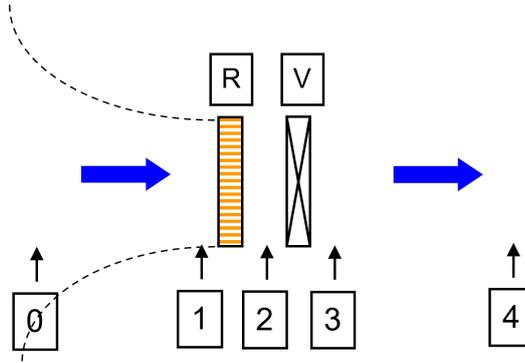


Figura 1.3: Ventola in un sistema resistente

Da cui è possibile ricavare l'energia persa nel sistema e l'energia utile fornita dalla ventola.

$$E_{pr} = p_{t0} - p_{t2} = p_{t1} - p_{t2}$$

$$L_{est} - E_{pv} - E_{cr} = p_{s3} - p_{t2}$$

Infine, applicando a questo sistema (ventola-sistema resistente) la relazione tra energia, lavoro e perdite, si ottiene:

$$L_{est} - E_{pv} - E_{cr} - E_{pr} = p_{t4} - p_{t0} = 0$$

Questo vuol dire che, nel momento in cui l'aria attraversa il sistema, si verifica una situazione di equilibrio tra l'energia utile e quella persa.

D'altra parte, l'energia utile fornita dalla ventola e l'energia persa dal sistema, sono il risultato di fenomeni che dipendono dalla portata d'aria.

### 1.1.1 Curve caratteristiche e punto di lavoro della ventola

In generale, per determinare la portata d'aria che attraversa il sistema, si misura il rendimento e l'energia utile in funzione della portata, ottenendo così le *curve caratteristiche*.

Un esempio di curva caratteristica, costruita per una ventola assiale a velocità costante, è riportata in Figura 1.4.

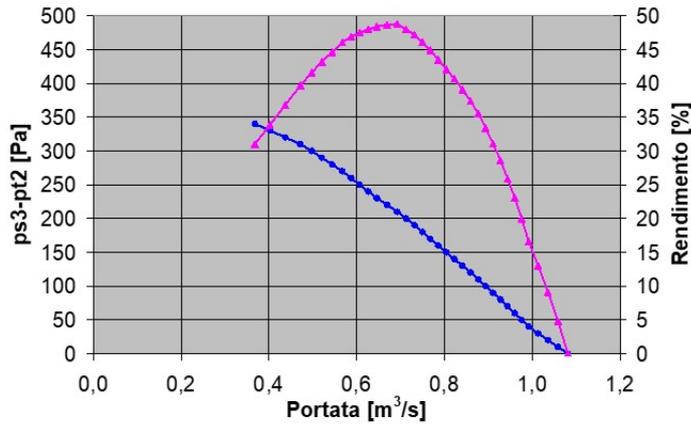


Figura 1.4: Curve caratteristiche

Intersecando le curve caratteristiche con quella dell'energia persa, la quale ha andamento parabolico perché proporzionale al quadrato della velocità di passaggio, si ottiene un punto che rappresenta il punto di lavoro della ventola (*working point*).

Nello specifico, quest'ultimo fornisce indicazioni sulla portata che attraversa il sistema e sull'energia utile che deve essere fornita alla ventola.

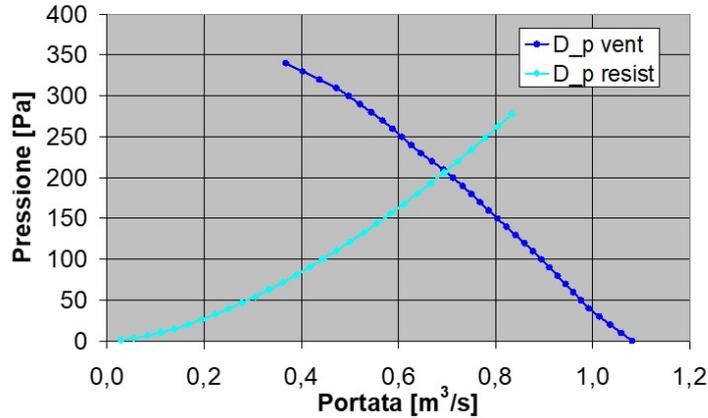


Figura 1.5: Punto di lavoro

### 1.1.2 Rendimento della ventola

L'energia utile fornita dalla ventola al flusso d'aria rappresenta solo una parte del lavoro fatto dall'esterno. Infatti, una parte del lavoro esterno viene dissipato all'interno della ventola, mentre l'altra parte, corrispondente all'energia

cinetica che si ha all'uscita della ventola, viene completamente persa. Il rendimento della ventola è quindi definito come il rapporto tra la potenza utile e quella fornita dall'esterno al sistema:

$$\eta = \frac{P_u}{P_{est}} = \frac{Q_v(p_{s3} - p_{t2})}{P_{est}}$$

dove  $Q_v$  è la portata volumetrica.

## 1.2 Problema in esame e approccio risolutivo adottato

Un problema che si può riscontrare in fase di progettazione dei moduli di raffreddamento, è legato alla loro installazione. Infatti, su richiesta del cliente, a monte o a valle della ventola, potrebbe essere posizionato un pannello (*back plate*) che simula l'ingombro frontale del motore. Questo pannello rappresenta un disturbo, in quanto provoca una rotazione della curva di lavoro, e pertanto una riduzione delle prestazioni fluidodinamiche della ventola stessa.

Nello specifico, in questo elaborato, viene analizzata quella configurazione di modulo di raffreddamento che vede il *back plate* posizionato a valle, come richiesto dalla casa automobilistica BMW.

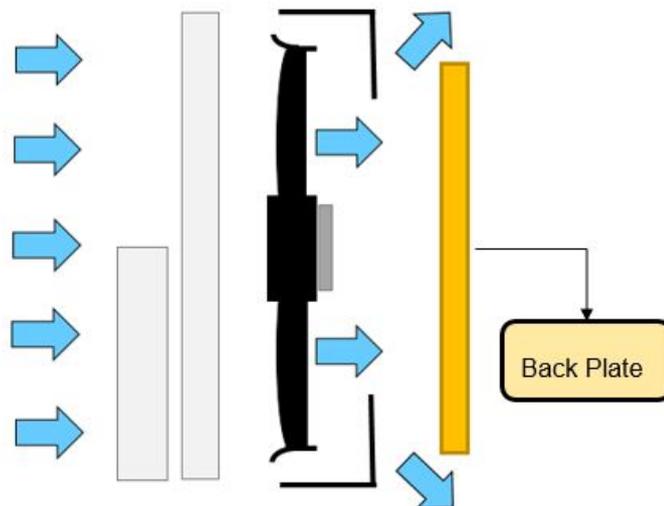


Figura 1.6: Ventola con pannello posto a valle

Per affrontare questo problema di riduzione delle prestazioni fluidodinamiche, in seguito all'inserimento del *back plate*, si sceglie di operare un'analisi di *robust parameter design*. Si tratta di un metodo di ottimizzazione che ha come obiettivo principale quello di ottenere un prodotto che sia il più possibile robusto ed insensibile al rumore, dove per rumore si intende il disturbo rappresentato dal pannello a valle.

Nello specifico, si procede prima con uno studio su come variare la corda della pala per incrementare l'efficienza della ventola, tenendo conto del fatto che la distribuzione di corda influenza anche la distribuzione di portanza, e quindi il lavoro che si può estrarre.

---

## ANALISI DI ROBUST PARAMETER DESIGN

---

L'analisi di *robust parameter design* è un metodo di ottimizzazione, basato sul *metodo di Taguchi*, che ha lo scopo di ottenere un prodotto caratterizzato da robustezza, dove per robustezza si intende la capacità del componente in esame di avere un funzionamento il meno sensibile possibile a specifiche condizioni di rumore (*noise factors*).

### 2.1 Descrizione del metodo di Taguchi

Per quanto riguarda il metodo di Taguchi, si tratta di un esperimento di progettazione, che permette di individuare e scegliere quel prodotto/processo, che funzioni in maniera più sistematica possibile nell'ambiente operativo. Taguchi, infatti, riconosce la presenza di fattori che causano la variabilità del sistema rispetto ad un funzionamento ideale (di target), e che non possono essere controllati, appunto i *noise factors*. L'obiettivo di questo esperimento, è quindi quello di individuare dei parametri di controllo (*control factors*), che vadano a minimizzare l'effetto dei noise factors.

Nello specifico, durante l'esperimento, si cerca di forzare la variabilità del sistema agendo sui noise factors, in modo tale da determinare quella combinazione di parametri di controllo ottimale, che effettivamente consente di rendere il prodotto/processo più robusto.

Per misurare la robustezza del prodotto/processo, si ricorre al concetto di *signal-to-noise ratio* (*SN ratio*), il quale è definito come il rapporto tra l'effetto utile, ovvero la variazione di risposta dovuta ad un cambiamento intenzionale del segnale di input al sistema, e l'effetto dannoso, cioè la variazione di risposta dovuta ai noise factors.

Il metodo di Taguchi è anche definito come un metodo di ottimizzazione a due

step, dove nel primo step si cerca di minimizzare la variabilità del sistema, e quindi di massimizzarne la robustezza. Invece, con il secondo step, si cerca di raggiungere il target, concentrandosi non più su quei parametri di controllo che influenzano il SN ratio, ma solo su quelli restanti che ne influenzano la condizione di ottimo. La configurazione ottimale del prodotto/processo sarà quindi frutto di un trade-off tra i control factors che massimizzano la robustezza, e quelli che vanno a definire il target.

Un esempio di applicazione del metodo di Taguchi si ha in Giappone (1950), con la Ina Tile Company. Infatti, quest'impresa, che si occupava della produzione di piastrelle, si era ritrovata con dei prodotti le cui dimensioni non rispettavano le specifiche. Il team addetto alla qualità, capì che la temperatura del forno usato per cuocere le piastrelle era soggetta a delle variazioni, causando quindi una non-uniformità nelle dimensioni delle piastrelle. Queste variazioni nella temperatura (*noise factor*) non potevano però essere eliminate, essendo il costo di un nuovo forno troppo eccessivo. Applicando il metodo di Taguchi, il team scoprì che aumentando il rivestimento di argilla (*control factor*), le piastrelle diventavano più robuste alle variazioni di temperatura, facilitando quindi la loro lavorazione.

### 2.1.1 Control factors e noise factors

Il metodo di Taguchi prevede la definizione di due tipi di fattori: i parametri di controllo (*control factors*), e i fattori di rumore (*noise factors*).

#### Control factors

Rappresentano quei parametri di design che si possono controllare, come ad esempio la strumentazione, il materiale utilizzato per ottenere un prodotto, e le sue caratteristiche.

Ai parametri di controllo sono inoltre associati dei livelli (*control factors levels*), che indicano il range di variazione di ciascun parametro.

#### Noise factors

Corrispondono a quelle condizioni di design che sono difficili, o comunque costose, da controllare durante la produzione, come ad esempio la temperatura e l'umidità dell'ambiente. Questi fattori causano delle variazioni nelle performance di un sistema, e nonostante non siano controllabili durante la produzione o in fase di utilizzo del componente, è comunque possibile simulare questi fattori in fase di design attraverso l'esperimento. Nel momento in cui si definiscono i noise factors, è anche opportuno scegliere i livelli di rumore (*noise*

*factors levels*), i quali rappresentano quei range di condizioni sotto le quali la risposta deve rimanere robusta.

## 2.1.2 Matrici ortogonali

Per poter stimare l'effetto dei diversi fattori sulle variazioni subite dal prodotto/processo, il metodo di Taguchi sfrutta delle matrici ortogonali, le quali fanno sì che ciascun livello di rumore abbia un ugual peso. In questo modo, ciascun fattore può essere stimato indipendentemente dagli altri, e il suo effetto non andrà ad influenzare la stima dei restanti fattori, riducendo notevolmente il tempo e il costo dell'esperimento.

La notazione utilizzata per indicare le matrici ortogonali ottenute con Taguchi, è del tipo:

$$L(\text{numero})(\text{numero}^{\text{esponente}})$$

dove

- $L(\text{numero})$  rappresenta il numero di casi analizzati;
- $(\text{numero}^{\text{esponente}})$ 
  - *numero* indica il numero di livelli di ciascun parametro;
  - *esponente* indica il numero di parametri di controllo;

Un esempio di matrice ortogonale si ha in Figura 2.1, la quale corrisponde ad una matrice  $L9(3^4)$  con 3 livelli e 4 parametri di controllo, per un totale di 9 casi. Se la matrice non fosse ortogonale e si considerasse un fattoriale completo, allora i casi da considerare sarebbero  $3^4 = 81$  anziché 9.

	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Figura 2.1:  $L9(3^4)$

Facendo sempre riferimento alla Figura 2.1, si ha che le colonne della matrice rappresentano i control factors, mentre le righe rappresentano i casi, e quindi le diverse combinazioni dei livelli. Infine, ciascuna cella della matrice corrisponde ad un livello di fattore per quel dato caso.

### 2.1.3 Signal-to-noise ratio

Come descritto precedentemente, nel primo step del metodo di Taguchi, si vogliono individuare quei control factors che consentono di ottenere un prodotto robusto, e che quindi permettono di massimizzare il SN ratio. Infatti, maggiore è il signal-to-noise ratio, maggiore sarà la robustezza del componente.

Il SN ratio misura inoltre come varia la risposta del sistema in relazione al suo funzionamento nominale o di target, e per calcolarlo si utilizzano diverse formule a seconda di quello che è l'obiettivo dell'esperimento.

#### Nominal-the-best

Quando il sistema in esame ha un target fisso e finito, la sua risposta prende il nome di *nominal-the-best response*. In questo caso, l'obiettivo è raggiungere la risposta di target, e il SN ratio viene calcolato a partire dalle seguenti grandezze:

- somma totale dei quadrati

$$S_T = y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_n^2$$

- somma dei quadrati dati dalla media

$$S_m = \frac{(y_1 + y_2 + \dots + y_n)^2}{n}$$

- varianza dovuta al rumore e all'errore

$$V_e = \frac{S_T - S_m}{n - 1}$$

$$SN = 10 \cdot \log \left[ \frac{1}{n} (S_m - V_e) \right]$$

### Larger-is-better

Nel caso di *larger-is-better response*, l'obiettivo è quello di massimizzare la risposta del sistema. Per quanto riguarda invece il SN ratio, questo dipende dalla media delle deviazioni standard:

$$\bar{\sigma}^2 = \frac{1}{n} \left( \frac{1}{y_1^2} + \frac{1}{y_2^2} + \dots + \frac{1}{y_n^2} \right)$$

$$SN = -10 \cdot \log(\bar{\sigma}^2)$$

### Smaller-is-better

Infine, nel caso di *smaller-is-better response*, l'obiettivo è quello di minimizzare la risposta del sistema, mentre il SN ratio viene calcolato in maniera analoga al caso larger:

$$\bar{\sigma}^2 = \frac{1}{n} (y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_n^2)$$

$$SN = -10 \cdot \log(\bar{\sigma}^2)$$

## 2.1.4 Media

Dopo aver individuato quali parametri di controllo influenzano effettivamente il SN ratio, e quindi la robustezza del componente, si procede con il secondo step del metodo di Taguchi. Questo mira a trovare quei control factors che consentono di massimizzare o minimizzare la media, a seconda del target che si vuole raggiungere.

La media, d'altra parte, si ottiene facendo la media delle risposte per ogni combinazione di livelli.

## 2.1.5 Limitazione del metodo di Taguchi

Il metodo di Taguchi rappresenta senz'altro uno strumento molto utile per svolgere l'analisi di robust design. Tuttavia, presenta una forte limitazione, che è data dal fatto che i risultati ottenuti dipendono da come vengono scelti i range di variazione dei parametri di controllo.

Questo problema può essere risolto ricorrendo invece all'ottimizzazione robusta.

## 2.2 Minitab

Nel condurre quest'analisi di robust parameter design, si sfrutta il software *Minitab*, il quale si occupa di analisi statistiche, predittive e di miglioramento dei processi.

Nello specifico, questo software consente di svolgere un *design of experiments* (*DOE*). Si tratta di una serie di esperimenti, che hanno il compito di individuare gli effetti di una serie di variabili di input (*factors*), su una sola variabile di output (*response*). A loro volta, questi esperimenti, consistono in una serie di test, nei quali vengono apportate delle modifiche alle variabili di input.

Si ricorre al DOE per individuare quelle condizioni di un processo, o quei componenti di un prodotto, che ne influenzano la qualità.

Minitab offre la possibilità di usufruire di diversi metodi di design, tra cui il metodo di Taguchi. Infatti, una volta scelta la dimensione della matrice ortogonale, e inseriti i control factors e noise factors, è possibile impostare il DOE e quindi i casi di interesse. Dopodiché, nota la risposta del sistema per ogni combinazione di parametri, e quindi per ogni riga della matrice ortogonale, è possibile calcolare e visualizzare il SN ratio e la media delle risposte. Infine, operando un trade-off tra quei control factors che massimizzano la robustezza, e quei parametri che invece definiscono il target da raggiungere, si riesce ad individuare la configurazione ottimale.

---

## SCelta DEI CONTROL FACTORS

---

Per applicare il metodo di Taguchi, e svolgere quindi l'analisi di robust parameter design, è necessario definire i *control factors* e i *noise factors*, specificando inoltre il numero di livelli associati a ciascun fattore.

Un criterio di scelta dei parametri di controllo che si potrebbe adottare, prevede di considerare la distribuzione di portanza locale che agisce sulla pala della ventola.

Nello specifico, data la distribuzione di portanza di una pala già nota, si procede con la sua ottimizzazione, andando ad agire solamente sulla corda.

Ricordando però la relazione della portanza, si nota come questa sia funzione non solo della corda ma anche dell'angolo di calettamento. Infatti:

$$L = \frac{1}{2} \rho v^2 C_{L_\alpha} (\alpha - \alpha_0) c$$

dove  $C_{L_\alpha}$  è il coefficiente angolare di portanza,  $\alpha$  l'angolo di calettamento,  $c$  la corda della pala,  $\rho$  la densità dell'aria, e  $v$  la sua velocità.

Nonostante questa dipendenza dalla corda e dall'angolo di calettamento, non conviene andare ad agire contemporaneamente su entrambe le grandezze. Infatti, a causa della non linearità della relazione, dovuta alla presenza dell'angolo di calettamento a portanza nulla ( $\alpha_0$ ), si potrebbero avere dei problemi nell'applicazione del metodo di Taguchi. Di conseguenza, conviene trascurare momentaneamente l'influenza dell'angolo di calettamento.

D'altra parte, si sceglie di agire sulla corda, e quindi di ottimizzare la distribuzione di portanza, perché quest'ultima influenza il lavoro estratto dalla pala e quindi la sua efficienza.

### 3.1 Parametrizzazione geometrica della pala

Per capire come varia la distribuzione di portanza in funzione della corda, si procede con la parametrizzazione geometrica della pala tramite le *funzioni di forma*.

Le funzioni di forma sono dei polinomi che permettono di capire come si spostano i punti interni alla corda della pala in funzione degli spostamenti nodali, ovvero in funzione di come si spostano i punti estremi. Pertanto, definito il grado del polinomio e l'ampiezza delle funzioni di forma, è possibile risalire allo spostamento dei punti più interni.

Una proprietà molto importante delle funzioni di forma, è la proprietà additiva. Infatti, grazie all'additività, si possono sommare più funzioni di forma differenti, in modo tale da ottenere un range di variazione della corda più ampio.

Nello specifico, si scelgono di adottare quattro funzioni di forma con rispettivamente un andamento costante, lineare, quadratico, e cubico. Per quanto riguarda invece la loro ampiezza, si scelgono dei valori che diano un'escursione massima di variazione della corda di  $\pm 10$  [mm], e un'escursione media di  $\pm 7$  [mm].

Di seguito vengono riportati i valori delle ampiezze delle quattro funzioni di forma, con i rispettivi andamenti, scelti in modo tale da rispettare i requisiti di escursione.

**C0=0**

$$y = 0$$

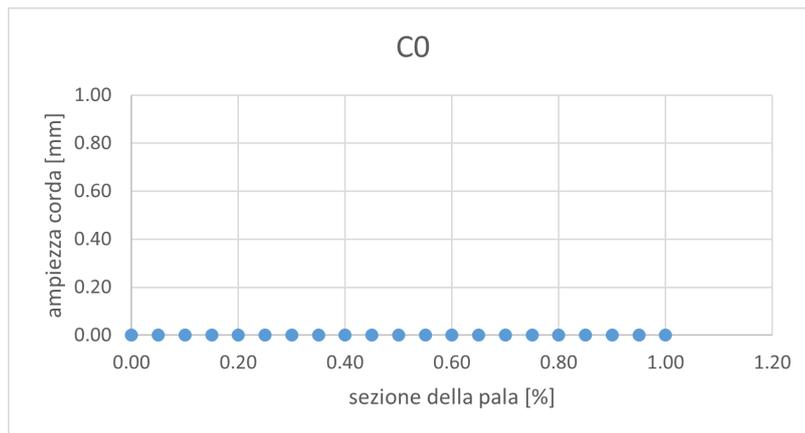


Figura 3.1: Funzione di forma costante

**C1=5**

$$y = 2.5 - 5x$$

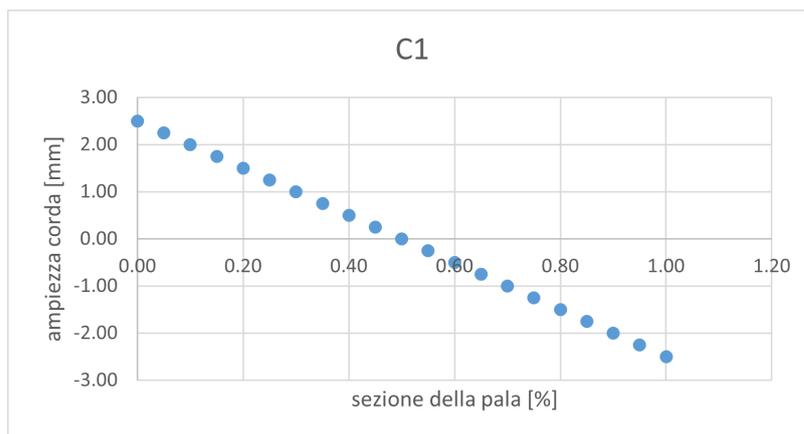


Figura 3.2: Funzione di forma lineare

**C2=-10**

$$y = 40x(x - 1) - 6.667$$

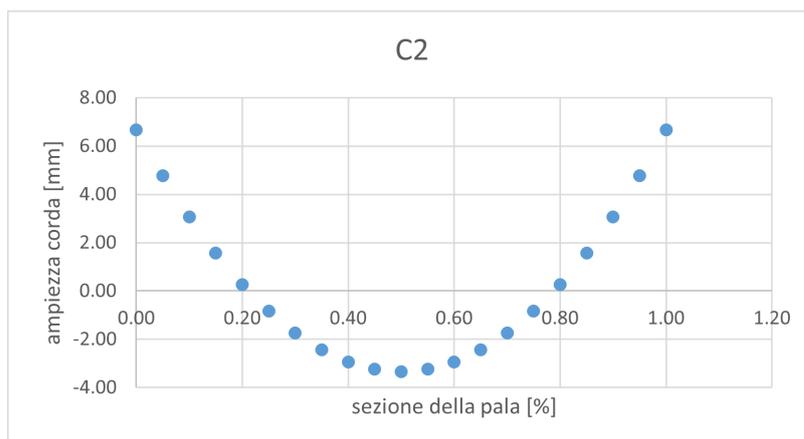


Figura 3.3: Funzione di forma quadratica

C3=10

$$y = 10.45 \cdot 10x(x - 1)(x - 0.5)$$

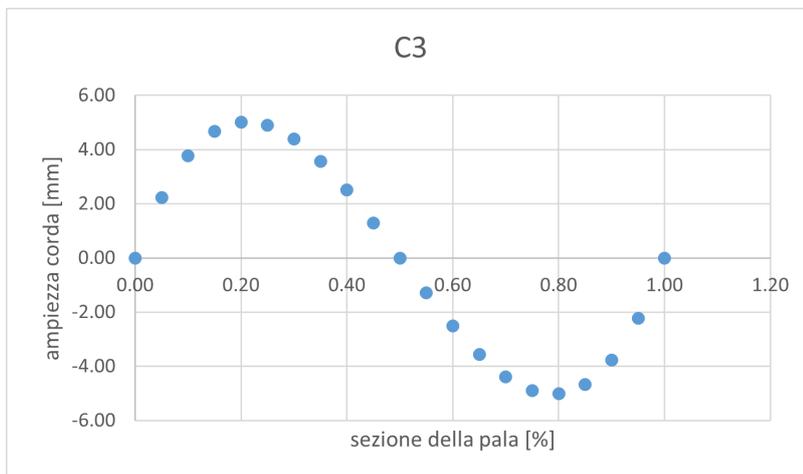


Figura 3.4: Funzione di forma cubica

### 3.1.1 Considerazioni sulle funzioni di forma

Le ampiezze delle quattro funzioni di forma  $C0$ ,  $C1$ ,  $C2$ , e  $C3$  corrispondono ai *control factors* necessari per applicare il metodo di Taguchi.

Un'altra alternativa alle funzioni di forma, sarebbe quella di adottare una *curva di Bézier*, quadratica o cubica, e quindi scegliere come *control factors* i suoi punti di controllo.

Operando però questa scelta, si possono incontrare dei problemi nell'applicazione del metodo di Taguchi. Infatti, pur avendo la possibilità di spaziare un range di variazione della corda più ampio, grazie alla capacità di questa curva parametrica di assumere forme diverse, i parametri di controllo sarebbero dipendenti tra di loro e quindi ci sarebbe una correlazione tra di questi.

D'altra parte, si è visto come le funzioni di forma siano sovrapponibili tra di loro grazie alla proprietà additiva. Tuttavia, il fatto che queste siano sovrapponibili, non implica che le prestazioni siano lineari con le funzioni di forma. Infatti, a seconda di come si scelgono i parametri di controllo, si potrebbero avere degli andamenti del SN ratio diversi. Di conseguenza, non è accurato sovrapporre gli effetti, e bisogna prestare particolare attenzione alla scelta dei *control factors*.

Per risolvere questo problema, si potrebbe pensare di ricorrere all'ottimizzazione robusta anziché al metodo di Taguchi, dal momento che quest'ultimo

non dipende dalla scelta degli estremi, e inoltre consente di spaziare dei range di variazione più ampi.



---

## APPLICAZIONE DEL METODO DI TAGUCHI

---

Dopo aver scelto come *control factors* i parametri relativi alle distribuzioni di corda  $C0$ ,  $C1$ ,  $C2$  e  $C3$ , si procede con l'individuazione dei *noise factors* e del numero di livelli associati a ciascun fattore.

Nello specifico, per quanto riguarda i *noise factors*, si considera come unica condizione di rumore l'inserimento del *back plate* a valle della ventola, e pertanto si ha a che fare con due livelli di rumore dati dalla presenza e assenza del pannello. Invece, per quanto riguarda i *control factors*, si impone un numero di livelli pari a tre.

In questo modo, si può procedere con l'impostazione di un DOE L9(3<sup>4</sup>), dove 4 sono i parametri di controllo, 3 i livelli di ciascun parametro, e 9 i casi totali da analizzare per poter individuare quella configurazione di pala, e quindi di ventola, che sia più robusta e che abbia un SN più alto.

### 4.1 Scelta dei control factors levels

I livelli associati a ciascun parametro di controllo vengono scelti tenendo conto della solidità della pala, e quindi del lavoro che si può estrarre.

Questi valori, riportati in Figura 4.1, corrispondono a tre possibili ampiezze che le quattro funzioni di forma, definite nel capitolo precedente, possono assumere.

	C0	C1	C2	C3
Liv. 1	0	5	-10	10
Liv. 2	0	0	0	0
Liv. 3	0	-5	10	-10

Figura 4.1: Livelli scelti

Nello specifico, sono stati scelti tali valori in modo tale da avere corda media fissata, solidità costante, e punto di lavoro che non cambia.

Se però venissero scelti dei livelli e delle funzioni di forma differenti da quelle considerate, si otterrebbero 9 configurazioni di pala, ciascuna caratterizzata da un valore di solidità differente. Pertanto, si dovrebbe eseguire uno studio sulla solidità delle 9 pale a posteriori.

Infatti, la particolarità delle funzioni di forma scelte sta nell'aver un integrale medio nullo per quanto riguarda le distribuzioni di corda  $C1$ ,  $C2$  e  $C3$ . In questo modo, le variazioni di solidità media sono rese nulle, mentre le variazioni di distribuzioni di solidità possono cambiare.

D'altra parte, poiché le funzioni di forma relative a  $C1$ ,  $C2$  e  $C3$  hanno integrale medio nullo, la solidità dipenderà unicamente dall'andamento della distribuzione di corda  $C0$ . Questo implica che si possono avere solo tre casi di solidità: o tutto positivo ( $+C0$ ), o tutto negativo ( $-C0$ ), o tutto nullo. Essendo però nel caso in esame  $C0$  nullo, la solidità non varia e il punto di lavoro non si sposta, facilitando quindi il confronto tra le 9 pale.

Infine, scegliendo in questo modo i parametri di controllo e i relativi livelli, è possibile valutare meglio l'effetto di una distribuzione di corda lineare, quadratica e cubica sulla variazione di corda e di portanza, in modo tale da capire come la distribuzione di portanza varia con le funzioni di forma.

## 4.2 DOE su Excel

Una volta definiti i control factors e i relativi livelli, si procede con l'impostazione di un DOE  $L9(3^4)$  su Excel, in modo tale da visualizzare facilmente le variazioni di corda dovute alla sovrapposizione delle quattro funzioni di forma.

	<b>C0</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C0</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>
<b>0</b>	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>1</b>	1	1	1	1	0	5	-10	10
<b>2</b>	1	2	2	2	0	0	0	0
<b>3</b>	1	3	3	3	0	-5	10	-10
<b>4</b>	2	1	2	3	0	5	0	-10
<b>5</b>	2	2	3	1	0	0	10	10
<b>6</b>	2	3	1	2	0	-5	-10	0
<b>7</b>	3	1	3	2	0	5	10	0
<b>8</b>	3	2	1	3	0	0	-10	-10
<b>9</b>	3	3	2	1	0	-5	0	10

Figura 4.2: DOE su Excel

Nello specifico, facendo riferimento al DOE riportato in Figura 4.2, si ha che:

- le colonne corrispondono ai control factors, ovvero alle 4 distribuzioni di corda;
- le righe rappresentano i 9 casi da analizzare, a partire dal caso base non modificato (caso 0);
- il numero riportato in ogni cella indica il livello associato al parametro di controllo di quella data colonna.

Di seguito vengono invece riportate le distribuzioni di corda  $C1$ ,  $C2$  e  $C3$  per ciascuno dei 9 casi, mentre viene omessa la distribuzione di corda  $C0$  essendo questa ovunque nulla per questioni di solidità.

C1																				
0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
2.50	2.25	2.00	1.75	1.50	1.25	1.00	0.75	0.50	0.25	0.00	-0.25	-0.50	-0.75	-1.00	-1.25	-1.50	-1.75	-2.00	-2.25	-2.50
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-2.50	-2.25	-2.00	-1.75	-1.50	-1.25	-1.00	-0.75	-0.50	-0.25	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50
2.50	2.25	2.00	1.75	1.50	1.25	1.00	0.75	0.50	0.25	0.00	-0.25	-0.50	-0.75	-1.00	-1.25	-1.50	-1.75	-2.00	-2.25	-2.50
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-2.50	-2.25	-2.00	-1.75	-1.50	-1.25	-1.00	-0.75	-0.50	-0.25	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50
2.50	2.25	2.00	1.75	1.50	1.25	1.00	0.75	0.50	0.25	0.00	-0.25	-0.50	-0.75	-1.00	-1.25	-1.50	-1.75	-2.00	-2.25	-2.50
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-2.50	-2.25	-2.00	-1.75	-1.50	-1.25	-1.00	-0.75	-0.50	-0.25	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50

Figura 4.3: Distribuzione di corda C1

C2																				
0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
6.67	4.77	3.07	1.57	0.27	-0.83	-1.73	-2.43	-2.93	-3.23	-3.33	-3.23	-2.93	-2.43	-1.73	-0.83	0.27	1.57	3.07	4.77	6.67
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-6.67	-4.77	-3.07	-1.57	-0.27	0.83	1.73	2.43	2.93	3.23	3.33	3.23	2.93	2.43	1.73	0.83	-0.27	-1.57	-3.07	-4.77	-6.67
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-6.67	-4.77	-3.07	-1.57	-0.27	0.83	1.73	2.43	2.93	3.23	3.33	3.23	2.93	2.43	1.73	0.83	-0.27	-1.57	-3.07	-4.77	-6.67
6.67	4.77	3.07	1.57	0.27	-0.83	-1.73	-2.43	-2.93	-3.23	-3.33	-3.23	-2.93	-2.43	-1.73	-0.83	0.27	1.57	3.07	4.77	6.67
-6.67	-4.77	-3.07	-1.57	-0.27	0.83	1.73	2.43	2.93	3.23	3.33	3.23	2.93	2.43	1.73	0.83	-0.27	-1.57	-3.07	-4.77	-6.67
6.67	4.77	3.07	1.57	0.27	-0.83	-1.73	-2.43	-2.93	-3.23	-3.33	-3.23	-2.93	-2.43	-1.73	-0.83	0.27	1.57	3.07	4.77	6.67
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Figura 4.4: Distribuzione di corda C2

C3																				
0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
0.00	2.23	3.76	4.66	5.02	4.90	4.39	3.57	2.51	1.29	0.00	-1.29	-2.51	-3.57	-4.39	-4.90	-5.02	-4.66	-3.76	-2.23	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	-2.23	-3.76	-4.66	-5.02	-4.90	-4.39	-3.57	-2.51	-1.29	0.00	1.29	2.51	3.57	4.39	4.90	5.02	4.66	3.76	2.23	0.00
0.00	2.23	3.76	4.66	5.02	4.90	4.39	3.57	2.51	1.29	0.00	-1.29	-2.51	-3.57	-4.39	-4.90	-5.02	-4.66	-3.76	-2.23	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	-2.23	-3.76	-4.66	-5.02	-4.90	-4.39	-3.57	-2.51	-1.29	0.00	1.29	2.51	3.57	4.39	4.90	5.02	4.66	3.76	2.23	0.00
0.00	2.23	3.76	4.66	5.02	4.90	4.39	3.57	2.51	1.29	0.00	-1.29	-2.51	-3.57	-4.39	-4.90	-5.02	-4.66	-3.76	-2.23	0.00

Figura 4.5: Distribuzione di corda C3

Dalla sovrapposizione di queste quattro funzioni di forma, si può calcolare facilmente la variazione di corda attesa per ciascuno dei 9 casi, rispettando quella combinazione di parametri riportata in ogni riga del DOE (Figura 4.6). Infine, andando a rappresentare gli andamenti ottenuti precedentemente, è possibile visualizzare queste variazioni su Excel (Figura 4.7).

C tot																				
0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
9.17	9.25	8.83	7.98	6.78	5.32	3.66	1.88	0.07	-1.69	-3.33	-4.78	-5.94	-6.75	-7.12	-6.98	-6.25	-4.85	-2.70	0.28	4.17
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-9.17	-9.25	-8.83	-7.98	-6.78	-5.32	-3.66	-1.88	-0.07	1.69	3.33	4.78	5.94	6.75	7.12	6.98	6.25	4.85	2.70	-0.28	-4.17
2.50	0.02	-1.76	-2.91	-3.52	-3.65	-3.39	-2.82	-2.01	-1.04	0.00	1.04	2.01	2.82	3.39	3.65	3.52	2.91	1.76	-0.02	-2.50
-6.67	-2.53	0.70	3.10	4.75	5.73	6.12	6.00	5.44	4.53	3.33	1.94	0.43	-1.13	-2.66	-4.07	-5.28	-6.23	-6.83	-7.00	-6.67
4.17	2.52	1.07	-0.18	-1.23	-2.08	-2.73	-3.18	-3.43	-3.48	-3.33	-2.98	-2.43	-1.68	-0.73	0.42	1.77	3.32	5.07	7.02	9.17
-4.17	-2.52	-1.07	0.18	1.23	2.08	2.73	3.18	3.43	3.48	3.33	2.98	2.43	1.68	0.73	-0.42	-1.77	-3.32	-5.07	-7.02	-9.17
6.67	2.53	-0.70	-3.10	-4.75	-5.73	-6.12	-6.00	-5.44	-4.53	-3.33	-1.94	-0.43	1.13	2.66	4.07	5.28	6.23	6.83	7.00	6.67
-2.50	-0.02	1.76	2.91	3.52	3.65	3.39	2.82	2.01	1.04	0.00	-1.04	-2.01	-2.82	-3.39	-3.65	-3.52	-2.91	-1.76	0.02	2.50

Figura 4.6: Sovrapposizione delle distribuzioni di corda

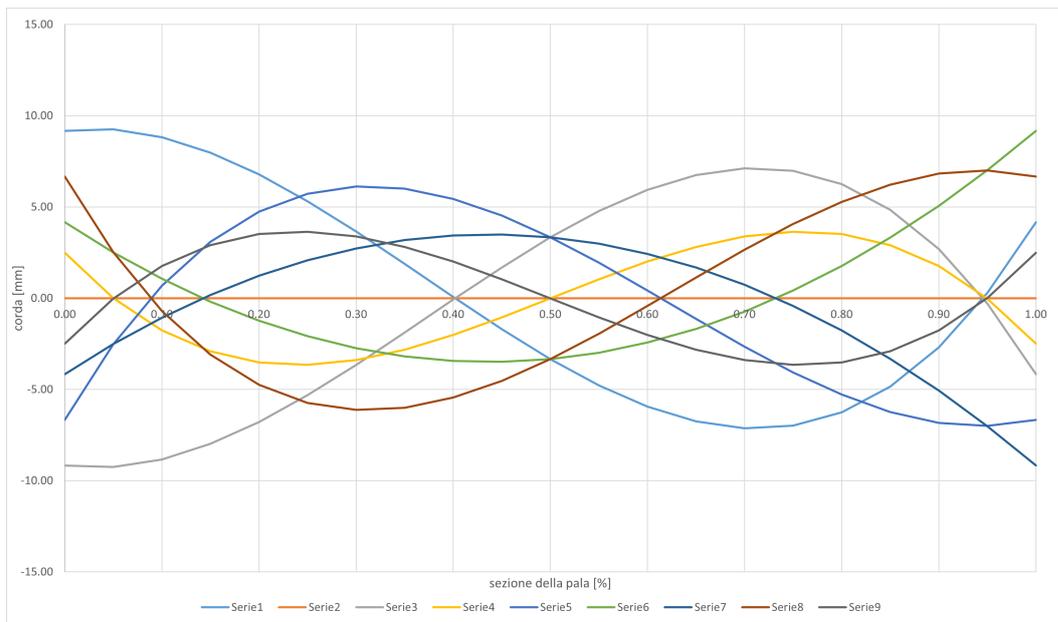


Figura 4.7: Variazioni di corda

Considerando la Figura 4.7, si osserva come i parametri di controllo scelti, e le relative funzioni di forma, siano adatti all'analisi che si vuole condurre. Infatti, questi consentono di spaziare più configurazioni di pala, in quanto ciascuna è caratterizzata da una variazione di corda differente.

---

## CONFRONTO RANS E DES

---

Una volta ricavate le distribuzioni di corda complessive, si procede con la costruzione delle 9 pale a partire dalla configurazione base, andando poi ad applicare le variazioni di corda individuate precedentemente. Queste 9 pale sono quindi ottenute dalla somma di una funzione lineare ( $C1$ ), di una Bézier quadratica ( $C2$ ), e di una Bézier cubica ( $C3$ ), sfruttando i relativi punti di controllo.

Definita la geometria di ciascuna pala, si può svolgere l'analisi di robust parameter design in *Minitab*, considerando le 9 pale prima nella configurazione senza *back plate* ( $BP$ ), e poi nella configurazione con  $BP$ , per un totale di 18 casi.

Tuttavia, nel condurre quest'analisi, conviene ragionare non in termini di efficienza nel punto di lavoro, ma in termini di efficienza massima.

Infatti, ipotizzando di voler ottimizzare una data curva di efficienza, la quale presenta il punto di lavoro in corrispondenza del punto di efficienza massima, si otterrebbe uno spostamento della curva.

In particolare, se questa traslasse solo verticalmente, continuerebbe a valere la coincidenza tra il punto di lavoro e quello di efficienza massima. Se invece la curva si spostasse in alto a destra, allora l'efficienza nel punto di lavoro potrebbe essere addirittura più bassa di quella del caso non ottimizzato.

Di conseguenza, conviene ragionare in termini di efficienza massima, andando a ricercare quel valore di portata che consente di massimizzare l'efficienza.

Per poter individuare il punto di efficienza massima, bisogna procedere prima con la costruzione della curva di efficienza, ovvero è necessario disporre di almeno 5 valori di portata da interpolare.

D'altra parte, dovendo costruire queste curve di efficienza per ciascuno dei 18 casi in esame (9 senza  $BP$  e 9 con  $BP$ ), per un totale di 90 simulazioni CFD,

conviene ricorrere al modello RANS anzichè DES.

Infatti, pur avendo un'accuratezza inferiore, il modello RANS ha un costo computazionale ridotto, e quindi permette di velocizzare l'analisi.

## 5.1 Simulazioni RANS e DES nel punto di lavoro

Prima di ricavare le curve di efficienza, si procede con un confronto tra le simulazioni RANS e DES, in corrispondenza del punto di lavoro ( $Q = 0.75 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$ ) e nella sola configurazione senza BP, così da avere un'idea circa l'accuratezza di questo modello.

	Blade_00	Blade_01	Blade_02	Blade_03	Blade_04	Blade_05	Blade_06	Blade_07	Blade_08	Blade_09	
<b>DES</b>											
p_tot_inlet	-313.810217	-327.826024	-313.810217	-284.048813	-302.361771	-293.29044	-332.415823	-273.718585	-323.721359	-326.362478	Pa
moment_blade	-0.176694	-0.181559	-0.176694	-0.170924	-0.176063	-0.162815	-0.194538	-0.160595	-0.194241	-0.180842	Nm
moment_ring	-0.011614	-0.012672	-0.011614	-0.010869	-0.01163	-0.01036	-0.014923	-0.009634	-0.013861	-0.012220	Nm
moment_shroud	-0.005145	-0.005438	-0.005145	-0.004973	-0.005138	-0.004666	-0.005745	-0.004616	-0.005927	-0.005319	Nm
moment_hub	-0.000123	-0.000125	-0.000123	-0.00012	-0.00014	-0.00014	-0.000126	-0.000128	-0.000125	-0.000132	Nm
moment_tot*n°	-0.193576	-0.199794	-0.193576	-0.186886	-0.192971	-0.177981	-0.215332	-0.174973	-0.214154	-0.198513	Nm
mass_in	-1.742184	-1.798146	-1.742184	-1.681974	-1.736739	-1.601829	-1.937988	-1.574757	-1.927386	-1.786617	Nm
efficiency	0.098682	0.098682	0.098682	0.098682	0.098682	0.098682	0.098682	0.098682	0.098682	0.098682	kg/s
	0.749484	0.749484	0.749484	0.749484	0.749484	0.749484	0.749484	0.749484	0.749484	0.749484	m³/s
	0.495830	0.501855	0.495830	0.464872	0.479239	0.504013	0.472162	0.478466	0.462341	0.502839	%
	49.583045	50.185541	49.583045	46.487248	47.923934	50.401318	47.216168	47.846577	46.234141	50.283893	
<b>RANS</b>											
efficiency	46.46	47.60	46.46	40.62	45.32	41.20	47.30	41.98	46.83	47.13	%
p_tot_inlet	-269.13	-308.36	-269.13	-233.58	-261.74	-224.81	-323.53	-227.54	-317.75	-279.84	Pa
moment_blade*n°	-1.594	-1.783	-1.594	-1.582	-1.589	-1.502	-1.88	-1.492	-1.867	-1.634	Nm
moment_blade	-0.177111	-0.198111	-0.177111	-0.175778	-0.176556	-0.166889	-0.209111	-0.165778	-0.207444	-0.181556	Nm
moment_ring*n°	-0.1320	-0.1250	-0.1320	-0.1470	-0.1350	-0.1410	-0.1270	-0.1350	-0.1250	-0.1270	Nm

Figura 5.1: Confronto della pressione totale di inlet

Nello specifico, ci si concentra sugli andamenti della pressione totale di inlet, della coppia che agisce sulla pala, e dell'efficienza.

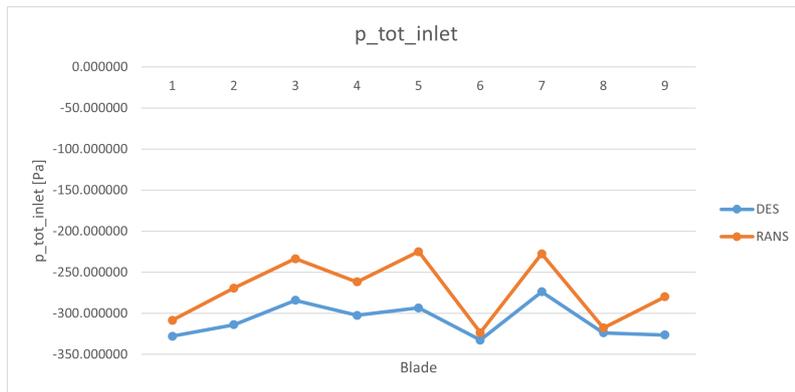


Figura 5.2: Confronto della pressione totale di inlet

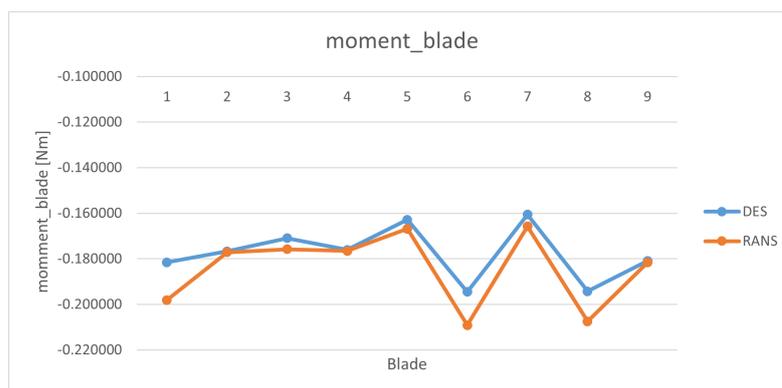


Figura 5.3: Confronto della coppia

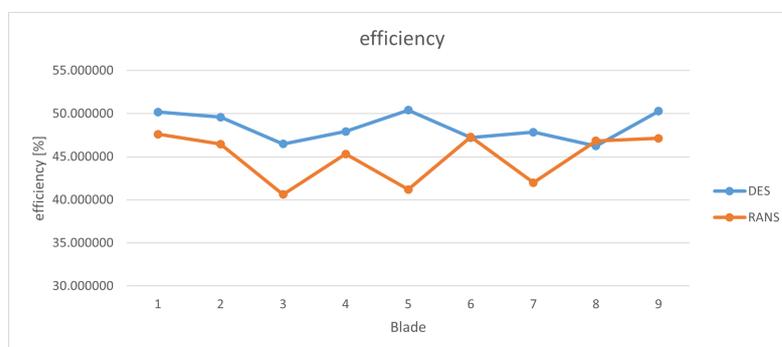


Figura 5.4: Confronto dell'efficienza

Osservando le figure riportate precedentemente, si nota che per quanto riguarda la coppia, gli andamenti ottenuti dalle simulazioni RANS e DES delle 9 pale senza BP, risultano essere molto simili tra di loro. La differenza tra i due modelli si osserva invece negli andamenti della pressione totale di inlet e dell'efficienza, soprattutto per i casi 5 e 7, i quali corrispondono a quelle configurazioni di pala caratterizzate da una riduzione eccessiva della corda nel bordo di fuga.

## 5.2 Matrici di correlazione

Per visualizzare meglio le differenze tra il modello RANS e DES, si ricorre alle *matrici di correlazione*, le quali sono delle matrici simmetriche che rappresentano la correlazione tra tutte le possibili coppie di valori di pressione, momento ed efficienza.

Nello specifico, queste matrici sono costituite da una serie di 1 e 0, dove con 1

si indica che le simulazioni RANS e DES hanno lo stesso trend (ad esempio a crescere o a ridursi), mentre con 0 si indica che le due simulazioni hanno trend opposto (ad esempio una a crescere e l'altra a ridursi).

Per ottenerle si parte dalla costruzione di due matrici, una per le simulazioni RANS e l'altra per le simulazioni DES, che hanno come riga i-esima e colonna j-esima il valore della grandezza in esame, ad esempio la pressione totale di inlet (Figura 5.5), riferita al caso considerato.

Il numero riportato all'interno di ciascuna cella (i,j) di queste due matrici, rappresenta invece la differenza tra il valore i-esimo e quello j-esimo.

Infine, andando a confrontare il segno della cella (i,j) della matrice DES, con quello della matrice RANS alla stessa posizione, si può ottenere la corrispondente matrice di correlazione (Figura 5.6).

Procedendo in maniera analoga anche per il momento e l'efficienza, si ottengono le matrici di correlazione in Figura 5.7 e 5.8.

p_tot_inlet										
DES										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
		-327.826024	-313.810217	-284.048813	-302.361771	-293.290440	-332.415823	-273.718585	-323.721359	-326.362478
1	-327.826024	0	-14.01581	-43.77721	-25.46425	-34.53558	4.58980	-54.10744	-4.10467	-1.46355
2	-313.810217	14.01581	0	-29.76140	-11.44845	-20.51978	18.60561	-40.09163	9.91114	12.55226
3	-284.048813	43.77721	29.76140	0	18.31296	9.24163	48.36701	-10.33023	39.67255	42.31367
4	-302.361771	25.46425	11.44845	-18.31296	0	-9.07133	30.05405	-28.64319	21.35959	24.00071
5	-293.290440	34.53558	20.51978	-9.24163	9.07133	0	39.12538	-19.57186	30.43092	33.07204
6	-332.415823	-4.58980	-18.60561	-48.36701	-30.05405	-39.12538	0	-58.69724	-8.69446	-6.05334
7	-273.718585	54.10744	40.09163	10.33023	28.64319	19.57186	58.69724	0	50.00277	52.64389
8	-323.721359	4.10467	-9.91114	-39.67255	-21.35959	-30.43092	8.69446	-50.00277	0	2.64112
9	-326.362478	1.46355	-12.55226	-42.31367	-24.00071	-33.07204	6.05334	-52.64389	-2.64112	0
RANS										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
		-308.36	-269.13	-233.58	-261.74	-224.81	-323.53	-227.54	-317.75	-279.84
1	-308.36	0	-39.23	-74.78	-46.62	-83.55	15.17	-80.82	9.39	-28.52
2	-269.13	39.23	0	-35.55	-7.39	-44.32	54.4	-41.59	48.62	10.71
3	-233.58	74.78	35.55	0	28.16	-8.77	89.95	-6.04	84.17	46.26
4	-261.74	46.62	7.39	-28.16	0	-36.93	61.79	-34.20	56.01	18.10
5	-224.81	83.55	44.32	8.77	36.93	0	98.72	2.73	92.94	55.03
6	-323.53	-15.17	-54.40	-89.95	-61.79	-98.72	0	-95.99	-5.78	-43.69
7	-227.54	80.82	41.59	6.04	34.2	-2.73	95.99	0	90.21	52.30
8	-317.75	-9.39	-48.62	-84.17	-56.01	-92.94	5.78	-90.21	0	-37.91
9	-279.84	28.52	-10.71	-46.26	-18.1	-55.03	43.69	-52.30	37.91	0

Figura 5.5: Pressione totale di inlet

p_tot_inlet										
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
8	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0
9	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1

Figura 5.6: Matrice di correlazione per la pressione totale di inlet

moment_blade									
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Figura 5.7: Matrice di correlazione per il momento

efficiency									
1	1	1	1	1	0	1	1	1	0
2	1	1	1	1	0	0	1	0	1
3	1	1	1	1	1	1	1	0	1
4	1	1	1	1	0	0	1	0	1
5	0	0	1	0	1	0	0	0	0
6	1	0	1	0	0	1	0	1	0
7	1	1	1	1	0	0	1	0	1
8	1	0	0	0	0	1	0	1	1
9	0	1	1	1	0	0	1	1	1

Figura 5.8: Matrice di correlazione per l'efficienza

Osservando queste matrici, si ha un'ulteriore conferma della differenza che sussiste tra i due modelli nel momento in cui si considerano la pressione totale di inlet e l'efficienza.

Nonostante ciò, l'utilizzo del modello RANS risulta essere più conveniente per costruire le curve di efficienza, e verificare che il punto di lavoro coincida effettivamente con quello di efficienza massima.



---

## CURVE DI EFFICIENZA

---

Dal confronto tra le simulazioni RANS e DES, svolte considerando il valore nominale di portata e la sola configurazione senza BP, è stato osservato come, nonostante ci siano delle sostanziali differenze in termini di pressione totale di inlet e di efficienza, queste siano trascurabili se si tiene conto dei vantaggi, dal punto di vista del costo computazionale, che si ottengono dall'utilizzo del modello RANS. Di conseguenza, nel costruire le 18 curve di efficienza (9 senza BP e 9 con BP), conviene ricorrere alle simulazioni RANS.

Infatti, è stato visto che per costruire queste curve è necessario disporre di almeno 5 punti a portata differente da interpolare, e questo vuol dire lanciare 5 simulazioni per ciascun caso, per un totale di 90 simulazioni (45 senza BP e 45 con BP). Impostare un modello RANS per queste 90 simulazioni, permette quindi di velocizzare notevolmente l'analisi.

### 6.1 Punto di efficienza massima

Per costruire le curve di efficienza, si considerano le variazioni di portata, rispetto al valore nominale ( $Q = 0.75 \frac{m^3}{s}$ ), riportate in Figura 6.1.

A partire da questi valori di portata, vengono lanciate le corrispondenti simulazioni RANS tramite il software *Ansys CFX*, per un totale di 90 simulazioni. Dopodiché dal loro post-processing si calcolano i relativi valori di efficienza, i quali sono necessari per costruire le curve di efficienza ed individuare quei valori di portata che le massimizzano.

Nello specifico, di seguito, vengono riportate le curve di efficienza ottenute per ciascun caso nella configurazione senza BP e con BP, dall'interpolazione dei 5 punti a portata differente. In questo modo, osservando i grafici ottenuti su Excel, è immediato individuare il punto di efficienza massima.

	P1	P2	P3	P4	P5	
%	-20%	-10%	0%	10%	20%	
Q	0.60	0.675	0.75	0.825	0.90	m <sup>3</sup> /s

Figura 6.1: Portate testate

### 6.1.1 Configurazione senza back plate

Andando ad interpolare i valori delle efficienze ottenute considerando la configurazione senza back plate a valle della ventola, si ottengono le curve riportate in Figura 6.3 e 6.4.

P1	Blade_00	Blade_01	Blade_02	Blade_03	Blade_04	Blade_05	Blade_06	Blade_07	Blade_08	Blade_09	
efficiency	33.57	33.24	33.57	33.06	33.31	39.85	32.14	39.9	31.85	33.75	%
p_tot_inlet	-345.08	-331.41	-345.08	-328.82	-344.99	-362.89	-342.51	-363.47	-343.61	-342.9	Pa
moment_blade*n°	-2.263	-2.195	-2.263	-2.19	-2.281	-2.005	-2.35	-2.006	-2.375	-2.237	Nm
moment_blade	-0.251444	-0.243889	-0.251444	-0.243333	-0.253444	-0.222778	-0.260667	-0.222889	-0.263889	-0.248556	Nm
moment_ring*n°	-0.1570	-0.1590	-0.1570	-0.1270	-0.1560	-0.1500	-0.1670	-0.1470	-0.1650	-0.1590	Nm
mass	2158.09	2158.09	2158.09	2158.09	2158.09	2158.09	2158.09	2158.09	2158.09	2158.09	m <sup>3</sup> /h

P2	Blade_00	Blade_01	Blade_02	Blade_03	Blade_04	Blade_05	Blade_06	Blade_07	Blade_08	Blade_09	
efficiency	43.85	43.97	43.85	42.74	43.47	44.36	43.43	44.17	43.21	44.06	%
p_tot_inlet	-336.34	-335.81	-336.34	-326.35	-333.06	-314.47	-353.75	-295.09	-351.99	-338.92	Pa
moment_blade*n°	-1.9	-1.892	-1.9	-1.891	-1.898	-1.756	-2.02	-1.655	-2.018	-1.905	Nm
moment_blade	-0.211111	-0.210222	-0.211111	-0.210111	-0.210889	-0.195111	-0.224222	-0.183889	-0.224222	-0.211667	Nm
moment_ring*n°	-0.1240	-0.1270	-0.1240	-0.1210	-0.1230	-0.1210	-0.1300	-0.1180	-0.1280	-0.1260	Nm
mass	2427.86	2427.86	2427.86	2427.86	2427.86	2427.86	2427.86	2427.86	2427.86	2427.86	m <sup>3</sup> /h

P3	Blade_00	Blade_01	Blade_02	Blade_03	Blade_04	Blade_05	Blade_06	Blade_07	Blade_08	Blade_09	
efficiency	46.46	47.60	46.46	40.62	45.32	39.29	47.30	41.98	46.83	47.13	%
p_tot_inlet	-269.13	-308.36	-269.13	-233.58	-261.74	-213.08	-323.53	-227.54	-317.75	-279.84	Pa
moment_blade*n°	-1.594	-1.783	-1.594	-1.582	-1.589	-1.492	-1.88	-1.492	-1.867	-1.634	Nm
moment_blade	-0.177111	-0.198111	-0.177111	-0.175778	-0.176556	-0.165778	-0.209111	-0.165778	-0.207444	-0.181556	Nm
moment_ring*n°	-0.1320	-0.1250	-0.1320	-0.1470	-0.1350	-0.1420	-0.1270	-0.1350	-0.1250	-0.1270	Nm
mass	2697.50	2697.50	2697.50	2697.50	2697.50	2697.50	2697.50	2697.50	2697.50	2697.50	m <sup>3</sup> /h

P4	Blade_00	Blade_01	Blade_02	Blade_03	Blade_04	Blade_05	Blade_06	Blade_07	Blade_08	Blade_09	
efficiency	41.98	42.08	41.98	39.98	40.83	38.58	43.66	40.96	42.82	42.63	%
p_tot_inlet	-217.65	-216.69	-217.65	-202.39	-211.37	-183.28	-242.97	-194.04	-235.25	-222.53	Pa
moment_blade*n°	-1.57	-1.559	-1.57	-1.532	-1.567	-1.438	-1.685	-1.434	-1.663	-1.58	Nm
moment_blade	-0.174444	-0.173222	-0.174444	-0.170222	-0.174111	-0.159778	-0.187222	-0.159333	-0.184778	-0.175556	Nm
moment_ring*n°	-0.1500	-0.1510	-0.1500	-0.1460	-0.1510	-0.1400	-0.1590	-0.1315	-0.1570	-0.1510	Nm
mass	2967.28	2967.28	2967.28	2967.28	2967.28	2967.28	2967.28	2967.28	2967.28	2967.28	m <sup>3</sup> /h

P5	Blade_00	Blade_01	Blade_02	Blade_03	Blade_04	Blade_05	Blade_06	Blade_07	Blade_08	Blade_09	
efficiency	38.61	43.55	38.61	37.41	39.57	41.31	40.52	41.01	40	43.03	%
p_tot_inlet	-178.64	-201.71	-178.64	-168.74	-180.72	-175.19	-202.25	-172.26	-198.7	-200.01	Pa
moment_blade*n°	-1.528	-1.530	-1.528	-1.49	-1.508	-1.401	-1.65	-1.387	-1.64	-1.535	Nm
moment_blade	-0.169778	-0.170000	-0.169778	-0.165556	-0.167556	-0.155667	-0.183111	-0.154111	-0.182222	-0.170556	Nm
moment_ring*n°	-0.1510	-0.1480	-0.1510	-0.1450	-0.1480	-0.1330	-0.1620	-0.1300	-0.1610	-0.1440	Nm
mass	3237.06	3237.06	3237.06	3237.06	3237.06	3237.06	3237.06	3237.06	3237.06	3237.06	m <sup>3</sup> /h

Figura 6.2: Valori delle efficienze senza BP

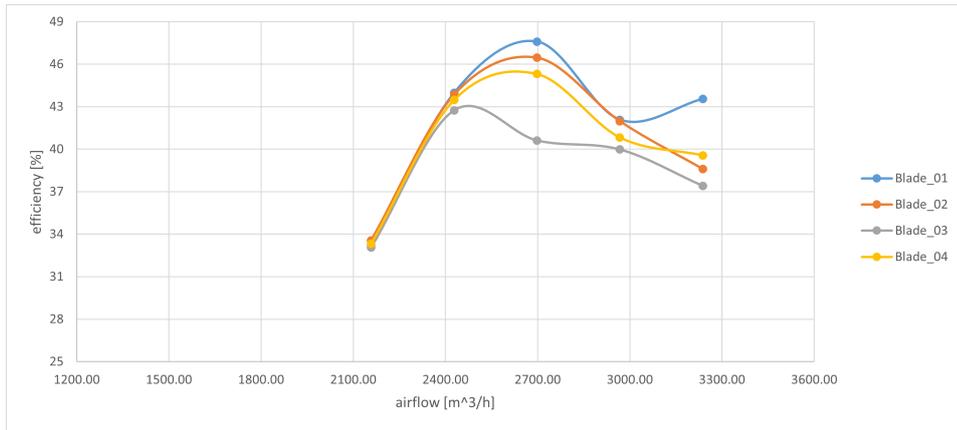


Figura 6.3: Curve di efficienza senza BP (1)

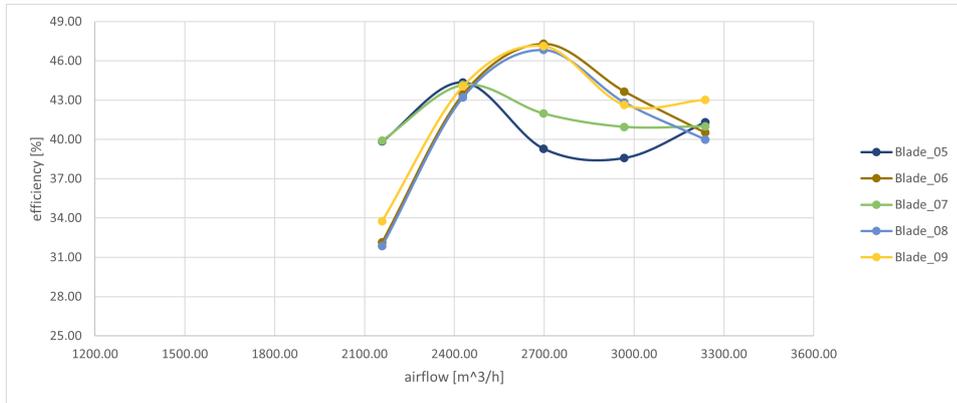


Figura 6.4: Curve di efficienza senza BP (2)

Nella figura che segue, sono riportati invece i valori delle efficienze in corrispondenza del punto di lavoro ( $e_{wp}$ ) e in corrispondenza di quel valore di portata che la massimizza ( $e_{max}$ ). Da questo confronto diretto, si può quindi stabilire se il punto di lavoro è anche punto di efficienza massima.

	Blade_01	Blade_02	Blade_03	Blade_04	Blade_05	Blade_06	Blade_07	Blade_08	Blade_09
<b>p_e_max</b>	0.75	0.75	0.675	0.75	0.675	0.75	0.675	0.75	0.75
<b>efficiency_wp</b>	47.60	46.46	40.62	45.32	39.29	47.30	41.98	46.83	47.13
<b>efficiency_max</b>	47.60	46.46	42.74	45.32	44.36	47.30	44.17	46.83	47.13

Figura 6.5: Confronto delle efficienze senza BP

In questo caso, si ottiene che il punto di lavoro coincide con quello di efficienza massima per tutte le configurazioni di pala ad eccezione di tre, le quali corri-

spondono inoltre a quelle pale con maggior variazione di corda in prossimità del mozzo o dell'anello.

## 6.1.2 Configurazione con back plate

Procedendo in maniera analoga anche per la configurazione con back plate, si ottengono le curve rappresentate in Figura 6.7 e 6.8, e i valori riportati in Figura 6.9.

P1	Blade_00_BP	Blade_01_BP	Blade_02_BP	Blade_03_BP	Blade_04_BP	Blade_05_BP	Blade_06_BP	Blade_07_BP	Blade_08_BP	Blade_09_BP	
efficiency	35.77	35.2	35.77	36	35.53	41.87	34.32	41.86	33.98	35.97	%
p_tot_inlet	-364.36	-348.99	-364.36	-372.21	-364.71	-378.09	-360.82	-377.07	-361.56	-362.42	Pa
moment_blade*n°	-2.24	-2.18	-2.24	-2.274	-2.257	-1.986	-2.31	-1.981	-2.34	-2.216	Nm
moment_blade	-0.248889	-0.242222	-0.248889	-0.252667	-0.250778	-0.220667	-0.256889	-0.220111	-0.260000	-0.246222	Nm
moment_ring*n°	-0.1570	-0.1590	-0.1570	-0.1530	-0.1550	-0.1490	-0.1680	-0.1460	-0.1650	-0.1580	Nm
mass	2155.54	2155.54	2155.54	2155.54	2155.54	2155.54	2155.54	2155.54	2155.54	2155.54	m³/h

P2	Blade_00_BP	Blade_01_BP	Blade_02_BP	Blade_03_BP	Blade_04_BP	Blade_05_BP	Blade_06_BP	Blade_07_BP	Blade_08_BP	Blade_09_BP	
efficiency	45.93	46.76	45.93	45.61	46.32	46.45	46.52	46.34	46.25	46.54	%
p_tot_inlet	-342.84	-349.2	-342.84	-311.13	-337.17	-301.28	-365.04	-296.93	-361.34	-348.35	Pa
moment_blade*n°	-1.847	-1.847	-1.847	-1.688	-1.801	-1.605	-1.941	-1.585	-1.933	-1.852	Nm
moment_blade	-0.205222	-0.205222	-0.205222	-0.187556	-0.200111	-0.178333	-0.215667	-0.176111	-0.214778	-0.205778	Nm
moment_ring*n°	-0.1210	-0.1240	-0.1210	-0.1190	-0.1200	-0.1170	-0.1260	-0.1150	-0.1230	-0.1240	Nm
mass	2425.00	2425.00	2425.00	2425.00	2425.00	2425.00	2425.00	2425.00	2425.00	2425.00	m³/h

P3	Blade_00_BP	Blade_01_BP	Blade_02_BP	Blade_03_BP	Blade_04_BP	Blade_05_BP	Blade_06_BP	Blade_07_BP	Blade_08_BP	Blade_09_BP	
efficiency	48.1	49.37	48.1	44.99	47.31	46.93	49.57	46.19	49.12	48.62	%
p_tot_inlet	-274.82	-286.63	-274.82	-251.42	-268.09	-249.10	-309.31	-244.96	-300.43	-279.46	Pa
moment_blade*n°	-1.571	-1.596	-1.571	-1.536	-1.558	-1.459	-1.72	-1.458	-1.681	-1.58	Nm
moment_blade	-0.174556	-0.177333	-0.174556	-0.170667	-0.173111	-0.162111	-0.190556	-0.162000	-0.186778	-0.175556	Nm
moment_ring*n°	-0.1230	-0.1200	-0.1230	-0.1270	-0.1260	-0.1200	-0.1260	-0.1200	-0.1250	-0.1220	Nm
mass	2694.32	2694.32	2694.32	2694.32	2694.32	2694.32	2694.32	2694.32	2694.32	2694.32	m³/h

P4	Blade_00_BP	Blade_01_BP	Blade_02_BP	Blade_03_BP	Blade_04_BP	Blade_05_BP	Blade_06_BP	Blade_07_BP	Blade_08_BP	Blade_09_BP	
efficiency	46.32	49.26	46.32	42.21	45.14	43.67	48.90	42.98	47.68	46.97	%
p_tot_inlet	-234.83	-246.57	-234.83	-213.11	-230.24	-209.66	-263.51	-205.93	-256.32	-240.37	Pa
moment_blade*n°	-1.533	-1.513	-1.533	-1.527	-1.542	-1.452	-1.630	-1.449	-1.625	-1.547	Nm
moment_blade	-0.170333	-0.168111	-0.170333	-0.169667	-0.171333	-0.161333	-0.181111	-0.161000	-0.180556	-0.171889	Nm
moment_ring*n°	-0.1280	-0.1200	-0.1280	-0.1310	-0.1300	-0.1230	-0.1320	-0.1230	-0.1350	-0.1290	Nm
mass	2963.78	2963.78	2963.78	2963.78	2963.78	2963.78	2963.78	2963.78	2963.78	2963.78	m³/h

P5	Blade_00_BP	Blade_01_BP	Blade_02_BP	Blade_03_BP	Blade_04_BP	Blade_05_BP	Blade_06_BP	Blade_07_BP	Blade_08_BP	Blade_09_BP	
efficiency	42.28	45.38	42.28	38.1	41.18	39.23	45.42	38.4	44.24	43.11	%
p_tot_inlet	-199.15	-212.41	-199.15	-177.22	-194.27	-174.90	-226.99	-170.36	-219.99	-205.54	Pa
moment_blade*n°	-1.554	-1.544	-1.554	-1.534	-1.556	-1.471	-1.648	-1.463	-1.64	-1.573	Nm
moment_blade	-0.172667	-0.171556	-0.172667	-0.170444	-0.172889	-0.163444	-0.183111	-0.162556	-0.182222	-0.174778	Nm
moment_ring*n°	-0.1340	-0.1330	-0.1340	-0.1350	-0.1350	-0.1290	-0.1410	-0.1280	-0.1410	-0.1360	Nm
mass	3233.24	3233.24	3233.24	3233.24	3233.24	3233.24	3233.24	3233.24	3233.24	3233.24	m³/h

Figura 6.6: Valori delle efficienze con BP

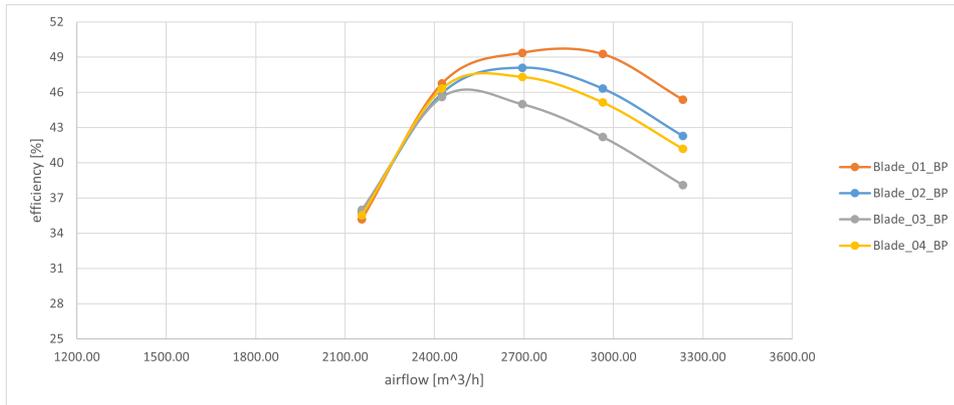


Figura 6.7: Curve di efficienza con BP (1)

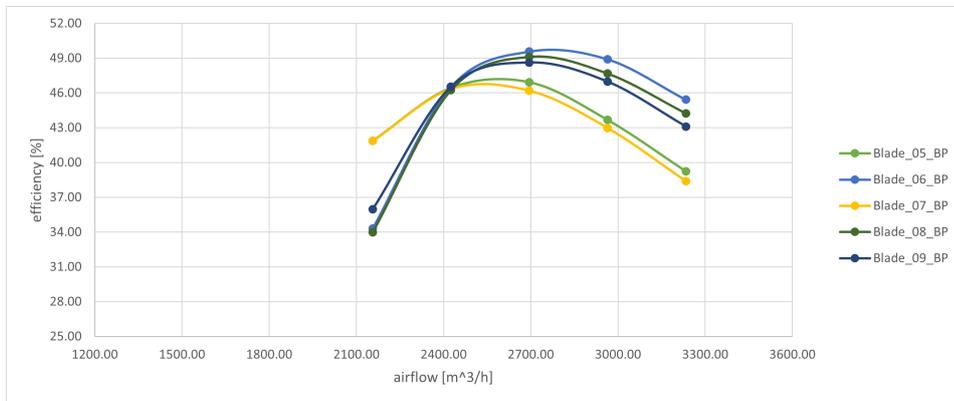


Figura 6.8: Curves di efficienza con BP (2)

	Blade_01_BP	Blade_02_BP	Blade_03_BP	Blade_04_BP	Blade_05_BP	Blade_06_BP	Blade_07_BP	Blade_08_BP	Blade_09_BP
p_e_max	0.75	0.75	0.675	0.75	0.75	0.75	0.675	0.75	0.75
efficiency_wp	49.37	48.1	44.99	47.31	46.93	49.57	46.19	49.12	48.62
efficiency_max	49.37	48.1	45.61	47.31	46.93	49.57	46.34	49.12	48.62

Figura 6.9: Confronto delle efficienze con BP

Considerando questa configurazione di ventola con pannello posizionato a valle, si osserva una differenza tra i due punti solamente per due pale, le quali presentavano questa differenza anche nella configurazione senza BP.

## 6.2 DOE e configurazione di pala ottimale

Una volta individuate le curve di efficienza, e quel valore di portata che le massimizza per ciascun caso delle due configurazioni, si procede con l'impo-

stazione di due DOE in Minitab, considerando prima l'efficienza nel punto di lavoro e in seguito l'efficienza massima.

In questo modo, è possibile individuare la configurazione di pala ottimale che massimizza il SN ratio nel caso di efficienza massima e di efficienza nel punto di lavoro, per poi confrontare queste due configurazioni ottimali risultanti.

L'obiettivo di questo confronto è capire se l'aver impostato le simulazioni considerando il punto di lavoro sia stata una buona scelta, e inoltre si vuole individuare quel parametro che fa da discriminante tra le due configurazioni di pala ottimale.

### 6.2.1 Efficienza massima

Considerando le efficienze massime nella configurazione senza BP e con BP, si può costruire il seguente DOE in Minitab, nelle cui colonne C7 e C8 sono riportati i valori del SN ratio e della media.

↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
	A	B	C		efficiency	efficiency_PP	SNRA1	MEAN1
1	5	-10	10		47.60	49.37	33.7078	48.485
2	5	0	0		46.46	48.10	33.4896	47.280
3	5	10	-10		42.74	45.61	32.8898	44.175
4	0	-10	0		45.32	47.31	33.3084	46.315
5	0	0	-10		44.36	46.93	33.1775	45.645
6	0	10	10		47.30	49.57	33.6960	48.435
7	-5	-10	-10		44.17	46.34	33.1058	45.255
8	-5	0	10		46.83	49.12	33.6129	47.975
9	-5	10	0		47.13	48.62	33.5990	47.875

Figura 6.10: DOE per l'efficienza massima

Per quanto riguarda invece gli andamenti del SN ratio e della media, in funzione dei 3 livelli associati a ciascun parametro di controllo, questi sono riportati in Figura 6.11 e 6.12.

Tenendo conto principalmente dell'andamento del SN ratio, si individuano quei parametri di controllo che lo massimizzano, e dalla cui combinazione si ricava la configurazione di pala ottimale nel caso di efficienza massima:

$$C0 = 0 \quad C1 = -5 \quad C2 = 0 \quad C3 = 10$$

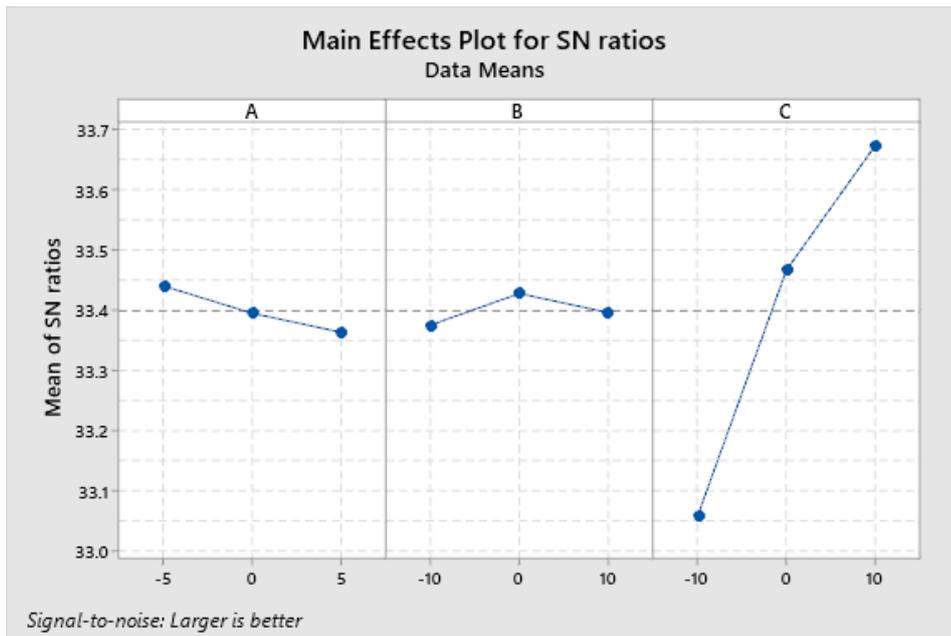


Figura 6.11: SN ratio per l'efficienza massima

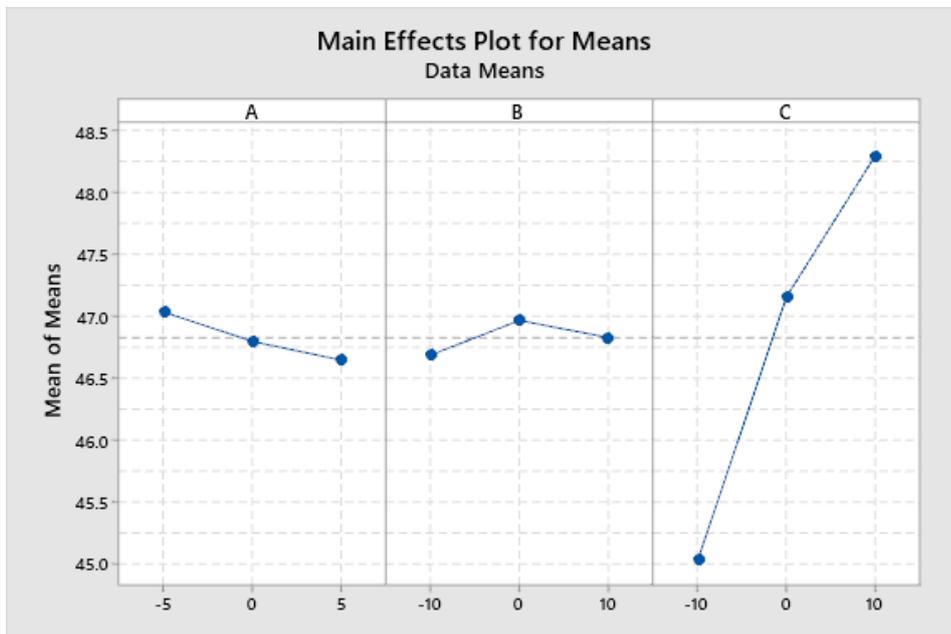


Figura 6.12: Media per l'efficienza massima

## 6.2.2 Efficienza nel punto di lavoro

In maniera analoga, considerando le efficienze nel punto di lavoro, si può impostare il seguente DOE in Minitab, da cui si ottengono poi gli andamenti del SN ratio e della media riportati in Figura 6.14 e 6.15.

↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
	A	B	C		efficiency	efficiency_PP	SNRA1	MEAN1
1	5	-10	10		47.60	49.37	33.7078	48.485
2	5	0	0		46.46	48.10	33.4896	47.280
3	5	10	-10		40.62	44.99	32.5959	42.805
4	0	-10	0		45.32	47.31	33.3084	46.315
5	0	0	-10		39.29	46.93	32.5891	43.110
6	0	10	10		47.30	49.57	33.6960	48.435
7	-5	-10	-10		41.98	46.19	32.8561	44.085
8	-5	0	10		46.83	49.12	33.6129	47.975
9	-5	10	0		47.13	48.62	33.5990	47.875

Figura 6.13: DOE per l'efficienza nel punto di lavoro

In questo caso, la configurazione di pala ottimale è individuata dai seguenti parametri di controllo che massimizzano il SN ratio:

$$C0 = 0 \quad C1 = -5 \quad C2 = 10 \quad C3 = 10$$

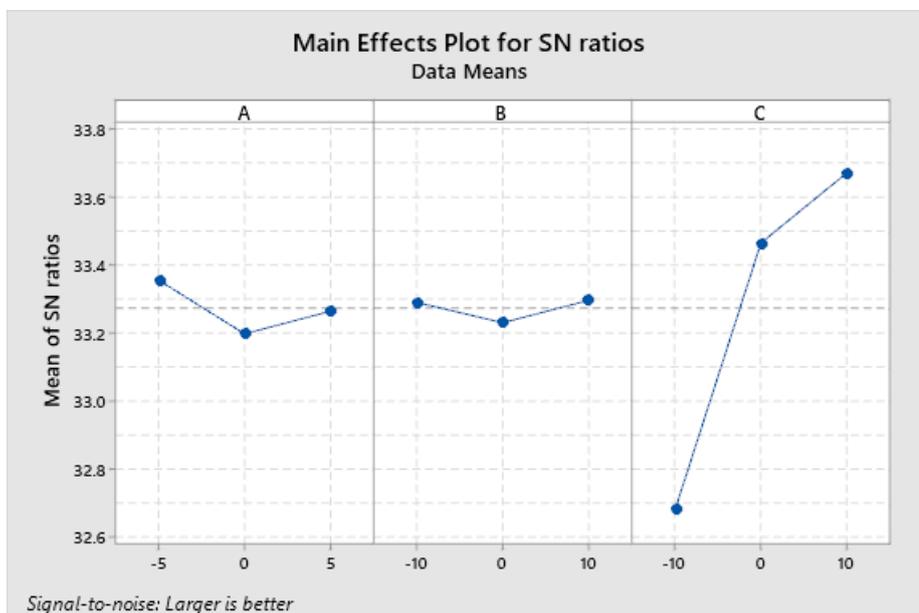


Figura 6.14: SN ratio per l'efficienza nel punto di lavoro

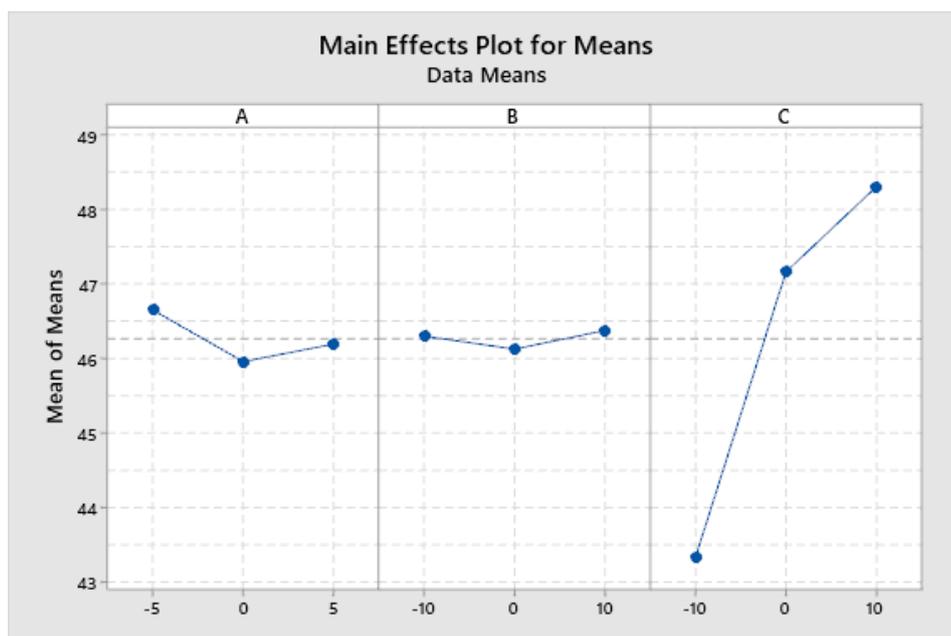


Figura 6.15: Media per l'efficienza nel punto di lavoro

### 6.2.3 Considerazioni sulle due configurazioni di pala ottimale

Facendo un confronto tra le due combinazioni di parametri che massimizzano il SN ratio quando si considera l'efficienza massima e l'efficienza nel punto di lavoro, si nota che queste differiscono per effetto del solo parametro  $C2$ , che corrisponde alla distribuzione quadratica della corda. D'altra parte però, questo parametro esercita un piccola influenza sulle variazioni del SN ratio e della media, pertanto può essere trascurato.

Per quanto riguarda invece gli altri parametri, si può osservare come  $C3$  sia il parametro più importante, di conseguenza conviene andare ad agire sulla distribuzione cubica della corda per capire come varia l'efficienza.

Infine, da queste considerazioni, si deduce che conviene ricorrere ad un modello DES con portata nel punto di lavoro, per svolgere l'analisi di robust parameter design.



---

## SIMULAZIONI CFD

---

Dal confronto tra le simulazioni RANS e DES, ma soprattutto in seguito allo studio svolto considerando le curve di efficienza, è stato ottenuto che conviene ricorrere al modello DES con portata nel punto di lavoro, per poter svolgere l'analisi di robust parameter design.

A partire da queste conclusioni, si procede quindi con l'impostazione delle 18 simulazioni CFD, dal cui post-processing si ricavano poi le relative efficienze nella configurazione con e senza BP.

### 7.1 Impostazione delle simulazioni

Le simulazioni CFD vengono condotte sulle 9 pale, generate nella configurazione senza BP e con BP a valle della ventola, per un totale di 18 simulazioni da lanciare.

Nell'impostare queste simulazioni si tiene conto del fatto che le funzioni di forma scelte consentono di annullare eventuali variazioni di solidità media, pertanto è come se si ragionasse a portata e a punto di lavoro costante. D'altra parte anche il numero di pale che compongono la ventola, la sua velocità di rotazione, e la densità del flusso d'aria sono ben definiti.

$$N = 10 \quad \omega = 2600 [rpm] \quad \rho = 1.185 \left[ \frac{kg}{m^3} \right] \quad Q = 0.75 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

Per quanto riguarda invece i software utilizzati per costruire la mesh e svolgere l'analisi CFD, si è deciso di ricorrere ad *Ansys Fluent* e *Turbogrid*, appoggiandosi al cluster aziendale essendo il costo computazionale delle simulazioni molto elevato.

In particolare, si adotta una mesh strutturata e un modello DES, viene simulata una time history di 0.15 s, e si impone il numero di iterazioni pari a 2500. Si potrebbe pensare di ridurre il numero di iterazioni a 1800, però facendo in questo modo si otterrebbero degli andamenti molto oscillanti e non costanti in media.

Nel lanciare queste 18 simulazioni, la pala viene simulata con il banco prova, e si considera il numero di giri costante.

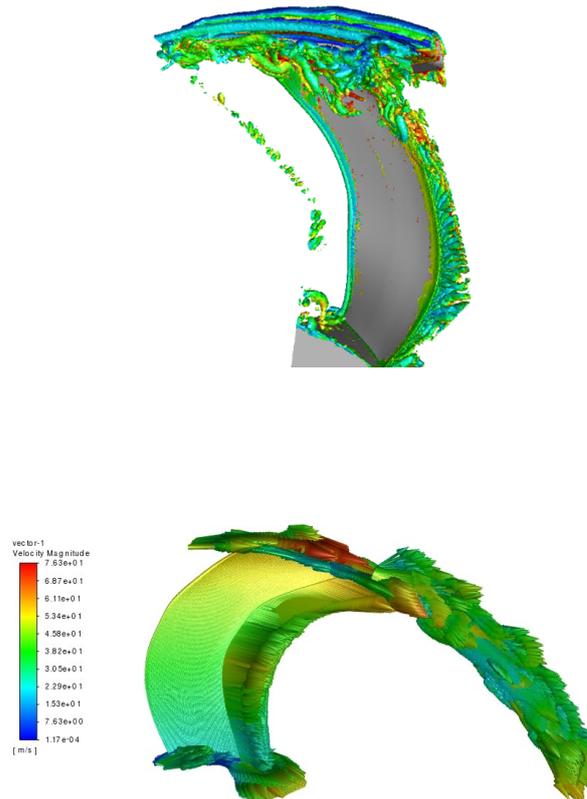


Figura 7.1: Scene vettoriali della velocità

## 7.2 Post-processing

Al termine di ciascuna simulazione, è possibile estrarre gli andamenti nel tempo di tutte quelle grandezze che sono necessarie per il calcolo dell'efficienza della ventola, in modo tale da fare un confronto diretto tra la configurazione di ventola con BP e senza BP.

Nello specifico, tramite una procedura automatizzata, si ottengono i grafici in Figura 7.2 e 7.3, i quali rappresentano la pressione totale di inlet e la coppia della pala.

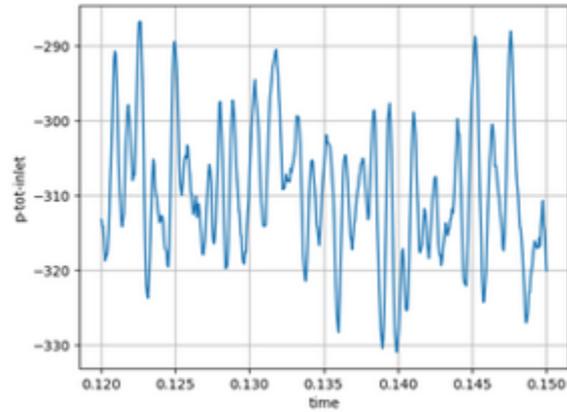


Figura 7.2: Andamento della pressione totale di inlet

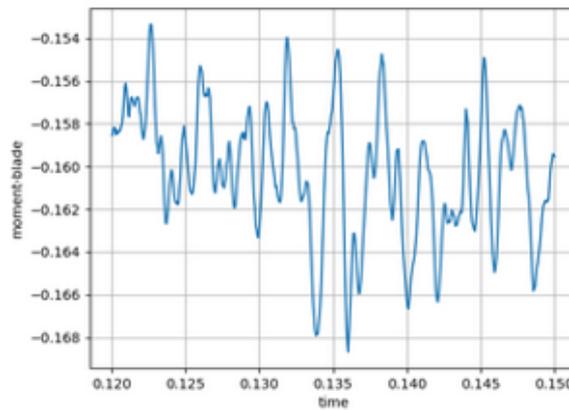


Figura 7.3: Andamento della coppia della pala

### 7.2.1 Calcolo dell'efficienza della ventola

Ricordando infatti la relazione per il calcolo dell'efficienza, si ha che:

$$\eta = \frac{Q \cdot p_{t_{inlet}}}{\omega \cdot c_{tot}} 100\%$$

dove  $Q$  rappresenta la portata d'aria che attraversa la ventola,  $\omega$  la velocità di rotazione della ventola,  $p_{t_{inlet}}$  la pressione totale di inlet, e infine  $c_{tot}$  la coppia totale.

A sua volta, la coppia totale è ottenuta sommando alla coppia della pala anche quella data dall'anello esterno, dallo shroud e dall'hub, il tutto moltiplicato poi per il numero di pale.

$$C_{tot} = (C_{blade} + C_{ring} + C_{shroud} + C_{hub}) \cdot N$$

In questo modo, a partire dalle varie grandezze definite prima, si procede con il calcolo delle efficienze delle 18 pale (9 con BP e 9 senza BP). Dopodiché, si imposta un DOE in Minitab e si inseriscono i valori delle efficienze appena ricavate, per trovare quella combinazione di parametri di controllo tale da massimizzare il SN ratio e le prestazioni.

Per semplificare la trattazione, si è deciso di raccogliere in un file Excel i valori di tutte le grandezze di interesse, considerando prima le 9 pale nella configurazione senza BP e poi le 9 pale nella configurazione con BP.

	Blade_00	Blade_01	Blade_02	Blade_03	Blade_04	Blade_05	Blade_06	Blade_07	Blade_08	Blade_09	
<b>DES</b>											
<b>p_tot_inlet</b>	-330.238954	-349.541515	-330.238954	-317.654315	-329.428764	-309.662036	-349.95623	-310.744315	-349.550487	-339.745468	Pa
<b>moment_blade</b>	-0.172562	-0.178480	-0.172562	-0.167284	-0.169053	-0.160275	-0.1915	-0.156281	-0.188691	-0.178285	Nm
<b>moment_ring</b>	-0.009860	-0.012154	-0.00986	-0.00962	-0.009523	-0.008829	-0.013128	-0.008763	-0.012934	-0.012467	Nm
<b>moment_shroud</b>	-0.004518	-0.004754	-0.004518	-0.004365	-0.004357	-0.004083	-0.005269	-0.003966	-0.005233	-0.004783	Nm
<b>moment_hub</b>	-0.000101	-0.000103	-0.000101	-0.000121	-0.000102	-0.000114	-0.000091	-0.000127	-0.000113	-0.000100	Nm
<b>moment_tot</b>	-0.187041	-0.195491	-0.187041	-0.181390	-0.183035	-0.173301	-0.209988	-0.169137	-0.206971	-0.195635	Nm
<b>moment_tot*n</b>	-1.870410	-1.954910	-1.870410	-1.813900	-1.830350	-1.733010	-2.099880	-1.691370	-2.069710	-1.956350	Nm
<b>mass_in</b>	0.088819	0.088819	0.088819	0.088819	0.088819	0.088819	0.088819	0.088819	0.088819	0.088819	kg/s
	0.749527	0.749527	0.749527	0.749527	0.749527	0.749527	0.749527	0.749527	0.749527	0.749527	m <sup>3</sup> /s
<b>efficiency</b>	0.486046	0.492218	0.486046	0.482089	0.495465	0.491895	0.458780	0.505767	0.464928	0.478071	
	48.604564	49.221808	48.604564	48.208873	49.546495	49.189506	45.878036	50.576658	46.492829	47.807131	%

Figura 7.4: Pale nella configurazione senza back plate

	Blade_00_BP	Blade_01_BP	Blade_02_BP	Blade_03_BP	Blade_04_BP	Blade_05_BP	Blade_06_BP	Blade_07_BP	Blade_08_BP	Blade_09_BP	
<b>DES</b>											
<b>p_tot_inlet</b>	-356.790109	-360.484447	-356.790109	-323.758491	-362.034047	-330.18766	-329.731341	-316.717538	-360.277157	-352.56816	Pa
<b>moment_blade</b>	-0.174504	-0.175507	-0.174504	-0.171636	-0.174201	-0.163636	-0.188306	-0.161819	-0.186159	-0.176986	Nm
<b>moment_ring</b>	-0.008998	-0.009626	-0.008998	-0.008542	-0.008392	-0.007343	-0.010235	-0.006792	-0.009765	-0.009662	Nm
<b>moment_shroud</b>	-0.004078	-0.003949	-0.004078	-0.004119	-0.004001	-0.00372	-0.004313	-0.00372	-0.004165	-0.004128	Nm
<b>moment_hub</b>	-0.000087	-0.000120	-0.000087	-0.000107	-0.0001	-0.000121	-0.000103	-0.000096	-0.000115	-0.000101	Nm
<b>moment_tot</b>	-1.876670	-1.892020	-1.876670	-1.844040	-1.866940	-1.748200	-2.029570	-1.724270	-2.002040	-1.908770	Nm
<b>mass_in</b>	0.088819	0.088819	0.088819	0.088819	0.088819	0.088819	0.088819	0.088819	0.088819	0.088819	kg/s
	0.749527	0.749527	0.749527	0.749527	0.749527	0.749527	0.749527	0.749527	0.749527	0.749527	m <sup>3</sup> /s
<b>efficiency</b>	0.523372	0.524501	0.523372	0.483322	0.533832	0.519942	0.447241	0.505653	0.495393	0.508481	
	52.337197	52.450106	52.337197	48.332181	53.383202	51.994246	44.724115	50.565279	49.539263	50.848138	%

Figura 7.5: Pale nella configurazione con back plate

---

## METODO DI TAGUCHI IN MINITAB

---

A partire dai valori delle efficienze ottenute dal post-processing, si costruisce in Minitab un DOE analogo a quello già impostato su Excel. Contrariamente a quanto fatto su Excel, ora però si tiene conto anche della risposta del sistema, e quindi della sua efficienza, quando si è in presenza dei due livelli di rumore. In questo modo, è possibile applicare il metodo di Taguchi, e visualizzare l'influenza di ciascun set di parametri di controllo sul valore assunto dal signal-to-noise ratio e dalla media. Dopodiché, con l'aiuto soprattutto dei grafici, si individua quella combinazione di parametri che effettivamente consente di massimizzare la robustezza e quindi il SN ratio del sistema.

### 8.1 Risultati ottenuti

↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
	A	B	C		efficiency	efficiency_PP	SNRA1	MEAN1
1	5	-10	10		49.221808	52.450106	34.1103	50.8360
2	5	0	0		48.604564	52.337197	34.0430	50.4709
3	5	10	-10		48.208873	48.332181	33.6736	48.2705
4	0	-10	0		49.546495	53.383202	34.2121	51.4648
5	0	0	-10		49.189506	51.994246	34.0716	50.5919
6	0	10	10		45.878036	44.724115	33.1201	45.3011
7	-5	-10	-10		50.576658	50.565279	34.0780	50.5710
8	-5	0	10		46.492829	49.539263	33.6146	48.0160
9	-5	10	0		47.807131	50.848138	33.8494	49.3276

Figura 8.1: DOE in Minitab

In Figura 8.1 viene riportato il DOE costruito in Minitab, nelle cui colonne C5 e C6 compaiono le efficienze della ventola in assenza e presenza del BP, mentre nelle colonne C7 e C8 vengono riportati i valori del SN ratio e della media calcolati dal software.

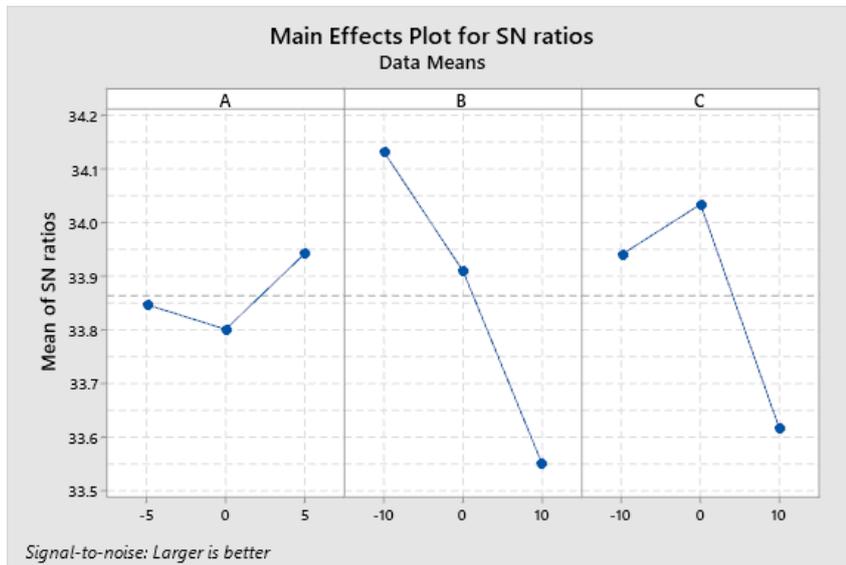


Figura 8.2: Signal-to-noise ratio

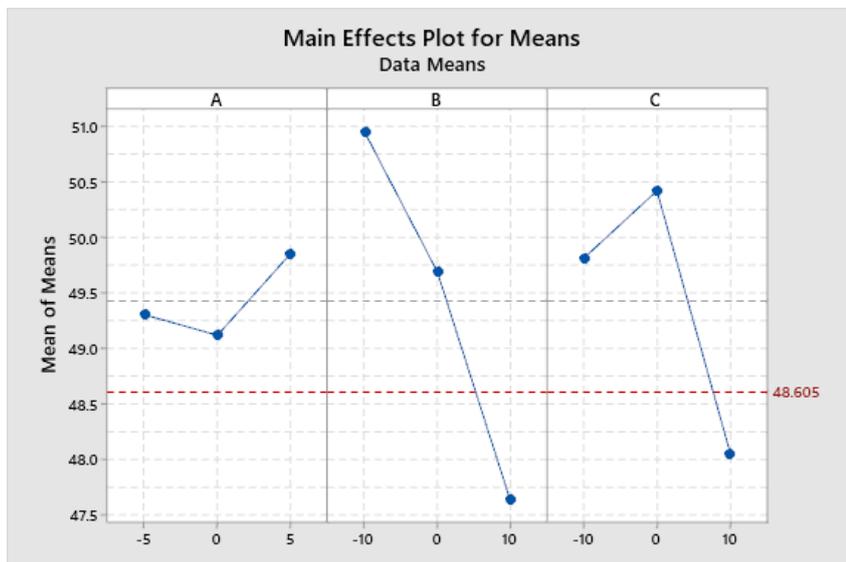


Figura 8.3: Media

In Figura 8.2 e 8.3, sono invece riportati gli andamenti del SN ratio e della media delle efficienze, in funzione dei 3 livelli associati a ciascun control factors.

Osservando queste figure, è quindi possibile fare delle considerazioni circa quella combinazione di distribuzioni di corde che massimizza il SN ratio, andando così ad individuare quella geometria di pala che risulta essere ottimale per Taguchi.

### 8.1.1 Configurazione di pala ottimale

Considerando soprattutto l'andamento del SN ratio, si può notare che la configurazione di pala ottimale per Taguchi, e che quindi massimizza il SN ratio, è data dalla seguente combinazione di parametri:

$$C0 = 0 \quad C1 = 5 \quad C2 = -10 \quad C3 = 0$$

Visualizzando inoltre la variazione di corda che si ha per questa configurazione ottimale (Figura 8.4), si può notare che la robustezza della ventola e le sue prestazioni aumentano nel momento in cui si applica un aumento della corda di circa 10 [mm] in corrispondenza del mozzo.

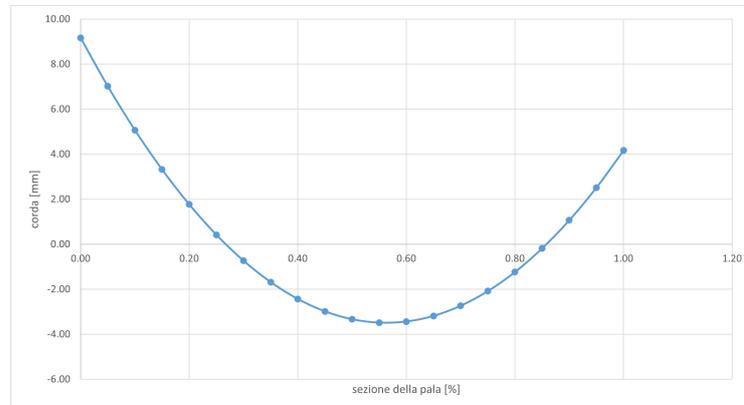


Figura 8.4: Variazione di corda della pala ottimale

D'altra parte, considerando sempre gli andamenti del SN ratio e della media, si trova che il parametro più importante è  $C2$ , ovvero quello relativo alla distribuzione di corda quadratica. Di conseguenza, seguendo la logica di Taguchi, sarebbe più conveniente spingersi oltre il valore di  $-10$  per poter ottenere un'efficienza maggiore.

## 8.1.2 Calcolo della variazione di efficienza

Una volta ricavata la distribuzione di corda complessiva della pala ottimale, si procede con la costruzione della sua geometria.

In questo modo, è possibile lanciare 2 simulazione CFD della nuova pala nella configurazione con BP e senza BP, e alle stesse condizioni delle simulazioni precedenti. Dopodiché, si procede con il post-processing, così da calcolare le efficienze della nuova pala, indicata con il numero 10.

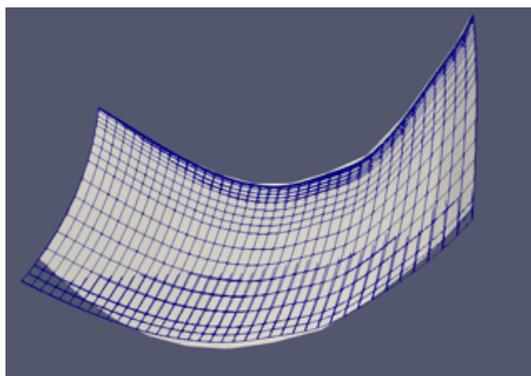


Figura 8.5: Confronto tra la pala ottimale (blu) e quella base (grigia)

	Blade_10	Blade_10_BP	
<b>DES</b>			
<b>p_tot_inlet</b>	-352.435405	-398.793543	Pa
<b>moment_blade</b>	-0.179576	-0.171125	Nm
<b>moment_ring</b>	-0.011076	-0.008357	Nm
<b>moment_shroud</b>	-0.004626	-0.003849	Nm
<b>moment_hub</b>	-0.000142	-0.00011	Nm
<b>moment_tot</b>	-1.9542	-1.83441	Nm
<b>mass_in</b>	0.088819	0.088819	kg/s
	0.749527426	0.749527426	m <sup>3</sup> /s
<b>efficiency</b>	0.496473514	0.598462954	
	49.64735142	59.84629542	%

Figura 8.6: Pala ottimale

Fatto ciò, è possibile ricavare anche la variazione di efficienza attesa ed effettiva, dovuta all'applicazione del metodo di Taguchi.

### Variatione di efficienza attesa

La variazione di efficienza che ci si aspetta di ottenere dall'applicazione del metodo di Taguchi, viene calcolata a partire dai valori del SN ratio riportati nelle colonne C7 e C8 del DOE.

Nello specifico, si parte dal calcolo del SN ratio medio, dopodiché, sfruttando il grafico in Figura 8.2, si individuano quei contributi al SN ratio dati dai control factors quando la pala ha una configurazione base, cioè con tutti i parametri nulli, e quando ha invece una configurazione ottimale.

$$\begin{aligned}
 SN_{medio} &= (SN_1 + SN_2 + SN_3 + SN_4 + SN_5 + SN_6 + SN_7 + SN_8 + SN_9) \frac{1}{9} = \\
 &= (34.11028223 + 34.0430 + 33.67361958 + 34.21210712 + 34.07160358 + \\
 &+ 33.1200568 + 34.07802525 + 33.61461409 + 33.84942439) \frac{1}{9} = 33.8636368
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 SN_{ott} &= SN_{C1} + SN_{C2} + SN_{C3} - 2 \cdot SN_{medio} = \\
 &= 33.9423 + 34.1335 + 34.0348 - 2 \cdot 33.8636368 = 34.3833264
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 SN_{base} &= SN_{C1} + SN_{C2} + SN_{C3} - 2 \cdot SN_{medio} = \\
 &= 33.8013 + 33.9097 + 34.0348 - 2 \cdot 33.8636368 = 34.0185264
 \end{aligned}$$

In questo modo, si ottiene la seguente variazione di efficienza:

$$\Delta SN = \left( \frac{SN_{ott} - SN_{base}}{SN_{base}} \right) 100\% = 1.0724\%$$

### Variatione di efficienza effettiva

Per calcolare invece la variazione di efficienza che effettivamente si ottiene nel momento in cui si ricorre alla pala ottimale, si procede andando ad aggiungere al DOE costruito in Minitab, anche quei valori di efficienza che derivano dal post-processing delle simulazioni CFD della pala 10.

↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
	A	B	C		efficiency	efficiency_PP	SNRA1	MEAN1	SNRA2	MEAN2
1	5	-10	10		49.221808	52.450106	34.1103	50.8360	34.1103	50.8360
2	5	0	0		48.604564	52.337197	34.0430	50.4709	34.0430	50.4709
3	5	10	-10		48.208873	48.332181	33.6736	48.2705	33.6736	48.2705
4	0	-10	0		49.546495	53.383202	34.2121	51.4648	34.2121	51.4648
5	0	0	-10		49.189506	51.994246	34.0716	50.5919	34.0716	50.5919
6	0	10	10		45.878036	44.724115	33.1201	45.3011	33.1201	45.3011
7	-5	-10	-10		50.576658	50.565279	34.0780	50.5710	34.0780	50.5710
8	-5	0	10		46.492829	49.539263	33.6146	48.0160	33.6146	48.0160
9	-5	10	0		47.807131	50.848138	33.8494	49.3276	33.8494	49.3276
10	5	-10	0		49.647351	59.846295			34.6540	54.7468

Figura 8.7: DOE con la pala ottimale

In questo modo, noto il SN ratio associato alla nuova pala, si può calcolare la variazione di efficienza effettiva, rispetto alla pala non modificata.

$$SN_{10} = 34.65397064$$

$$\Delta SN = \left( \frac{SN_{10} - SN_{base}}{SN_{base}} \right) 100\% = 1.8679\%$$

Confrontando i due valori calcolati precedentemente, si osserva che il metodo Taguchi ha funzionato correttamente, in quanto i parametri di controllo scelti hanno permesso effettivamente di ottenere un aumento di efficienza della ventola, molto vicino a quello atteso.

Nonostante ciò, bisogna comunque tener conto dei limiti insiti nel metodo di Taguchi, e dovuti principalmente alla forte dipendenza dei risultati da come vengono scelti i livelli associati a ciascun parametro di controllo.

---

## OTTIMIZZAZIONE ROBUSTA MULTI-OBIETTIVO

---

Dall'applicazione del metodo di Taguchi in Minitab, si è visto che per ottenere un miglioramento dell'efficienza nella configurazione con BP, conviene modificare la corda con una distribuzione quadratica.

Inoltre, andando ad agire solamente su questo parametro di design, è stato possibile ottenere un aumento dell'efficienza nella configurazione con BP dell'1.8679%.

Tenendo conto di questi risultati, si va ora ad agire su ulteriori parametri, come il calettamento della pala, tramite un'ottimizzazione robusta multi-obiettivo.

Si decide di ricorrere all'ottimizzazione robusta multi-obiettivo, anziché al metodo di Taguchi, a causa della forte dipendenza di questo metodo dalla scelta degli estremi dei parametri di controllo.

### 9.1 Descrizione dell'ottimizzazione robusta multi-obiettivo

Per quanto riguarda l'ottimizzazione robusta multi-obiettivo (*multi-objective robust optimization*), si tratta di un processo che mira a trovare la soluzione ottima di un problema costituito da molteplici obiettivi (*MOP*).

Infatti, la maggior parte dei problemi reali non può essere ricondotta ad un problema a singolo obiettivo (*SOP*), in quanto ci sono molteplici aspetti di cui tener conto e spesso in contrasto tra di loro.

Nel momento in cui si considera un *MOP*, è possibile ottenere una soluzione univoca solo quando questi obiettivi non sono in conflitto tra di loro. Tuttavia, nella maggior parte dei casi reali questo non accade, e pertanto con l'ottimizzazione robusta multi-obiettivo non si ottiene più una soluzione univoca, ma

un insieme di soluzioni.

In generale, la risoluzione di un MOP è basata su due differenti approcci: un approccio basato sulle preferenze, e un approccio ideale.

L'approccio basato sulle preferenze consiste nello sfruttare l'ordine di preferenza degli obiettivi, in modo tale da pesare l'importanza delle funzioni obiettivo, e ricondurre così il MOP ad un SOP. L'efficacia di questo approccio è però discutibile, in quanto è fortemente dipendente dalla scelta dei pesi. Infatti, risolvendo il MOP con lo stesso tipo di approccio ma con pesi differenti, si possono ottenere dei risultati notevolmente differenti.

L'approccio ideale mira invece a trovare un insieme di soluzioni, senza basarsi su alcun tipo di preferenza iniziale, e una volta ricavato questo insieme di soluzioni, vengono sfruttate le eventuali preferenze per selezionare la migliore. Questo è un approccio molto più efficace del precedente, in quanto le soluzioni ricavate non sono indirizzate da preferenze personali.

## 9.2 Fronte di Pareto

Per un problema di ottimizzazione robusta multi-obiettivo non banale, non esiste un'unica soluzione che ottimizzi simultaneamente ogni obiettivo. In questo caso, si dice che le funzioni obiettivo sono in conflitto tra di loro, ed esiste un numero infinito di soluzioni ottime.

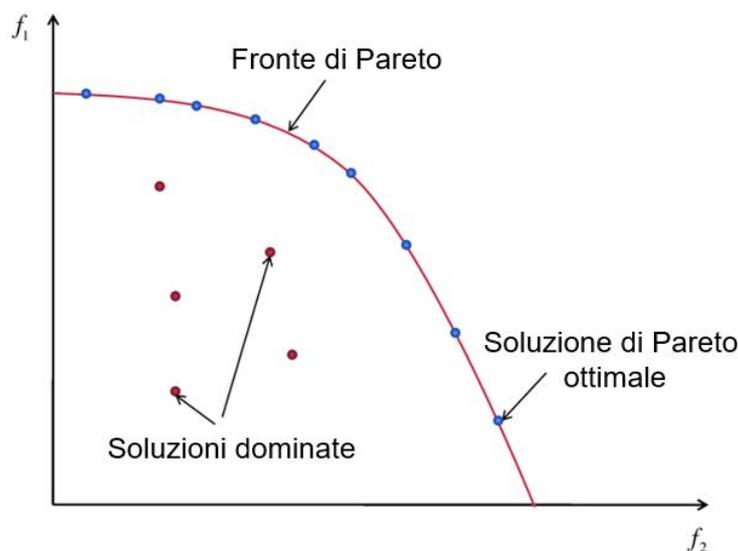


Figura 9.1: Fronte di Pareto

Una soluzione è chiamata non dominata, o Pareto ottimale, se nessuna delle funzioni obiettivo può essere migliorata di valore senza degradare l'altra. Pertanto, tutte le soluzioni ottimali di Pareto sono considerate ugualmente buone. Nello specifico, con il termine *fronte di Pareto* si intende quell'insieme di soluzioni ottime, costituito da tutti quei punti che non sono dominati, ovvero per i quali non esiste alcun punto che sia migliore contemporaneamente per tutti gli obiettivi.

Un esempio di fronte di Pareto è riportato in Figura 9.1, nella quale i pallini blu rappresentano le soluzioni non dominate, mentre i pallini rossi rappresentano quelle dominate.

## 9.3 Algoritmi evolutivi

Attualmente esistono più di trenta tecniche di programmazione matematica per la risoluzione di problemi di ottimizzazione robusta multi-obiettivo. Tuttavia, queste tecniche tendono a generare uno alla volta gli elementi del fronte di Pareto. Inoltre, la maggior parte di queste sono molto sensibili alla forma della curva di Pareto, ad esempio non funzionano quando la curva di Pareto è concava.

In risposta a questi problemi, è stata sviluppata una sotto-categoria di algoritmi che si basa su quanto viene proposto dalla natura: gli *algoritmi evolutivi*. Questi algoritmi si basano sul principio dell'evoluzione delle specie, teorizzato per la prima volta da Charles Darwin nella seconda metà del diciannovesimo secolo, e secondo la quale solo gli individui più adatti e meglio dotati sopravvivono all'ambiente circostante.

Gli algoritmi basati sul principio evolutivo simulano ciò che accade in natura. Nel far ciò, bisogna prima definire la popolazione iniziale di possibili soluzioni, la quale viene, di generazione in generazione, modificata seguendo una linea evuzionistica che porta la popolazione sempre più ad adattarsi all'obiettivo da perseguire. In questo modo, sopravvivono solo le soluzioni migliori, mentre quelle più deboli vengono scartate.

### 9.3.1 Algoritmi genetici multi-obiettivo

Per quanto riguarda invece gli *algoritmi genetici*, questi fanno parte degli algoritmi evolutivi, ed operano non su una singola soluzione ma su un insieme di soluzioni.

Ogni soluzione (individuo) viene rappresentato mediante il proprio patrimonio genetico in una stringa detta cromosoma, la quale è suddivisa in tante unità, dette geni, utilizzate per rappresentare le variabili del problema. Esse vengono

codificate in modo tale che ad ogni punto dello spazio campionario corrisponda una sola stringa di codifica, denominata appunto cromosoma.

Gli algoritmi genetici operano quindi su questa popolazione di cromosomi, che vengono fatti riprodurre selettivamente in base alle prestazioni dei fenotipi a cui danno origine.

Durante il processo riproduttivo, le repliche dei cromosomi degli individui migliori vengono accoppiate casualmente e parte del materiale genetico viene scambiato, mentre alcune piccole mutazioni alterano localmente la struttura del codice genetico. Le nuove strutture genetiche vanno quindi a rimpiazzare quelle dei loro genitori, dando luogo ad una nuova generazione di individui.

Lo scopo di questo algoritmo è quello di spostare, di generazione in generazione, la popolazione verso una composizione ottimale di individui.

Gli algoritmi genetici si basano quindi su tre operatori principali: la riproduzione selettiva degli individui migliori, la ricombinazione genetica (crossover) e le mutazioni casuali dei cromosomi.

---

## SCelta DEI PARAMETRI DI INPUT E DEGLI OBIETTIVI

---

Per svolgere l'ottimizzazione robusta multi-obiettivo in modeFrontier, bisogna innanzitutto definire i parametri di input e gli obiettivi da raggiungere.

Nello specifico, per quanto riguarda i parametri di input, conviene fare riferimento ad un numero maggiore di parametri, considerando non solo la corda ma anche il calettamento della pala.

Tuttavia, se considerare un numero di parametri più grande ha dei vantaggi, in quanto si può intervenire su più punti per migliorare la pala, d'altra parte questo comporta un numero maggiore di casi in modeFrontier, e pertanto complica ed allunga notevolmente l'analisi.

Infine, per quanto riguarda gli obiettivi da raggiungere, si ha a che fare con un problema non a singolo obiettivo, ma costituito da molteplici obiettivi.

### 10.1 Definizione degli obiettivi

Gli obiettivi di questa ottimizzazione robusta sono due: massimizzare l'efficienza e la pressione totale di inlet nella configurazione con BP e senza BP a valle della ventola.

Si ricorda inoltre che data la coppia e la pressione totale di inlet, l'efficienza può essere calcolata come segue:

$$\eta = \frac{Q \cdot p_{t_{inlet}}}{\omega \cdot c_{tot}} 100\%$$

dove  $Q$  rappresenta la portata d'aria che attraversa la ventola,  $\omega$  la velocità di rotazione della ventola,  $p_{t_{inlet}}$  la pressione totale di inlet, e infine  $c_{tot}$  la coppia totale.

## 10.2 Definizione dei parametri di input

Si considerano invece come parametri di input le coordinate dei punti di controllo delle Bézier cubiche ( $P_0, P_1, P_2, P_3$ ), in quanto si è visto che queste curve parametriche consentono di spaziare un range di variazione dei parametri più ampio.

In particolare, si sceglie di adottare un numero di parametri pari ad 8, di cui 3 sono relativi alla corda, e 5 al calettamento. Inoltre, gli estremi dei range di variazione vengono scelti in modo tale da avere una variazione maggiore del 10% sia per la corda che per il calettamento, proprio perché, a differenza del metodo di Taguchi, in modeFrontier conviene scegliere degli intervalli il più grandi possibile.

CORDA				
	c_P0	c_P1	c_P2	c_P3
x	0.00	0.25	0.75	1.00
y	0.00	-15.00	-16.00	-5.00
x	0.00	0.25	0.75	1.00
y	0.00	20.00	13.00	7.00

Figura 10.1: 3 parametri relativi alla corda

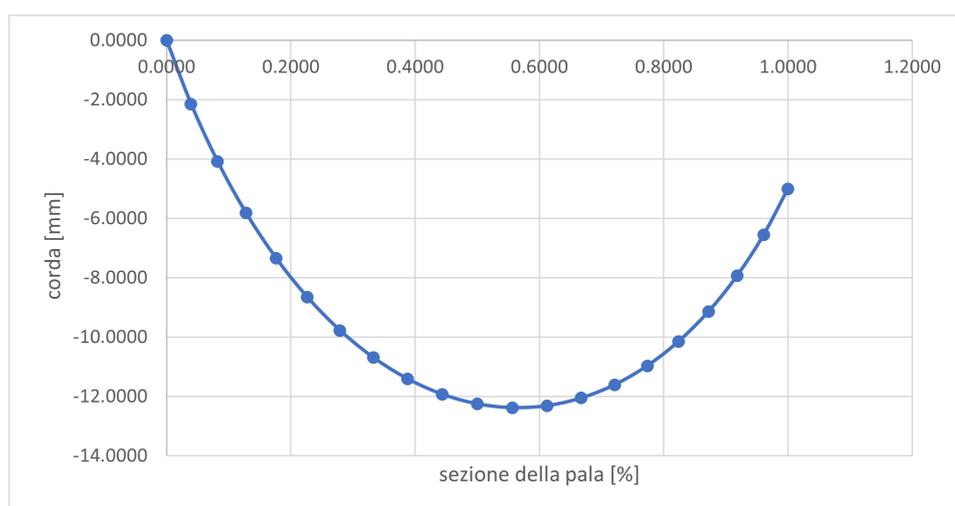


Figura 10.2: Esempio di Bézier cubica per la corda

CALETTAMENTO				
	g_P0	g_P1	g_P2	g_P3
x	0.00	0.33	0.66	1.00
y	0.00	-15.00	-8.00	-9.00
x	0.00	0.40	0.60	1.00
y	0.00	14.00	10.00	5.00

Figura 10.3: 5 parametri relativi al calettamento

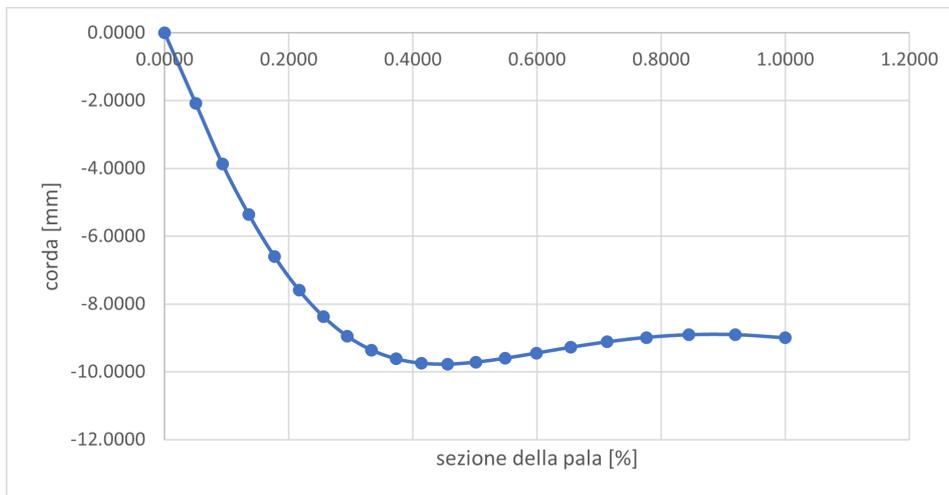


Figura 10.4: Esempio di Bézier cubica il calettamento

Come si può notare osservando le Figure 10.1 e 10.3, le quali mostrano gli estremi degli intervalli scelti, si è deciso di intervenire non solo sulla coordinata y dei punti di controllo, ma anche sulla coordinata x. Inoltre, sono stati scelti dei parametri di input maggiori per il calettamento, in quanto per la corda si è fatto riferimento ai risultati già ottenuti dal metodo di Taguchi.

Tuttavia, considerare un DOE fattoriale completo con questi 8 parametri di input equivale ad impostare e lanciare 64 simulazioni per la configurazione senza BP e 64 per la configurazione con BP, per un totale di 128 simulazioni con modello DES. Di conseguenza, nonostante i vantaggi derivanti da questa scelta, conviene ridurre i parametri di input, in modo tale da alleggerire l'analisi statistica in Minitab e l'ottimizzazione in modeFrontier.

## 10.2.1 Riduzione dei parametri di input

Facendo una scelta ragionata, si riducono gli 8 parametri a 4, di cui un parametro è relativo alla corda, e 3 al calettamento.

CORDA				
	<b>c_P0</b>	<b>c_P1</b>	<b>c_P2</b>	<b>c_P3</b>
<b>x</b>	0.00	0.25	0.75	1.00
<b>y</b>	0.0	0.0	-16.0	0.0
<b>x</b>	0.00	0.25	0.75	1.00
<b>y</b>	0.00	0.00	11.00	0.00

Figura 10.5: 1 parametro relativo alla corda

CALETTAMENTO				
	<b>g_P0</b>	<b>g_P1</b>	<b>g_P2</b>	<b>g_P3</b>
<b>x</b>	0.00	0.30	0.70	1.00
<b>y</b>	0.00	-10.00	-12.00	-3.00
<b>x</b>	0.00	0.30	0.70	1.00
<b>y</b>	0.00	9.00	13.00	4.00

Figura 10.6: 3 parametri relativi al calettamento

Nell'operare questa riduzione, si è deciso di considerare un solo parametro per la corda, tenendo conto dei risultati ottenuti dal metodo di Taguchi. Invece, per il calettamento, si è deciso di intervenire solamente sulla coordinata y dei punti di controllo delle Bézier cubiche, trascurando inoltre il punto di controllo corrispondente al bordo d'attacco della pala, per evitare che questa non sia stampabile.

Nonostante questa riduzione dei parametri di input da 8 a 4, il numero di simulazioni da lanciare continua ad essere elevato.

Infatti, considerando questi parametri e ricorrendo sempre al DOE fattoriale completo, il numero delle simulazioni da lanciare sarebbe pari a 16 per la configurazione senza BP e 16 per la configurazione con BP, per un totale di 32 simulazioni con modello DES. Conviene quindi operare una riduzione del numero di simulazioni, facendo riferimento sempre a 4 parametri di input, ma ricorrendo non più al DOE fattoriale completo ma al DOE fattoriale ridotto.

## 10.2.2 DOE fattoriale ridotto

Per design con fattoriale completo (*full factorial*), si intende quel design in cui le risposte del sistema vengono misurate considerando la combinazione di tutti i livelli associati a ciascun parametro.

Ipotizzando di considerare un fattoriale completo a 2 livelli, il numero di casi totali necessari sarebbe pari a  $2^k$ , dove con  $k$  si intende il numero di parametri.

Per quanto riguarda invece il design con fattoriale ridotto (*fractional factorial*), questo altro non è che un design in cui gli esperimenti vengono condotti considerando solo una parte, o frazione, dei casi del fattoriale completo. Pertanto, ricorrere al fattoriale ridotto conviene nel momento in cui il numero di parametri è elevato, in quanto consente di ridurre il numero di casi totali.

Nel condurre l'analisi statistica in Minitab, si decide di ricorrere ad un DOE fattoriale ridotto che considera solo metà dei casi del DOE fattoriale completo, così da ridurre il numero di simulazioni da lanciare a 8, per un totale di 16 simulazioni con modello DES.

In Figura 10.7, viene riportato il DOE fattoriale ridotto considerato per svolgere l'analisi statistica, dove con  $c_{P2}$  si indica il parametro relativo alla corda definito in Figura 10.5, e con  $g_{P1}$ ,  $g_{P2}$  e  $g_{P3}$  i parametri relativi al calettamento riportati in Figura 10.6.

	<b>c_P2</b>	<b>g_P1</b>	<b>g_P2</b>	<b>g_P3</b>
<b>1</b>	-16	9	-12	4
<b>2</b>	-16	-10	-12	-3
<b>3</b>	11	9	-12	-3
<b>4</b>	-16	-10	13	4
<b>5</b>	-16	9	13	4
<b>6</b>	11	9	13	4
<b>7</b>	11	-10	13	-3
<b>8</b>	11	-10	-12	4

Figura 10.7: DOE fattoriale ridotto

A partire da questi parametri di input, e considerando un DOE fattoriale ridotto, è possibile costruire le 8 pale, ciascuna corrispondente ad un caso del DOE, e impostare le 16 simulazioni (8 con BP e 8 senza BP) con modello DES.



ANALISI STATISTICA IN MINITAB

Dal post-processing delle 16 simulazioni con modello DES, è possibile calcolare le relative efficienze, le quali sono necessarie per poter svolgere l'analisi statistica in Minitab.

Lo scopo di quest'analisi è individuare quali parametri di input influenzano le efficienze ottenute nella configurazione con e senza BP, in modo tale da ridurre ulteriormente il numero di questi parametri, facendo anche delle considerazioni sugli estremi dei range di variazione scelti.

11.1 Influenza dei parametri di input sulle efficienze

	Blade_00	Blade_01	Blade_02	Blade_03	Blade_04	Blade_05	Blade_06	Blade_07	Blade_08	
	DES									
p_tot_inlet	-330.238954	-310.95889	-151.942988	-251.514652	-381.627935	-408.234653	-473.239015	-333.877829	-223.629798	Pa
moment_blade	-0.172562	-0.149493	-0.077343	-0.128008	-0.206431	-0.305611	-0.347835	-0.173838	-0.109525	Nm
moment_ring	-0.00986	-0.009985	-0.009782	-0.009863	-0.009104	-0.011849	-0.010406	-0.011507	-0.012974	Nm
moment_shroud	-0.004518	-0.003966	-0.003969	-0.003934	-0.003177	-0.003551	-0.003203	-0.003912	-0.004572	Nm
moment_hub	-0.000101	-0.000112	-0.00028	-0.000173	-0.000114	-0.000078	-0.000061	-0.000127	-0.000198	Nm
moment_tot	-0.187041	-0.163556	-0.091374	-0.141978	-0.218826	-0.321089	-0.361505	-0.189384	-0.127269	Nm
moment_tot*n	-1.87041	-1.63556	-0.91374	-1.41978	-2.18826	-3.21089	-3.61505	-1.89384	-1.27269	Nm
mass_in	0.088819	0.088816	0.088816	0.088816	0.088809	0.088809	0.088809	0.088809	0.088809	kg/s
	0.749527	0.749502	0.749502	0.749502	0.749443	0.749443	0.749443	0.749443	0.749443	m <sup>3</sup> /s
efficiency	0.486045	0.523368	0.457751	0.487656	0.480040522	0.349962172	0.360332054	0.485267225	0.483663934	%
	48.60453592	52.33682718	45.77505974	48.76555037	48.00405224	34.99621722	36.03320541	48.52672249	48.36639339	%

Figura 11.1: Post-processing degli 8 casi senza BP

In Figura 11.1 e 11.2, sono riportati i valori delle efficienze nella configurazione senza BP e con BP, dei 16 casi considerati.

Facendo un primo confronto tra i risultati ottenuti, si può notare come i parametri scelti consentano di spaziare un range di variazione delle efficienze

abbastanza ampio, permettendo inoltre di ricavare delle configurazioni di pala effettivamente migliori rispetto al caso non modificato.

Di conseguenza, i parametri di input scelti rappresentano una buona base di partenza per lo svolgimento dell'ottimizzazione robusta multi-obiettivo in modeFrontier.

	Blade_00_PP	Blade_01_PP	Blade_02_PP	Blade_03_PP	Blade_04_PP	Blade_05_PP	Blade_06_PP	Blade_07_PP	Blade_08_PP	
DES										
p_tot_inlet	-356.790109	-319.386401	-158.895635	-261.15849	-396.214561	-493.021616	-540.099152	-340.098079	-258.082961	Pa
moment_blade	-0.174504	-0.149309	-0.079882	-0.129474	-0.197578	-0.274149	-0.290346	-0.176135	-0.113834	Nm
moment_ring	-0.008998	-0.009592	-0.00895	-0.010023	-0.010473	-0.009364	-0.00985	-0.011481	-0.010156	Nm
moment_shroud	-0.004078	-0.003813	-0.00378	-0.003911	-0.003314	-0.003335	-0.003173	-0.00379	-0.003963	Nm
moment_hub	-0.000087	-0.000116	-0.000253	-0.00015	-0.000097	-0.000063	-0.000064	-0.000112	-0.000161	Nm
moment_tot*n'	-1.87667	-1.6283	-0.92865	-1.43558	-2.11462	-2.86911	-3.03433	-1.91518	-1.28114	Nm
mass_in	0.088819	0.088809	0.088809	0.088809	0.088809	0.088809	0.088809	0.088808	0.088809	kg/s
	0.749527	0.749443	0.749443	0.749443	0.749443	0.749443	0.749443	0.749435	0.749443	m <sup>3</sup> /s
efficiency	0.523372	0.53906631	0.470973604	0.500741301	0.515744684	0.472993776	0.489945021	0.48879455	0.554497262	%
	52.3372	53.990663	47.097360	50.074130	51.57446845	47.29937758	48.9945021	48.879455	55.44972617	

Figura 11.2: Post-processing degli 8 casi con BP

### 11.1.1 Svolgimento dell'analisi in Minitab

A partire dalle efficienze ottenute con il post-processing, si procede con l'analisi statistica in Minitab, in modo tale da individuare quei parametri che maggiormente influenzano le prestazioni.

Nello specifico, si fa riferimento ai grafici riportati in Figura 11.3 e 11.4, i quali mostrano l'effetto di ciascuno dei 4 parametri di input sulle efficienze nella configurazione senza BP e con BP.

Osservando queste figure, si nota che il parametro relativo alla corda  $c_{P2}$  influenza nello stesso verso, e in maniera meno importante, le efficienze nelle due configurazioni. Inoltre, più la corda è negativa, più ci si aspetta un aumento delle efficienze, e questo è un'ulteriore conferma dei risultati ottenuti con il metodo di Taguchi.

Per quanto riguarda invece i tre parametri relativi al calettamento, si nota che ad influenzare maggiormente le prestazioni sono i parametri identificati come  $g_{P1}$  e  $g_{P2}$ , i quali corrispondono al calettamento delle sezioni della pala posizione a  $\frac{1}{3}$  e  $\frac{2}{3}$  della corda. Inoltre, anche in questo caso si ha che i due parametri influenzano nello stesso verso le efficienze nelle due configurazioni. Nello specifico, ci aspettiamo un aumento delle due efficienze quando  $g_{P1}$  diventa più positivo, e  $g_{P2}$  più negativo.

Infine, considerando il calettamento della sezione al bordo di fuga della pala  $g_{P3}$ , si nota che questo parametro influenza poco, e con verso opposto, le efficienze nelle due configurazioni.

In conclusione, se si vuole andare ad agire contemporaneamente sulle efficienze delle due configurazioni, ad esempio migliorandole, conviene intervenire su entrambi i parametri  $g_{P1}$  e  $g_{P2}$ . Invece, se si vuole migliorare l'efficienza di una

sola configurazione, a scapito dell'altra, conviene intervenire solo sul parametro  $g_{P3}$ , il quale fa appunto da discriminante tra le due configurazioni.

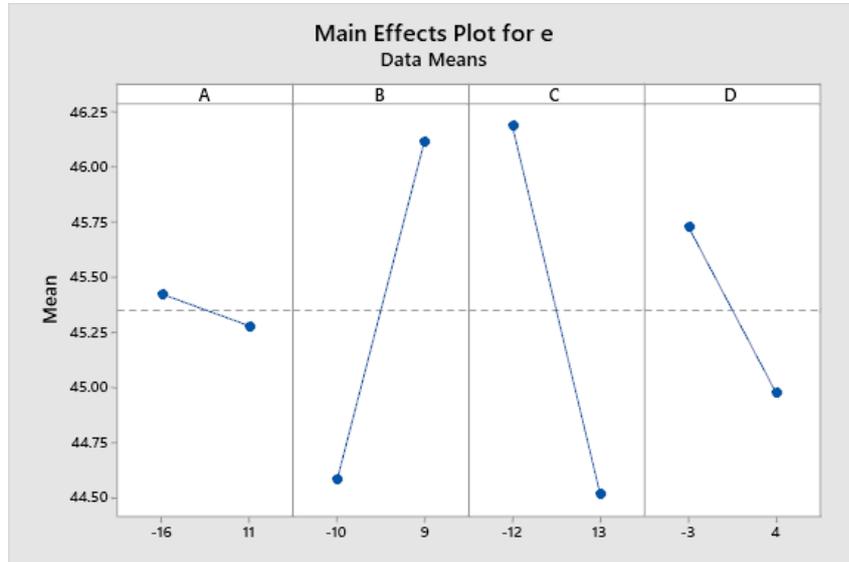


Figura 11.3: Influenza sull'efficienza senza BP

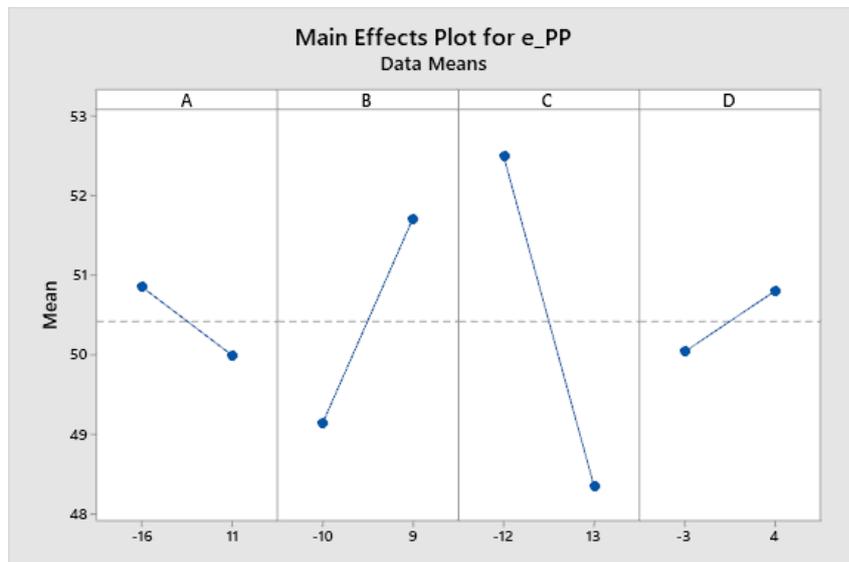


Figura 11.4: Influenza sull'efficienza con BP

Un'ulteriore conferma dei risultati ottenuti da quest'analisi in Minitab si hanno considerando i diagrammi riportati in Figura 11.5 e 11.6, che mostrano

l'influenza dei parametri di input sull'effetto Pareto nella configurazione con BP e senza BP.

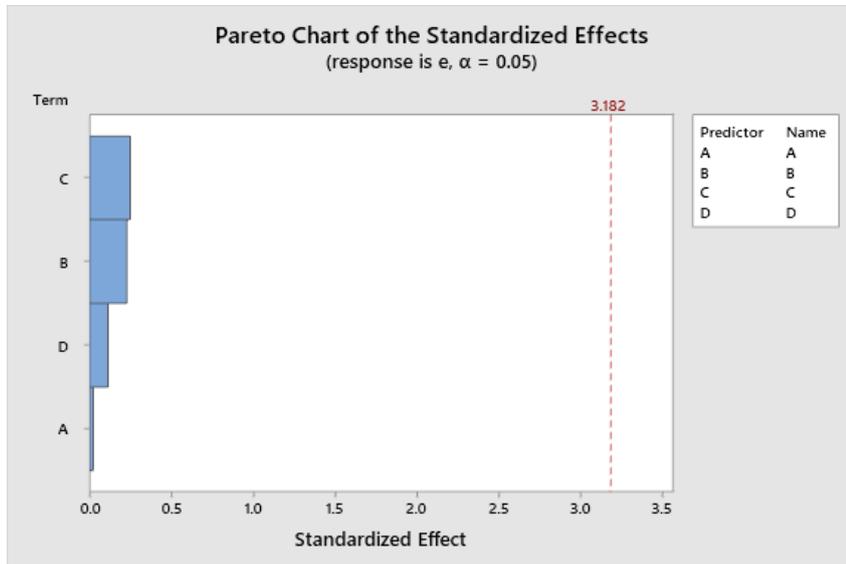


Figura 11.5: Effetto Pareto nel caso senza BP

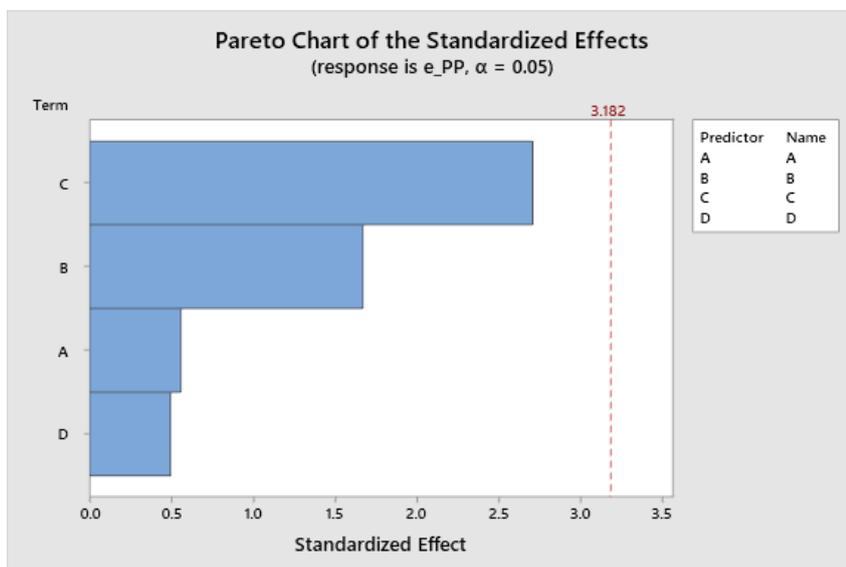


Figura 11.6: Effetto Pareto nel caso con BP

Nello specifico, si osserva che i parametri che influenzano maggiormente il raggiungimento del fronte di Pareto sono  $g_{P1}$  e  $g_{P2}$ , mentre  $g_{P3}$  e  $c_{P2}$  esercitano

una minima influenza per i motivi visti precedentemente.

Tenendo conto di queste considerazioni, è possibile ridurre ulteriormente il numero di parametri da impostare per l'ottimizzazione robusta multi-obiettivo, modificando inoltre gli estremi dei range di variazione.

### 11.1.2 Modifica dei parametri di input

A partire dai risultati ottenuti con l'analisi statistica in Minitab, si riduce il numero di parametri di input a 3, i quali corrispondono ai 3 parametri relativi al calettamento come mostrato in Figura 11.8.

Infatti, poiché la corda esercita una minima influenza sulle efficienze nelle due configurazioni, si decide di mantenere questo parametro costante e pari al valore più negativo.

Invece, per quanto riguarda i parametri  $g_{P1}$  e  $g_{P2}$ , si decide di modificare gli estremi degli intervalli di variazione, tenendo conto del fatto che conviene aumentare il più possibile  $g_{P1}$  e ridurre  $g_{P2}$ , così da aumentare sia l'efficienza nella configurazione con BP che senza BP.

Infine, l'ultimo parametro relativo al calettamento non subisce alcuna modifica, essendo quest'ultimo il parametro discriminante tra le due configurazioni.

	c	g_P1	g_P2	g_P3
<b>Lower</b>	-16	-10	-12	-3
<b>Upper</b>	11	9	13	4

Figura 11.7: Parametri di partenza

	c	g_P1	g_P2	g_P3
<b>Lower</b>	-16	0	-14	-3
<b>Upper</b>		12	0	4

Figura 11.8: Parametri modificati



---

## OTTIMIZZAZIONE IN MODEFRONTIER

---

Una volta definiti i parametri di input e gli obiettivi da raggiungere, si può procedere con l'impostazione dell'ottimizzazione robusta multi-obiettivo in *modeFrontier*.

Lo scopo di questa ottimizzazione robusta è individuare quell'insieme di soluzioni che costituiscono il fronte di Pareto, ovvero per le quali non è possibile migliorare contemporaneamente le efficienze nelle due configurazioni, senza peggiorare l'una o l'altra quantità.

In questo modo, è possibile capire come modificare i parametri di input per poter passare da un punto dominato, in corrispondenza del quale le efficienze non sono ottimizzate, ad un punto non dominato, il quale appartiene al fronte di Pareto.

Infine, al termine di questa ottimizzazione, si può individuare quella configurazione di pala che consente di ottenere dei miglioramenti sia nell'efficienza senza BP che con BP, così da avere un'ulteriore conferma circa la correlazione che sussiste tra i parametri di input scelti e le prestazioni.

### 12.1 Costruzione del workflow in modeFrontier

Prima di procedere con l'ottimizzazione robusta multi-obiettivo, si costruisce il workflow riportato in Figura 12.1.

Nello specifico, questo flusso si ottiene tenendo conto del fatto che, per quanto riguarda i parametri di input, si considerano i 3 parametri relativi al solo calettamento, mentre per quanto riguarda gli obiettivi, si vuole massimizzare l'efficienza e la pressione nella configurazione con BP e senza BP.

L'algoritmo di ottimizzazione che si decide di utilizzare è invece un algoritmo genetico multi-obiettivo (*MOGA*), il quale si basa sul principio dell'evoluzione

delle specie.

Con questo algoritmo si cerca di dare origine ad una nuova generazione di individui migliore della precedente, così da spostare, di generazione in generazione, la popolazione verso una composizione ottimale.

Procedendo in questo modo, si ottengono 40 casi (20 con BP e 20 senza BP), per un totale di 5 generazioni.

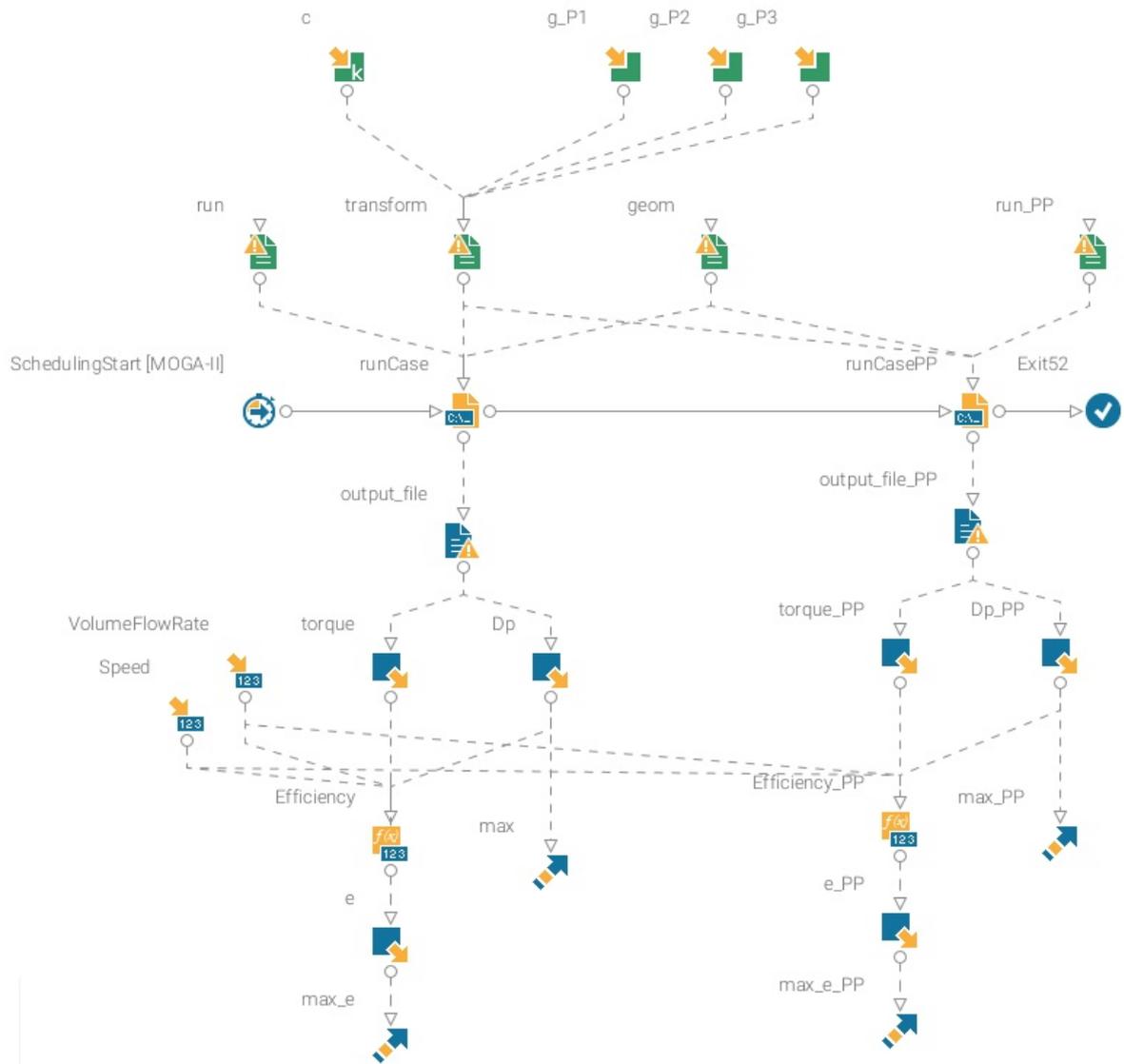


Figura 12.1: Workflow in modeFrontier

## 12.2 Risultati dell'ottimizzazione

Considerando i risultati ottenuti dall'ottimizzazione robusta multi-obiettivo svolta in *modeFrontier*, si può affermare che i parametri di input scelti per l'ottimizzazione consentono effettivamente di migliorare le efficienze nella configurazione con BP e senza BP, come si può notare dal grafico in Figura 12.1, che mostra l'efficienza nella configurazione con BP ( $e_{BP}$ ) in funzione dell'efficienza nella configurazione senza BP ( $e$ ) per ogni caso analizzato.

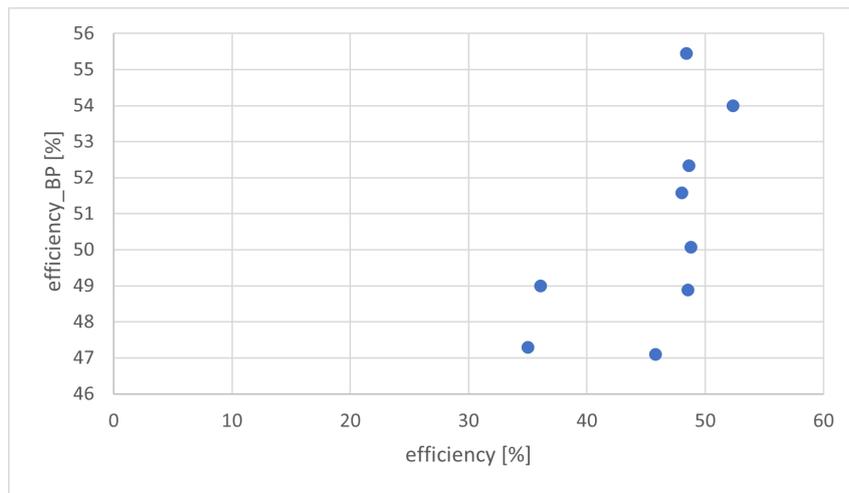


Figura 12.2: Efficienza con BP in funzione dell'efficienza senza BP

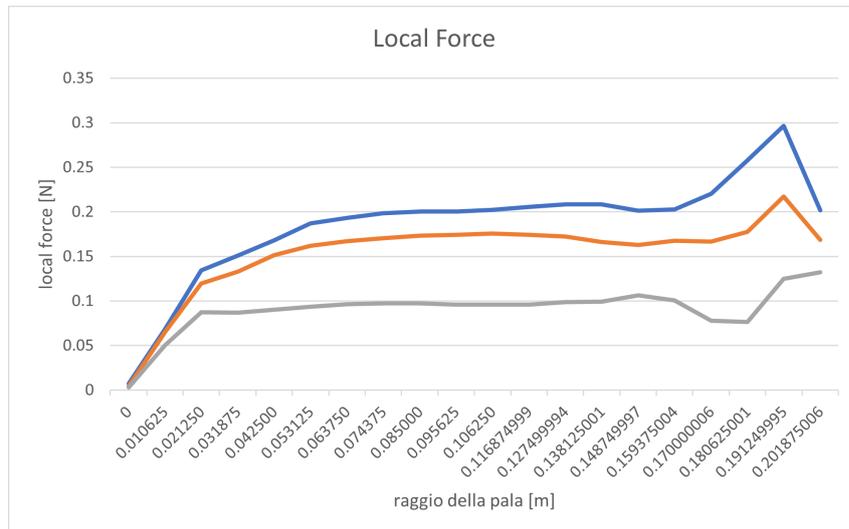


Figura 12.3: Distribuzione di portanza

Per quanto riguarda invece la distribuzione di portanza in funzione del raggio della pala, rappresentata in Figura 12.2, questa assume un andamento uniforme e costante, soprattutto se si considera quella configurazione di pala ottimale derivante dall'ottimizzazione.

Infine, considerando la configurazione ottimale di pala che si ottiene dall'ottimizzazione robusta multi-obiettivo, questa è definita dalla seguente combinazione di parametri:

$$c_{P2} = -16 \quad g_{P1} = 9 \quad g_{P2} = -12 \quad g_{P3} = 4$$



Figura 12.4: Configurazione di pala ottimale

---

## CONCLUSIONI

---

L'approccio delineato in questa tesi, per la risoluzione del problema di riduzione delle prestazioni fluidodinamiche dei moduli di raffreddamento nelle condizioni installate, consiste nell'ottimizzazione robusta multi-obiettivo. Si tratta di uno strumento molto utile in fase di progettazione di questi componenti, che può essere applicato a qualsiasi ventola già esistente, senza richiedere particolari modifiche alla geometria della pala.

Per rappresentare le condizioni reali di installazione, viene posizionato un pannello (back plate) a valle della ventola, che simula la sua posizione nel sottoscocca.

A partire da una configurazione di pala ottimizzata solo con modello RANS e senza back plate a valle della ventola, si è deciso di procedere con una sua ottimizzazione ricorrendo al modello DES e all'approccio proposto. Questo modello, infatti, riesce a cogliere con maggior accuratezza le complessità insite nella fluidodinamica, a scapito però dell'elevato costo computazionale.

Ricorrendo all'ottimizzazione robusta multi-obiettivo, è stato possibile raggiungere il fronte di Pareto, ed individuare quelle configurazioni di pala che consentono di migliorare sia l'efficienza con back plate che l'efficienza senza back plate.

Nel procedere con l'ottimizzazione, sono stati considerati inizialmente 8 parametri geometrici di definizione della ventola (corda e calettamento). Tuttavia, a causa dell'elevato costo computazionale del modello DES, si è resa necessaria una riduzione di questi parametri a 4, tramite scelte dettate dall'esperienza e tenendo conto dei risultati derivanti dall'analisi statistica.

In questo modo, sono state ottenute delle prestazioni migliori nella configurazione con e senza back plate con soli 4 parametri di input, riducendo notevolmente le complessità legate a quest'analisi.

D'altra parte, si può affermare che questi 4 parametri sono stati scelti correttamente, in quanto hanno permesso di ottenere un guadagno del 2% per quanto riguarda l'efficienza con back plate, e del 4% per l'efficienza senza back plate. Da notare, inoltre, è che la distribuzione di portanza ottimale in funzione del raggio della pala presenta un andamento uniforme e costante.

Concludendo, l'approccio proposto in questa tesi ha consentito di superare i limiti di quei metodi di ottimizzazione mono-obiettivo basati su analisi stazionarie, prediligendo invece quei metodi di ottimizzazione multi-obiettivo per la progettazione fluidodinamica dei moduli di raffreddamento.

In questo modo, è stato possibile andare ad agire sulla pala della ventola, migliorando le sue prestazioni fluidodinamiche sia in condizioni standard che in condizioni reali di installazione.

## 13.1 Passi successivi

I risultati descritti precedentemente derivano da uno studio condotto considerando una pala già esistente. Pertanto, per poter generalizzare ed estendere queste considerazioni ad ogni configurazione di pala, così da evitare l'analisi, si dovrebbe condurre questo stesso studio facendo riferimento ad altre pale.

Inoltre, questo studio è stato fatto concentrandosi principalmente sulla fluidodinamica della ventola, trascurando quindi l'acustica. Di conseguenza, si potrebbe pensare di proseguire l'analisi tenendo conto anche dell'acustica, in modo tale da capire se l'andamento uniforme della distribuzione di portanza può portare anche a dei miglioramenti in termini di rumore.

---

## BIBLIOGRAFIA

---

- [1] The British Standards Institution (2014), *Applications of statistical and related methods to new technology and product development process - Robust parameter design (RPD)*
- [2] Genichi Taguchi, Subir Chowdhury, Yulin Wu (2004), *Taguchi's Quality Engineering*
- [3] *Taguchi designs*  
<https://support.minitab.com/en-us/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/taguchi-designs/taguchi-designs/>
- [4] *Design of Experiments via Taguchi Methods - Orthogonal Arrays*  
[https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial\\_and\\_Systems\\_Engineering/Book](https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial_and_Systems_Engineering/Book)
- [5] *Example of Analyze Taguchi Design*  
<https://support.minitab.com/en-us/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/how-to/taguchi/analyze-taguchi-design/before-you-start/example-of-analyzing-a-dynamic-design/>
- [6] *Factorial and fractional factorial designs*  
<https://support.minitab.com/en-us/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/factorial-and-screening-designs/factorial-and-fractional-factorial-designs/>
- [7] *Ottimizzazione multi-obiettivo*  
<https://123dok.org/article/ottimizzazione-multi-obiettivo-accenni-al-probl-zpn64534>

- [8] *Multi-objective optimization*  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Multi-objective\\_optimization](https://en.wikipedia.org/wiki/Multi-objective_optimization)
  
- [9] *Multi-objective Optimization*  
<http://www.cs.uccs.edu/~jkalita/work/cs571/2012/MultiObjectiveOptimization.pdf>
  
- [10] *Pareto Optimality*  
<https://web.stanford.edu/group/sisl/k12/optimization/M0-unit5-pdfs/5.8Pareto.pdf>
  
- [11] *Pareto front*  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Pareto\\_front](https://en.wikipedia.org/wiki/Pareto_front)