



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN  
INGEGNERIA MECCANICA

Tesi di laurea

*Ottimizzazione del canale di ritorno di una pompa centrifuga a due stadi  
con una versione innovativa dell'algoritmo evolutivo PSO*

Relatori

*Prof. Ardizzon Guido*

*Prof.ssa Cavazzini Giovanna*

Laureando

*Schiavon Alex*

Anno Accademico

2013/2014





UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN  
INGEGNERIA MECCANICA

Tesi di laurea

*Ottimizzazione del canale di ritorno di una pompa centrifuga a due stadi  
con una versione innovativa dell'algoritmo evolutivo PSO*

Anno Accademico

2013/2014



*“L’importante non è vincere,  
ma è l’unica cosa che conta”.*

*Giampiero Boniperti*



## Indice

Introduzione.....	p. 7
-------------------	------

### **PARTE 1: Implementazione del feromone artificiale nella struttura del *Particle Swarm Optimization***

1. Concetti base dell'ottimizzazione.....	p. 11
2. Struttura del <i>PSO</i> .....	p. 13
3. Confronto tra algoritmi.....	p. 25

### **PARTE 2: Applicazione del PSO con feromone all'ottimizzazione del condotto statorico di una pompa centrifuga**

4. Schema di lavoro sperimentale.....	p. 33
4.1. Fase 1: parametrizzazione 3D.....	p. 35
4.2. Fase 2: calcolo punti del poligono di Bézier.....	p. 37
4.3. Fase 3: Fase 3: costruzione modello e validazione.....	p. 39
4.4. Fase 4: primo ciclo di ottimizzazione.....	p. 49
4.4.1 Risultati prima ottimizzazione.....	p. 52
4.5. Fase 5: simulazione macchina completa statore ottimizzato.....	p. 57
4.6. Fase 6: Fase 4b: secondo ciclo di ottimizzazione.....	p. 60
4.6.1 Risultati seconda ottimizzazione.....	p. 61
4.7 Fase 5: simulazione macchina completa nuovo statore ottimizzato.....	p. 66
5. Conclusioni parte sperimentale.....	p. 69
6. Conclusioni.....	p. 75
Appendice A.....	p. 81
Appendice B.....	p. 83
Appendice C.....	p. 85
Appendice D.....	p. 87

Appendice E.....	p. 89
Appendice F.....	p. 91
Appendice G.....	p. 93
Appendice H.....	p. 95
Note.....	p. 101
Bibliografia.....	p. 103
Ringraziamenti.....	p. 105



## Introduzione

Il presente lavoro di tesi tratta in maniera riassuntiva dello sviluppo di alcuni strumenti innovativi all'interno della struttura dell'algoritmo di ottimizzazione PSO, *Particle Swarm Optimization*, e del suo utilizzo in un caso industriale per il miglioramento delle prestazioni di una pompa centrifuga.

Nella prima parte di questo elaborato sono presentate le novità introdotte in una struttura già modificata rispetto al PSO tradizionale e che riguardano sostanzialmente l'inserimento di una ulteriore componente di ricerca legata al feromone artificiale. Il feromone è, infatti, una sostanza naturale che molte specie animali e di insetti emettono per avvisare gli altri membri del gruppo circa l'individuazione di una zona ricca di cibo o in cui è possibile trovare riparo. La prima parte del lavoro ha come obiettivo quello di tradurre in termini matematici questo concetto, creando un archivio digitale capace di raccogliere le informazioni dei membri dello sciame e di evolvere continuamente durante le iterazioni, con l'obiettivo di aumentare la velocità di convergenza dell'algoritmo e di migliorare il suo funzionamento in un elevato range di funzioni test. Con "migliorare il suo funzionamento" s'intende non solo diminuire il numero minimo di valutazioni della funzione obiettivo, *function evaluations FE*, per raggiungere la convergenza, ma anche ottenere un algoritmo che sia capace di garantire un "buon livello" di convergenza nel più elevato numero possibile di funzioni test. In sostanza, poiché non esiste un algoritmo migliore di un altro in tutte le *objective functions*, introducendo nel suo flusso operativo alcune strutture matematiche rappresentative di idee dotate di una loro consistenza teorica, si è cercato di ottenere una velocità e una percentuale di convergenza quanto più elevate ed equilibrate nel maggior numero di funzioni test.

La seconda parte, invece, contiene i metodi e i risultati ottenuti dall'applicazione dell'algoritmo all'ottimizzazione geometrica del canale di ritorno, l'organo statorico, di una pompa centrifuga a due stadi. Si è deciso di svolgere un'analisi 3-dimensionale per cogliere effetti quali correnti secondarie, interazione flusso-pareti della cassa, altrimenti non quantificabili con una semplice ottimizzazione nel piano. Inizialmente è stata costruita la geometria della macchina completa con i suoi due stadi, utilizzando una mesh strutturata per il canale statorico, e tramite numerose validazioni si è determinato il

modello più accurato dal punto di vista dei parametri di funzionamento, ma capace di garantire tempi di calcolo accettabili, da utilizzarsi nel loop iterativo successivo.

Il ciclo di ottimizzazione è stato suddiviso in due step: inizialmente si è utilizzato un primo vettore di variabili di decisione e si sono analizzati i risultati ottenuti ricostruendo la geometria della nuova macchina; dalle considerazioni emerse si è eseguito un secondo loop iterativo introducendo delle modifiche di forma alle curve di mozzo e cassa dello statore e utilizzando un nuovo vettore delle variabili di decisione.

Si è, inoltre, apportata una successiva modifica al condotto di scarico rispetto alla configurazione originaria, conformandolo secondo la geometria semplificata utilizzata nel loop iterativo.

Sono riportate, infine, le curve caratteristiche della macchina ottimizzata da confrontarsi con quelle nella configurazione originaria per evidenziare i miglioramenti ottenuti.

## **PARTE 1**

### **Implementazione del feromone artificiale nella struttura del *Particle Swarm Optimization***



## 1. Concetti base dell'ottimizzazione

Con l'espressione *metodi di ottimizzazione* s'intende l'insieme delle tecniche attraverso le quali è possibile determinare i valori delle variabili di decisione di un sistema che massimizzano o minimizzano una funzione obiettivo, libera o vincolata. Si parla di vettore delle variabili di decisione perché queste possono essere non solo di progetto ma anche di funzionamento.

In generale la formulazione di un problema di ottimizzazione è la seguente:

determinare il vettore  $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  tale che  $f(\mathbf{x})$  sia minima in presenza di  $m$ -vincoli di disuguaglianza  $g_j(\mathbf{x}) \leq 0$  con  $j = 1, 2, \dots, m$  e di  $p$ -vincoli di uguaglianza  $l_k(\mathbf{x}) = 0$  con  $k = 1, 2, \dots, p$ .

I metodi classici operano con una soluzione alla volta che evolve il proprio valore nel corso delle iterazioni e si suddividono in diretti e indiretti: i primi non necessitano del calcolo delle derivate della funzione e possono essere utilizzati in problemi di ottimizzazione irregolari, rumorosi e variabili nel tempo, ma hanno una velocità di convergenza inferiore; i secondi operano utilizzando il vettore gradiente e presentano una velocità superiore di convergenza.

I metodi avanzati al contrario dei precedenti utilizzano una popolazione di soluzioni che evolve nel corso delle iterazioni e diminuisce progressivamente il valore medio della funzione obiettivo. Una prima classificazione di queste tecniche conduce alla suddivisione in tre categorie:

- metodi enumerativi: esplorano in maniera sistematica lo spazio di ricerca;
- metodi deterministici: il passaggio da una popolazione alla successiva è determinato da una serie di regole stabilite a priori;
- metodi stocastici: il passaggio da una soluzione a quella successiva avviene tramite operazioni casuali, *i.e.* il lancio di numeri random.

Attualmente si sono sviluppati molti metodi meta-euristici che risultano dalla combinazione di operazioni deterministiche e stocastiche: i più noti sono gli algoritmi genetici ed evolutivi (GA e EA) e quelli legati alla teoria degli sciami (ACO e PSO); queste tecniche cercano di simulare il comportamento della Natura, trovando in questa la principale fonte di ispirazione. Se si considera, infatti, il comportamento di una colonia di

formiche, di uno stormo di uccelli o di un banco di pesci le capacità del singolo individuo sono limitate se confrontate con quelle dell'intero sistema sociale.

Il presente lavoro riassume alcune tecniche di calcolo che sono state implementate in un algoritmo di tipo PSO (*Particle Swarm Optimization*) al fine di emulare quanto più possibile il reale comportamento degli sciami durante la ricerca di cibo.

Si ricorda che la ricerca scientifica in questo campo è in continua evoluzione e di conseguenza il punto di arrivo di questo lavoro costituisce uno step intermedio di un progetto ancora in fase di realizzazione: quanto più si riuscirà ad avvicinarsi al reale comportamento degli sciami e a tradurlo in operazioni matematiche, tanto migliore potrà essere il funzionamento di un algoritmo di ottimizzazione nella ricerca della soluzione ottimale.

## 2. Struttura del PSO

L'algoritmo di ricerca *Particle Swarm Optimization*, traducibile come "ottimizzazione con sciame di particelle," è un metodo proposto da Kennedy ed Eberhart<sup>1</sup> nel 1995 e si basa sul comportamento sociale di uno stormo di uccelli o di un banco di pesci durante la ricerca di cibo o di un riparo. L'idea centrale dell'algoritmo è che il gruppo si muove alla ricerca di quello che è meglio non per il singolo ma per la collettività: ogni componente dello sciame si muove nello spazio di ricerca e quando trova una regione ottimale trasmette la propria informazione al resto del gruppo in modo che tutti gli altri membri in sincronia possano raggiungere quella zona.

L'algoritmo PSO nasce dalla traduzione in termini matematici delle semplici considerazioni precedenti per la ricerca della soluzione ottimale durante un problema di ottimizzazione. Ad ogni iterazione, l'algoritmo identifica un nuovo "candidato all'ottimo" nello spazio di ricerca, utilizzando come parametro qualitativo il valore della funzione obiettivo di ogni membro dello sciame.

Il PSO ottimizza un problema utilizzando una popolazione di soluzioni candidate, dette "particelle", che si spostano nello spazio di ricerca sulla base di relazioni matematiche, che tengono in considerazione la velocità di spostamento corrente di ogni membro, le loro conoscenze dello spazio di fitness (ovvero la migliore soluzione che hanno esplorato fino a quel momento) e la conoscenza condivisa (cioè la miglior soluzione generale identificata).

Il primo passo consiste nella creazione casuale di un insieme di soluzioni che costituiscono i membri dello sciame, fissato il loro numero, in modo tale che giacciono all'interno dello spazio di ricerca; l'algoritmo evolve durante le iterazioni aggiornando le posizioni dei suoi membri sulla base delle informazioni raccolte in precedenza.

Dal punto di vista matematico, durante la fase di inizializzazione si valuta la funzione obiettivo associata ad ogni membro e si ordinano le particelle in modo crescente in base a questo valore.

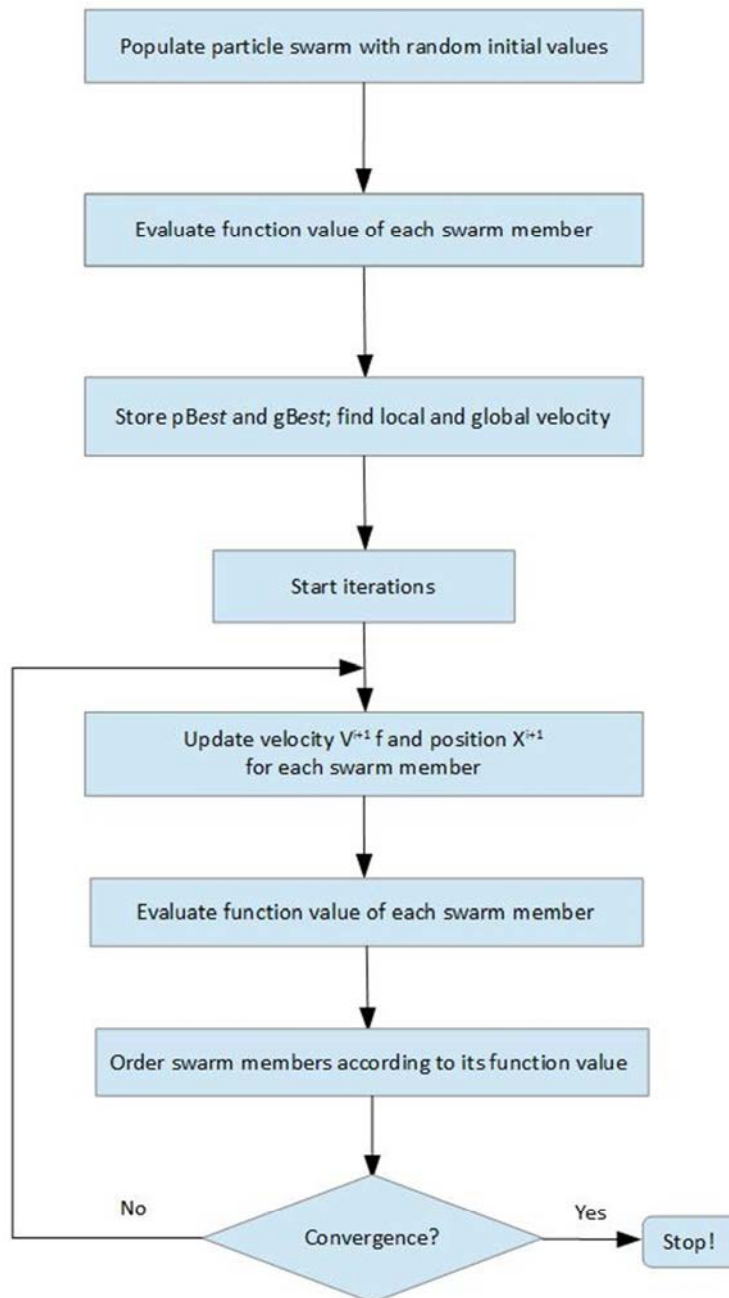


Figura 1. Schema algoritmo PSO tradizionale.

Il processo iterativo vero e proprio del PSO consiste nella determinazione di una direzione di ricerca da sommarsi vettorialmente alla posizione corrente di ogni particella tenendo conto dell'analogia naturale: ogni membro dello sciame utilizza la propria memoria personale e il comportamento dell'intero gruppo per determinare una regione fattibile dello spazio di ricerca. La direzione di ricerca è data dalla combinazione di tre diverse componenti:



- una componente inerziale, legata alla velocità all'iterazione precedente della singola particella;
- una componente locale, data dalla migliore posizione trovata dalla singola particella e che costituisce l'esperienza cognitiva personale;
- una componente globale, legata alla migliore posizione trovata fino a quel momento dallo sciame e che costituisce la memoria sociale di tutti i membri e li guida per 'imitazione'.

In termini analitici le considerazioni precedenti sono tradotte nella seguente formulazione:

$$V_{i,ind} = wV_{ind}^{old}$$

$$V_{l,ind} = c_1 rand(x_{l,ind} - x_{ind})$$

$$V_{g,ind} = c_2 rand(x_g - x_{ind})$$

e il vettore risultante è dato da:

$$V_{ind}^{new} = V_{i,ind} + V_{l,ind} + V_{g,ind}$$

dove con  $V_{ind}^{new}$  si indica il nuovo vettore velocità del generico individuo, con  $w$  coefficiente moltiplicativo (compreso tra 0,4 e 0,9)<sup>2</sup> della velocità inerziale all'iterazione precedente  $V_{ind}^{old}$ , con  $x_{l,ind}$  la migliore posizione dell'individuo e con  $x_g$  la migliore posizione in assoluto dello sciame; i coefficienti  $c_i$  moltiplicati per un numero casuale tra 0 e 1 consentono di variare il modulo del vettore velocità e la loro somma, secondo quanto riportato in letteratura, deve essere al massimo pari a quattro.

L'aggiornamento della nuova posizione è ottenuto sommando alla posizione precedente il vettore della velocità totale calcolato:

$$x_{ind}^{new} = x_{ind}^{old} + V_{ind}^{new}$$

Tuttavia, anche se abbastanza efficace, il PSO tradizionale presenta alcuni problemi legati alla difficoltà di convergenza verso il minimo globale e alla lentezza di calcolo.

Un buon algoritmo di calcolo dovrebbe, infatti, riuscire a 'fuggire' dai minimi locali della funzione e mantenere nel frattempo un'elevata velocità di convergenza. Si ricorda, che solo gli algoritmi di tipo indiretto consentono di determinare se il minimo trovato dall'ottimizzatore è effettivo poiché in tal caso il gradiente della funzione si annulla. In

letteratura si trovano numerose varianti della versione base dell'algoritmo, alcune derivanti per esempio dalla ibridizzazione con il metodo ACO (*Ant Colony Optimization*, che simula la fase di foraggio delle formiche), per formare il metodo PSACO.

Nell'ottica di migliorare il PSO tradizionale, cercando di avvicinarsi quanto più possibile al reale comportamento di uno sciame, sono state proposte in studi precedenti alcune modifiche alla struttura di base che prevedono un aggiustamento dinamico dei parametri al suo interno, permettendo una suddivisione dei membri tra esploratori e affinatori; questo è stato possibile introducendo dei coefficienti  $w$ ,  $c_1$  e  $c_2$  variabili per ogni particella in base alla distanza dalla migliore posizione determinata fino a quel momento. Quando la distanza tra una particella e la migliore posizione supera una frazione della massima distanza in assoluto allora quell'individuo diventa un esploratore e risente in modo minore dell'influenza dello sciame, permettendo di muoversi in regioni diverse e meno esplorate.

Il presente lavoro di tesi riassume un'ulteriore modifica apportata a questa nuova struttura del PSO che deriva da una osservazione molto semplice: perché le singole particelle oltre alla migliore posizione trovata dallo sciame,  $g_{best}$ , e alla migliore posizione determinata dalla singola particella,  $p_{best}$ , non dovrebbero tenere in memoria anche le più promettenti posizioni trovate dallo sciame fino a quel momento? In questo modo, infatti, ogni particella in caso di difficoltà, *i.e.* nel caso in cui si trovi in un minimo locale, potrebbe far ricorso ad una memoria sociale aggiuntiva per aiutarla a fuggire da una situazione di criticità ma anche per orientare preventivamente la sua direzione di ricerca in modo da raggiungere più rapidamente regioni dello spazio più interessanti.

L'idea è quella di simulare il comportamento degli insetti o dei membri di uno sciame che rilasciano nelle zone più prolifiche da loro trovate una sostanza chimica, chiamata feromone<sup>3</sup>, che permette di indicare agli altri individui la strada da intraprendere. L'implementazione di un feromone digitale all'interno del PSO è già stata proposta da alcuni autori<sup>4</sup> indicandola come tecnica efficiente per aumentare l'accuratezza della soluzione e aumentare la velocità di convergenza.

La prima parte di questo lavoro ha come obiettivo quello di riassumere le fasi che hanno condotto all'implementazione del feromone digitale all'interno della struttura modificata del PSO, *PSO\_new\_v46*, introdotta in precedenza. Il feromone consiste in una scia chimica

prodotta dagli insetti per comunicare agli altri l'individuazione di una fonte di cibo o di riparo; più l'intensità del feromone è forte più membri sono attratti verso la corrispondente regione. Trasportare questo concetto all'interno dell'algoritmo significa aggiungere al vettore velocità  $V_{ind}^{new}$  una nuova componente, legata alla memoria storica dello sciame  $V_{fer,ind}$ .

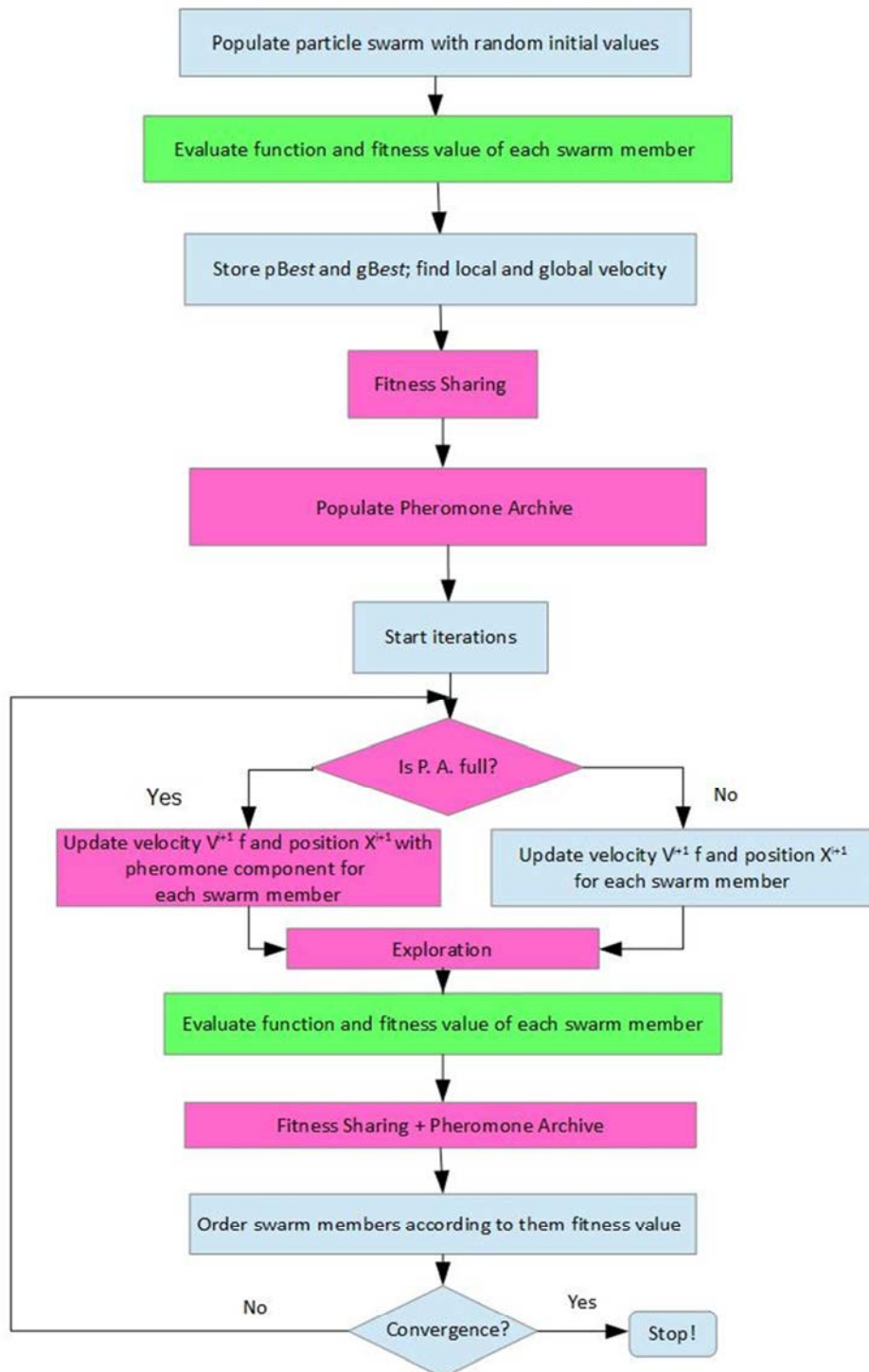


Figura 2. Schema algoritmo *PSO\_fer\_v28*.

Per conservare la memoria delle migliori posizioni trovate fino a un determinato momento dai membri dello sciame è necessario immagazzinare le informazioni in un archivio esterno che aggiorna i suoi valori nel corso delle iterazioni, conservando solamente le posizioni caratterizzate da una intensità maggiore. Questo si traduce dal punto di vista della programmazione nella creazione di una matrice  $x\_feromone$  che nel corso delle iterazioni raccoglie le varie posizioni occupate dalle particelle e ne misura l'intensità attraverso un corrispondente vettore di *fitness*. Le posizioni dell'archivio sono ordinate in modo decrescente in base al valore del fitness ad esse associato e le migliori avranno più possibilità di essere scelte per andare ad aggiornare il vettore velocità secondo la relazione:

$$V_{fer,ind} = c_3 rand(x_{fer} - x_{ind})$$

$$V_{ind}^{new} = V_{i,ind} + V_{l,ind} + V_{g,ind} + V_{fer,ind}$$

Per maggiore chiarezza di seguito si riporta la struttura costruita in Matlab® e se ne fornisce una spiegazione dettagliata.

## 1. Inizializzazione dello sciame

```
n = size(x,2);
N = size(x,1);
p = 2*N;
c1max = 3;
c1min = 0;
c2max = 3;
c2min = 0.5;
c3max = 0.5;
c3min = 0;
wmax = 0.9;
wmin = 0.4;
```

Si stabiliscono il numero di particelle N dello sciame, la dimensione dello spazio di ricerca n e la dimensione massima p dell'archivio della memoria storica, il cui valore ottimale è stato determinato pari a due volte il numero delle particelle dello sciame. Si fissano poi i valori dei vari coefficienti  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$  e  $w$  con il valore massimo di  $c_3$  posto pari a 0.5 per non introdurre troppa variabilità all'interno dello sciame.

```
f = f_objective(x);
fitness = (pi/2-atan(f))/pi
```

```

[f,i] = sort(f);
x = x(i,:);
fitness = fitness(i);
xl = x;
fl = f;
v = zeros(size(x));
xg = ones(N,1)*x(1,:);
fg = ones(N,1)*f(1);
stdeviation = std(f);
f_old1 = f;
x_old1 = x;

```

Dopo aver creato in modo casuale una popolazione iniziale di particelle si calcola il valore della funzione obiettivo e l'intensità del segnale associato a ciascuna di esse tramite la funzione fitness in modo tale che, trattando il problema come determinazione del minimo di una funzione, fitness maggiore sia associata a particelle con funzione obiettivo minore. Per descrivere l'andamento della *fitness function* si è utilizzata una funzione arcotangente shiftata, che presenta valori del codominio compresi tra [0,1]:

$$fitness = 0.5 - arctg(f)/\pi$$

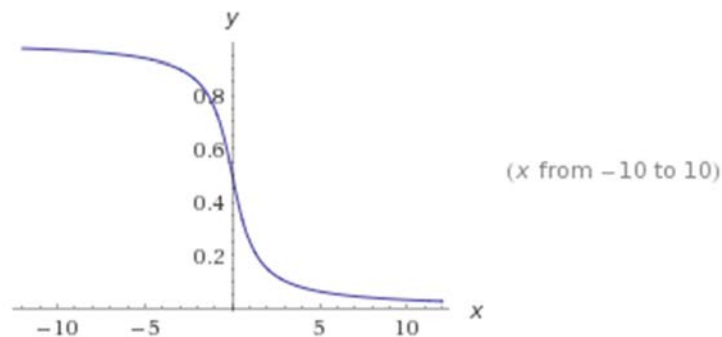


Figura 3. Funzione fitness.

Si ordinano le particelle e il corrispondente fitness in modo decrescente in base alla funzione obiettivo e si inizializza la memoria personale *xl* e quella sociale *xg* dello sciame.

```

[x_1,fitness_1] = sharing(x,fitness,j,data);
x_feromone = x_1;
fit_feromone = fitness_1;
dim_x_feromone = size(x_feromone,1);
if dim_x_feromone > 0
    [fit_feromone,u] = sort(fit_feromone,'descend');
    x_feromone = x_feromone(u,:);
end

```

Per evitare che la matrice del feromone si riempia di regioni troppo vicine dal punto di vista del fitness e, quindi, al fine di diversificare le informazioni contenute, è stato realizzato un meccanismo di *clustering* con l'obiettivo di raggruppare in un'unica regione, e, quindi, unica riga dell'archivio, particelle troppo vicine tra di loro. Si definisce, cioè, un'intorno circolare del fitness, *r\_share*, con raggio variabile nel corso delle iterazioni e si computano le soluzioni contenute all'interno; se ci sono più particelle nello stesso intorno allora vengono fuse in una unica con coordinate pari a quelle medie e valore del fitness medio. I valori così ottenuti sono inseriti nell'archivio, se ne valuta la dimensione raggiunta e si riordina in modo decrescente.

## 2. Ciclo iterativo

Fino a quando non è verificato un criterio di uscita, che nel caso di validazione dell'algoritmo con funzioni test, è dato o dal raggiungimento della tolleranza per la funzione obiettivo o dal numero massimo di iterazioni consentite, il programma esegue l'iterazione del PSO.

```
if dim_x_feromone >= p
    arch = 1;
else arch = 0;
end
```

Si valuta se la dimensione dell'archivio è pari a quella fissata all'inizio e si definisce il parametro *arch* che determina o meno l'utilizzo della componente della velocità legata al feromone nell'aggiornamento della nuova posizione.

```
dis = xg-x;
max_dis = max(abs(dis));
```

Si valuta la distanza di ogni particella dalla *gbest* e si definisce tra queste quella massima in modo da suddividere i membri dello sciame in esploratori e affinatori.

Si calcolano i coefficienti  $w$ ,  $c_1$ ,  $c_2$  e  $c_3$  (questo nel caso di *arch* == 1) che assumono andamento parabolico tra i valori massimo e minimo prima impostati in base alla distanza corrispondente.

```
if arch == 1
    bb = (c1+c2+c3)>4;
    c2(bb==1) = 1.85;
    c1(bb==1) = 1.85;
```

```

        c3(bb==1) = 0.3;
else bb = (c1+c2)>4;
        c2(bb==1) = 2;
        c1(bb==1) = 2;
end

```

Si controlla che la somma dei vari coefficienti non superi il valore limite indicato in letteratura, altrimenti si aggiustano assegnando un valore soddisfacente.

```

if arch == 1
    fit_feromone = fit_feromone(1:p);
    x_feromone = x_feromone(1:p,:);
    for m = 1:p
        p_i(m,:) = fit_feromone(m,:)/sum(fit_feromone,1);
    end
    if sum((p_i>10^(-5)))<p
        arch = 0;
    end
end

```

Nel caso di feromone attivo si riducono la matrice della memoria storica e il vettore fitness alla dimensione massima dell'archivio. Questo perché nel successivo aggiornamento vengono inseriti all'interno altri  $m$  valori con  $m \leq N$  ( con  $N$  numero di particelle usate nella ricerca e  $m$  numero di particelle risultanti dal *clustering*) secondo quanto indicato nel seguito. La matrice del feromone ha, dunque, dimensioni massime pari a  $[p+N;n]$  anche se per la scelta delle posizioni si utilizza una matrice di  $[p,n]$ .

Una determinata posizione dell'archivio è scelta dalle particelle dello sciame in base all'intensità del suo segnale e, quindi, è necessario associare a ciascuna una probabilità di scelta legata al fitness:

$$p_{i,fer} = \frac{fit\_feromone_i}{\sum_{i=1}^p fit\_feromone_i}$$

Si effettua anche un controllo per disattivare l'archivio nel caso contenga valori di fitness troppo bassi che di conseguenza condurrebbero lo sciame verso regioni poco interessanti dello spazio di ricerca (situazione che si sviluppa nelle prime iterazioni del calcolo).

```

if arch == 1
    for nn = 1:p
        if nn == 1
            delta(nn,:) = [0,p_i(nn)];
        else delta(nn,:) = [delta(nn-1,2),delta(nn-1,2)+p_i(nn)];
        end
    end

```

end

Il meccanismo di scelta delle componenti dell'archivio è effettuato con la tecnica *roulette wheel selection*<sup>5</sup>: si assegna ad ogni posizione dell'archivio un intervallo *delta* definito dalla probabilità cumulata utilizzando la probabilità determinata in precedenza:

$$\delta_{i,fer} = [p_{i,fer}, p_{i+1,fer}]$$

Tramite il lancio di un vettore di numeri random si determina una matrice di posizioni *xf* pari al numero delle particelle dello sciame. In questo modo è garantita una certa libertà nell'esplorazione perché non necessariamente sono scelte le regioni migliori in assoluto contenute nella memoria storica; questa tecnica costituisce la base dei metodi metaeuristici, dove le regole di passaggio da un'iterazione alla successiva sono ben determinate pur conservando una certa componente di casualità.

```
r_1 = rand(1000*N,1);
keep_going = 1;
q = 0;
k = 1;
while keep_going == 1
    q = q + 1;
    if q > size(r_1,1);
        r_1 = [r_1;rand(10*N,1)];
    end
    for e = 1:p
        if r_1(q) >= delta(e,1) && r_1(q) <= delta(e,2)
            index(k) = e;
            if k == 1
                xf_1(k,:) = x_feromone(e,:);
                fitness_1(k) = fit_feromone(e);
                k = k + 1;
            else cont_index = 0;
                for i = 1:size(index,2)
                    if index(k) == index(i)
                        cont_index = cont_index + 1;
                    end
                end
            end
            if cont_index <= ceil(0.4*N)
                xf_1(k,:) = x_feromone(e,:);
                fitness_1(k) = fit_feromone(e);
                k = k + 1;
            end
        end
    end
end
```



```

        end
    end
end
end
if size(xf_1,1) == N
    keep_going = 0;
end
end
xf = xf_1;
end

```

Si sottolinea che è stato introdotto un limite massimo al numero di particelle che possono scegliere una determinata regione dell'archivio al fine di mantenere una certa capacità di esplorazione all'algoritmo; si è verificato sperimentalmente che un valore che permette un buon compromesso tra funzioni unimodali e multimodali è dato dal 40% del numero delle particelle dello sciame. Si evita in questo modo che troppe particelle si dirigano verso la stessa regione che seppur interessante potrebbe costituire un minimo locale.

```

vi = w.*v;
vl = c1.*(rand(size(x))).*(xl-x);
vg = c2.*(rand(size(x))).*(xg-x);
if arch == 1
    vf = c3.*(rand(size(x))).*(xf-x));
end
if arch == 1
    v = vi+vl+vg+vf;
else v = vi+vl+vg;
end
x = x_old1+v;

```

Si calcolano le componenti inerziale, locale e globale della velocità e se l'archivio è attivo anche quella legata al feromone utilizzando la matrice  $xf$  scelta con la *roulette*; si aggiorna infine la posizione degli individui dello sciame.

```

if sum(v(1,:)) == 0
    x(1,:) = x(1, :)*(1+(-0.1+0.2*rand(1)));
else
    [x] = exploration(x,UB,LB,5);
end

```

Si inserisce a questo punto un meccanismo chiamato di 'esplorazione' che nel caso in cui la velocità della prima particella, cioè della migliore, sia nulla (questo si verifica quando la componente del feromone scelta è esattamente pari alla miglior posizione dello sciame)

consiste in un movimento della stessa in un intorno del 10% della sua posizione corrente, mentre in caso contrario viene scelta una componente qualsiasi del 5% delle particelle e fatta muovere di un valore massimo del 10% in base alla distanza dal baricentro dello sciame. In sostanza nelle prime iterazioni quando lo sciame è in fase esplorativa gli spostamenti sono più ampi, mentre quando si concentra in una regione l'ampiezza della mossa è inferiore al fine di affinare la soluzione.

```
f = f_objective(x);  
fitness = (pi/2-atan(f))/pi;  
[x_1,fitness_1] = sharing(x,fitness,j,data);
```

Si aggiorna il valore della funzione obiettivo e del fitness associati allo sciame e si applica il meccanismo di *clustering* alle nuove posizioni, che sono poi inserite all'interno dell'archivio.

```
dim_x_feromone = size(x_feromone,1);  
if dim_x_feromone > 0  
    [fit_feromone,u] = sort(fit_feromone,'descend');  
    x_feromone = x_feromone(u,:);  
end
```

Si valuta, infine, la nuova dimensione dell'archivio e si ordinano le regioni in modo decrescente in base al fitness.

### 3. Confronto tra algoritmi

In questo capitolo sono presentati i metodi e i risultati conseguiti con il nuovo algoritmo *PSO\_fer\_v28* attraverso alcune funzioni test e il confronto con altri algoritmi presenti in letteratura e derivati dal PSO tradizionale.

Il confronto è eseguito sulla base del numero di *function evaluations* FE, ossia sul numero di valutazioni della funzione obiettivo necessarie per soddisfare uno dei due criteri di uscita delle prove:

- differenza tra soluzione trovata e effettiva inferiore alla tolleranza imposta:  
 $|f - f^*| < \varepsilon$ ;
- raggiungimento del numero massimo di iterazioni consentito.

Questa scelta permette di risolvere i problemi derivanti dall'implementazione degli algoritmi con linguaggi di programmazione diversi; tuttavia, presenta come svantaggio quello di non tener conto del tempo effettivo delle prove come avviene, invece, nel metodo di *CPU-time*.

Le funzioni di test si dividono in:

- unimodali: presenza di un solo minimo relativo che coincide con quello assoluto;

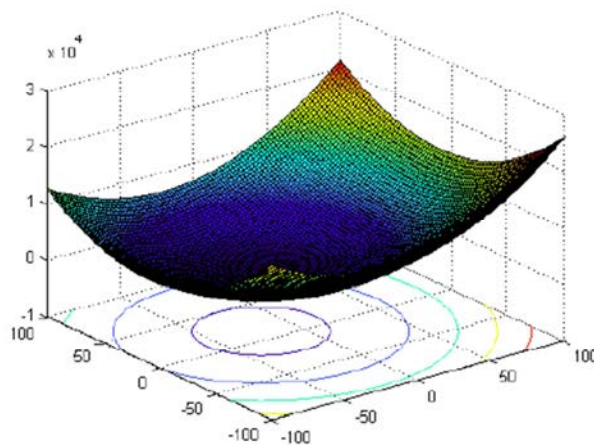


Figura 4. Esempio funzione test unimodale: sfera.

- multimodali: presenza di molti minimi relativi tra cui si 'nasconde' il minimo assoluto.

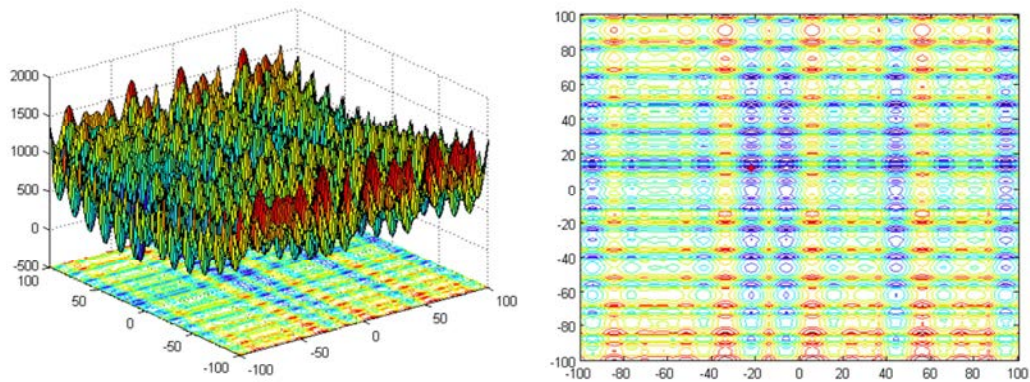


Figura 5. Esempio di funzione multimodale: Schwefel.

Si ricorda l'esistenza di un teorema il quale afferma che non esiste un algoritmo che in assoluto fornisca risultati migliori degli altri in tutte le funzioni test, ma per ottenere un buon solutore è necessario che la sua *performance* sia quanto più livellata tra tutte le *objective functions*. Un algoritmo deve, di conseguenza, presentare due caratteristiche:

- *diversification*, cioè la capacità di esplorare lo spazio di ricerca per non rimanere intrappolato in un minimo locale;
- *intensification*, cioè la capacità di convergere rapidamente verso il minimo globale una volta che questo è stato individuato.

Questi due obiettivi sono in antitesi tra di loro, in quanto la diversificazione sottende la necessità di un numero elevato di FE, mentre l'intensificazione comporta la minimizzazione del numero di FE.

Una prima analisi è stata eseguita con una popolazione di 20 particelle utilizzando alcune delle funzioni test a 30 dimensioni riassunte in figura 6.

TEST FUNCTIONS

Test Function	n	Optimum	Domain	$\epsilon$	Name
$f_1(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2$	30	0	[-100,100]	0.01	Sphere
$f_2(x) = \sum_{i=1}^n  x_i  + \prod_{i=1}^n  x_i $	30	0	[-10,10]	0.01	Schwefel's P2.22
$f_3(x) = \sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^i x_j)^2$	30	0	[-100,100]	100	Quadratic
$f_4(x) = \sum_{i=1}^{n-1} [100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2]$	30	0	[-10,10]	100	Rosenbrock's
$f_5(x) = \sum_{i=1}^n ( x_i + 0.5 )^2$	30	0	[-100,100]	0	Step
$f_6(x) = \sum_{i=1}^n -x_i \sin(\sqrt{ x_i })$	30	-12569.5	[-500,500]	2000	Schwefel's
$f_7(x) = \sum_{i=1}^n [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10]$	30	0	[-5.12,5.12]	10	Rastrigin
$f_8(x) = \sum_{i=1}^n [y_i^2 - 10 \cos(2\pi y_i) + 10]$	30	0	[-5.12,5.12]	10	Noncontinuous Rastrigin
$f_9(x) = -20 \exp(-0.2 \sqrt{1/n \sum_{i=1}^n x_i^2}) - \exp(1/n \sum_{i=1}^n \cos 2\pi x_i) + 20 + e$	30	0	[-32,32]	0.01	Ackley
$f_{10}(x) = 1/4000 \sum_{i=1}^n x_i^2 - \prod_{i=1}^n \cos(x_i/\sqrt{i}) + 1$	30	0	[-600,600]	0.01	Griewank
$f_{11}(x) = \frac{\pi}{n} (1 - \sin^2(\pi y_1) + \sum_{i=1}^{n-1} (y_i - 1)^2 [1 + 10 \sin^2(\pi y_{i+1})]) + (y_n - 1)^2 + \sum_{i=1}^n u(x_i, 10, 100, 4), y_i = 1 + \frac{1}{4}(x_i + 1)$	30	0	[-50,50]	0.01	Generalized Penalized
$f_{12}(x) = \frac{1}{10} (10 \sin^2(3\pi x_1) + \sum_{i=1}^{n-1} (x_i - 1)^2 [1 + \sin^2(3\pi x_{i+1})])$	30	0	[-50,50]	0.01	Generalized Penalized
$f_{13}(x) = \sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^i z_j)^2 - 450, z = x - o$	30	-450	[-100,100]	100	Shifted Schwefel's P1.2
$f_{14}(x) = \sum_{i=1}^n (10^6)^{\frac{i-1}{n-1}} z_i^2 - 450, z = (x - o) \times M$	30	-450	[-100,100]	$1 \times 10^{-7}$	Shifted Rotated High Conditioned Elliptic
$f_{15}(x) = \sum_{i=1}^{n-1} [100(z_{i+1} - z_i^2)^2 + (z_i - 1)^2] + 390, z = x - o + 1$	30	390	[-100,100]	100	Shifted Rosenbrock's
$f_{16}(x) = \sum_{i=1}^n [z_i^2 - 10 \cos(2\pi z_i) + 10] - 330, z = (x - o) \times M$	30	-330	[-5,5]	200	Shifted Rotated Rastrigin's
$f_{17}(x) = \sum_{i=1}^n (\sum_{k=0}^i \max_{j=0,1} [a^k \cos(2\pi b^k (z_i + 0.5))]) - n \sum_{k=0}^i \max_{j=0,1} [a^k \cos(2\pi b^k \cdot 0.5)] + 90, a = 0.5, b = 3, k \max = 20, z = (x - o) \times M$	30	90	[-0.5,0.5]	30	Shifted Rotated Weierstrass

Figura 6. Test functions con numero dimensioni=30.

Tramite un'analisi statistica ogni funzione è stata valutata per trenta volte e si sono trovati valor medio e scarto quadratico medio di FE. Supponendo una distribuzione gaussiana dei risultati, un valore del grado di confidenza del 95% e del parametro di Student di 2 è stato possibile assegnare un'incertezza di ripetibilità del 5%. I risultati ottenuti dal confronto con le versioni precedenti sono riportati nella tabella seguente.

		PSO_fer_v28	PSO_new_v46	PSO_trad
	tipo	FE	FE	FE
Sphere	unimodale	3352	3315	68642 (90%)
Schwefel P2.22 f2	unimodale	4048	3837	309006 (95%)
Quadratic	unimodale	2427	1900	107780 (30%)
Rosenbrock	unimodale	1751	1560	
Step	unimodale	9808	5564	
Schwefel	multimodale	38938	3410	
Rastrigin	multimodale	20528	18510	47498 (43%)
NC Rastrigin	multimodale	22861	21628	46118 (43%)
Ackley	multimodale	4082	3842	161131 (80%)
Griewank	multimodale	4905 (70%)	4808 (83%)	
Shifted Schwefel's P1.2	unimodale	80550 (90%)	98615 (27%)	
Shifted Rotated High Conditioned Elliptic	unimodale			
Shifted Rosenbrock function	multimodale	93387 (55%)	161737 (23%)	
Shifted Rotated Rastrigin function	multimodale	7030 (40%)	5768 (67%)	
Shifted Rotated Weierstrass	unimodale	15580 (30%)	8906 (23%)	

Figura 7. Confronto tra diverse versioni del PSO (tra parentesi la percentuale di raggiungimento della tolleranza sulla funzione obiettivo).

In generale è possibile notare come l'aggiunta del feromone alla versione *New46* comporti una sostanziale uguaglianza nelle funzioni unimodali e multimodali più semplici,

mentre permetta un miglioramento nelle funzioni ruotate. Questi risultati devono essere interpretati in virtù del fatto che, per come è stato strutturato l'algoritmo, l'aggiunta di una nuova componente velocità causa una deviazione del vettore originario: nelle funzioni unimodali, poiché non tutte le particelle possono scegliere la migliore componente del feromone sia per una questione stocastica, legata alla probabilità di scelta, che deterministica, legata al massimo numero di particelle che possono dirigersi verso una determinata regione dell'archivio, si avrà una diminuzione della capacità di intensificazione. Al contrario, nelle funzioni multimodali, escludendo il caso della Schwefel che mal tollera la presenza del feromone, l'algoritmo mantiene un'elevata capacità di diversificazione, riuscendo ad individuare con maggiore facilità l'ottimo globale.

Nella figura 8 è realizzato il confronto con altri algoritmi presenti in letteratura; il *PSO\_fer\_v28* risulta sicuramente vincente rispetto al PSO tradizionale e a molti degli altri algoritmi; mantiene, invece, nonostante i miglioramenti, un *ranking* inferiore nelle funzioni ruotate più complesse. Nella figura 9 sono, invece, riassunti i risultati ottenuti con altre funzioni test al variare del numero di dimensioni e della tolleranza di uscita dal ciclo; si ricorda che si sono eseguite le prove con un numero di particelle pari a 20, valore ottimo per il funzionamento dell'algoritmo.

	PSO_fer_v28		ALC-PSO	APSO	GPSO	GPSO lin	VPSO	RPSO	CLPSO	HPSO-TVAC	FIPS	DMS-PSO	
	FE	Rank	FE	FE	FE	FE	FE	FE	FE	FE	FE	FE	
Sphere	3352	1	7491	7074	7488	109157	112934	117765	59706	30012	32342	91484	
Schwefel P2.22 f2	4048	1	8180	7900	7916	105287	110507	114732	62348	32505	36328	90640	
Quadratic	2427	1	23839	21166	23753	139798	149647	165220	173583 (40%)	106672	80588	187507	
Rosenbrock	1751	1	6406	5334	5348	97297	101888	100433	59985	12115	12359	86008	
Step	9808	2	13176			29085 (73.3%)	101141	91001	90102	28038	55218	7541	71324
Schwefel	38938	2	46698 (100%)			74716 (96.7%)	95417 (56.67%)	93406 (3.33%)	27205	45493 (100%)	103167 (70%)	88037 (33.33%)	
Rastrigin	20528	1	74206			-	-	-	103459	85424 (96.7%)	169061 (3.33%)	-	
NC Rastrigin	22861	1	58900			64994 (30%)	164892 (53.3%)	169896 (23.3%)	113585	93259			
Ackley	4082		58900	40736		11171 (23.3%)	115287	118013	125779	66771	54616	38347	99777
Griegwank	4905 (70%)	4	10161 (60%)	7568 (66.7%)		8265 (56.7%)	119097 (53.3%)	117774 (33.3%)	122650 (73.3%)	66649	35497 (60%)	43147	97435 (70%)
Shifted Schwefel's P1.2	80550 (90%)	10	30736			27512	143175	141691	161607	-	122419	97708	122403
Shifted Rotated HCE			9277			8372	114086	105986	125118 (93.3%)	164493 (63.3%)	59570	58564 (96.7%)	96985 (86.7%)
Shifted Rosenbrock function	93387 (55%)	10	34007 (90%)			34756 (90%)	130662 (80%)	135917 (83.3%)	140012 (90%)	91486	107552 (86.7%)	45521 (73.3%)	122403 (80%)
Shifted Rotated Rastrigin function	7030 (40%)	10	17121			4085	93834 (86.7%)	31841	36769	50312	-	54626	29485
Shifted Rotated Weierstrass	15580 (30%)	10	36270 (86.7%)			31867 (50%)	91142	34131	30885	75402	21056 (36.7%)	68359 (96.7%)	48150

Figura 8. Confronto PSO\_fer\_v28 vs altri algoritmi presenti in letteratura.

	dim	tol	PSO_fer_v28		ACOr	(1+1)ES	CSA-ES	CMA-ES	IDEA	MBOA	CACO	API	CIAC	CGA	ECTS	ESA	DE	
			FE	rank	FE	FE	FE	FE	FE	FE	FE	FE	FE	FE	FE	FE	FE	FE
Sphere	10	10^-10	5070	5	1507	1370	2192	1781	7535	65760								
Ellipsoid	10	10^-10	5640	1	11570	293700	489500	4450	7120	62300								
Cigar	10	10^-10	6690	3	5376	2342400	3072000	3840	17664	46080								
Tablet	10	10^-10	6770	3	2567	118082	166855	4363,9	7444,3	61608								
Rosenbrock	2	10^-4	1660	6	820	-	-	-	-	-	6806	9840	11480	960	480	816	624	
Rosenbrock	5	10^-4			2570 (97%)								39792 (90%)	4069,8	2142	5355		
Griegwank	10	10^-4	7560	1	1390 (61%)						50040		50040 (52%)				12788	
Shekel (4,5)	4	10^-4	9920	1	787 (50%)								39350 (5%)	610 (76%)	854 (75%)	1159 (54%)		
Shekel (4,7)	4	10^-4	14090	1	748 (79%)									680 (83%)	884 (80%)	1224 (54%)		
Shekel (4,10)	4	10^-4	4080	1	715 (81%)									650 (83%)	854 (80%)	1170 (50%)		
Goldstein & Price	2	10^-4	510	4	384						5376		23424 (56%)	415,8	231	785,4		
Branin	2	10^-4	360	2	857,5									612,5	245			
B2	2	10^-4	700	3	544								11968	430				
Easom	2	10^-4	650	1	772 (98%)									1466,8				
Zacharov	2	10^-4	320	3	292,5									624	195	15795		
Zacharov	5	10^-4	1190	2	727									1381,3	2253,7	69792		
De Jong	3	10^-4	480	3	392									744,8			392	
Hartmann (3,4)	3	10^-4	520	2	342									581,4	547,2	684		
Hartmann (6,4)	6	10^-4	650 (70%)	5	722									938,6	1516,2	2671,4		
Sphere	6	10^-4	1040	2	781						21868	10153	49984					
Martin & Gaddy	2	10^-4	500	2	345						1725		11730 (20%)					

Figura 9. Confronto PSO\_fer\_v28 vs altri algoritmi presenti in letteratura con funzioni test, dimensioni e tolleranza diverse.





## **PARTE 2**

### **Applicazione del PSO con feromone all'ottimizzazione del condotto statorico di una pompa centrifuga**



#### 4. Schema di lavoro sperimentale

La seconda parte di questo lavoro di tesi tratta dell'applicazione dei concetti teorici precedenti ad un caso industriale di ottimizzazione del canale di ritorno di una pompa centrifuga a due stadi realmente esistente, denominata MXV\_65.

Tale macchina è composta da un condotto di adduzione iniziale, da una prima girante centrifuga di sei pale che produce un incremento di pressione totale del fluido, un condotto statorico di otto pale con il compito di recuperare una quota parte di pressione statica e di raddrizzare la corrente in ingresso al secondo stadio, realizzato in modo analogo al precedente e seguito da un condotto di scarico.

Il lavoro di ottimizzazione è stato svolto attraverso un'analisi 3-dimensionale del canale di ritorno stazionario, spezzando il dominio in due parti: la prima di interfaccia tra girante e riconvogliatore, la seconda composta dall'organo statorico vero e proprio.

Inizialmente si è costruito un modello semplificato della macchina: si precisa, infatti, che il condotto statorico in esame presenta nella realtà una configurazione a pale alterne caratterizzate da geometria diversa. Partendo dal cad si è effettuata una parametrizzazione 3-D determinando le coordinate di linea media e di semispessore per i due tipi di palettature e da queste si è ottenuta una pala descritta dalle coordinate medie tra le due.

Ottenuta la geometria di riferimento si è lanciato un primo loop iterativo utilizzando uno script in Matlab® in grado di determinare con l'utilizzo del *PSO\_fer\_v28* le coordinate dei punti del poligono di Bézier che descrivono una curva che meglio si sovrappone a quella ottenuta dalla parametrizzazione. Le coordinate di linea media e spessore così ottenute costituiscono alcune delle successive variabili di decisione da utilizzarsi nel loop di ottimizzazione vero e proprio.

Prima di eseguire l'ottimizzazione, tuttavia, è stato necessario validare il modello semplificato costruito attraverso la creazione di diverse schematizzazioni aventi l'obiettivo di valutare quantitativamente la differenza delle prestazioni tra modello e macchina reale.

Si è sviluppata in seguito un'ottimizzazione 3-dimensionale, utilizzando un primo set di variabili di decisione, tramite un'interfaccia grafica/geometrica-numerica gestita da un loop capace di collegare tra loro diversi programmi comandati da uno script master in

Matlab®; questo riceve in input il valore della funzione obiettivo e restituisce in output le nuove variabili di decisione, che permettono di ricostruire di volta in volta la nuova geometria. Una volta ottenuto l'individuo ottimizzato si è costruita la nuova geometria della macchina e si sono effettuate alcune simulazioni in diversi punti della linea operativa al fine di determinare le prestazioni nella nuova configurazione da confrontare con l'originale.

Infine, in base ad alcune osservazioni tratte dai risultati precedenti, si è apportata una modifica geometrica alle curve di *hub* e *shroud* e si è eseguita una nuova ottimizzazione con un secondo set di variabili di decisione.

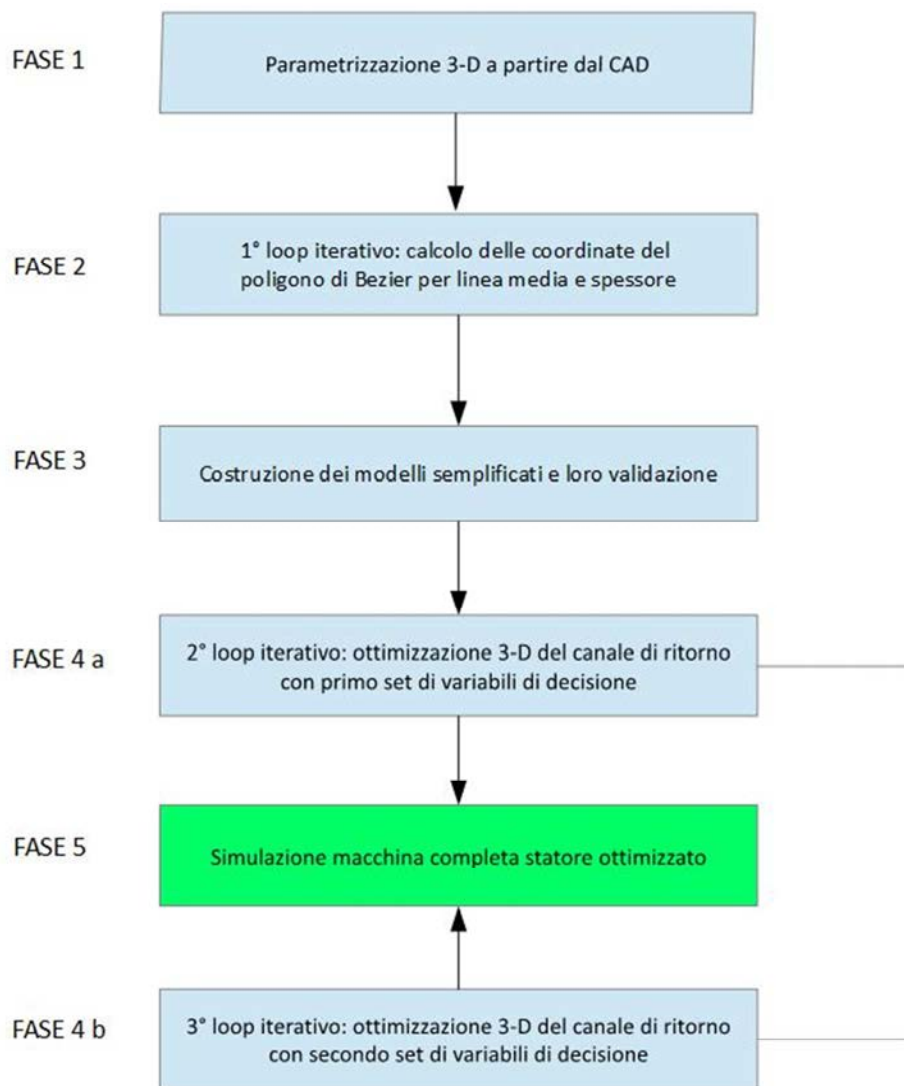


Figura 10. Flow chart dello studio del canale di ritorno.

Nel seguito sono descritte in maniera dettagliata le cinque fasi.

#### 4.1 Fase 1: parametrizzazione 3D

La macchina in esame è rappresentata in figura 11:

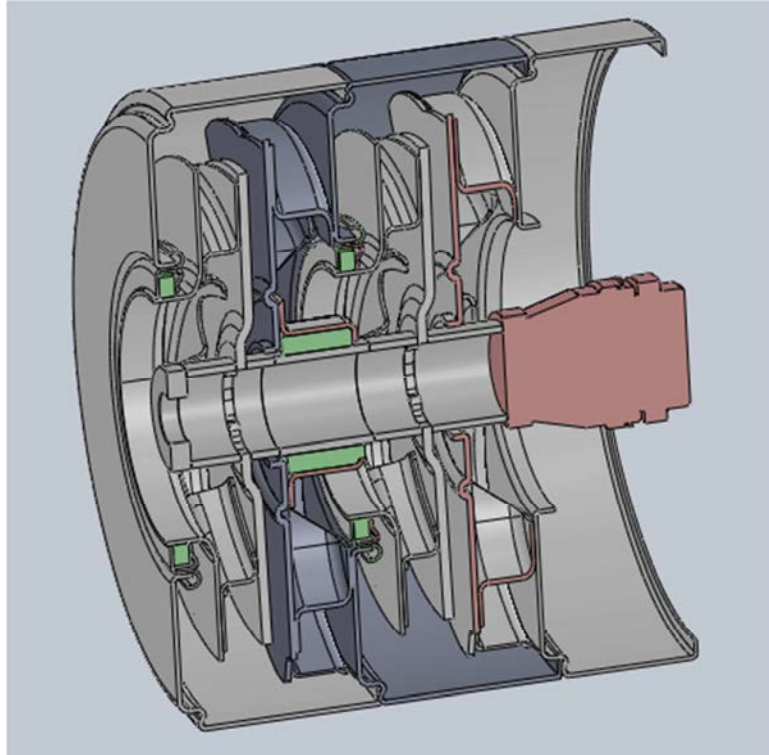


Figura 11. Vista in prospettiva MXV\_65 con sezione nel piano meridiano.

La parametrizzazione 3-D di una turbomacchina consiste nell'individuazione nel piano meridiano e in quello conforme, rappresentativo del canale interpalare, delle coordinate  $R\Delta\vartheta$  e  $m$  di linea media, intradosso ed estradosso della pala del canale di ritorno, dove i valori infinitesimi di tali grandezze sono espressi come:

$$\delta m = \sqrt{\delta R \delta R + \delta z \delta z}$$

$$\delta m' = \delta m/R$$

$$m = \int_0^S \delta m ds$$

con  $S$  lunghezza del generico layer nella vista meridiana.

Nel caso particolare i valori  $R$  e  $z$  della palettatura a semplice curvatura sono stati misurati direttamente dal disegno cad della macchina e poiché il condotto statorico è perfettamente radiale si ha che il valore di  $m$  coincide con il raggio misurato nel piano meridiano se si fissa la coordinata assiale  $z$  nulla.

La parametrizzazione 3-D ha come particolarità il fatto che gli angoli misurati nella vista circonferenziale e quelli riportati nel piano conforme coincidono; di conseguenza fissando un asse di riferimento passante per il centro della macchina e per il *trailing edge* TE di una pala è stato possibile determinare il valore dell'angolo  $\theta_i$  per ogni punto della linea media. Per completezza si riporta di seguito la definizione di  $\vartheta$ :

$$\theta = \int_0^S \delta\theta ds$$

Dalle grandezze precedenti si può determinare l'angolo locale della palettatura  $\beta$ :

$$tg\beta = \delta\theta/\delta m'$$

In definitiva si sono raccolti in un foglio Excel i valori di  $R$  e  $\vartheta$  delle tue tipologie di pale del riconvolgiatore e tramite uno script in Matlab® si sono mediate le coordinate al fine di determinare la palettatura rappresentativa da utilizzarsi nella successiva ottimizzazione.

Si riporta nel seguito la ricostruzione della geometria della pala del riconvolgiatore.

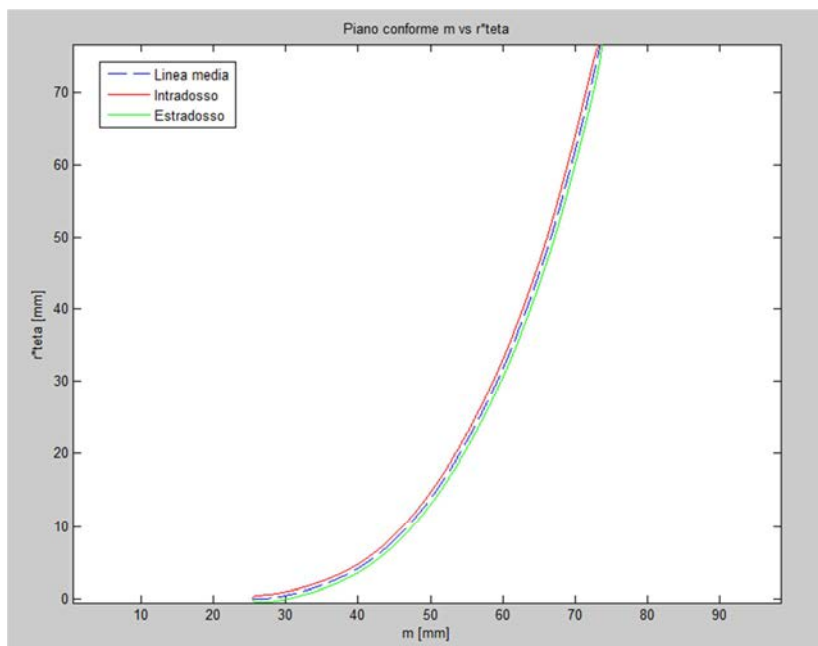


Figura 12. Pala media dello statore nel piano conforme m vs r\*teta.

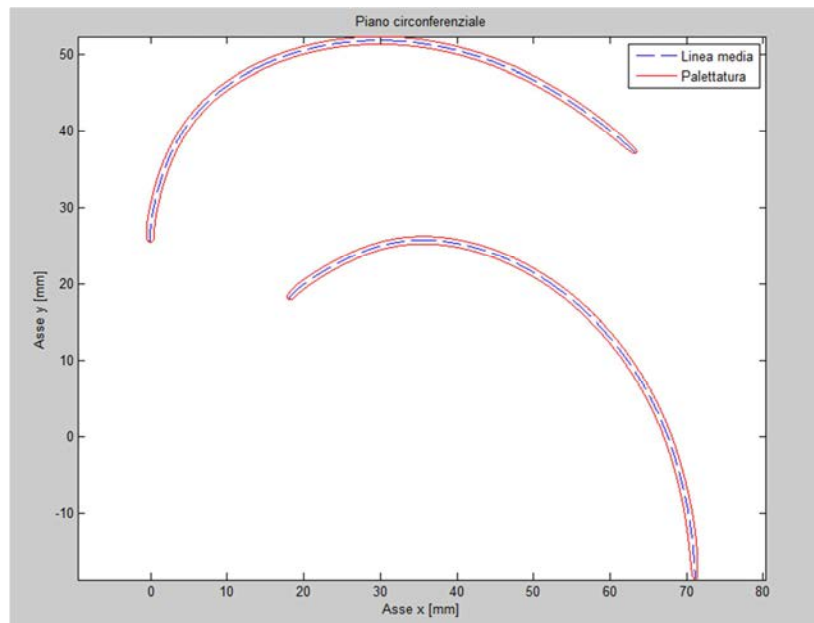


Figura 13. Due pale medie dello statore nel piano circonferenziale.

## 4.2 Fase 2: calcolo punti del poligono di Bézier

I valori in Excel sono stati letti da uno script in Matlab® al fine di determinare le coordinate dei punti del poligono di Bézier che costituiscono le variabili di decisione dell'ottimizzazione. Non è pensabile, infatti, di modellare la geometria della pala muovendo direttamente tutte le coordinate di ogni punto di linea media e spessore perché altrimenti si avrebbero per un'ottimizzazione nel piano  $2 \cdot n$  variabili, con  $n$  numero di punti che descrivono la generica curva; si utilizza, invece, una parametrizzazione mediante curve spline e curve di Bézier. Queste ultime sono curve parametriche descritte da un parametro  $t$  appartenente ad un intervallo tra 0 e 1:

$$\begin{cases} x(t) \\ y(t) \end{cases} = \sum_{i=0}^n C_{n,i} t^i (1-t)^{n-i} \begin{cases} x(i) \\ y(i) \end{cases}$$

con  $i$  numero dei punti di controllo o punti del poligono di Bézier.

La parametrizzazione con curve di Bézier prevede che il primo e l'ultimo punto del poligono coincidano con il primo e l'ultimo punto della curva da rappresentare e che i rispettivi lati siano tangenti alla curva.

In questo modo si hanno i seguenti vantaggi: sono sufficienti pochi parametri per rappresentare una curva regolare; essendo curve parametriche sono in grado di

descrivere geometrie non esplicite e che, quindi, possono chiudersi; consentono, infine, di rappresentare la curvatura locale della curva, come per esempio la derivata seconda.

Nel caso in esame si è fissato un numero di punti del poligono pari a 8, compresi gli estremi, con l'obiettivo di poter apprezzare alla fine del processo un'eventuale cambio di curvatura della linea media della pala.

Per semplificare il problema si è deciso di utilizzare i punti del poligono nel piano conforme con ascisse equi spaziate e di muovere unicamente le ordinate, che costituiscono, quindi, alcune delle variabili di decisione del secondo loop iterativo.

L'obiettivo di questa seconda fase è, quindi, quello di determinare i valori delle ordinate dei punti in modo da avere a disposizione nell'ottimizzazione vera e propria dei valori iniziali da cui partire per poter modificare la geometria della pala. La funzione obiettivo da minimizzare è una funzione algebrica data dall'errore tra la curva iniziale e quella costruita artificialmente dal programma ed espressa come somma delle differenze dei segmenti verticali tra le due curve. Si è utilizzato l'algoritmo *PSO\_fer\_v28* con 20 particelle, impostando un numero massimo di iterazioni pari a 200 e un valore di tolleranza sulla funzione obiettivo di  $10^{-10}$ , seguito da un algoritmo indiretto di tipo *sqp*, *sequential quadratic programming*, con le medesime impostazioni; così facendo si affida al primo il compito di individuare una direzione promettente di ricerca, mentre al secondo quello di affinare la soluzione.

Il confronto tra curva originale e curva ricostruita è mostrato nella figura 14, dove è visibile anche il poligono di Bézier con i suoi otto punti:



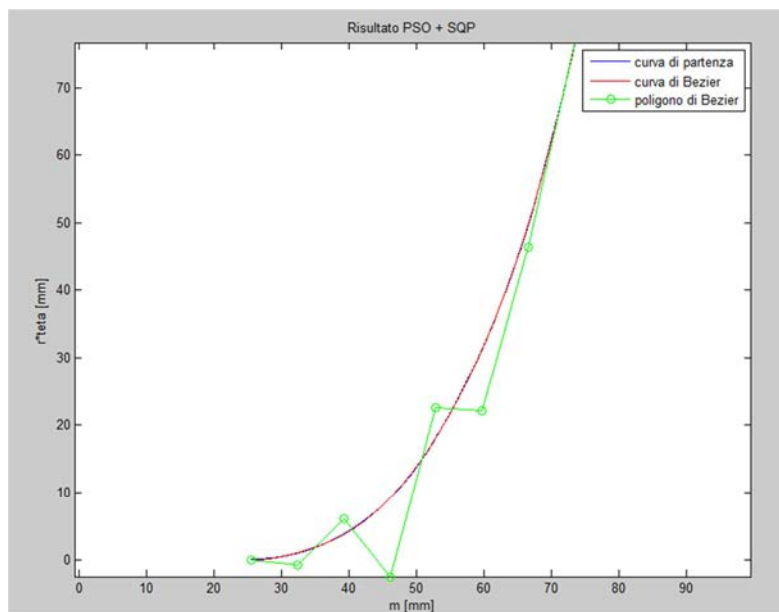


Figura 14. Confronto tra curve e poligono di Bèzier.

Per lo spessore la procedura è stata più semplice, infatti, il suo valore è costante lungo e pari a 1 mm; di conseguenza fissate le medesime ascisse del caso precedente si è assegnato a ciascuna il valore unitario per le ordinate.

I valori delle coordinate dei punti del poligono di linea media e spessore utilizzati nel loop successivo e shiftati con ascissa nulla nel primo punto sono:

- Linea media

<b>m [mm]</b>	0	6,35	12,74	19,09	25,44	31,84	38,19	44,56
<b>Rθ [mm]</b>	-55,88	-39,49	-24,28	-28,28	-1,71	-10,11	-0,90	0

- Spessore

<b>m [mm]</b>	0	6,35	12,74	19,09	25,44	31,84	38,19	44,56
<b>Rθ [mm]</b>	1	1	1	1	1	1	1	1

In figura 15 si ha nel piano circonferenziale il confronto geometrico tra pala originale e pala ricostruita.

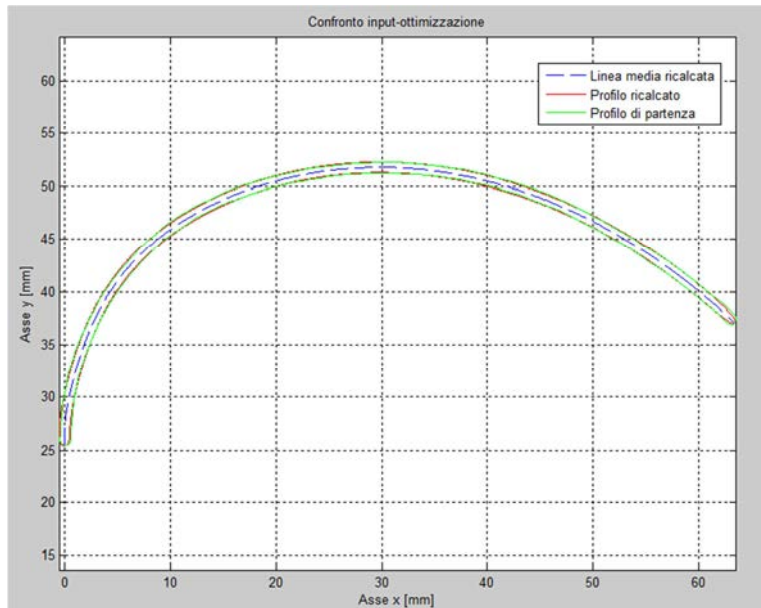


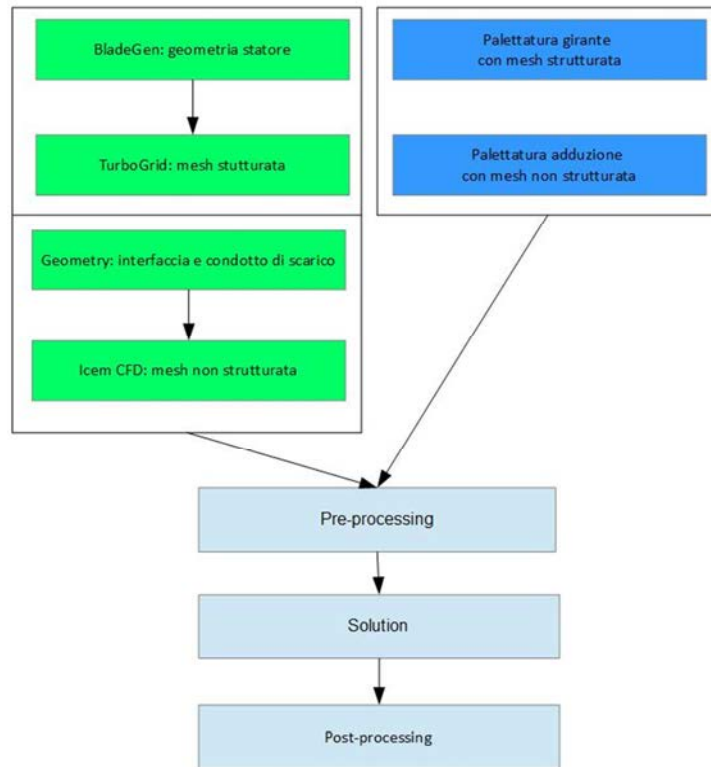
Figura 15. Piano circolare: geometria originale e geometria ricostruita.

### 4.3 Fase 3: costruzione modello e validazione

Una volta parametrizzata la geometria palare dello statore è necessario costruire un modello 3-dimensionale completo della pompa con i suoi due stadi, introducendo ulteriori semplificazioni geometriche, come l'eliminazione dei risvolti in lamiera o di particolari difficilmente modellabili. L'obiettivo è quello di realizzare un condotto statorico, definito da una mesh strutturata, da associare alle altre parti della macchina, come il canale di adduzione e la girante, già modellate durante studi precedenti in modo rispettivamente non strutturato e strutturato.

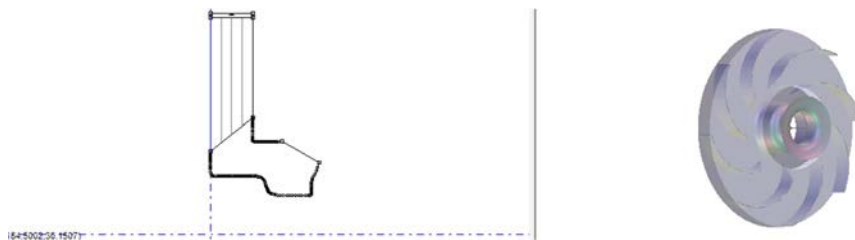
Il modello così realizzato deve essere necessariamente validato, cioè, una volta imposte le condizioni al contorno di funzionamento, confrontato con le curve sperimentali della macchina.

La modellazione è stata eseguita utilizzando il Workbench® di Ansys®, creando un progetto schematico, i cui dettagli sono contenuti in appendice G, composto dai seguenti moduli.



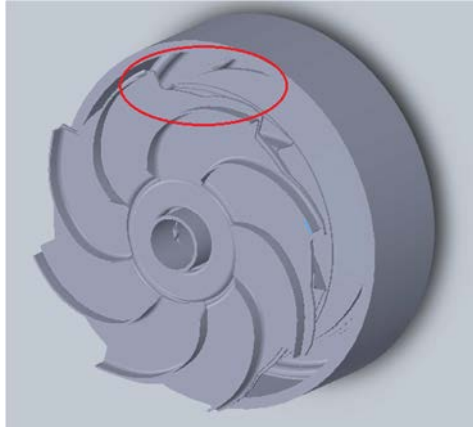
**Figura 16. Mappa concettuale per la realizzazione del modello semplificato della macchina: a sinistra le geometrie costruite in questo lavoro di tesi, a destra quelle già disponibili da studi precedenti.**

- Modulo geometrico: determinate le coordinate dei punti del poligono di Bézier di linea media e spessore nella la fase precedente, con il programma BladeGen®, appositamente pensato per la realizzazione di turbomacchine, è stata ricostruita la geometria 3-D dello statore, sia del primo sia del secondo stadio.



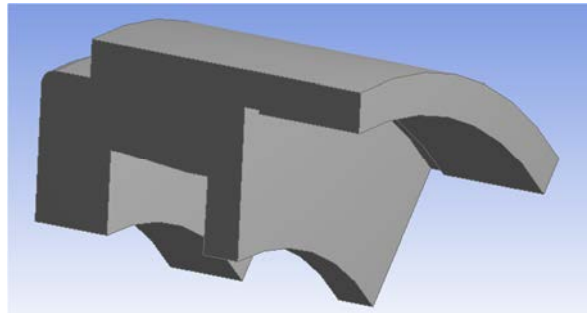
**Figura 17. Piano meridiano e vista 3-D del primo riconvolgiatore.**

Al fine di valutare le effettive prestazioni della macchina derivanti dalla sua progettazione originaria, si è deciso di eliminare dall'organo statorico un'apertura sulla lamiera di derivazione sperimentale tra una pala e l'altra, volgarmente detta "margherita", che consente un maggior passaggio di acqua alle elevate portate e, quindi, un minor effetto perdita legato alla strizione della sezione di attraversamento.



**Figura 18. Vista in sezione dell'organo statorico con la "margherita"; nella simulazione si è eliminata.**

Alla geometria della pala si aggiunge la zona di interfaccia tra dominio rotante, girante, e dominio statorico, riconvolgiatore. Tale zona è stata costruita utilizzando il programma Geometry® che permette di definire alcuni parametri geometrici, le quote, in maniera parametrica e di variarli dall'esterno in modo che la forma in esame si aggiorni automaticamente; in questo modo durante la fase di ottimizzazione è stato possibile modificare i valori del raggio della strizione e l'altezza della pala.



**Figura 19. Spicchio di 45° della zona di interfaccia tra rotore e statore.**

Sempre con il Geometry® si è creato il condotto di scarico alla fine del secondo stadio.

- Modulo di mesh: la geometria della pala è stata "collegata" al programma di meshatura TurgoGrid®, che permette di discretizzare secondo la teoria degli elementi finiti il dominio fluido della turbomacchina in celle esaedriche, per definizione più accurate di quelle tetraedriche. Nella prima fase di validazione si è utilizzato un numero di celle pari a 250.000 per passaggio palare; successivamente è stata svolta un'analisi di sensitività per abbassare tale numero e diminuire i tempi di calcolo durante il loop iterativo di ottimizzazione.

La zona di interfaccia, invece, è stata meshata in modo non strutturato con celle tetraedriche utilizzando Icem CFD® con il metodo *Octree* per le superfici esterne e

*Delaunay* per riempire il dominio dall'esterno all'interno; lo stesso è stato fatto per la zona di uscita dal secondo stadio. In entrambi i casi si è utilizzato un numero di nodi pari a 50.000, oggetto poi per la zona di collegamento di un'analisi di sensitività come nel caso della pala dello statore.

- Le geometrie meshate sono state collegate al preprocessore del CFX®, al quale sono state aggiunte anche quelle di adduzione e girante già discretizzate in maniera non strutturata e strutturata in studi precedenti. Con questo strumento è stato possibile definire le condizioni operative della macchina e le relazioni tra i domini rotorici e statorici. Nel primo caso si è imposta, valutandola dalla curva del collaudo, una portata all'ingresso e una condizione di *opening*, cioè di scarico libero, all'uscita; nel secondo, invece, si è optato per un approccio *frozen rotor*. A tal riguardo sono necessarie alcune precisazioni poiché esistono tre diversi metodi che consentono di collegare le interfacce rotore-statore. Il *frozen rotor* è il più semplice dal punto di vista computazionale perché prevede la girante congelata nella posizione definita rispetto allo statore; il solutore risolve le equazioni di Navier-Stokes mediate alla Reynolds sia nel sistema relativo che in quello assoluto annullando la derivata totale di tutte le grandezze fluide, cioè secondo la modalità *steady*. Con questo metodo la soluzione è vincolata alla posizione relativa tra i domini.

Se, invece, si vuole analizzare il problema tenendo conto della rotazione della girante, si deve passare alla modalità *unsteady* tramite lo slittamento delle due mesh eseguito con l'introduzione di un parametro aggiuntivo, il *time step*, che definisce l'intervallo temporale di rotazione tra i domini: si parla in questo caso di approccio *sliding mesh*. Sebbene questo metodo sia più accurato del precedente, i tempi di calcolo si allungano notevolmente a causa delle numerose iterazioni che il solutore deve compiere.

Un caso intermedio dal punto di vista computazionale è costituito dal "piano di mescolamento" in cui le grandezze fluide in uscita dalla girante sono mediate in direzione circonferenziale e passate al successivo dominio; questo è visibile nella fase di *post-processing* come una discontinuità del campo di moto.

Nel caso in esame si è utilizzato un approccio *frozen rotor* al fine di contenere la durata delle simulazioni.

Nella validazione virtuale si sono imposti un numero di iterazioni pari a 600 e i valori massimi dei residui, termini che derivano dalla soluzione in step delle equazioni di NS al di sotto dei quali si ritiene raggiunta la convergenza, di  $10^{-4}$ .

La validazione è stata eseguita inizialmente considerando la macchina nella sua completezza, composta, cioè, dai due stadi e da tutti i condotti palari nei  $360^\circ$ ; successivamente si sono simulati i due stadi come condotto singolo, introducendo, cioè, la condizione di periodicità delle palettature. In ogni configurazione si sono simulate alla velocità di 2900 rpm cinque portate diverse:  $5.7 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $8.55 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $9.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $10.45 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $13.3 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Utilizzando una workstation con 32 GB di ram e 4 processori ogni simulazione completa ha impiegato circa trenta ore di calcolo, mentre circa quattro ore per la configurazione periodica.

Le figure seguenti riassumono i risultati della validazione, confrontati con il collaudo sperimentale e le analisi già svolte nei precedenti studi dove il canale storico era stato analizzato con la "margherita" e con mesh non strutturata; i valori dettagliati delle simulazioni nelle due configurazioni sono contenuti in forma tabulare nell'appendice A.

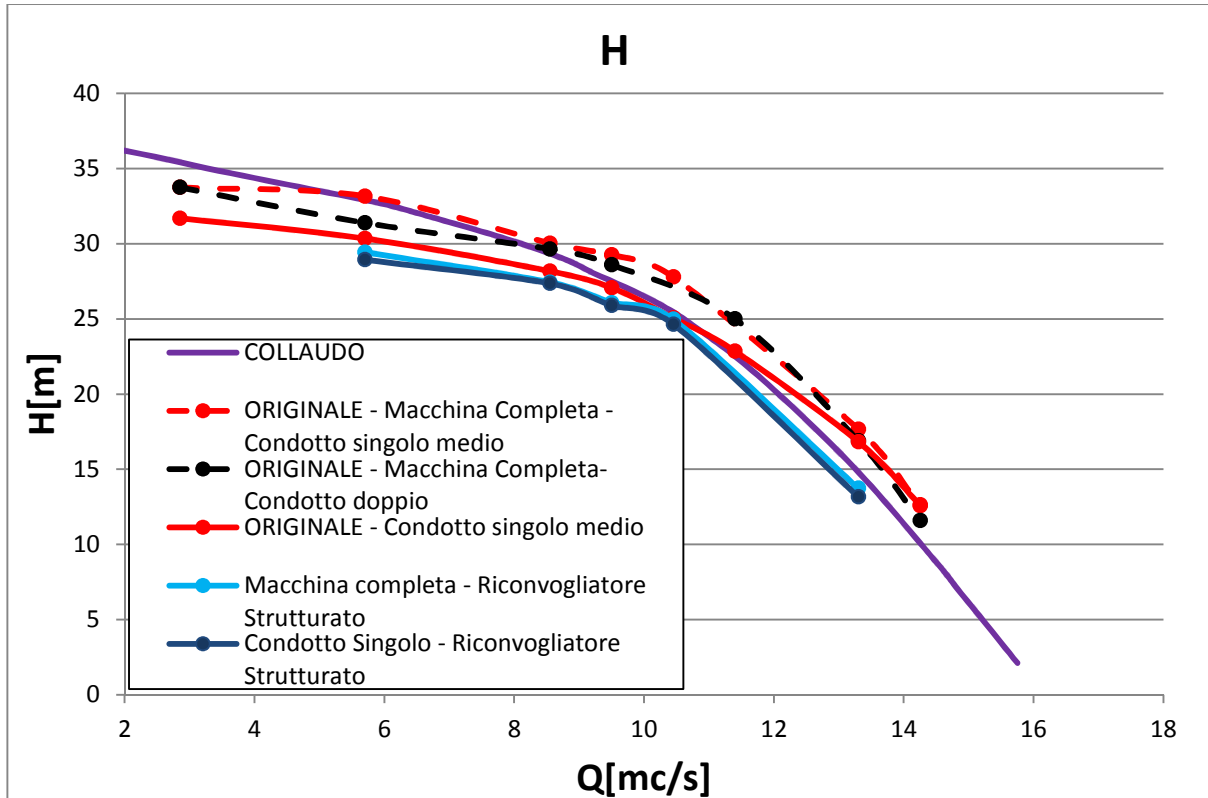


Figura 20. Grafico prevalenza  $H$  [m] - portata  $Q$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ].

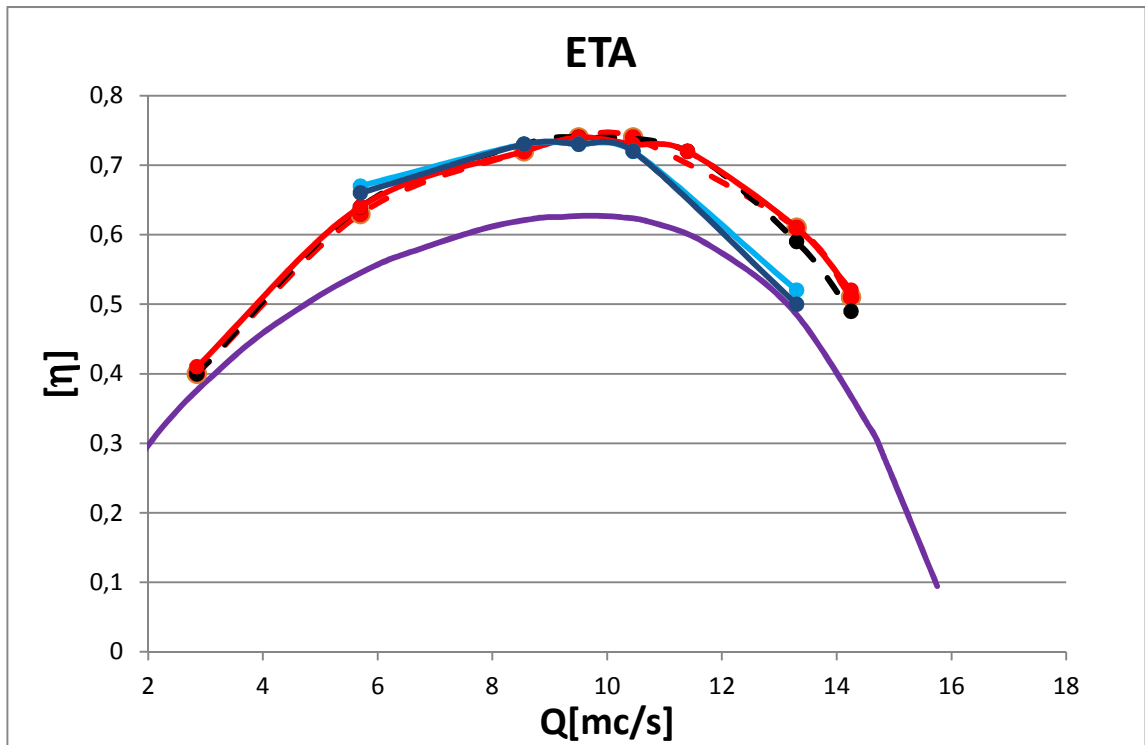


Figura 21. Grafico rendimento  $\eta$  - portata Q [m/s].

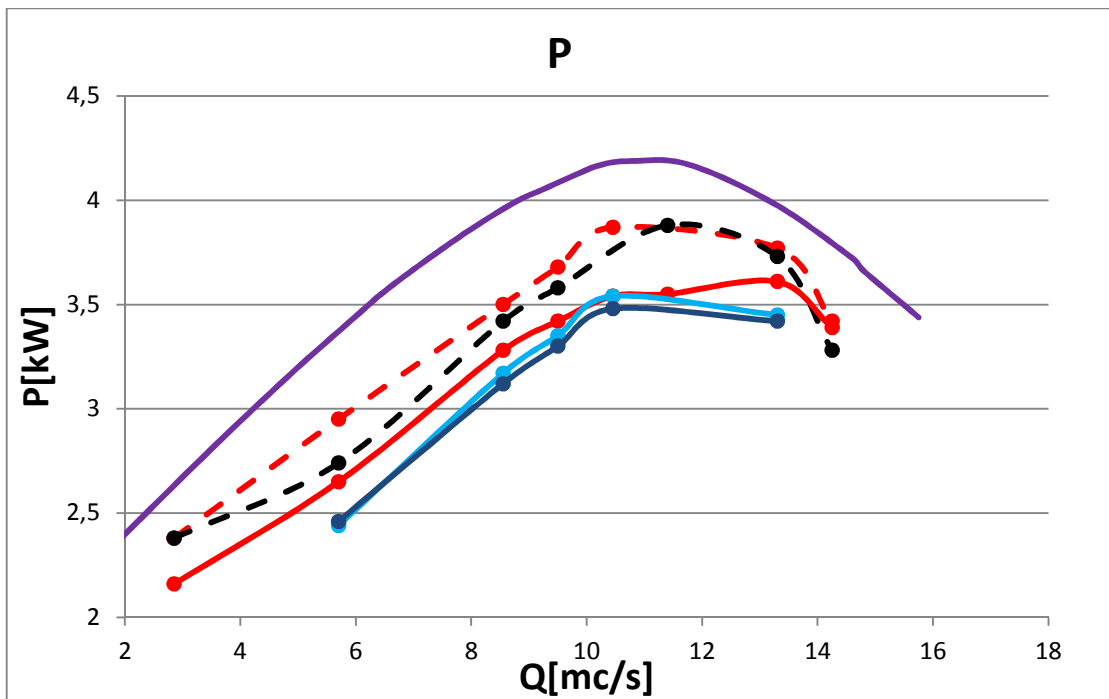


Figura 22. Grafico potenza P [kW] - portata Q [m/s].

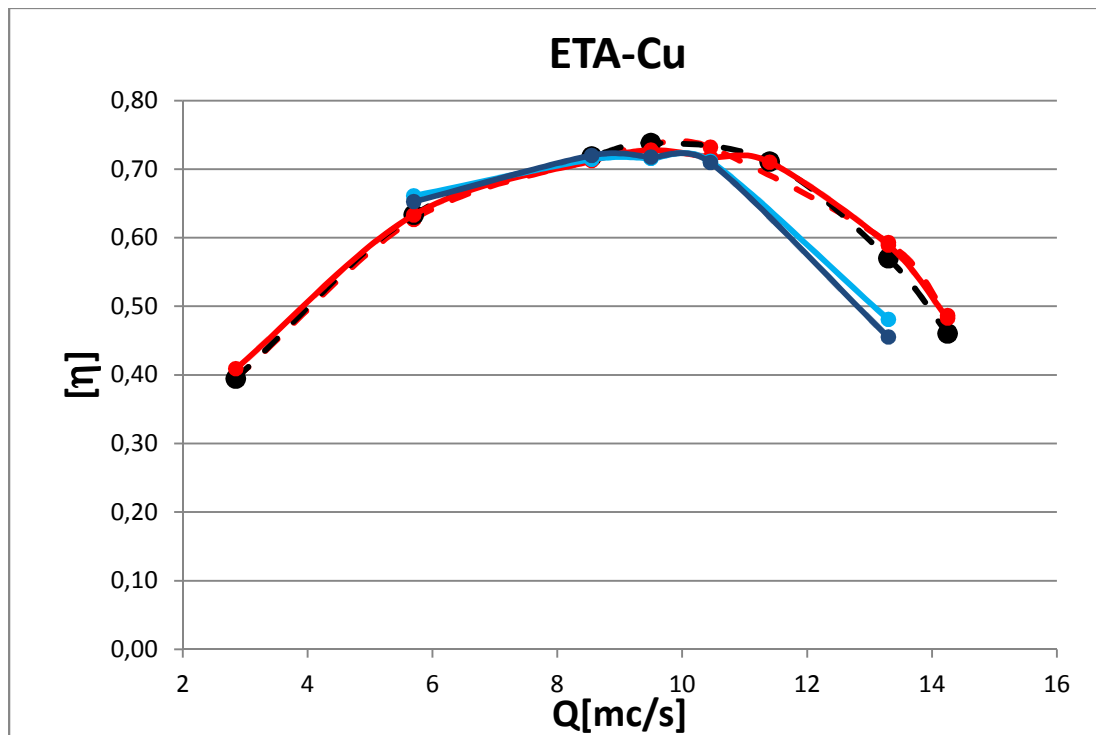


Figura 23. Grafico rendimento velocità tangenziale allo scarico - portata Q [m/s].

Dai grafici precedenti si possono trarre alcune considerazioni:

- Le simulazioni macchina completa e condotto singolo mostrano gli stessi risultati, di conseguenza è possibile semplificare il problema e studiare la macchina definendo un unico canale palare e introducendo la periodicità dei diversi domini fluidi.
- I risultati delle nuove simulazioni, ottenute con mesh strutturata, sono sostanzialmente compatibili a quelli con mesh non strutturata. Lo scostamento maggiore si nota nel grafico della potenza; questo è dovuto alle semplificazioni con cui è stato realizzato il modello geometrico del canale di ritorno in BladeGen® e TurboGrid®: il programma non permette di distinguere tra dominio rotante e fisso delle superfici di *hub* e *shroud* una volta definito il riconvolgiatore come organo statorico. Se si osserva la figura 17, infatti, è intuibile che la parte di *hub* inferiore a contatto con l'albero su cui è montata la palettatura sia in realtà una superficie rotante e, quindi, soggetta a un momento torcente. È corretto pensare, in definitiva, che il difetto di potenza sia dovuto proprio alla mancanza di tale termine nell'equazione della potenza.



- L'aver eliminato dalla geometria originale la "margherita" produce dei risultati che si discostano maggiormente dalle simulazioni precedenti analizzando il rendimento in termini di velocità tangenziale allo scarico per le alte portate. Questo può essere giustificato considerando che mano a mano che la portata aumenta, necessariamente la velocità attraverso la sezione ristretta aumenta; di conseguenza la velocità allo scarico aumenta con conseguente aumento delle perdite.

La diminuzione del rendimento complessivo nel punto a portata di  $9,5 \text{ m}^3/\text{s}$  è, invece, dell'1% nella nuova configurazione.

Si sottolinea che la differenza tra la curva sperimentale e quella ricavata nelle prove virtuali costituisce un'incertezza composta da una componente di modello, legata alle semplificazioni geometriche realizzate, e da una numerica, dovuta alla soluzione approssimata delle equazioni di Navier-Stokes del solutore del CFX®. In una simulazione virtuale non è possibile distinguere tali contributi e l'unico modo per ridurre tale gap o accettarlo come valore significativo è quello di effettuare un numero elevato di validazioni.

Dopo aver studiato entrambi gli stadi si è passati ad analizzare unicamente il primo con l'obiettivo di costruire un modello di interfaccia-statore compatibile con i risultati precedenti con il minor numero di nodi nella mesh; si è eseguita in sostanza un'analisi di sensibilità per determinare il numero di nodi ottimale con cui effettuare la successiva ottimizzazione. In questi studi è stata semplificata anche la geometria dello statore all'uscita, utilizzando una geometria rettilinea di *hub* e *shroud* nella vista meridiana, in modo da ottenere una mesh che rispetti i criteri minimi di qualità anche con basso numero di nodi.

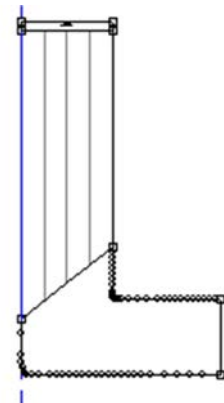


Figura 24. Geometria semplificata statore.

Il modello costruito prevede, secondo la configurazione canale singolo, il condotto di adduzione, la girante, l'interfaccia, definita inizialmente con 50.000 nodi, e il canale di ritorno con 250.000 nodi. Lo studio di sensibilità è stato eseguito valutando la perdita di pressione totale espressa in metri,  $\Delta H_t$ , e la velocità periferica  $C_u$  allo scarico, cioè, i due termini che costituiscono la funzione obiettivo del loop iterativo successivo, variando il

numero di nodi dello statore dal valore iniziale a 50.000 e quello dell'interfaccia fino a 10.000.

Si è scelto un punto di progetto corrispondente a una portata di  $9,5 \text{ m}^3/\text{s}$ , utilizzato anche nella successiva ottimizzazione.

Inizialmente si è variato unicamente il numero di nodi del riconvolgiatore ad intervalli di 50 knodi; determinato il valore che permette la saturazione della mesh nei parametri monitorati si è passati a diminuire il valore dei nodi all'interfaccia ad intervalli di 10 knodi alla volta.

I risultati sono riassunti nei grafici seguenti, mentre i valori numerici sono riportati nell'appendice B.

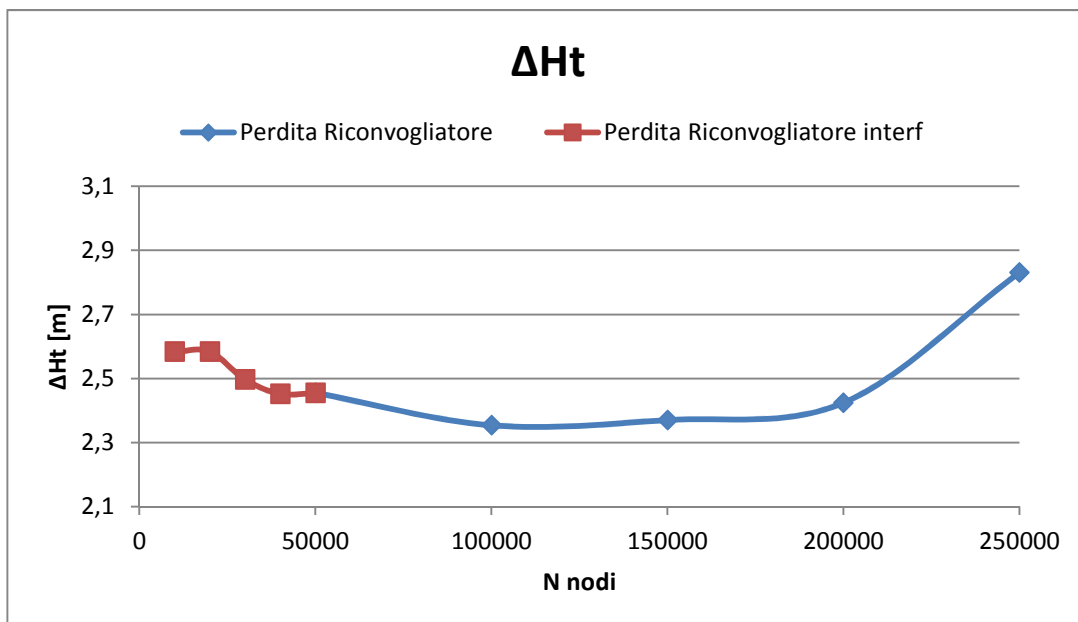


Figura 25. Andamento della perdita di pressione totale al variare del numero di nodi.

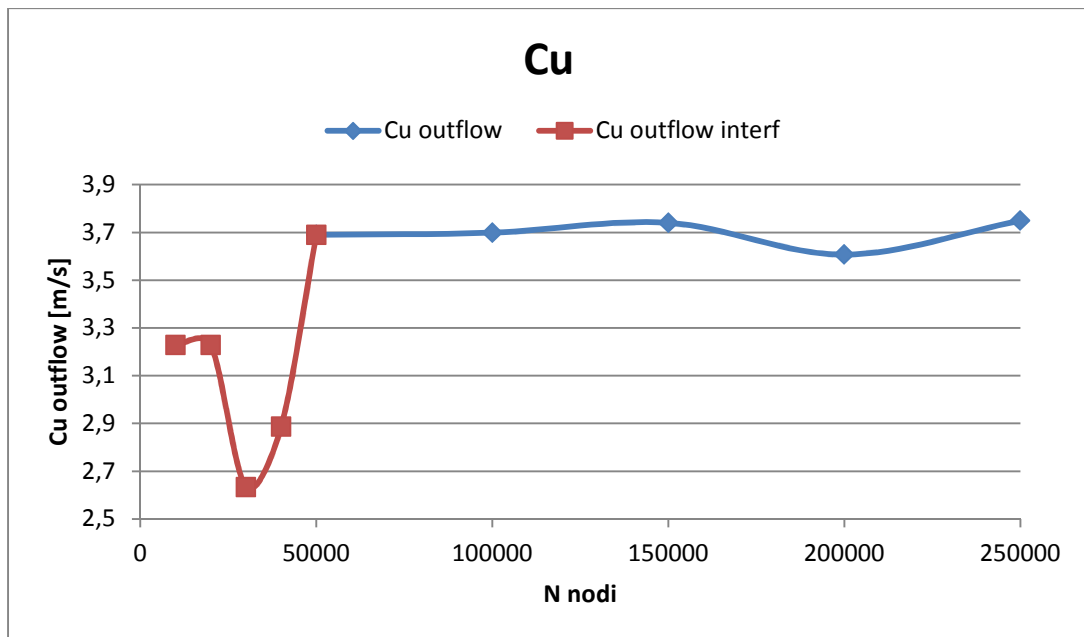


Figura 26. Andamento della velocità tangenziale allo scarico al variare del numero di nodi.

Si può notare come già diminuendo il numero di nodi del riconvolgiatore da 250 knodi a 200 knodi la perdita di pressione totale diminuisca; questo è giustificato dal fatto che il numero di celle con cui viene definito lo strato limite cala e, quindi, gli effetti della viscosità sono catturati in maniera meno precisa. Si ricorda che, poiché l'obiettivo dell'intero lavoro di tesi è di fornire dei risultati qualitativi, non si è tenuto conto per costruire la mesh del criterio discriminante basato sul valore assunto da  $Y^+$ .

Sia dal grafico del  $\Delta H_t$  che della  $C_u$  si nota come fino a 50 knodi i parametri di interesse assumono circa valori costanti al variare del numero di nodi: questo significa che ci si sta muovendo su un determinato livello di saturazione della mesh.

Si è deciso, quindi, di utilizzare per il riconvolgiatore 50 knodi e si è realizzata la seconda analisi di sensibilità variando il numero di nodi dell'interfaccia ad intervalli di 10 knodi. Poiché questa zona è critica a causa del ricircolo di portata che si sviluppa nelle parti inferiori, la diminuzione del numero di nodi comporta delle variazioni significative nel computo della velocità allo scarico. I valori ottenuti con 10 e 20 knodi sono riportati solo per completezza ma non possono essere ritenuti significativi a causa delle elevate oscillazioni dei residui durante la procedura di soluzione.

In conclusione per la successiva ottimizzazione si sono fissati 50.000 nodi per la mesh strutturata del riconvolgiatore e 50.000 per quella non strutturata dell'interfaccia; si sono determinati i valori delle componenti delle velocità assolute in uscita dalla girante e, eliminati il condotto di adduzione e la girante, mantenendo interfaccia e riconvolgiatore,

sono state poste come condizioni iniziali del modello schematico per l'ottimizzazione, composto unicamente dal condotto statorico.

#### 4.4 Fase 4: primo ciclo di ottimizzazione

Il ciclo di ottimizzazione è stato eseguito considerando unicamente le zone di interfaccia e della palettatura dello statore una volta determinate le condizioni di velocità all'ingresso con l'analisi di sensibilità.

Le variabili di decisione del problema sono le otto ordinate dei punti del poligono di Bezièr sia per linea media che spessore, i raggi di *leading edge* (gestito in modo indiretto tramite un parametro geometrico del modello Geometry® in figura 19 e visibile a sinistra in figura 27) e *trailing edge* della sezione al mozzo e l'altezza della pala in direzione assiale, per un totale di diciannove valori.

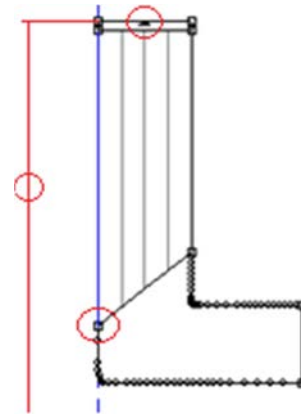


Figura 27. Ultime tre variabili di decisione.

Il loop del *PSO\_fer\_v28* è stato organizzato utilizzando uno script master in Matlab® che a partire dalle variabili di decisione ricostruisce la geometria del modello, creando i files *journal* per lanciare il progetto Workbench® dell'iterazione corrente, esegue il *pre-process*, il solutore e nel *post-process* estrae ed elabora i termini che costituiscono la funzione obiettivo.

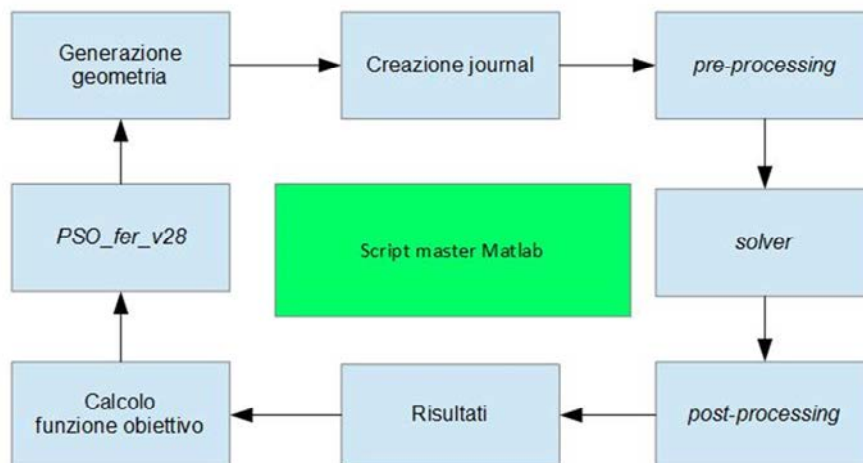


Figura 28. Loop iterativo schematico.

Di seguito si riportano due precisazioni circa la funzione obiettivo.

- La funzione obiettivo che deve essere minimizzata è composta da due termini. Il primo è la perdita di pressione totale in metri calcolata tra l'ingresso e l'uscita dello statore:

$$\Delta p^o = p_{in}^o - p_{ex}^o \quad [m]$$

La perdita di pressione totale è legata in generale a tre fenomeni: il primo è dovuto alla viscosità del fluido che genera lo strato limite, in cui la velocità è rallentata dal valore indisturbato a zero, in prossimità di intradosso ed estradosso del profilo, ma anche sulle pareti di mozzo e cassa; il secondo è causato dal distacco della vena fluida dal profilo durante lo stallo, mentre il terzo è dovuto a effetti 3-dimensionali, come flussi secondari o *misturning* che possono essere valutati in modo significativo solo con una simulazione nello spazio e non bidimensionale.

Il secondo termine della funzione obiettivo è l'energia cinetica data dalla velocità in direzione circonferenziale allo scarico espressa in metri tramite la relazione:

$$C_u = \frac{(C_u [\frac{m}{s}])^2}{2g} \quad [m]$$

Minimizzare tale velocità significa ridurre gli effetti dissipativi legati alla formazione di moto ellittico allo scarico, ma anche semplificare la progettazione dello stadio successivo, perché la velocità giunge all'ingresso della girante in direzione assiale.

- La funzione obiettivo utilizzata fornisce in output un unico valore scalare, cioè il problema è stato analizzato con un approccio mono-obiettivo, perché l'ottimizzatore non è in grado di gestire problemi multi-obiettivo; tale metodo viene definito "della somma pesata" perché combina due o più valori tramite l'utilizzo di due coefficienti moltiplicativi  $a$  e  $b$  definiti dal progettista:

$$f_{obj(x)} = a * f_{obj_1}(x) + b * f_{obj_2}(x)$$

I due termini precedenti sono stati sommati ipotizzando un valore unitario dei coefficienti in modo da garantire un uguale peso ad entrambi.

Questo metodo, sebbene di "facile" implementazione, presenta alcuni svantaggi legati al fatto che la soluzione del problema è in realtà un fronte di Pareto, ossia un insieme di funzioni non dominate, determinate da un insieme ottimale di Pareto, cioè l'insieme delle soluzioni non dominate. In sostanza con il metodo

della somma pesata si ottiene un unico valore della funzione determinato da un ben preciso vettore delle variabili di decisione alla fine del loop iterativo che è significativo solo per quella coppia di pesi assunta dal progettista; la procedura dovrebbe, quindi, essere ripetuta per diversi valori al fine di determinare il fronte di Pareto della soluzione. Tuttavia, in questo modo i tempi di calcolo si allungano notevolmente perché ogni loop iterativo deve essere ripetuto molto volte fino all'ottenimento di un numero significativo di soluzioni sul fronte.

I limiti delle variabili, *upper e lower boundaries*, sono stati determinati valutando i vincoli geometrici di ogni parametro e scegliendo degli intervalli quanto più ampi possibili in modo da non escludere eventuali zone dello spazio di ricerca; non si sono posti vincoli particolari alla funzione obiettivo. Si è imposto un numero di individui del *PSO\_fer\_v28* pari a 20, valore ottimale determinato con le analisi statistiche della prima parte, con 50 iterazioni.

#### 4.4.1 Risultati prima ottimizzazione

L'algoritmo di ottimizzazione per completare le 50 iterazioni volute ha impiegato circa 23 giorni occupando circa 110 gigabyte nel disco fisso.

I valori dettagliati delle variabili di decisione nella configurazione iniziale e finale sono contenute nell'appendice C insieme alla storia di convergenza.

La configurazione geometrica iniziale è riportata nelle figure 29 e 30, in cui si può osservare come la pala presenti la concavità rivolta sempre dallo stesso lato.

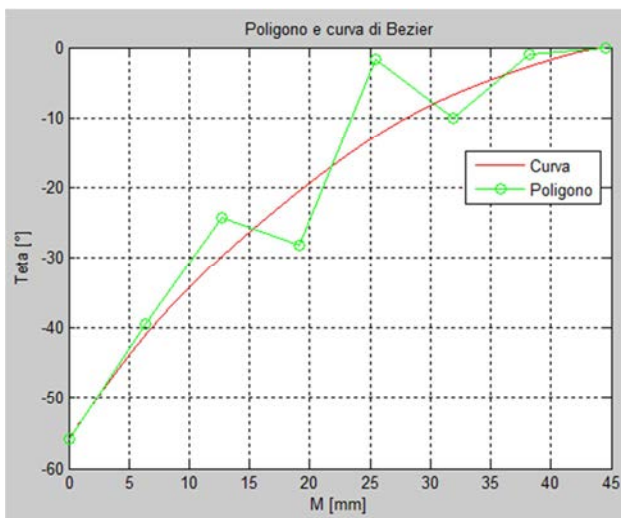


Figura 29. Linea media iniziale piano conforme.

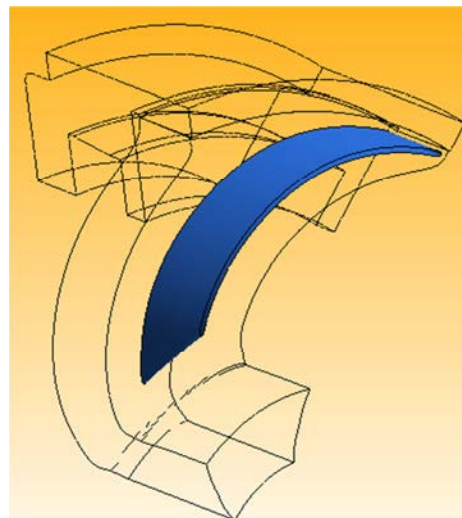


Figura 30. Geometria 3-D dello statore originario.

Il valore della funzione obiettivo iniziale, comprensivo sia del termine di perdita di pressione totale che della velocità tangenziale allo scarico, è di 2,633 m.

L'individuo ottimo ottenuto alla fine del processo è caratterizzato da una linea media con forma diversa dalla precedente: in figura 31 è possibile notare un flesso in prossimità del bordo di uscita; la pala è più lunga, e, quindi, con possibilità di distribuire in maniera più efficiente il carico. Inoltre, l'angolo in uscita è quasi nullo, cioè l'ottimizzatore ha cercato di far uscire quanto più possibile in flusso in direzione radiale.

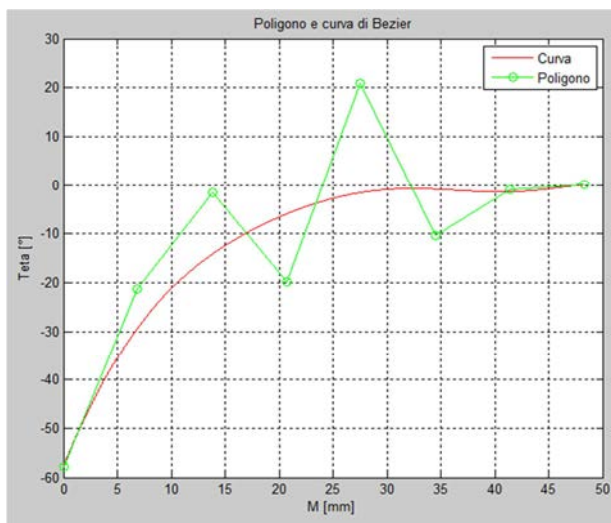


Figura 31. Linea media finale nel piano conforme.

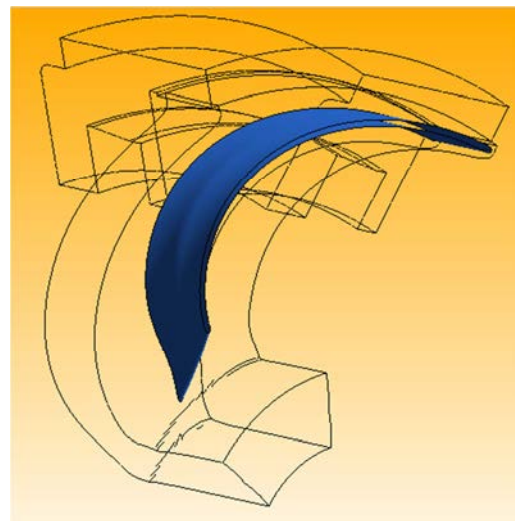


Figura 32. Geometria 3-D dello statore finale.

Analizzando qualitativamente anche le altre variabili di decisione, si osserva come il raggio all'interfaccia sia passato da 73,49 mm a 72,64 mm, cioè sia rimasto circa lo stesso; questo significa che almeno nel punto di progetto il passaggio di portata in questa nuova configurazione avviene nelle condizioni ottimali e che la "margherita" non porta alcun vantaggio rispetto alla configurazione progettuale iniziale. Il raggio del *trailing edge* si è abbassato, passando da 27,72 mm a 24,36 mm e contribuendo ad allungare la pala; i valori dell'altezza della pala e delle ordinate dello spessore sono rimasti circa i medesimi. Da questo punto di vista è interessante il risultato assunto dallo spessore, che rimanendo circa costante e pari ad un millimetro può essere facilmente realizzato in lamiera.

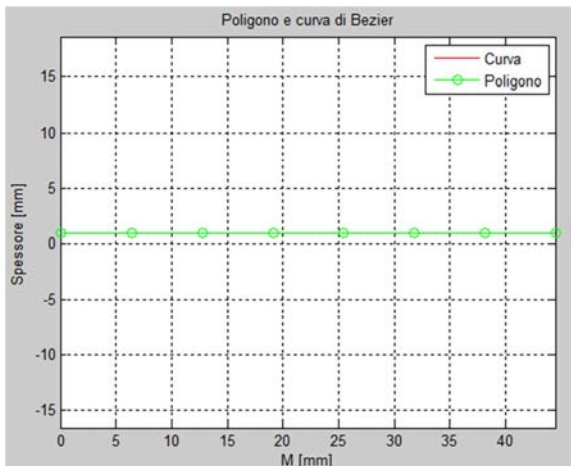


Figura 33. Spessore iniziale.

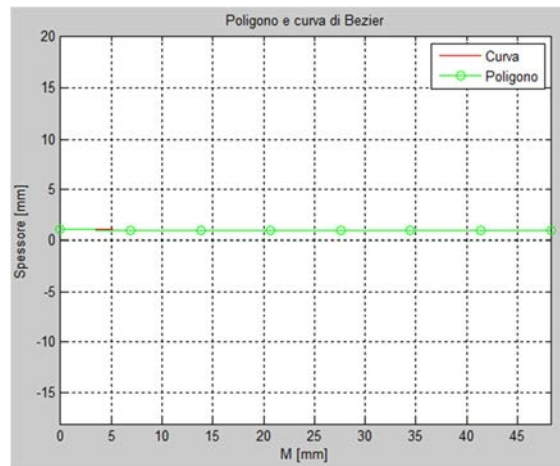


Figura 34. Spessore finale.

La perdita di pressione totale è passata da 2,26 a 1,74 m, da cui deriva un coefficiente di perdita di pressione  $\omega$  di 0,393; la velocità tangenziale allo scarico, invece, è passata da 2,71 m/s a 1,25 m/s. Complessivamente la funzione obiettivo dell'individuo ottimo è di 1,86, cioè si è avuta una diminuzione di circa il 30% rispetto alla configurazione iniziale.

Osservando i *contours* della velocità nella fase di *post-processing* si possono evidenziare le differenze tra le due configurazioni. Nella sezione al mozzo la macchina originale presenta un profilo con uno stallo che avviene già nella prima metà della sua lunghezza; inoltre, l'incidenza della corrente non garantisce mai un flusso orientato secondo la linea del profilo. Nella configurazione ottimizzata, invece, la corrente entra nello statore con angolo d'incidenza minimo e viene guidato maggiormente durante il moto; si può notare, infatti, in figura 36 come i vettori velocità riescano a seguire la forma del profilo e che anche dopo la zona di stallo in prossimità dell'estradosso comunque il difetto di incidenza non sia così marcato come nella configurazione iniziale.

Dal punto di vista del distacco dello strato limite lo statore originario presenta stallo in tutta la prima metà dell'estradosso della pala. L'individuo ottimo, invece, mostra distacchi nella zona centrale dell'estradosso, ma la forma ottenuta consente di contenerli e di continuare a guidare il flusso attraverso il condotto palare.



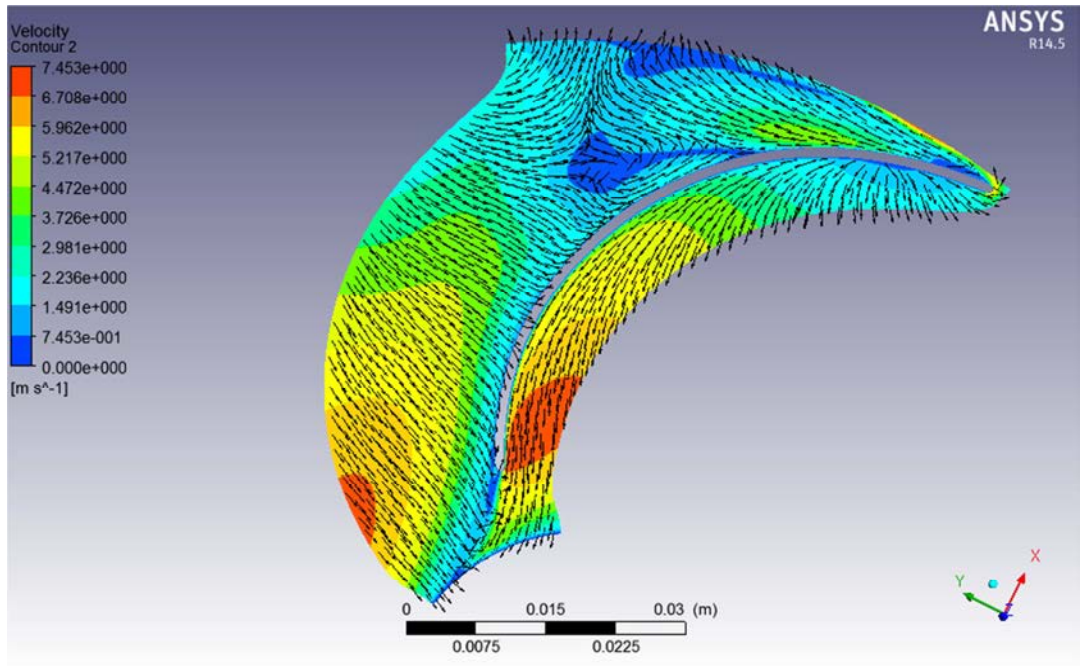


Figura 35. *Contours* della velocità nella sezione al mozzo dello statore originario.

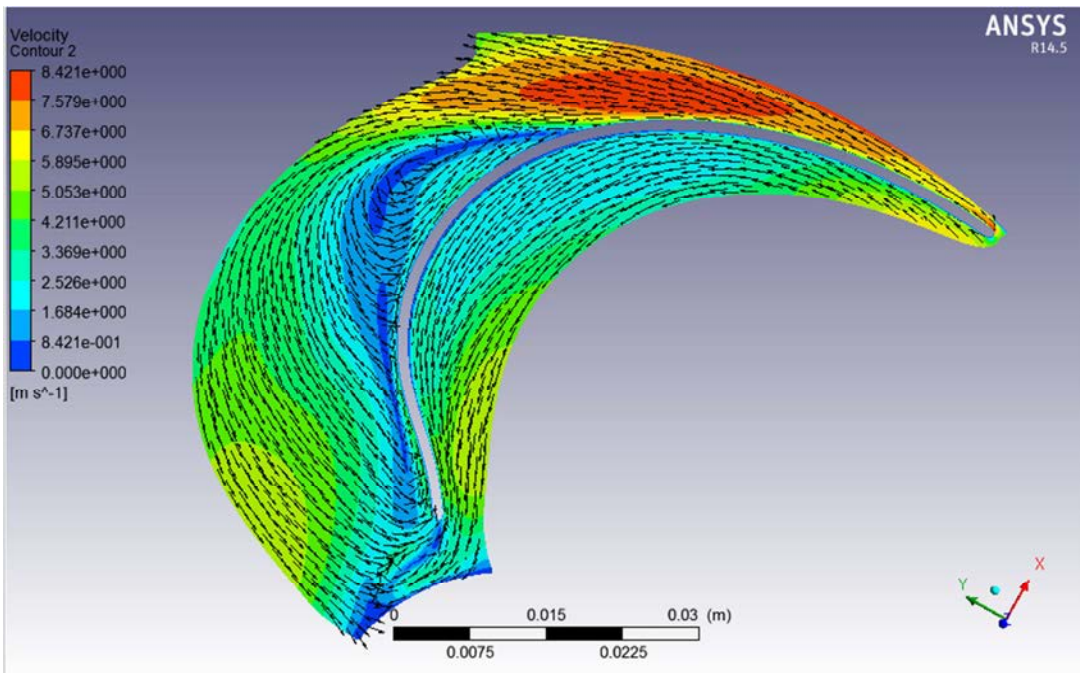


Figura 36. *Contours* della velocità nella sezione al mozzo dello statore ottimizzato.

Se si analizza, invece, la sezione allo *shroud* della configurazione originaria e ottimizzata, si nota che lo stallo è più esteso nella nuova soluzione ed è presente anche in una parte dell'intradosso.

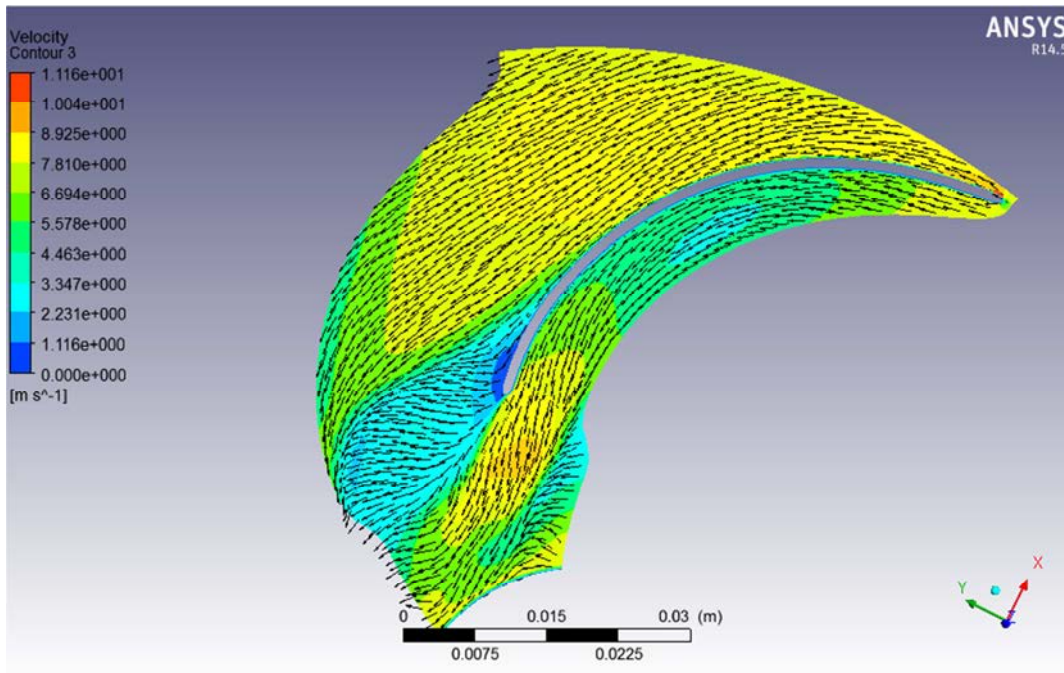


Figura 37. *Contours* della velocità nella sezione alla cassa dello statore originario.

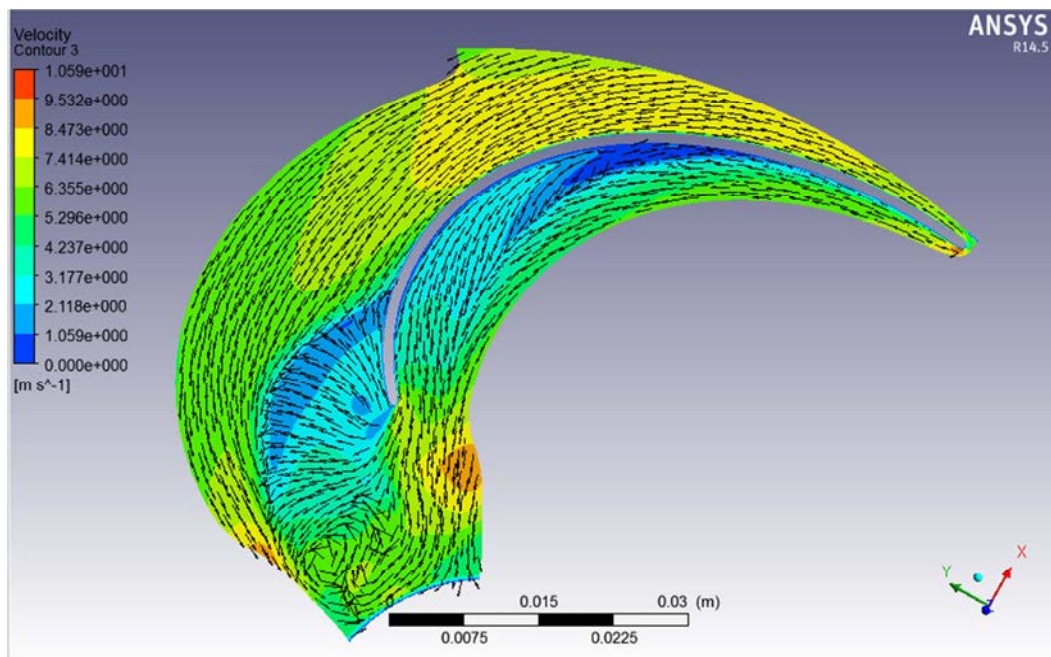


Figura 38. *Contours* della velocità nella sezione alla cassa dello statore ottimizzato.

Plottando nel dominio 3-D anche le linee di corrente è possibile evidenziare la presenza di due vortici sovrapposti: il primo è generato dallo stallo del profilo, mentre il secondo dalla brusca deviazione che subisce la corrente per passare dalla direzione radiale imposta dalle pale dello statore alla direzione assiale per entrare nella girante successiva.

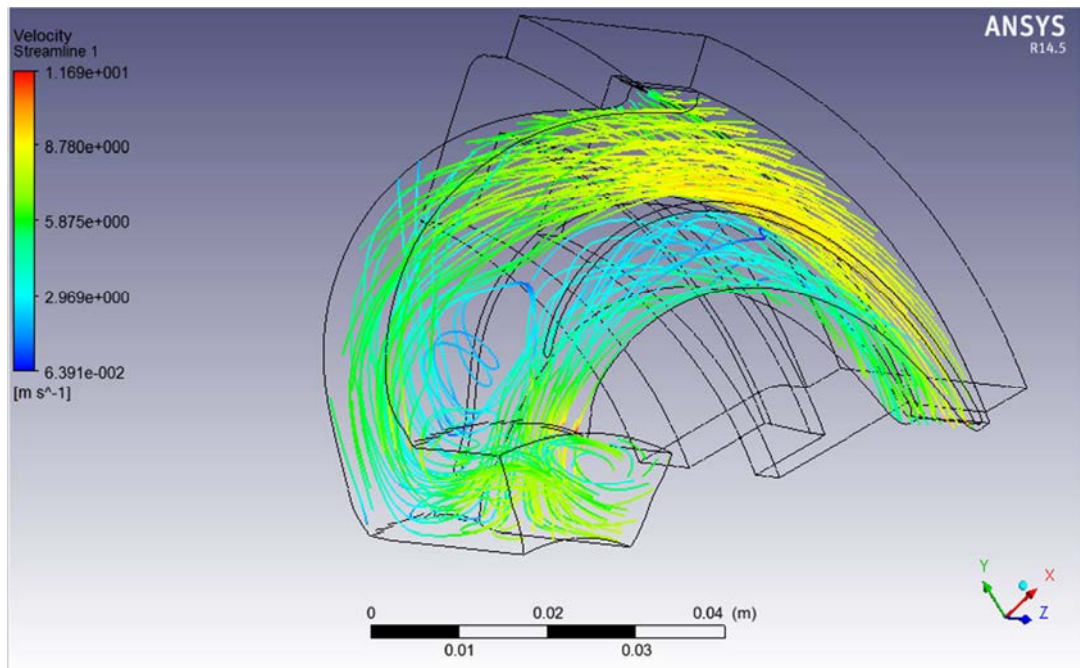


Figura 39. *Pathlines* all'interno del condotto storico: vortici generati dallo stallo e dalla curvatura del condotto.

#### 4.5 Fase 5: simulazione macchina completa con statore ottimizzato

Al fine di valutare le prestazioni della macchina con lo statore ottimizzato si è costruito un modello completo della nuova configurazione, utilizzando tutti i parametri definiti durante la validazione, in particolare un numero di nodi della mesh pari a 250.000, e si sono eseguite le stesse simulazioni descritte in precedenza.

I risultati conseguiti sono riassunti nei grafici seguenti, mentre i valori numerici dettagliati sono contenuti nell'appendice D.

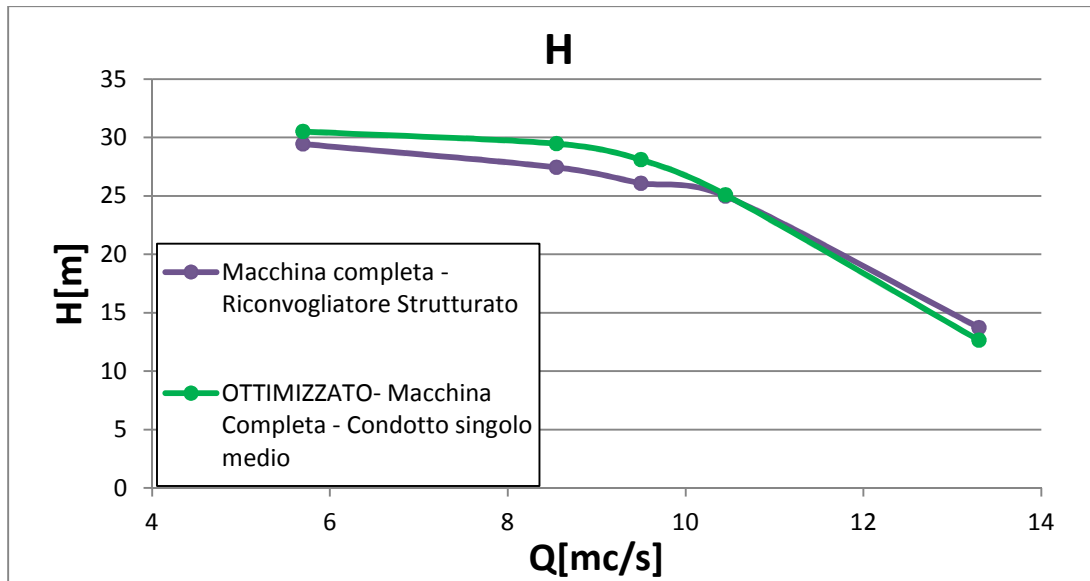


Figura 40. Grafico prevalenza H [m] - portata Q [mc/s]: confronto originale - ottimizzato.

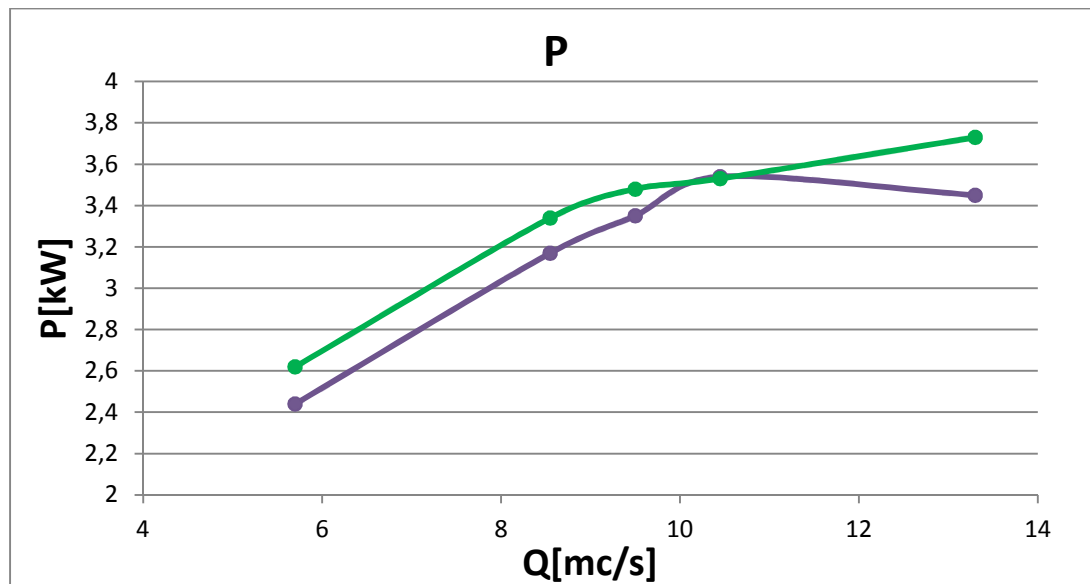


Figura 41. Grafico potenza P [kW] - portata Q [mc/s]: confronto originale - ottimizzato.

I grafici 40 e 41 mostrano come nell'intorno del punto di progetto la prevalenza, e conseguentemente la potenza, sono aumentate rispetto a quelle della macchina originale, questo perché lo statore permette un maggior recupero della componente statica della pressione (si veda appendice D).

I grafici di maggior interesse sono, tuttavia, quelli del rendimento complessivo e del rendimento complessivo anche della velocità tangenziale  $C_u$  allo scarico, ossia i due termini della funzione obiettivo del ciclo iterativo.

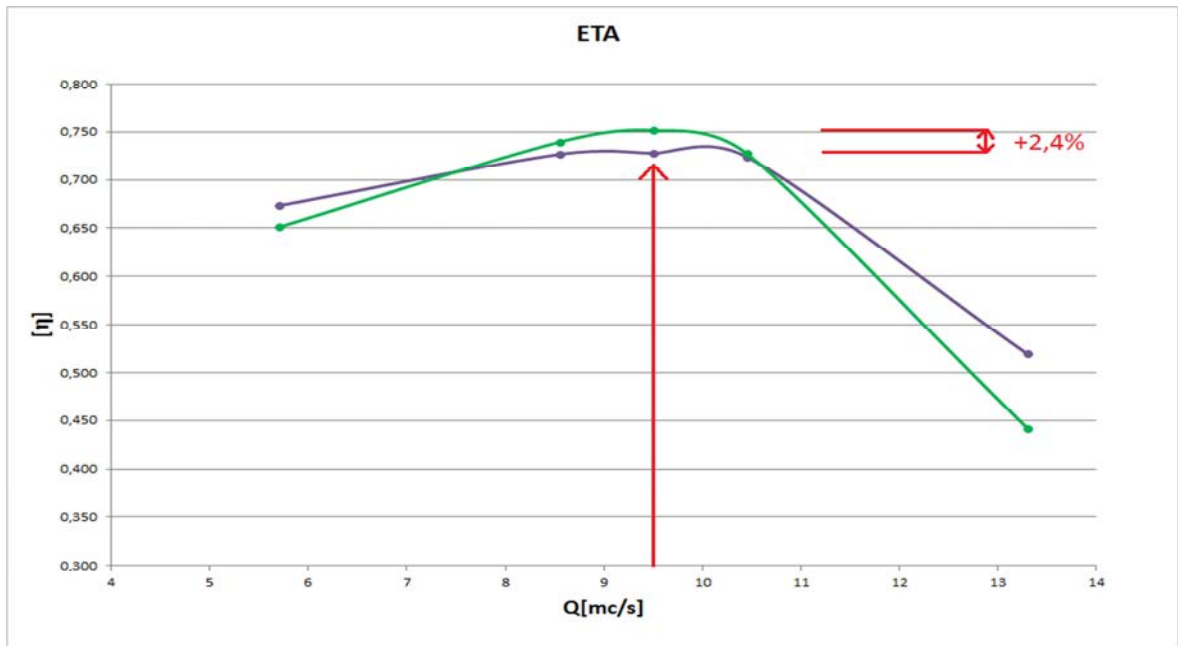


Figura 42. Grafico rendimento  $\eta$  - portata Q [mc/s]: confronto originale - ottimizzato.

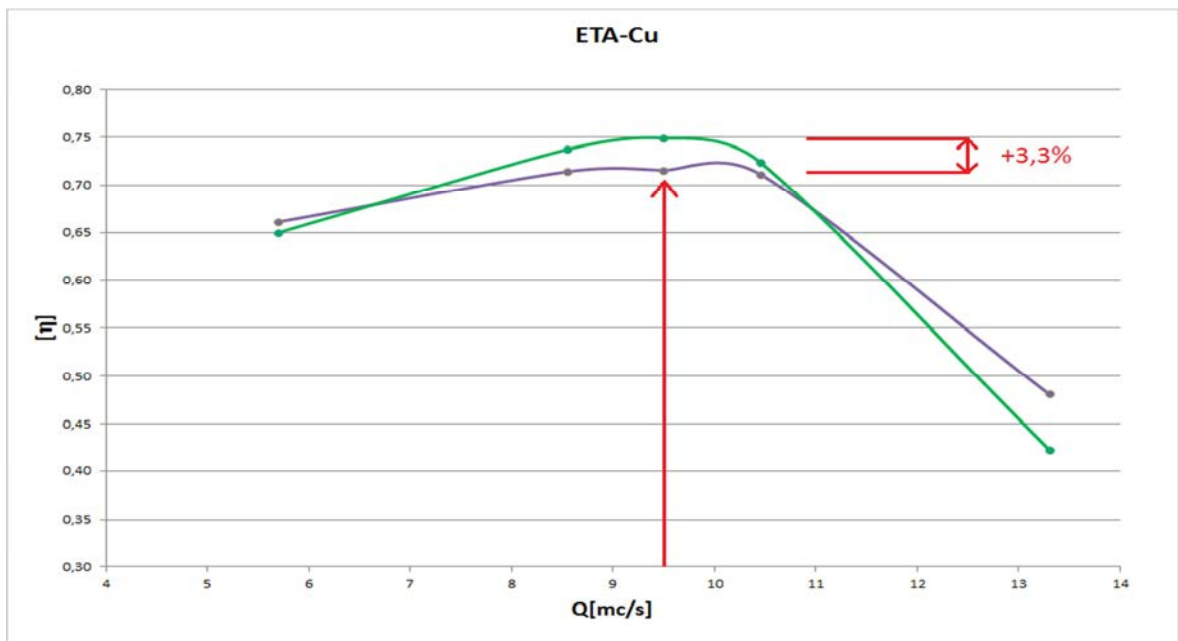


Figura 43. Grafico rendimento velocità tangenziale allo scarico - portata Q [mc/s]: confronto originale - ottimizzato.

Nel punto di progetto si è ottenuto un rendimento  $\eta$  di 2,4 punti maggiore rispetto alla macchina originale, mentre di 3,3 punti per il  $\eta_{Cu}$ . In generale l'aumento di entrambi i rendimenti è consolidato per portate che si trovano nell'intorno del punto di progetto, mentre alle basse portate, e in particolare alle alte, la nuova macchina funziona con rendimenti inferiori. Questo è giustificabile con il fatto che l'ottimizzazione è stata

eseguita considerando unicamente la condizione di progetto; nel caso in cui sia previsto il funzionamento anche per portate che si discostano molto da quella di progetto è necessario eseguire un'ottimizzazione multi-punto.

Dai risultati dei grafici precedenti e dall'analisi della geometria e del campo di moto della girante si sono tratte alcune considerazioni:

- All'uscita della palettatura statorica il flusso è obbligato a passare dalla direzione radiale a quella assiale con una brusca deviazione a  $90^\circ$  causando un vortice che va a combinarsi con quello derivante dallo stallo del profilo e che genera delle perdite di pressione totale. È possibile, quindi, raccordare in maniera più dolce i tratti verticali e orizzontali di mozzo e cassa e in che misura tale fenomeno è limitato?
- Il flesso presente nella forma della linea media potrebbe essere causato dalla necessità che la pala ha di conformarsi in modo tale da generare la minima  $C_u$  all'uscita dello statore con il vincolo imposto dalla posizione del *trailing edge* allo *shroud*; in altre parole la domanda che ci si pone è la seguente: è possibile che liberando anche la posizione del TE alla cassa la linea media si conformi in un modo diverso durante l'ottimizzazione?

#### **4.6 Fase 4b: secondo ciclo di ottimizzazione**

Per verificare le ipotesi conclusive del paragrafo precedente e si è costruito un nuovo ciclo di ottimizzazione, del tutto analogo al precedente, ma con alcune modifiche dal punto di vista geometrico e delle variabili di decisione.

Innanzitutto, tenendo conto dei vincoli geometrici legati alla presenza di altre parti della macchina e dei cuscinetti che sostengono l'albero, si sono ricordati i tratti verticali e orizzontali di mozzo e cassa con dei raggi opportuni, i cui valori massimi ammissibili sono rispettivamente 4,5 mm e 4 mm.

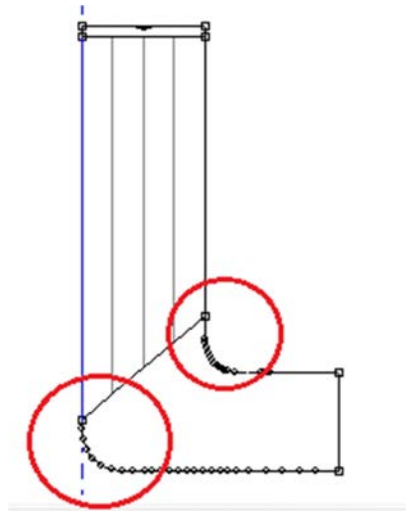


Figura 44. Piano meridiano dello statore con i nuovi raccordi.

Inoltre, si è deciso di introdurre come ulteriore parametro per la nuova ottimizzazione anche il raggio al *trailing edge* della cassa, il cui valore originario e mantenuto costante nel precedente loop iterativo è di 38,75 mm.

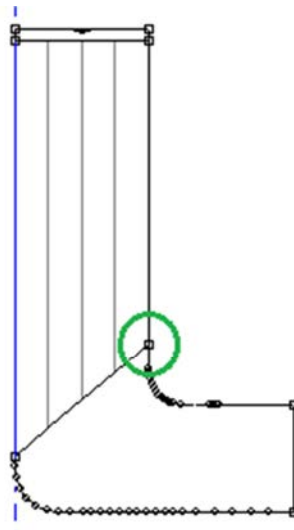


Figura 45. Raggio al TE al mozzo come ulteriore variabile di decisione nel nuovo loop iterativo.

Nella nuova ottimizzazione si sono utilizzate le medesime impostazioni del *PSO\_fer\_v28* di quella precedente; dallo studio, però, della storia di convergenza del loop iterativo (riportato in appendice C) si è deciso di fissare un limite massimo di iterazioni pari a 30 e di aggiungere un criterio di uscita dell'algoritmo nel caso in cui il valore minimo raggiunto della funzione obiettivo non sia modificato per più di 10 iter.

Nella popolazione iniziale dell'algoritmo si sono inseriti, oltre alla configurazione dello statore originario, anche alcuni individui derivanti dall'ottimizzazione precedente, come per esempio l'individuo ottimo ottenuto al termine dell'analisi.

#### 4.6.1 Risultati seconda ottimizzazione

L'algoritmo di ottimizzazione non ha completato le 30 iterazioni perché all'iterazione 25 è uscito dal ciclo a causa del controllo imposto nello stallo della convergenza: in sostanza il valore minimo della funzione obiettivo è stato raggiunto nella 15esima iterazione e nelle 10 successive non è stato più modificato. Il loop ha impiegato circa 12 giorni occupando circa 60 gigabyte nel disco fisso.

I valori dettagliati delle variabili di decisione nella configurazione finale sono contenute nell'appendice E insieme alla storia di convergenza.

La configurazione geometrica iniziale è la medesima delle figure 29 e 30 del paragrafo 4.4.1.

Se si prende a riferimento come valore della funzione obiettivo quello dell'individuo ottimo ottenuto al termine del ciclo precedente, si ha avuto una diminuzione da 1,86 a 1,44, pari al 24% circa. La perdita di pressione totale è passata da 1,74 m a 1,44 m, mentre la velocità tangenziale allo scarico assume un valore di 0,05 m/s, cioè quasi nullo.

La nuova linea media, figura 46, non presenta più il flessò all'uscita e la sua curvatura è maggiore rispetto alla configurazione ottima precedente, tanto che una porzione della curva presenta ordinate di segno positivo. La sua lunghezza è di circa 47 mm, cioè si è accorciata rispetto al primo ottimo, il cui valore è di 48,28 mm, ma comunque maggiore di quella originale.

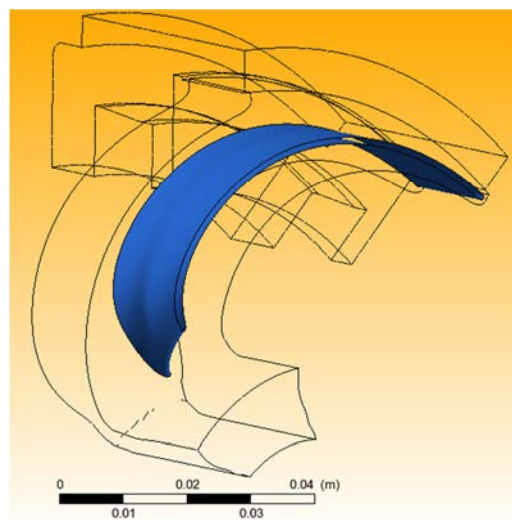
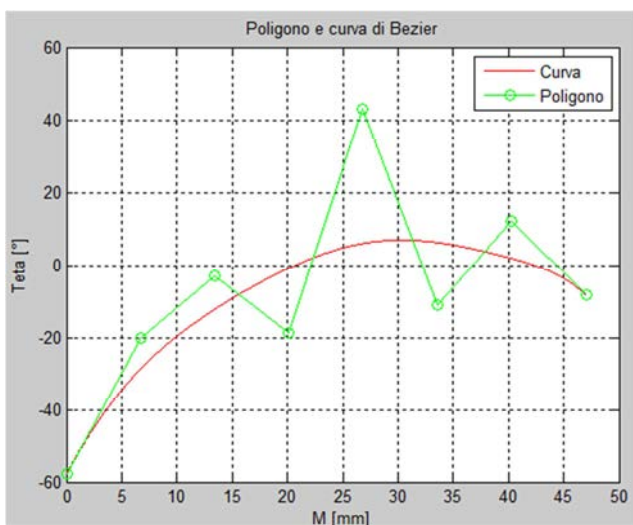


Figura 46. Linea media dopo secondo loop nel piano conforme. Figura 47. Geometria 3-D dello statore secondo loop.



Il raggio all'interfaccia è di 72,07 mm, mentre quelli al *trailing edge* per mozzo e cassa sono rispettivamente di 25,05 mm e 37,46 mm, cioè il primo è aumentato rispetto all'individuo ottimo precedente mentre il secondo, svincolato per la prima volta è diminuito. Anche la larghezza della pala è aumentata, passando da circa 14 mm a 14,65 mm.

Lo spessore è plottato in figura 48:

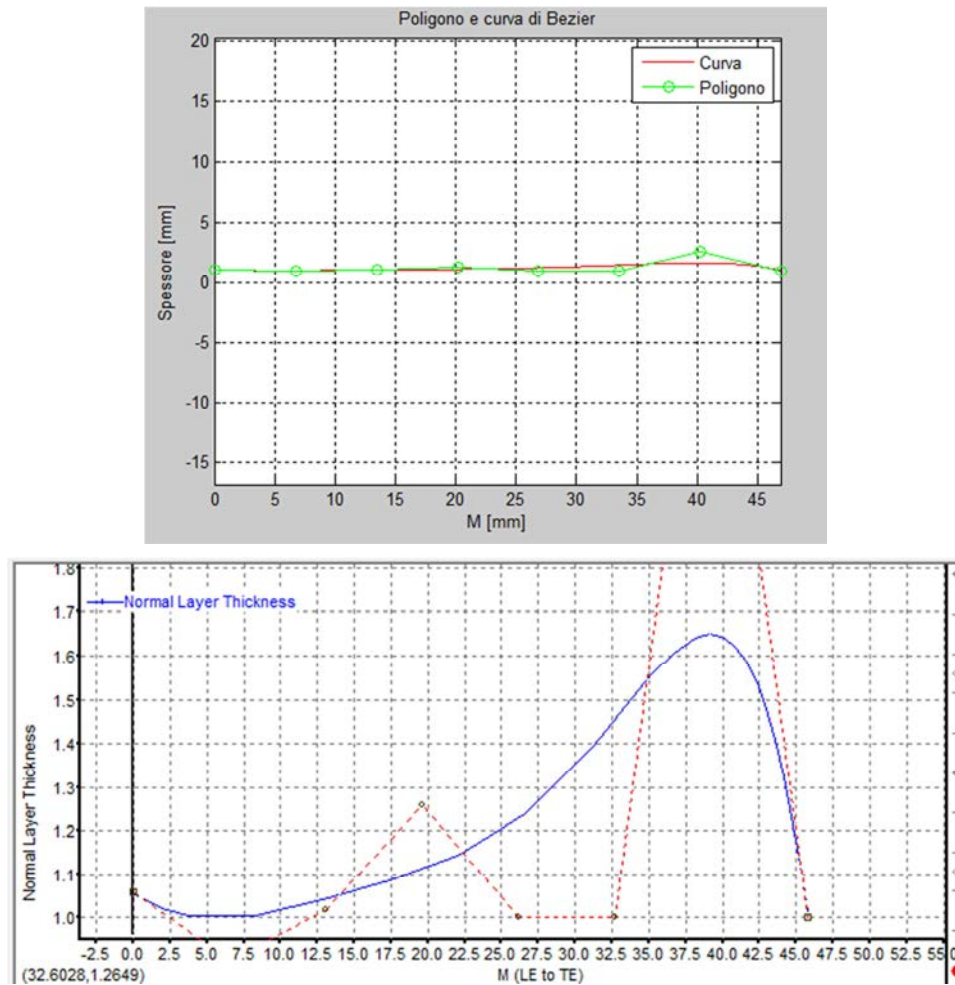


Figura 48. Spessore finale dopo seconda ottimizzazione.

Lo spessore in questo caso non è costante come al termine della precedente ottimizzazione e presenta un massimo in vicinanza del bordo di uscita di circa 1,65 mm.

I valori dettagliati di tutte le variabili di decisione sono contenuti nell'appendice E.

Se si analizzano i *contours* della velocità nelle sezioni di mezzeria, mozzo e cassa è possibile valutare l'entità e l'estensione dello stallo; in figura 49 è rappresentata la sezione media.

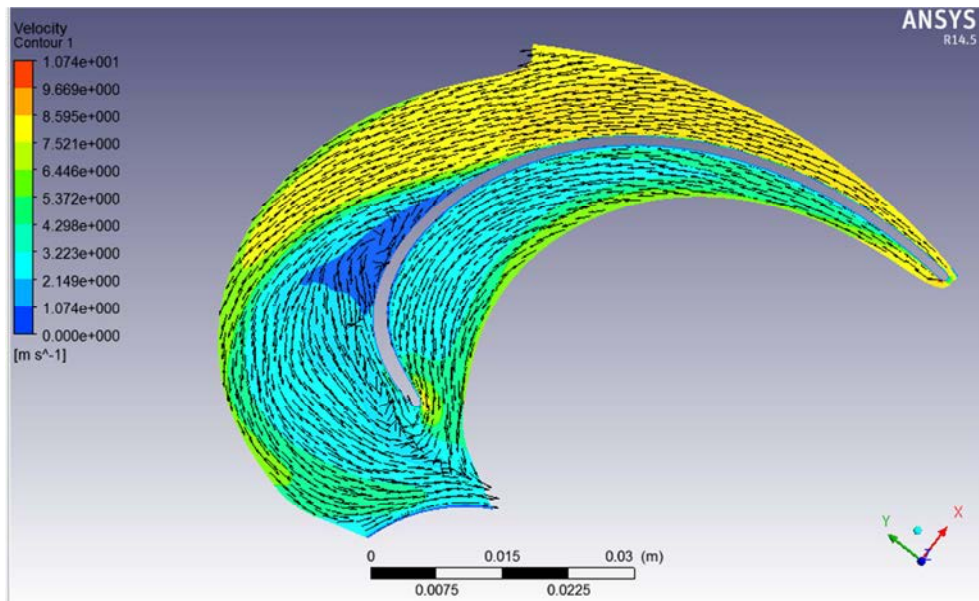


Figura 49. *Contours* della velocità nella sezione di mezzeria dello statore ottimizzato.

La palettatura riesce a guidare correttamente il flusso all'intradosso, mentre sull'estradosso comincia a svilupparsi lo stallo a partire da circa 2/3 della sua lunghezza. Se si considera, invece, la sezione al mozzo, l'estensione della zona soggetta a stallo nell'estradosso della pala è ridotta in maniera importante rispetto alla configurazione dello statore originario di figura 35; rispetto, invece, alla configurazione derivante dalla prima ottimizzazione un confronto visivo risulta più difficile in quanto è presente comunque un vortice sull'estradosso.

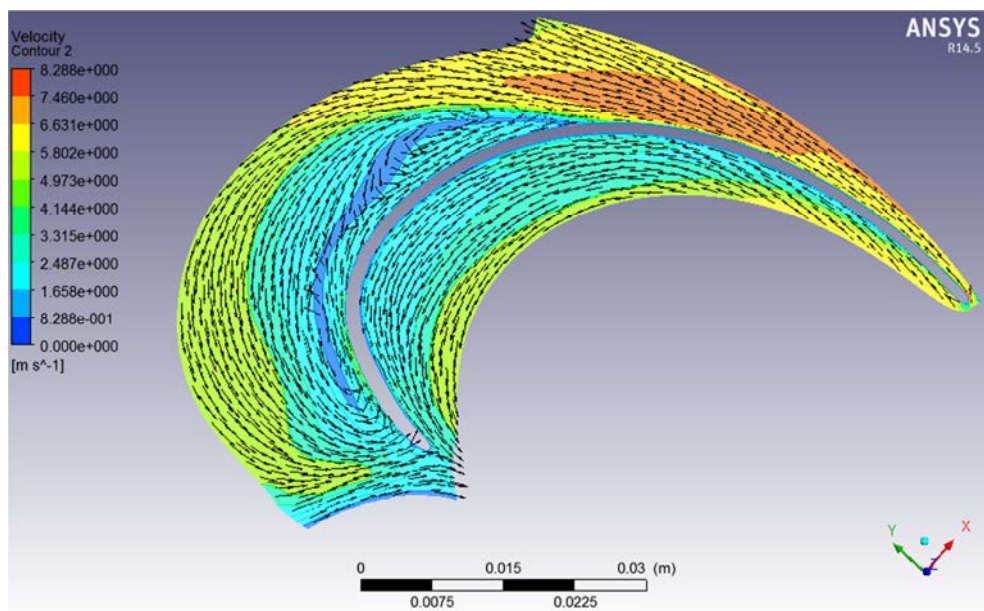


Figura 50. *Contours* della velocità nella sezione al mozzo dello statore ottimizzato.

Anche la sezione alla cassa mostra un andamento dei vettori velocità sull'estradosso simile a quello della prima ottimizzazione; non si ha, invece, contrariamente al caso precedente di figura 38, distacco dello strato limite sull'intradosso.

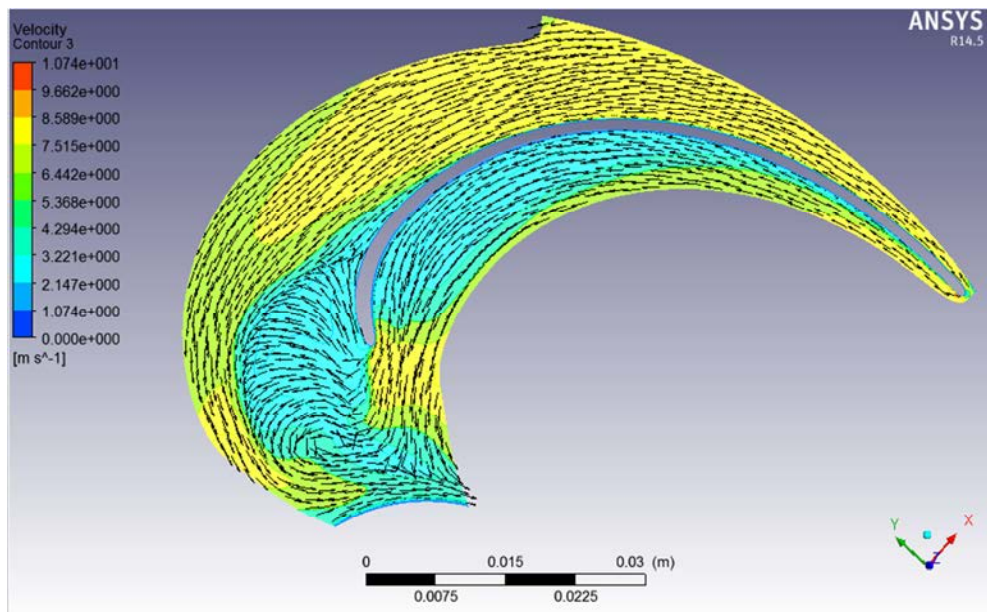


Figura 51. *Contours* della velocità nella sezione alla cassa dello statore ottimizzato.

Analizzando con senso critico i valori numerici ottenuti e i risultati della simulazione CFD della nuova configurazione rispetto a quella della prima ottimizzazione, è possibile affermare che l'ottimizzatore si è avvicinato in maniera soddisfacente al minimo assoluto della funzione obiettivo imposta: la velocità tangenziale allo scarico, secondo termine della funzione, è praticamente nulla, mentre lo stallo nella convergenza del ciclo iterativo (appendice E, figura 75) può essere interpretato come l'impossibilità per l'algoritmo di diminuire ulteriormente la perdita di pressione totale variando i parametri geometrici imposti all'interno del vettore delle variabili di decisione. Non è possibile, infatti, ridurre ad un valore nullo la perdita di pressione totale a causa dell'effetto sempre presente della viscosità che si manifesta all'interno dello strato limite; inoltre, il fatto che entrambe le ottimizzazioni conducano a delle configurazioni che presentano entrambe uno stallo, che sebbene ridotto rispetto a quello dello statore originario, rimane comunque di una certa entità, può far pensare che per diminuire tale fenomeno sia necessario agire su altri parametri del condotto statorico, quali per esempio il numero di pale.

Per eseguire un confronto con le simulazioni precedenti di macchina originaria e derivante dalla prima ottimizzazione si è costruito un modello completo della nuova configurazione.

## 4.7 Fase 5: simulazione macchina completa con nuovo statore ottimizzato

Anche in questo caso si sono effettuate cinque simulazioni corrispondenti a diversi punti di funzionamento della macchina; i valori numerici sono contenuti nell'appendice F.

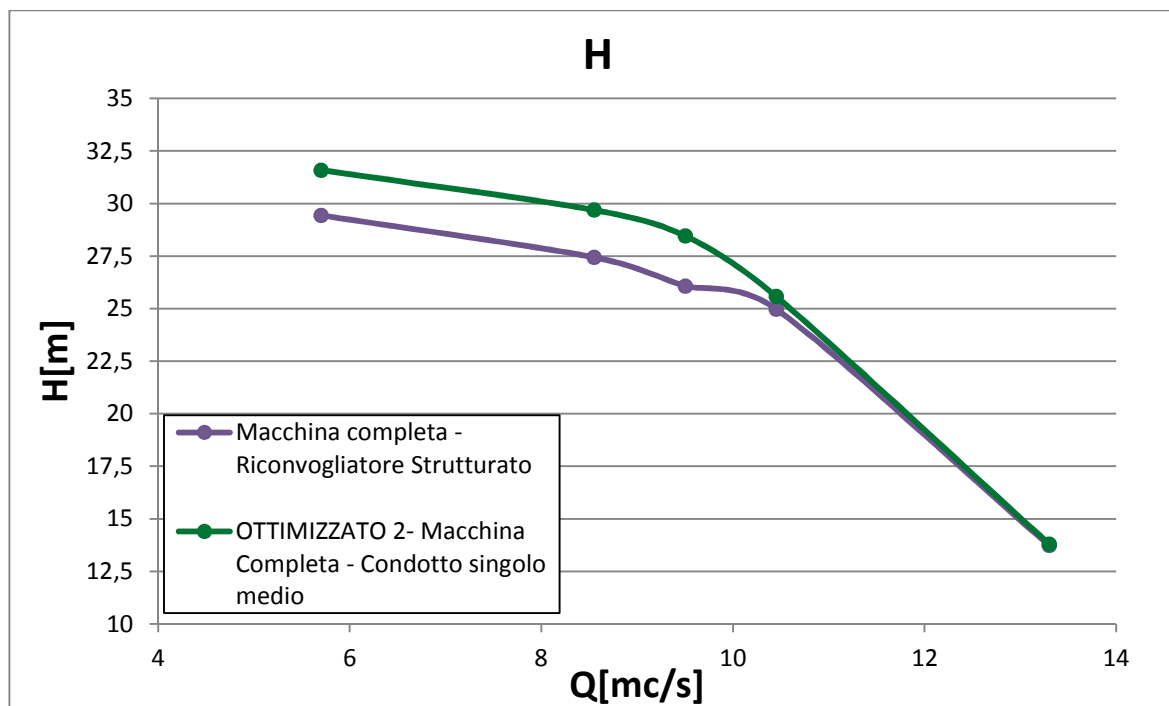


Figura 52. Grafico prevalenza  $H$  [m] - portata  $Q$  [mc/s]: confronto originale - ottimizzato2.

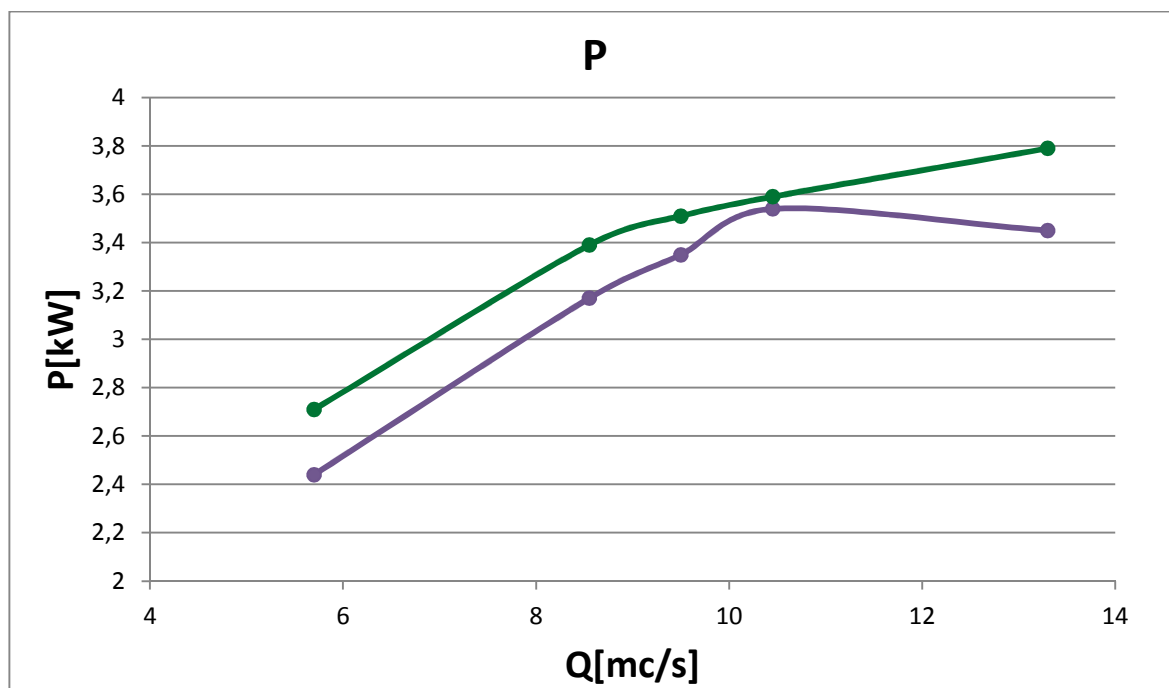


Figura 53. Grafico potenza  $P$  [kW] - portata  $Q$  [mc/s]: confronto originale - ottimizzato2.

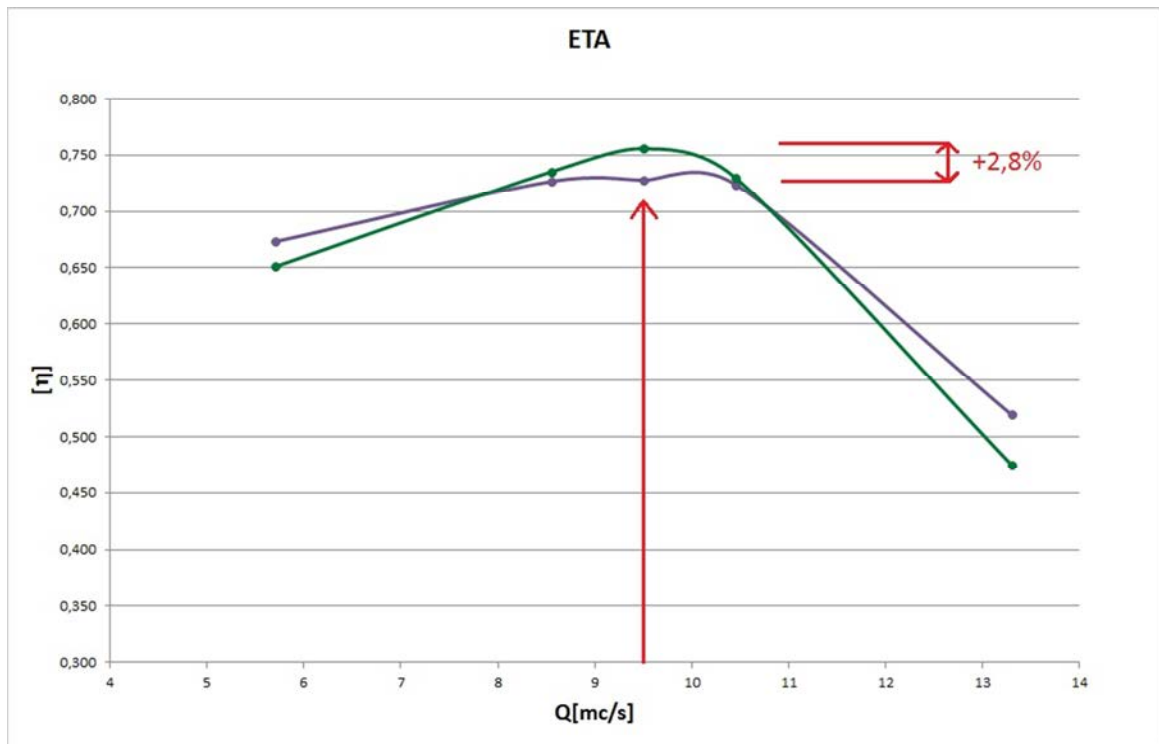


Figura 54. Grafico rendimento  $\eta$  - portata  $Q$  [mc/s]: confronto originale - ottimizzato2.

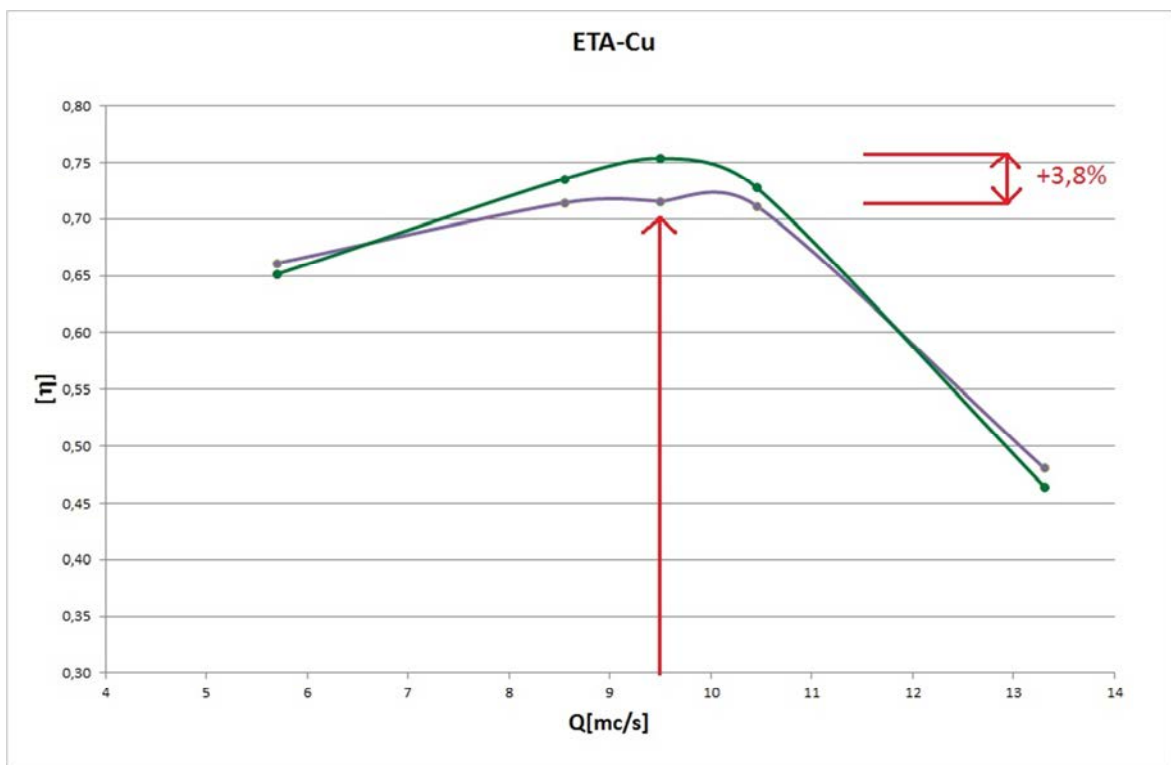


Figura 55. Grafico rendimento velocità tangenziale allo scarico - portata  $Q$  [mc/s]: confronto originale – ottimizzato2.

Come per la macchina ottimizzata precedente anche in questo caso le curve di prevalenza e di potenza si sono spostate verso l'alto.

Il rendimento complessivo è aumentato di 0,4% rispetto alla prima ottimizzazione e di 2,8% rispetto alla macchina originaria nel punto di progetto; quello complessivo della Cu allo scarico è aumentato di 0,5% rispetto alla prima ottimizzazione e di 3,8% rispetto alla macchina originaria. Un maggiore aumento di  $\eta_{Cu}$  è stato possibile grazie al valore quasi nullo della velocità tangenziale garantito dalla nuova geometria dello statore; infatti, se si rapporta la Cu allo scarico espressa in metri al salto entalpico totale a cui viene sottratta la Cu stessa ( $Cu [m]/(Ht [m])$ ) si ottiene un rendimento che nel punto di progetto è pari al 99,9% a fronte di un valore di 98,8% nella configurazione originale (per tutti i dettagli si vedano le appendici A e F).

Osservando i grafici 54 e 55, l'aumento del rendimento è consolidato per portate che si trovano nell'intorno di quella di progetto, mentre per portate molto di fuori-progetto, come  $5,7 \text{ m}^3/\text{s}$  o  $13,3 \text{ m}^3/\text{s}$ , si ha una diminuzione di qualche punto percentuale di entrambi i rendimenti.

#### 4.8 Simulazione macchina completa con nuovo condotto di scarico

La configurazione della macchina fino ad ora analizzata presenta un condotto di scarico, seppur modificato con l'introduzione dei raggi di raccordo, con una geometria analoga a quella della configurazione originaria, ossia con una curva di *hub* che prosegue dopo il *trailing edge* fino ad incontrare l'albero su cui è calettata la macchina.

Tale geometria comporta un andamento delle linee di corrente diverso da quello ottenuto nell'ottimizzazione, con zone di ricircolo e a bassa velocità del flusso in prossimità del raggio di raccordo all'*hub*, che causano una perdita nel secondo riconvogliatore del 40% maggiore rispetto a quello del primo stadio.

Si è pensato, quindi, di estendere la geometria semplificata utilizzata nel loop di ottimizzazione e di valutare gli effetti sul rendimento della macchina completa secondo la configurazione mostrata in figura 57.

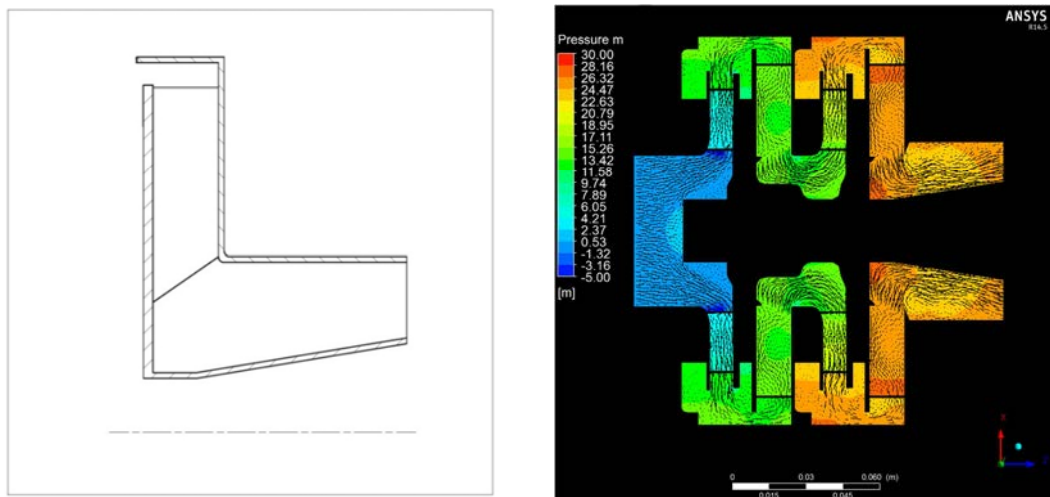


Figura 56. Configurazione dello scarico e *contours* della pressione nella macchina completa originaria.

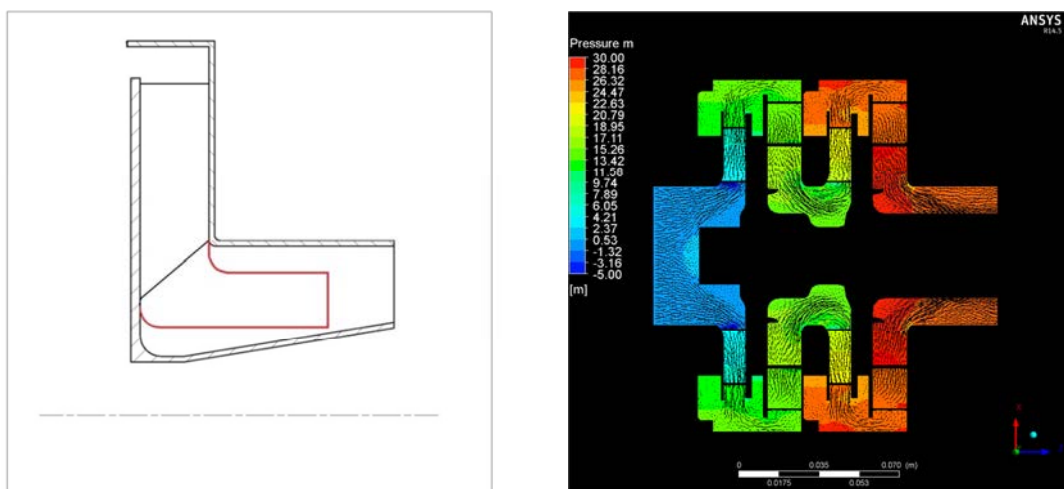


Figura 57. Configurazione del nuovo scarico e *contours* della pressione nella macchina completa ottimizzata.

Nel punto di progetto si è ottenuto un aumento del rendimento di 0,2% e del rendimento complessivo della Cu allo scarico di 0,3% rispetto alla configurazione senza condotto di scarico "ottimizzato".

Questo è stato possibile principalmente grazie alla diminuzione della perdita nel secondo riconvogliatore, che è passata da 2,91 m a 2,65 m e anche ad un leggero aumento del rendimento della seconda girante; i risultati completi di queste nuove simulazioni sono contenute nell'appendice G.



## 5. Conclusioni parte sperimentale

Le due ottimizzazioni realizzate hanno permesso di modificare la geometria del condotto statorico per soddisfare gli obiettivi della funzione, quali minimizzazione del  $\Delta p^\circ$  e della  $C_u$  allo scarico. La linea media iniziale presenta una lunghezza di 44,56 mm, mentre quella ottimizzata di 47,02 mm: la pala si è, quindi, allungata permettendo una distribuzione meno concentrata del carico su di essa. Dalla figura 58 è, invece, possibile osservare come la nuova linea media presenti una curvatura più accentuata rispetto alla configurazione originaria, cioè sia diventata *overturning* per contrastare la deviazione in uscita del flusso.

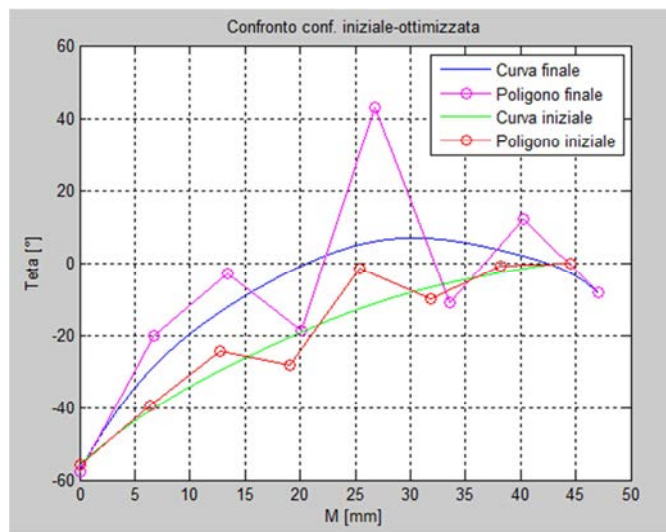


Figura 58. Confronto linea media nel piano conforme: prima e dopo l'ottimizzazione.

Lo spessore non è rimasto costante e presenta due massimi: uno in corrispondenza del bordo d'ingresso e il secondo in vicinanza del bordo d'uscita.

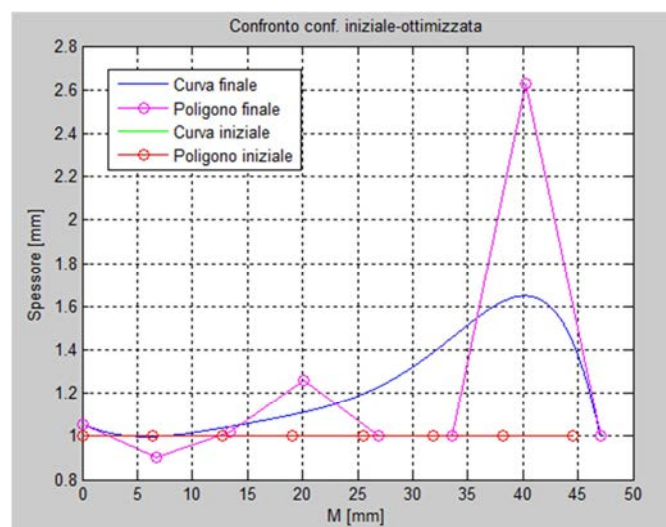


Figura 59. Confronto spessore nel piano conforme: prima e dopo l'ottimizzazione.

La larghezza della pala è passata da 14 mm a 14,645 m.

Queste modifiche geometriche, insieme alla variazione dello scarico, hanno permesso un aumento del rendimento complessivo della macchina nel punto di progetto a portata di  $9,5 \text{ m}^3/\text{s}$  di 3% e del rendimento complessivo della velocità tangenziale  $C_u$  allo scarico di 4,1% rispetto alla configurazione originaria.

L'algoritmo *PSO\_fer\_v28* è stato utilizzato in questo lavoro di tesi per la prima volta nel campo dell'ottimizzazione di forma di una macchina idraulica e il suo funzionamento si è rilevato efficace perché ha permesso di ottenere una geometria continua della pala ed è stato capace di gestire in maniera soddisfacente i punti del polino di Bezièr di linea media e spessore, ossia le variabili di decisione del problema, rispettando i vincoli imposti dal progettista.

Dalle figure seguenti è possibile confrontare dal punto di vista geometrico nel piano meridiano, in quello conforme e in quello circolare la geometria dello statore di partenza e di quello ottimizzato.

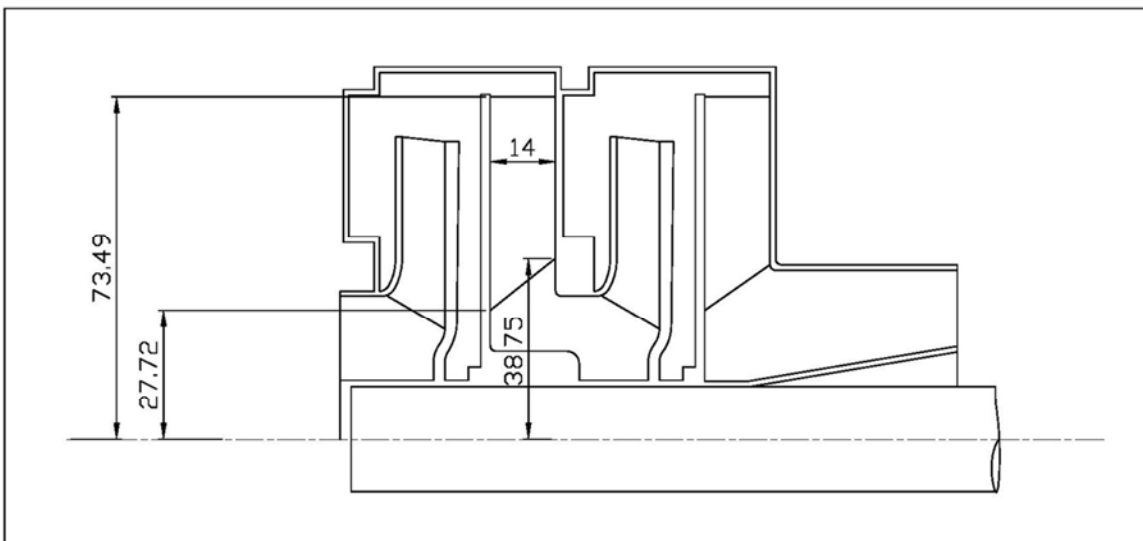


Figura 60. Macchina completa: piano meridiano con statore originario.

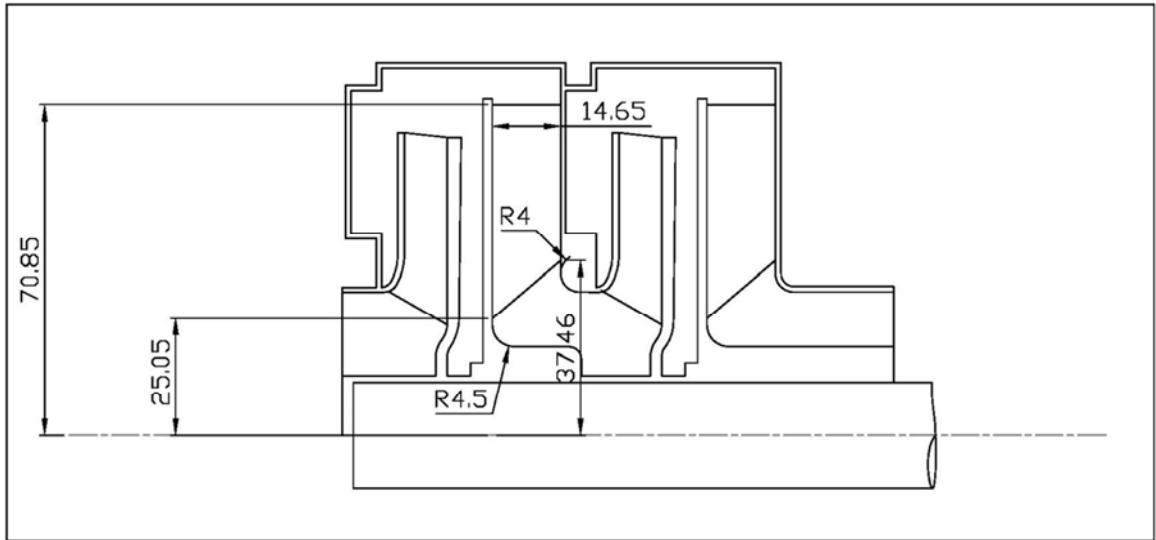


Figura 61. Macchina completa: piano meridiano con statore ottimizzato.

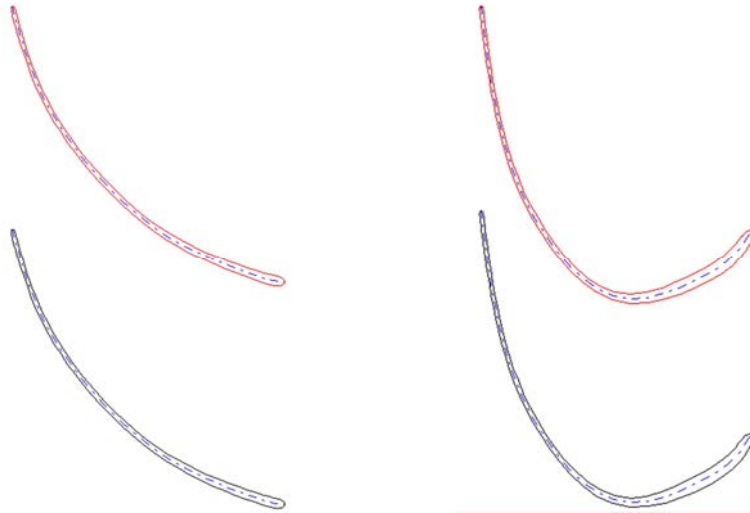


Figura 62. Linea media nel piano conforme ( $m'$  vs  $\theta$ ): geometria originaria a sinistra e ottimizzata a destra.

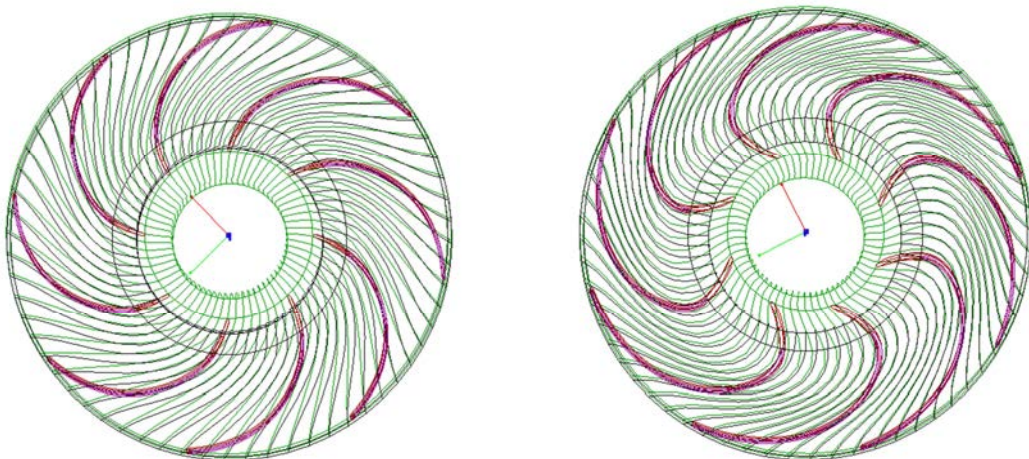


Figura 63. Statore nel piano circolare: configurazione originaria a sinistra e ottimizzata a destra.

La pala dello statore presenta ancora uno stallò con un'elevata estensione, anche se rispetto alla configurazione iniziale, la corrente viene comunque guidata nel condotto con

un andamento simile a quello della palettatura (vd. confronto tra figure 35 e 50), cioè il flusso anche nella fase di stallo riesce a mantenere una direzione del moto compatibile con quella imposta dalla pala.

Il coefficiente di perdita di pressione totale  $\omega$  nella configurazione originaria è pari a 0,498 mentre in quella ottimizzata a 0,317. I risultati più sorprendenti, però, sono stati raggiunti nella minimizzazione della velocità tangenziale allo scarico, il cui valore originario è pari a 2,706 m/s mentre quello ottimizzato a 0,05 m/s, cioè la  $C_u$  è stata praticamente annullata, in quanto il suo valore è pari al 2% di quello di partenza.

Nei due grafici seguenti sono riassunti dal punto di vista delle curve di rendimento i quattro steps di ottimizzazione della macchina completa MXV\_65: configurazione originale, prima ottimizzazione, configurazione finale dopo seconda ottimizzazione, configurazione finale dopo seconda ottimizzazione con scarico modificato.

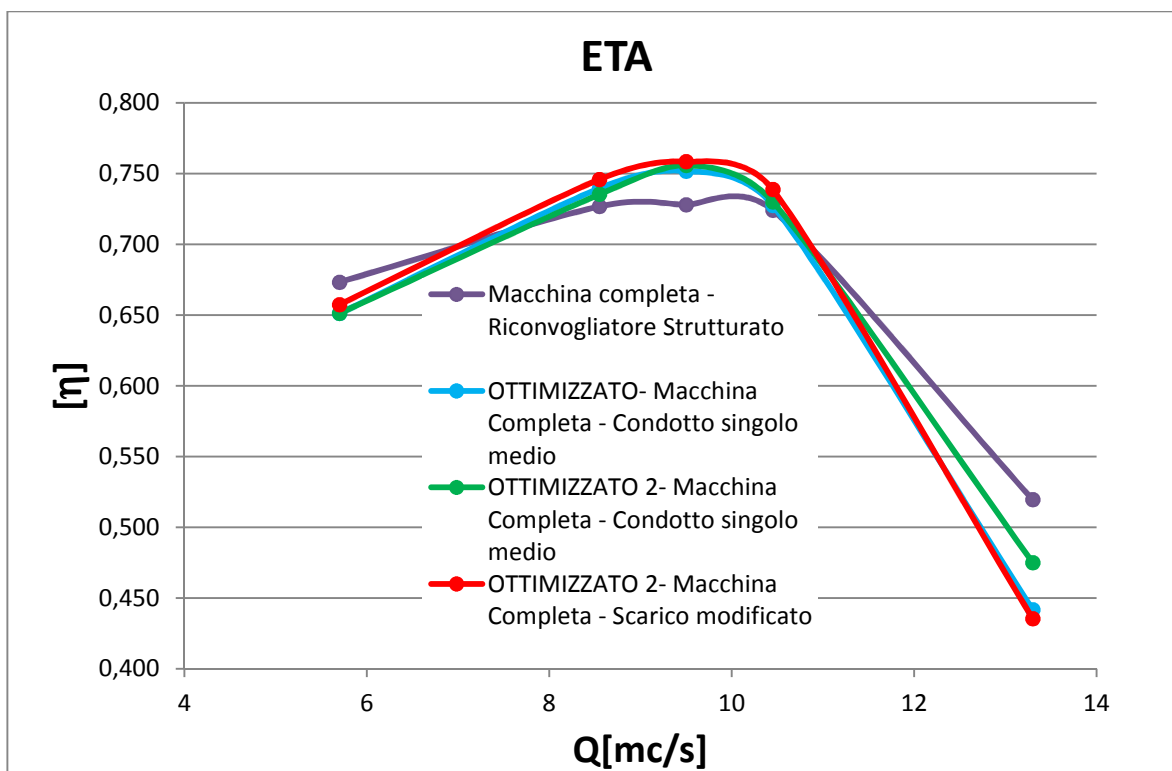


Figura 64. Confronto tra curve di rendimento complessivo nelle quattro configurazioni.

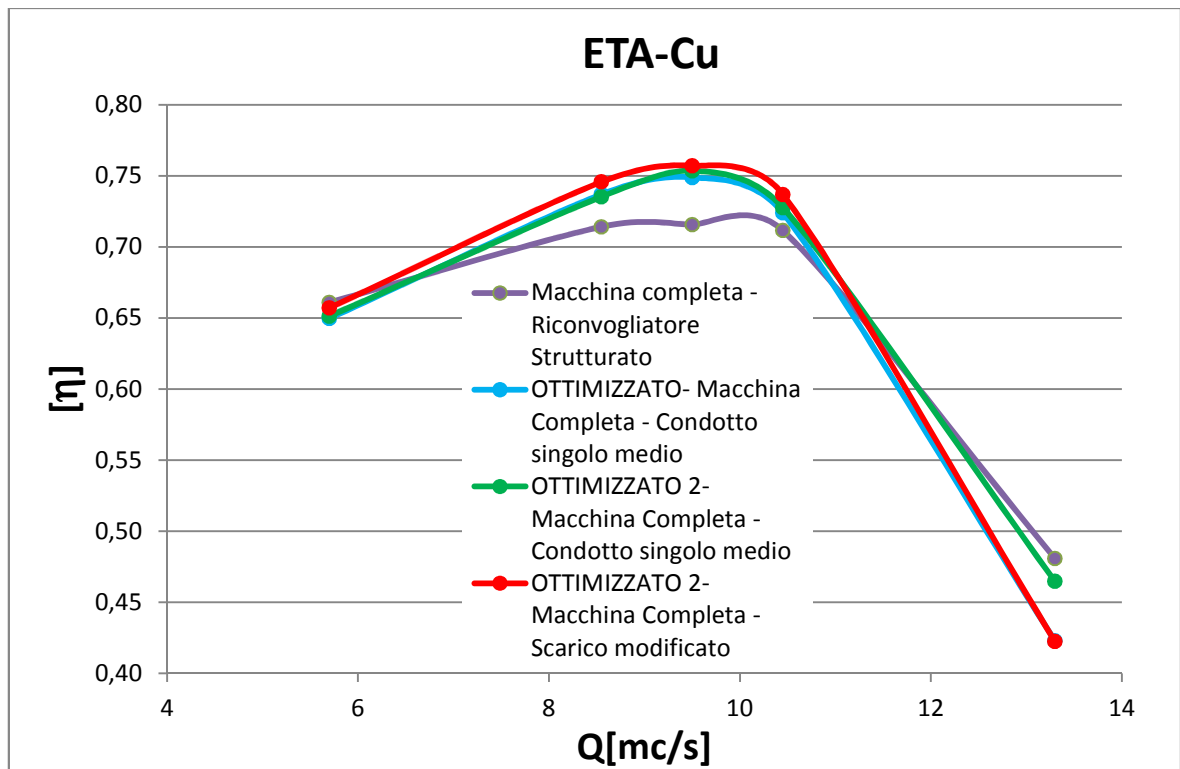


Figura 65. Confronto tra curve di rendimento complessivo della Cu allo scarico nelle quattro configurazioni.

Analizzando la macchina nella sua globalità si nota come la perdita di pressione nella seconda girante sia aumentata rispetto alla situazione originaria, passando da 1,86 m a 2,16 m nel punto di progetto, cioè circa il 16% in più; questo può essere giustificato tenendo conto delle differenti condizioni della corrente all'ingresso della girante rispetto a quelle con cui è stata progettata: l'angolo di ingresso  $\alpha_i$  nella macchina originaria assume un valore di  $11,5^\circ$  mentre nella macchina ottimizzata di  $5,9^\circ$ , cioè circa 1/2 di quello di progetto.



## 6. Conclusioni

Il presente lavoro di tesi si è occupato dell'implementazione all'interno di un algoritmo PSO modificato di una struttura matriciale riconducibile ai concetti di feromone naturale, sostanza rilasciata da alcune specie animali, o dei segnali inviati dai membri di un banco di pesci o da uno stormo di uccelli per comunicare tra loro durante la ricerca di cibo o di un riparo.

Questi segnali naturali sono stati tradotti in forma matematica come vettori, rappresentativi di una direzione nello spazio, e raccolti all'interno di una matrice capace di racchiudere al suo interno tutte le migliori posizioni occupate fino a quel momento dai vari membri dello sciame, ossia delle particelle dell'algoritmo. Ogni particella nel corso delle iterazioni è in grado di scegliere una componente di questo archivio e di aggiornare la sua direzione di ricerca tenendo conto della "memoria sociale" dell'intero gruppo. La scelta di una determinata direzione è effettuata seguendo delle regole ben precise che, però, permettono una certa componente di casualità all'interno del meccanismo di ricerca: ad ogni posizione dell'archivio è associato, infatti, un valore del fitness, l'intensità del segnale, corrispondente ad una probabilità di scelta legata al valore della funzione obiettivo in quel punto dello spazio, e con la tecnica della *roulette wheel selection* ogni membro seleziona una nuova direzione di ricerca in relazione ad un numero casuale creato durante ogni iterazione. Al fine di garantire una velocità e una capacità di convergenza dell'algoritmo quanto più elevate e livellate nel maggior numero di funzioni test, si è fissato un numero di particelle  $N$  dello sciame pari a 20, una dimensione massima dell'archivio pari a  $2*N$  e un coefficiente  $c_3$ , moltiplicativo della componente di velocità legata al feromone, al massimo di 0,5.

Si sono poi inseriti alcuni meccanismi ausiliari, come per esempio una tecnica di *clustering*, con l'obiettivo di diversificare le soluzioni da inserire all'interno dell'archivio digitale, ossia di evitare che questo venga riempito da posizioni troppo vicine tra di loro e che, quindi, possa indirizzare il gruppo verso un minimo locale. Per garantire, inoltre, un buon equilibrio nella convergenza per le funzioni unimodali e multimodali si è fissato un valore massimo del 40% di particelle dello sciame che possono scegliere una determinata posizione della matrice del feromone.

Infine, si è inserito un meccanismo, detto di esplorazione, in grado di muovere la migliore particella del gruppo nel caso in cui non ci sia un miglioramento della funzione obiettivo tra l'iterazione corrente e quella precedente o, se questo avviene, che selezioni in modo casuale una componente di un membro qualsiasi dello sciame e la sposti al massimo del 10% della distanza massima dal baricentro dello sciame in quella iterazione.

I risultati raggiunti dal *PSO\_fer\_v28* nelle funzioni test sono in linea con quelli della versione modificata dell'algoritmo PSO nelle funzioni unimodali, mentre presentano un miglioramento nelle funzioni multimodali complesse come per esempio la *Shifted Rosenbrock function*. Se si confrontano i risultati con quelli del PSO tradizionale, la versione con il feromone risulta vincente in tutte le funzioni analizzate.

La seconda parte di questo lavoro ha avuto una connotazione più pratica, in quanto l'algoritmo *PSO\_fer\_v28* è stato applicato all'ottimizzazione 3-dimensionale del canale di ritorno di una pompa centrifuga a due stadi. Tramite un progetto Workbench® è stata creata la geometria semplificata della macchina, utilizzando uno statore con una mesh strutturata, e si è realizzata una validazione virtuale in cinque punti caratteristici corrispondenti ad altrettanti valori di portata da confrontarsi con la curva del collaudo sperimentale. Tramite un'analisi di sensibilità si è poi semplificata la geometria per costruire un modello del solo canale di ritorno da utilizzarsi nell'ottimizzazione geometrica. Si è utilizzato un approccio della "somma pesata" con una funzione mono-obiettivo composta di due termini: il primo esprime la perdita di pressione totale della corrente, mentre il secondo tiene conto della velocità tangenziale allo scarico in uscita dallo statore.

Inizialmente, scegliendo come punto di progetto quello con portata di  $9,5 \text{ m}^3/\text{s}$ , si è eseguita una prima ottimizzazione ponendo come variabili di decisione le ordinate dei punti del poligono di Bézier di linea media e spessore, il raggio dell'interfaccia, quello al *trailing edge* nella sezione all'*hub* e la larghezza della pala. Dopo 50 iterazioni la geometria dello palettatura è stata modificata dall'ottimizzatore come rappresentato nelle figure 31 e 34 e la funzione obiettivo, il cui valore nella configurazione originaria era di 2,633, si è ridotta fino a 1,86: il coefficiente di perdita di pressione totale  $w$  si è ridotto dal valore di 0,498 a 0,393 e la velocità tangenziale allo scarico da 2,706 m/s a 1,245 m/s;



complessivamente si è ottenuto un aumento del rendimento nel punto di progetto di 2,4% rispetto alla configurazione originaria.

Tuttavia, analizzando la geometria ottimizzata e il campo di moto risultante dall'analisi CFD, si è ipotizzato che per diminuire ulteriormente il valore della funzione obiettivo fosse necessario introdurre dei raggi di raccordo alle curve di mozzo e cassa nel piano meridiano e di svincolare anche il raggio al *trailing edge* della sezione alla cassa dello statore. Si sono, quindi, fissati dei valori dei raggi di raccordo rispettivamente di 4,5 mm e 4 mm, compatibilmente ai vincoli geometrici della macchina, e si è eseguita una seconda ottimizzazione secondo la stessa configurazione di quella precedente ma con un'ulteriore variabile di decisione rispetto al vettore precedente.

Dopo 25 iterazioni la funzione obiettivo è stata ridotta fino al valore di 1,44, con una velocità tangenziale allo scarico di 0,05 m/s e un coefficiente  $\omega$  di 0,317. La  $C_u$  allo scarico è stata praticamente annullata dall'ottimizzatore e il residuo della funzione obiettivo è dato interamente dalla perdita di pressione totale che subisce il flusso nell'attraversamento dello statore e non è possibile eliminarla del tutto a causa della natura viscosa del fluido.

La pala ottimizzata si è allungata (vd. figura 58), si è allargata, assumendo un'altezza di 14,645 mm, lo spessore non è rimasto costante (vd. figura 59) e i raggi posti come variabili di decisione sono variati secondo quanto riportato nella nuova configurazione geometrica in figura 61.

In conclusione il rendimento complessivo della macchina è aumentato nel punto di progetto del 3%, mentre quello comprensivo della velocità tangenziale allo scarico del 4,1%.



## Appendice A

Risultati della validazione per il modello macchina a due stadi completa.

ORIGINALE - Macchina Completa - Condotta singolo medio						
Macchina completa - Riconvolgiatore Strutturato						
		Q060	Q090	Q100	Q110	Q140
Qtot	[kg s <sup>-1</sup> ]	5,7	8,55	9,5	10,45	13,3
Ptot	[kW]	2,44	3,17	3,35	3,54	3,45
H	[m]	29,44	27,44	26,08	24,98	13,73
Ht	[m]	43,73	37,76	35,83	34,5	26,43
Perdita Adduzione	[m]	0,1	0,06	0,07	0,08	0,12
Perdita Riconvolgiatore 1	[m]	3,92	2,99	2,67	2,53	2,93
Perdita Riconvolgiatore2	[m]	5,56	3,37	3,15	2,96	3,72
Recupero Pressione Ric1	[m]	1,98	1,04	0,72	0,51	-2,26
Recupero Pressione Ric2	[m]	-0,11	0,78	0,52	0,42	-2,9
Cd Ric1	[-]	0,56	0,53	0,51	0,52	0,69
Cd Ric2	[-]	0,78	0,61	0,6	0,58	0,83
Cp Ric1	[-]	0,28	0,18	0,14	0,11	-0,53
Cp Ric2	[-]	-0,02	0,14	0,1	0,08	-0,65
Cr Out 1° Gir	[m s <sup>-1</sup> ]	1,5	2,26	2,51	2,75	3,47
Cu Out 1° Gir	[m s <sup>-1</sup> ]	10,71	9,8	9,26	8,75	7,15
Ca Out 1° Gir	[m s <sup>-1</sup> ]	0,18	0,04	0,1	0,17	0,2
Cr Out Ric	[m s <sup>-1</sup> ]	1,59	2,06	2,24	2,46	3,47
Cu Out Ric	[m s <sup>-1</sup> ]	7,63	6,58	6,23	5,77	5,74
Ca Out Ric	[m s <sup>-1</sup> ]	0,72	1,18	1,27	1,35	1,91
Cr Out 2° Gir	[m s <sup>-1</sup> ]	1,53	2,26	2,51	2,76	3,52
Cu Out 2° Gir	[m s <sup>-1</sup> ]	10,65	9,54	9,07	8,69	6,79
Ca Out 2° Gir	[m s <sup>-1</sup> ]	-0,18	0,05	0,09	0,09	0,08
Cm Outflow	[m s <sup>-1</sup> ]	4,14	3,28	3,55	3,89	5,28
Cu Outflow	[m s <sup>-1</sup> ]	3,19	3,08	2,93	2,91	4,47
Ca Outflow	[m s <sup>-1</sup> ]	2,01	3	3,33	3,66	4,66
C minima out Ric1	[m s <sup>-1</sup> ]	2,29	3,43	3,81	4,2	5,34
C effettiva out Ric1	[m s <sup>-1</sup> ]	4,743	5,64	5,947	5,919	8,368
Pgir1	[W]	1307,18	1696,74	1784,48	1864,24	2012,35
Ht gir1	[m]	23,39	20,24	19,15	18,19	15,43
H gir1	[m]	20,11	18,02	17,15	16,29	13,13
Eta idr gir 1		0,86	0,89	0,9	0,9	0,85
Pgir2	[W]	1137,48	1469,39	1553,85	1671,26	1435,47
Ht gir2	[m]	20,35	17,52	16,68	16,31	11,01
H gir2	[m]	18,9	15,85	14,82	14,26	7,37
Eta idr gir 2		0,93	0,9	0,89	0,87	0,67
Eta totale	[-]	0,673	0,727	0,728	0,724	0,519
Cu uscita Ric	[m]	0,519	0,484	0,438	0,432	1,019
Htot-Cu	[m]	43,211	37,276	35,392	34,068	25,411
Eta-cu	[-]	0,988	0,987	0,988	0,987	0,961
Perita add	[m]	0,1	0,06	0,07	0,08	0,12
Perdita Gir1	[m]	3,28	2,22	2	1,9	2,3
Perdita Ric1	[m]	3,92	2,99	2,67	2,53	2,93
Perdita Gir2	[m]	1,45	1,67	1,86	2,05	3,64
Perdita Ric2	[m]	5,56	3,37	3,15	2,96	3,72
Perdita tot	[m]	14,829	10,794	10,188	9,952	13,729
eta-cu	[-]	0,661	0,714	0,716	0,712	0,481

Figura 66. Tabella riassuntiva *macchina completa* dei parametri di confronto durante la validazione.

Risultati della validazione per il modello macchina a due stadi con condotto singolo.

ORIGINALE - Condotto singolo medio						
Condotto Singolo - Riconvogliatore Strutturato						
		Q060	Q090	Q100	Q110	Q140
Qtot	[kg s <sup>-1</sup> ]	5,7	8,55	9,5	10,45	13,3
Ptot	[kW]	2,46	3,12	3,3	3,48	3,42
H	[m]	28,94	27,36	25,89	24,65	13,17
Ht	[m]	43,76	37,42	35,39	34,15	26,13
Perdita Adduzione	[m]	0,12	0,06	0,07	0,08	0,12
Perdita Riconvogliatore 1	[m]	4,43	3,03	2,68	2,49	2,86
Perdita Riconvogliatore2	[m]	5,19	3,14	3,1	3,13	4,07
Recupero Pressione Ric1	[m]	1,55	0,78	0,62	0,3	-2,73
Recupero Pressione Ric2	[m]	1,09	0,95	0,54	0,18	-3,97
Cd Ric1	[-]	0,63	0,54	0,52	0,52	0,68
Cd Ric2	[-]	0,74	0,57	0,59	0,62	0,69
Cp Ric1	[-]	0,22	0,14	0,12	0,06	-0,65
Cp Ric2	[-]	0,16	0,17	0,1	0,04	-0,87
Cr Out 1° Gir	[m s <sup>-1</sup> ]	1,49	2,27	2,51	2,75	3,51
Cu Out 1° Gir	[m s <sup>-1</sup> ]	10,48	9,59	9,09	8,61	7,08
Ca Out 1° Gir	[m s <sup>-1</sup> ]	0,18	-0,02	0,07	0,14	0,21
Cr Out Ric	[m s <sup>-1</sup> ]	2,65	3,73	4,09	4,45	5,83
Cu Out Ric	[m s <sup>-1</sup> ]	3,18	3,35	3,29	2,86	4,71
Ca Out Ric	[m s <sup>-1</sup> ]	1,99	2,57	2,78	2,61	4,31
Cr Out 2° Gir	[m s <sup>-1</sup> ]	1,53	2,28	2,52	2,76	3,54
Cu Out 2° Gir	[m s <sup>-1</sup> ]	10,36	9,34	8,92	8,71	6,56
Ca Out 2° Gir	[m s <sup>-1</sup> ]	-0,18	0,01	0,1	0,25	0,09
Cm Outflow	[m s <sup>-1</sup> ]	2,22	3,25	3,6	3,95	5,62
Cu Outflow	[m s <sup>-1</sup> ]	2,73	2,91	3,09	2,91	4,99
Ca Outflow	[m s <sup>-1</sup> ]	2,01	3,01	3,35	3,68	4,69
C minima out Ric1	[m s <sup>-1</sup> ]	1,52	2,28	2,54	2,79	3,55
C effettiva out Ric1	[m s <sup>-1</sup> ]	4,597	5,858	6,003	6,197	8,914
Pgir1	[W]	1292,1	1667,52	1757,76	1836,3	1986,96
Ht gir1	[m]	23,12	19,86	18,87	17,92	15,23
H gir1	[m]	20,07	17,84	17,03	16,19	13,09
Eta idr gir 1		0,87	0,9	0,9	0,9	0,86
Pgir2	[W]	1154,28	1469,7	1539,12	1663,2	1421,34
Ht gir2	[m]	20,65	17,53	16,52	16,23	10,9
H gir2	[m]	18,61	15,74	14,7	14,17	7,12
Eta idr gir 2		0,9	0,9	0,89	0,87	0,65
Eta totale	[-]	0,661	0,731	0,732	0,722	0,504
Cu uscita Ric	[m]	0,380	0,432	0,487	0,432	1,270
Htot-Cu	[m]	43,380	36,988	34,903	33,718	24,860
Eta-cu	[-]	0,991	0,989	0,986	0,987	0,951
Perita add	[m]	0,12	0,06	0,07	0,08	0,12
Perdita Gir1	[m]	3,05	2,02	1,84	1,73	2,14
Perdita Ric1	[m]	4,43	3,03	2,68	2,49	2,86
Perdita Gir2	[m]	2,04	1,79	1,82	2,06	3,78
Perdita Ric2	[m]	5,19	3,14	3,1	3,13	4,07
Perdita tot	[m]	15,210	10,472	9,997	9,922	14,240
eta-cu	[-]	0,653	0,720	0,718	0,709	0,455

Figura 67. Tabella riassuntiva *condotto singolo* dei parametri di confronto durante la validazione.

## Appendice B

Risultati dell'analisi di sensibilità sul numero di nodi della mesh di riconvolgiatore strutturato e geometria di interfaccia non strutturata.

		Numero di nodi				
		50000	100000	150000	200000	250000
<b>Perdita Riconvolgiatore</b>	[m]	2,455	2,354	2,37	2,424	2,831
<b><math>\omega</math> riconvolgiatore</b>	-	0,478	0,458	0,461	0,471	0,551
<b>Ca interf</b>	[m/s]	0,083	0,083	0,082	0,083	0,086
<b>Cr interf</b>	[m/s]	2,507	2,507	2,507	2,507	2,507
<b>Cu interf</b>	[m/s]	9,126	9,127	9,126	9,126	9,112
<b>Cu outflow</b>	[m/s]	3,69	3,699	3,74	3,607	3,749
		Numero di nodi ric: 50kN				
		Numero di nodi interf				
		10000	20000	30000	40000	50000
<b>Perdita Riconvolgiatore interf</b>	[m]	2,584	2,584	2,497	2,452	2,455
<b><math>\omega</math> riconvolgiatore</b>	-	0,51	0,513	0,496	0,48	0,478
<b>Ca interf</b>	[m/s]	0,06	0,06	0,068	0,12	0,083
<b>Cr interf</b>	[m/s]	2,461	2,461	2,478	2,501	2,507
<b>Cu interf</b>	[m/s]	9,005	9,005	9,006	9,052	9,126
<b>Cu outflow interf</b>	[m/s]	3,228	3,228	2,633	2,887	3,69

Figura 68. Valori numerici studio di sensibilità.



## Appendice C

Il vettore delle variabili di decisione è composto dal raggio superiore del canale di ritorno, denominato raggio all'interfaccia, dal raggio del bordo di uscita della sezione al mozzo, dalle otto ordinate dei punti del poligono di Bézier di linea media, dalle otto dello spessore e infine dall'altezza della pala; tutti i valori sono in millimetri.

Nell'ottimizzatore le variabili di decisione di ogni individuo sono state adimensionalizzate rispetto ai valori iniziali riportati in tabella.

<b>Variabili</b>	<b>Valore [mm]</b>
R_interf	73,490
R_exit	27,716
y_lm_1	-55,877
y_lm_2	-39,494
y_lm_3	-24,275
y_lm_4	-28,151
y_lm_5	-1,707
y_lm_6	-10,108
y_lm_7	-0,901
y_lm_8	0,000
y_sp_1	1,000
y_sp_2	1,000
y_sp_3	1,000
y_sp_4	1,000
y_sp_5	1,000
y_sp_6	1,000
y_sp_7	1,000
y_sp_8	1,000
H_pala	14,000

Figura 69. Tabella valori iniziali variabili di decisione.

I termini della funzione obiettivo iniziale sono:

<b>Termine</b>	<b>Valore</b>
$\Delta p^\circ$ [m]	2,26
$C_u$ [m/s]	2,706

Figura 70. Tabella termini iniziali funzione obiettivo.

Le variabili di decisione dell'individuo ottimo sono le seguenti:

Variabili	Valore [mm]
R_interf	72,637
R_exit	24,361
y_lm_1	-57,727
y_lm_2	-21,299
y_lm_3	-1,4985
y_lm_4	-19,888
y_lm_5	-20,941
y_lm_6	-10,308
y_lm_7	-0,856
y_lm_8	0,0127
y_sp_1	1,049
y_sp_2	1,000
y_sp_3	1,018
y_sp_4	1,001
y_sp_5	1,000
y_sp_6	1,000
y_sp_7	1,000
y_sp_8	1,001
H_pala	14,057

Figura 71. Tabella valori finali variabili di decisione prima ottimizzazione.

I termini della funzione obiettivo dell'individuo ottimo sono:

Termine	Valore
$\Delta p^\circ$ [m]	1,784
Cu [m/s]	1,245

Figura 72. Tabella termini finali funzione obiettivo prima ottimizzazione.

In figura 71 è stata ricostruita la storia di convergenza:

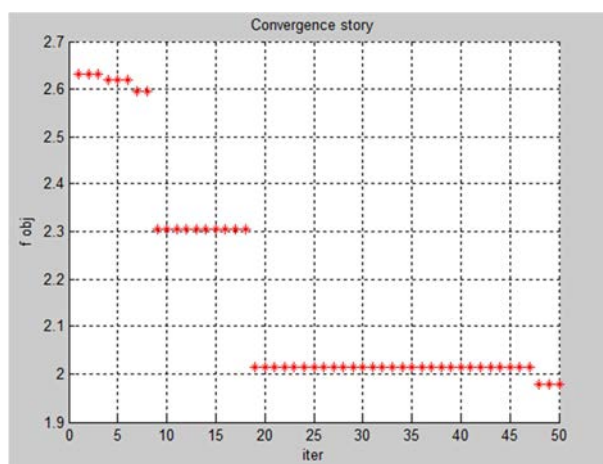


Figura 73. Storia di convergenza ottimizzazione n. 1.



## Appendice D

Risultati della simulazione per il modello ottimizzato macchina a due stadi completa.

OTTIMIZZATO- Macchina Completa - Condotto singolo medio						
Macchina completa - Riconvogliatore Strutturato						
		Q060	Q090	Q100	Q110	Q140
Qtot	[kg s <sup>-1</sup> ]	5,7	8,55	9,5	10,45	13,3
Ptot	[kW]	2,62	3,34	3,48	3,53	3,73
H	[m]	30,51	29,47	28,09	25,09	12,64
Ht	[m]	46,86	39,85	37,37	34,49	28,61
Perdita Adduzione	[m]	0,11	0,06	0,07	0,08	0,12
Perdita Riconvogliatore 1	[m]	4,88	2,64	2,16	2,17	4,36
Perdita Riconvogliatore2	[m]	5,01	3,25	2,95	3,39	6,2
Recupero Pressione Ric1	[m]	1,3	1,79	1,47	0,8	-3,38
Recupero Pressione Ric2	[m]	1,52	1,02	1,06	-0,32	-5,25
Cd Ric1	[-]	0,68	0,47	0,42	0,45	1,03
Cd Ric2	[-]	0,72	0,58	0,55	0,69	1,45
Cp Ric1	[-]	0,18	0,32	0,28	0,17	-0,8
Cp Ric2	[-]	0,22	0,18	0,2	-0,07	-1,23
Cr Out 1° Gir	[m s <sup>-1</sup> ]	1,47	2,26	2,5	2,75	3,5
Cu Out 1° Gir	[m s <sup>-1</sup> ]	10,89	9,82	9,25	8,74	7,16
Ca Out 1° Gir	[m s <sup>-1</sup> ]	0,41	0,06	0,11	0,16	0,18
Cr Out Ric	[m s <sup>-1</sup> ]	1,32	1,75	1,89	2,07	2,7
Cu Out Ric	[m s <sup>-1</sup> ]	8,94	7,91	7,62	7,32	6,16
Ca Out Ric	[m s <sup>-1</sup> ]	0,49	0,81	0,9	1,01	1,34
Cr Out 2° Gir	[m s <sup>-1</sup> ]	1,51	2,26	2,5	2,76	3,51
Cu Out 2° Gir	[m s <sup>-1</sup> ]	10,53	9,55	9,31	8,69	7,05
Ca Out 2° Gir	[m s <sup>-1</sup> ]	-0,03	0,03	0,16	0,09	0,14
Cm Outflow	[m s <sup>-1</sup> ]	2,13	3,2	3,55	3,84	5,06
Cu Outflow	[m s <sup>-1</sup> ]	1,13	1,35	1,52	1,48	3,2
Ca Outflow	[m s <sup>-1</sup> ]	2	2,99	3,33	3,66	4,66
C minima out Ric1	[m s <sup>-1</sup> ]	2,29	3,43	3,81	4,2	5,34
C effettiva out Ric1	[m s <sup>-1</sup> ]	4,494	4,912	5,513	5,975	7,973
Pgir1	[W]	1323,53	1699,21	1783,07	1860,83	2010,74
Ht gir1	[m]	23,68	20,27	19,14	18,16	15,42
H gir1	[m]	20,43	18,11	17,2	16,32	13,18
Eta idr gir 1		0,86	0,89	0,9	0,9	0,86
Pgir2	[W]	1295,72	1642,23	1698,51	1673,22	1720,17
Ht gir2	[m]	23,18	19,59	18,23	16,33	13,19
H gir2	[m]	20,08	17,31	16,08	14,4	10,12
Eta idr gir 2		0,87	0,88	0,88	0,88	0,77
Eta totale	[-]	0,651	0,740	0,752	0,727	0,442
Cu uscita Ric	[m]	0,065	0,093	0,118	0,112	0,522
Htot-Cu	[m]	46,795	39,757	37,252	34,378	28,088
Eta-cu	[-]	0,999	0,997	0,997	0,997	0,982
Perita add	[m]	0,11	0,06	0,07	0,08	0,12
Perdita Gir1	[m]	3,25	2,16	1,94	1,84	2,24
Perdita Ric1	[m]	4,88	2,64	2,16	2,17	4,36
Perdita Gir2	[m]	3,1	2,28	2,15	1,93	3,07
Perdita Ric2	[m]	5,01	3,25	2,95	3,39	6,2
Perdita tot	[m]	16,415	10,483	9,388	9,522	16,512
eta-cu	[-]	0,650	0,737	0,749	0,724	0,423

Figura 74. Tabella riassuntiva dei parametri di confronto della macchina ottimizzata.



## Appendice E

Il vettore delle variabili di decisione è composto dalle medesime variabili del ciclo di ottimizzazione precedente, cioè dal raggio superiore del canale di ritorno, denominato raggio all'interfaccia, dal raggio del bordo di uscita della sezione al mozzo, dalle otto ordinate dei punti del poligono di Bézier di linea media, dalle otto dello spessore, dall'altezza della pala, a cui va aggiunta la variabile del bordo di uscita della sezione alla cassa, per un totale di 20 parametri; tutti i valori sono in millimetri.

Nell'ottimizzatore le variabili di decisione di ogni individuo sono state adimensionalizzate rispetto ai valori iniziali riportati nella tabella di figura 69 a cui è stato aggiunto R\_exit\_shr di 38,75 mm.

Avendo inserito nella popolazione iniziale l'individuo ottimo ottenuto dall'ottimizzazione precedente, viene usato come termine di confronto il valore della sue funzione obiettivo, composta dai termini in figura 72.

I valori delle variabili di decisione del nuovo individuo ottimo sono i seguenti:

<b>Variabili</b>	<b>Valore [mm]</b>
R_interf	72,066
R_exit_hub	25,054
y_lm_1	-57,705
y_lm_2	-20,016
y_lm_3	-3,121
y_lm_4	-18,736
y_lm_5	-42,812
y_lm_6	-11,139
y_lm_7	11,932
y_lm_8	-8,259
y_sp_1	1,057
y_sp_2	0,903
y_sp_3	1,017
y_sp_4	1,257
y_sp_5	1,000
y_sp_6	1,002
y_sp_7	2,629
y_sp_8	1,000
H_pala	14,645
R_exit_shr	37,458

**Figura 75. Tabella valori finali variabili di decisione seconda ottimizzazione.**

I termini della funzione obiettivo dell'individuo ottimo sono:

Termine	Valore
$\Delta p^\circ$ [m]	1,44
Cu [m/s]	0,05

Figura 76. Tabella termini finali funzione obiettivo seconda ottimizzazione.

Nella figura successiva è stata ricostruita la storia di convergenza:

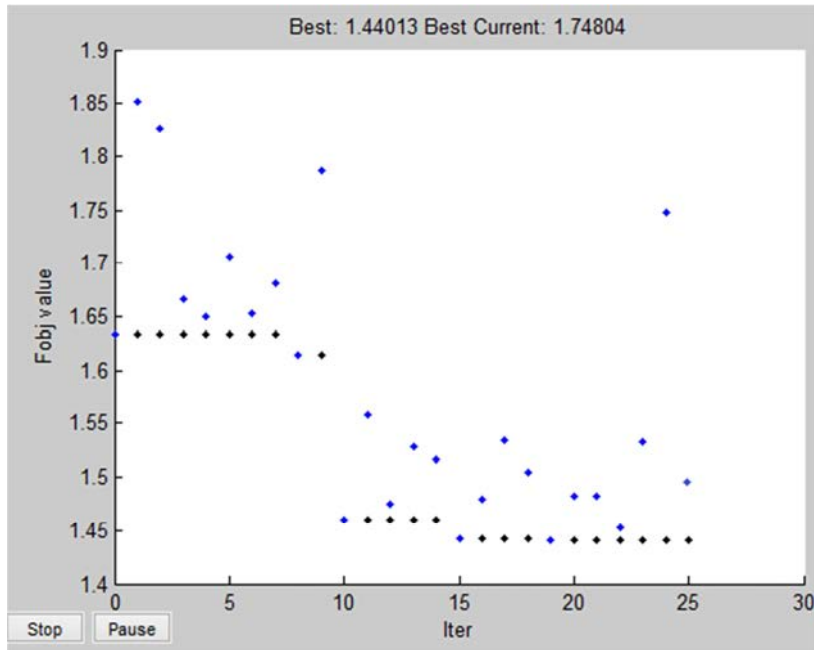


Figura 77. Storia di convergenza ottimizzazione n. 2.

## Appendice F

Risultati della validazione per il secondo modello ottimizzato macchina a due stadi completa.

OTTIMIZZATO 2- Macchina Completa - Condotto singolo medio						
Macchina completa - Riconvogliatore Strutturato						
		Q060	Q090	Q100	Q110	Q140
Qtot	[kg s <sup>-1</sup> ]	5,7	8,55	9,5	10,45	13,3
Ptot	[kW]	2,71	3,39	3,51	3,59	3,79
H	[m]	31,59	29,69	28,46	25,58	13,8
Ht	[m]	48,52	40,38	37,66	35,04	29,05
Perdita Adduzione	[m]	0,12	0,06	0,07	0,08	0,12
Perdita Riconvogliatore 1	[m]	4,77	2,58	2,1	2,38	4,24
Perdita Riconvogliatore2	[m]	4,67	3,19	2,91	2,97	5,5
Recupero Pressione Ric1	[m]	1,68	1,65	1,43	0,56	-3,45
Recupero Pressione Ric2	[m]	1,84	1,33	1,32	0,6	-3,52
Cd Ric1	[-]	0,66	0,48	0,43	0,5	1
Cd Ric2	[-]	0,66	0,57	0,56	0,62	1,3
Cp Ric1	[-]	0,23	0,29	0,28	0,12	-0,82
Cp Ric2	[-]	0,26	0,23	0,24	0,12	-0,83
Cr Out 1° Gir	[m s <sup>-1</sup> ]	1,47	2,26	2,5	2,75	3,51
Cu Out 1° Gir	[m s <sup>-1</sup> ]	10,8	9,76	9,25	8,73	7,15
Ca Out 1° Gir	[m s <sup>-1</sup> ]	0,43	0	0,09	0,14	0,17
Cr Out Ric	[m s <sup>-1</sup> ]	1,26	1,72	1,77	1,93	2,51
Cu Out Ric	[m s <sup>-1</sup> ]	8,53	7,83	7,72	7,42	6,22
Ca Out Ric	[m s <sup>-1</sup> ]	0,39	0,69	0,8	0,91	1,19
Cr Out 2° Gir	[m s <sup>-1</sup> ]	1,5	2,28	2,51	2,75	3,51
Cu Out 2° Gir	[m s <sup>-1</sup> ]	10,62	9,68	9,29	8,59	7,16
Ca Out 2° Gir	[m s <sup>-1</sup> ]	0,11	-0,12	0,05	0,11	0,12
Cm Outflow	[m s <sup>-1</sup> ]	2,17	3,18	3,43	3,75	4,87
Cu Outflow	[m s <sup>-1</sup> ]	-0,15	0,73	0,66	1,28	2,41
Ca Outflow	[m s <sup>-1</sup> ]	2	3	3,33	3,66	4,66
C minima out Ric1	[m s <sup>-1</sup> ]	2,29	3,43	3,81	4,2	5,34
C effettiva out Ric1	[m s <sup>-1</sup> ]	3,818	5,028	5,472	6,025	8,204
Pgir1	[W]	1341,54	1693,37	1784,07	1860,32	2011,08
Ht gir1	[m]	24	20,2	19,15	18,15	15,42
H gir1	[m]	20,51	18,01	17,2	16,3	13,17
Eta idr gir 1		0,85	0,89	0,9	0,9	0,85
Pgir2	[W]	1370,79	1692,07	1724,1	1730,42	1777,73
Ht gir2	[m]	24,52	20,18	18,51	16,89	13,63
H gir2	[m]	20,65	17,54	16,28	14,71	10,49
Eta idr gir 2		0,84	0,87	0,88	0,87	0,77
Eta totale	[-]	0,651	0,735	0,756	0,730	0,475
Cu uscita Ric	[m]	0,001	0,027	0,022	0,084	0,296
Htot-Cu	[m]	48,519	40,353	37,638	34,956	28,754
Eta-cu	[-]	1,000	0,999	0,999	0,998	0,990
Perita add	[m]	0,12	0,06	0,07	0,08	0,12
Perdita Gir1	[m]	3,49	2,19	1,95	1,85	2,25
Perdita Ric1	[m]	4,77	2,58	2,1	2,38	4,24
Perdita Gir2	[m]	3,87	2,64	2,23	2,18	3,14
Perdita Ric2	[m]	4,67	3,19	2,91	2,97	5,5
Perdita tot	[m]	16,921	10,687	9,282	9,544	15,546
eta-cu	[-]	0,651	0,735	0,754	0,728	0,465

Figura 78. Tabella riassuntiva dei parametri di confronto della macchina al termine della seconda ottimizzazione.



## Appendice G

Risultati della validazione per il secondo modello ottimizzato con scarico modificato macchina a due stadi completa: configurazione finale del lavoro.

OTTIMIZZATO 2- Macchina Completa - Scarico modificato						
Macchina completa - Riconvogliatore Strutturato						
		Q060	Q090	Q100	Q110	Q140
Qtot	[kg s <sup>-1</sup> ]	5,7	8,55	9,5	10,45	13,3
Ptot	[kW]	2,69	3,42	3,5	3,6	3,75
H	[m]	31,64	30,45	28,52	25,92	12,53
Ht	[m]	48,13	40,83	37,61	35,09	28,78
Perdita Adduzione	[m]	0,12	0,06	0,07	0,08	0,12
Perdita Riconvogliatore 1	[m]	4,58	2,49	2,25	2,41	4,69
Perdita Riconvogliatore 2	[m]	4,72	3,03	2,65	2,69	5,87
Recupero Pressione Ric1	[m]	1,89	1,74	1,42	0,49	-3,69
Recupero Pressione Ric2	[m]	1,81	1,41	1,01	0,17	-5,03
Cd Ric1	[-]	0,64	0,44	0,43	0,5	1,11
Cd Ric2	[-]	0,66	0,52	0,49	0,55	1,41
Cp Ric1	[-]	0,26	0,31	0,27	0,1	-0,88
Cp Ric2	[-]	0,25	0,24	0,19	0,03	-1,21
Cr Out 1° Gir	[m s <sup>-1</sup> ]	1,47	2,26	2,5	2,75	3,5
Cu Out 1° Gir	[m s <sup>-1</sup> ]	10,84	9,82	9,25	8,74	7,16
Ca Out 1° Gir	[m s <sup>-1</sup> ]	0,46	0,06	0,09	0,14	0,21
Cr Out Ric	[m s <sup>-1</sup> ]	1,26	1,64	1,77	1,93	2,54
Cu Out Ric	[m s <sup>-1</sup> ]	8,65	8,01	7,72	7,41	6,12
Ca Out Ric	[m s <sup>-1</sup> ]	0,41	0,73	0,8	0,91	1,23
Cr Out 2° Gir	[m s <sup>-1</sup> ]	1,49	2,26	2,51	2,75	3,51
Cu Out 2° Gir	[m s <sup>-1</sup> ]	10,75	9,77	9,3	8,68	7,08
Ca Out 2° Gir	[m s <sup>-1</sup> ]	0,21	0,04	0,05	0,15	0,16
Cm Outflow	[m s <sup>-1</sup> ]	3,14	4,68	5,21	5,77	7,29
Cu Outflow	[m s <sup>-1</sup> ]	-0,41	0,12	1,07	1,19	2,7
Ca Outflow	[m s <sup>-1</sup> ]	3,1	4,66	5,17	5,69	7,24
C minima out Ric1	[m s <sup>-1</sup> ]	2,29	3,43	3,81	4,2	5,34
C effettiva out Ric1	[m s <sup>-1</sup> ]	3,717	5,272	5,464	6,084	7,932
Pgir1	[W]	1341,22	1705,74	1784,11	1860,89	2017,16
Ht gir1	[m]	23,99	20,34	19,15	18,16	15,47
H gir1	[m]	20,47	18,1	17,2	16,31	13,16
Eta idr gir 1		0,85	0,89	0,9	0,9	0,85
Pgir2	[W]	1348,95	171,65	1719,69	1735,48	1736,02
Ht gir2	[m]	24,13	20,49	18,46	16,93	13,31
H gir2	[m]	20,58	17,93	16,3	14,8	10,05
Eta idr gir 2		0,85	0,88	0,88	0,87	0,75
Eta totale	[-]	0,657	0,746	0,758	0,739	0,435
Cu uscita Ric	[m]	0,009	0,001	0,058	0,072	0,372
Htot-Cu	[m]	48,121	40,829	37,552	35,018	28,408
Eta-cu	[-]	1,000	1,000	0,998	0,998	0,987
Perita add	[m]	0,12	0,06	0,07	0,08	0,12
Perdita Gir1	[m]	3,52	2,24	1,95	1,85	2,31
Perdita Ric1	[m]	4,58	2,49	2,25	2,41	4,69
Perdita Gir2	[m]	3,55	2,56	2,16	2,13	3,26
Perdita Ric2	[m]	4,72	3,03	2,65	2,69	5,87
Perdita tot	[m]	16,499	10,381	9,138	9,232	16,622
eta-cu	[-]	0,657	0,746	0,757	0,737	0,422

Figura 79. Tabella riassuntiva dei parametri di confronto della macchina al termine della seconda ottimizzazione con scarico modificato.





## Appendice H: creazione modello Workbench®

Di seguito sono riassunti in maniera dettagliata i principali passaggi per la creazione del progetto della pompa MXV\_65 con il programma Workbench® di Ansys®.

1. Creare nuovo progetto Workbench®.

2. Inserire modulo BladeGen® e creare nuovo modello per costruire il riconvolgiatore strutturato. Compilare i campi dei valori geometrici di riferimento ricavati dal cad, il numero di pale (in questo caso pari a otto), mentre il numero di layer da indicare non ha importanza perché la pala verrà definita in seguito a semplice curvatura.

Una volta dato "invio" compare una forma approssimativa del condotto in alto a sinistra ed è necessario convertire le curve di *hub* e *shroud* a curve spline o curve di Bézier cliccandoci sopra con il tasto destro e selezionando l'opzione "*Converts Points to*" al fine da gestire la forma da assegnare al condotto.

Espandendo il modulo "*Model*" in alto a sinistra si possono definire le proprietà della turbomacchina, indicando la parte come un diffusore, radiale e stazionario; per ultimo si inseriscono le unità di misura volute. Sempre in questo modulo nella sezione "*Ang/Thk Beta Definition*" si imposta l'opzione "*Beta from Tangential*".

Espandendo il modulo "*Blade*" e "*Properties*" nella sezione "*LE/TE Ellipse*" si possono definire i valori dei raggi del bordo di ingresso e di uscita, in questo caso posti pari a 2 mm.

Nell'area grafica in basso a sinistra e in basso a destra vi sono i piani conformi di linea media e spessore; cliccando con il tasto destro prima sopra l'una e poi sopra l'altra si possono impostare le proprietà di visualizzazione: si definisce "*Theta Distribution*" e su "*Spanwise Distribution Type*" si seleziona "*Axial Element*" per definire la pala a semplice curvatura.

Compilati tutti i campi si salva e si esce da BladeGen®.

3. Facendo click con il tasto destro sopra al modulo precedente si seleziona l'opzione "*Transfer Data to new Turbogrid*" per creare la sezione di mesh.

Nell'albero delle *features* di sinistra si seleziona il modulo "*Mesh Data*" e in "*Mesh Size*" "*Target Mesh Passage Size*" nel campo "*Method*"; il campo successivo permette di specificare il numero di nodi con cui si va a realizzare la mesh nel canale palare.

Sempre nell'albero delle *features* sotto "*Outlet*" si possono impostare i valore dei punti di controllo della sezione di uscita.

Definiti i parametri precedenti si può selezionare il pulsante "*Mesh*" e controllare la sua qualità nella sezione "*Mesh Analysis Error*".

Se i valori sono soddisfacenti si può salvare e uscire.

4. Nel progetto Workbench® si inserisce il modulo Geometry® per costruire l'interfaccia non strutturata. Questo programma presenta le medesime caratteristiche di un qualsiasi modellatore geometrico e permette di costruire uno sketch per poi rivoluzionario attorno ad un asse. Una volta definita la geometria di interesse è possibile definire alcune quote come parametri, selezionando il quadrato a sinistra del loro nome al fine di gestirle direttamente dall'interfaccia del progetto Workbench®. Bisogna, infine, selezionare le superfici dall'interfaccia grafica e definire le zone di *inlet*, *outlet*, *hub*, *hub\_mov*, *shroud*, *shroud\_mov*.

Si può salvare e uscire.

5. Facendo click con il tasto destro sopra al modulo precedente si seleziona l'opzione "*Transfer Data to new ICEM CFD*" per creare la sezione di mesh non strutturata.

Nel modulo "*Geometry*" si seleziona l'opzione "*Create Body*", "*Fluid*", "*Entire Model*" per assegnare un punto di riferimento alla parte. Nel modulo "*Mesh*" si apre il campo "*Global Mesh Setup*", "*Global Mesh Size*" e si assegna il valore di 0.002 al massimo elemento; in "*Volume Meshing Parameters*" si seleziona il metodo "*Robust (Octree)*" e si spunta l'opzione del lancio in *batch process*. Si setta infine la periodicità inserendo l'asse di rivoluzione e il valore voluto in gradi.

Sempre nel modulo "*Mesh*" si apre il manager di "*Part Mesh Setup*" e si assegnano le dimensioni massime degli elementi, per ottenere circa 50.000 nodi si settano i valori di 0.0008 per *hub*, *hub\_mov*, *shroud*, *shroud\_mov*, mentre di 0.0012 per *Inflow* e *Outflow*.

Si chiude il manager e si seleziona l'ultimo campo a destra del modulo "*Mesh*", "*Compute Mesh*"; in "*Volume Mesh*" si seleziona il metodo "*Robust (Octree)*" e si lancia il processo.

Fatto questo si seleziona il modulo "*Edit Mesh*", "*Delete Elements*" e si selezionano tutti gli elementi in modo da lasciare il tipo di mesh selezionata solo sulle superfici esterne del corpo. Si affina poi mesh con l'opzione "*Smooth Mesh Globally*", indicando 20 iterazioni

sia per la "quality" che per il "min angle"; il primo valore deve essere superiore a 0,4 e il secondo a 18°.

Si effettua, infine, una seconda meshatura in "Compute Mesh" con il metodo "Quick (Delaunay)" e si esegue in modo analogo a prima l'opera di affinamento.

Nel menù "Info", "Mesh info" si può valutare il numero di nodi della mesh.

Si può salvare e uscire.

6. Si ripetono i passi 4. e 5. per la creazione del condotto di scarico all'uscita del secondo statore.

7. Facendo click con il tasto destro sopra ad uno dei moduli di meshatura precedenti si seleziona l'opzione "Transfer Data to new CFX". Una volta creato il blocco di simulazione è sufficiente trascinare gli altri moduli di mesh sopra a questo per metterli in collegamento.

Nel pre-processor del CFX® si collocano tutte le parti create in precedenza in base alle loro posizioni relative e si impostano le condizioni al contorno. Quando si apre il programma si trovano solamente le parti create direttamente nel progetto Workbench® e nel caso si voglia simulare la macchina completa occorre importare le mesh di girante e adduzione: nel menù "file" si seleziona l'opzione "import mesh". Per posizionare ogni mesh in modo corretto, nell'albero delle features si clicca con il tasto destro sopra la parte di interesse e si seleziona "transform mesh"; nella schermata è possibile trascinare, ruotare e duplicare le mesh. Se si vuole simulare la macchina completa ogni parte deve essere replicata tante volte quanti sono i condotti palari: per esempio in questo caso sei volte la girante e otto lo statore; se, invece, si vuole simulare il condotto singolo non è necessario copiare le parti.

Si definiscono i seguenti domini:

- *A Ingresso*, di tipo stazionario con modello fluido *Shear Stress Transport*.
  - o *A Hub mov*: di tipo *wall*, rotante alla velocità di 2900 rpm;
  - o *A Inflow*, di tipo *Inlet* con portata di massa pari a quella desiderata (9,5 m/s nel punto di progetto);
  - o *A Shr mov*, di tipo *wall*, rotante alla velocità di 2900 rpm.
- *B Girante 1*, di tipo rotante con velocità di 2900 rpm e con modello fluido *Shear Stress Transport*.
  - o *B Blade*: di tipo *wall*;

- *B Hub*: di tipo *wall*;
- *B Shroud*: di tipo *wall*.
- *C Statorico 2*, di tipo stazionario con modello fluido *Shear Stress Transport*.
  - *C Wall fix*, di tipo *wall*;
  - *C Wall mov*, di tipo *wall*, rotante alla velocità di 2900 rpm.
- *D Riconvogliatore 1*, di tipo stazionario con modello fluido *Shear Stress Transport*.
  - *D Blade*: di tipo *wall*;
  - *D Hub*: di tipo *wall*;
  - *D Shroud*: di tipo *wall*.
- *F Girante 2*, di tipo rotante con velocità di 2900 rpm e con modello fluido *Shear Stress Transport*.
  - *B Blade*: di tipo *wall*;
  - *B Hub*: di tipo *wall*;
  - *B Shroud*: di tipo *wall*.
- *G Statorico 4*, di tipo stazionario con modello fluido *Shear Stress Transport*.
  - *C Wall fix*, di tipo *wall*;
  - *C Wall mov*, di tipo *wall*, rotante alla velocità di 2900 rpm.
- *H Riconvogliatore 2*, di tipo stazionario con modello fluido *Shear Stress Transport*.
  - *D Blade*: di tipo *wall*;
  - *D Hub*: di tipo *wall*;
  - *D Shroud*: di tipo *wall*.
- *I Uscita*, di tipo stazionario con modello fluido *Shear Stress Transport*.
  - *I Hub*, di tipo *wall* rotante alla velocità di 2900 rpm;
  - *I Shroud*, di tipo *wall* stazionario;
  - *I Outlet*, di tipo *Opening, Subsonic, Entrainment, Zero Gradient* con pressione relativa di 0 Pa.

Si definiscono poi le seguenti interfacce tra i domini rotanti e statorici:

- *A to B: General Connection, Frozen Rotor, Specified Pitch Angle 360°-360°*;
- *B to C: General Connection, Frozen Rotor, Specified Pitch Angle 360°-360°*;
- *C to D: General Connection*;
- *D to F: General Connection, Frozen Rotor, Specified Pitch Angle 360°-360°*;

- *F to G: General Connection, Frozen Rotor, Specified Pitch Angle 360°-360°;*
- *G to H: General Connection;*
- *H to I: General Connection.*

Nell'albero delle *features* si possono settare sotto la voce "*expression*" alcune espressioni utili come il numero di giri, la pressione in ingresso e in uscita dalle due giranti.

Nella sezione "*solver*", su "*Solver Controls*" si impostano le condizioni *High Resolution* sia per la turbolenza che per *Advection Scheme*, un numero massimo di iterazioni pari a 600 e i valori massimi dei residui a  $10e-4$ . Sotto "*Output Controls*", "*Backup*" è consigliabile inserire 50 iterazioni per il salvataggio automatico durante le iterazioni.

Completate queste operazioni si salva e si esce.

8. Sempre nel modulo *CFX* si entra nel solutore e si impostano i valori di *double precision* nel caso (consigliato) di lanciare la simulazione con più di un processore.

9. Una volta terminata l'analisi nel post-processore è possibile visualizzare i risultati.

Per macchina completa e condotto singolo a due stadi i dati possono essere elaborati utilizzando il file *.cst* chiamato *Completo2.cst*



## Note

1. Kennedy, J.; Eberhart: 1995, "*Particle Swarm Optimization*", *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*. IV. pp. 1942–1948.
2. Shi, Eberhart, "*Parameter Selection in Particle Swarm Optimization*", *In Proceedings of the Fourth World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization 2001*, Dahlian, China] [Shi, Eberhart, "*A Modified Particle Swarm Optimizer*", *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, pp 69-73, Piscataway, NJ, IEEE Press May 1988.
3. Feromone:
4. V. Kalivarapu, E. Winer, "*Implementation of Digital Pheromones in Particle Swarm Optimization for Constrained Optimization Problems*", Iowa State University, Ames, A, 50011, Usa.
5. Operatore usato negli principalmente negli algoritmi genetici per scegliere potenziali soluzioni da ricombinare. Ad ogni individuo è associata una certa probabilità di scelta derivante dal valore della sua funzione obiettivo e con un vettore di numeri random si selezionano inizialmente due genitori; sempre con la tecnica a roulette viene scelta una porzione del loro cromosoma genetico e mescolato.





## Bibliografia

- V. Kalivarapu, E. Winer, *“Implementation of Digital Pheromones in Particle Swarm Optimization for Constrained Optimization Problems”*, Iowa State University, Ames, A, 50011, Usa.
- K. Socha, M. Dorigo, *“Ant colony optimization for continuous domains”*, IRIDIA, Université libre de Bruxelles, 2006.
- Zhi-Hun Han, Jun Zhang, Yun Li, Henry Shu-Hung Chung, *“Adaptive Particle Swarm Optimization”*, IEEE, 2009.
- Wei-Neg Chen, Jun Zhang, Ying Lin, Ni Chen, Zhi-Hui Zhan, Henry Shu-Chung, Yun Li, Yu-Hui Shi, *“Particle Swarm Optimization with an Aging Leader and Challengers”*, IEEE, 2013.
- P. N. Suganthan<sup>1</sup>, N. Hansen<sup>2</sup>, J. J. Liang<sup>1</sup>, K. Deb<sup>3</sup>, Y. -P. Chen<sup>4</sup>, A. Auger<sup>2</sup>, S. Tiwari<sup>3</sup>, *“Problem Definitions and Evaluation Criteria for the CEC 2005 Special Session on Real-Parameter Optimization”*, Singapore, maggio 2005.
- “Corso di Macchine”, G. Ventrone, ed. Cortina.
- “Dispense di macchine 2”, Guido Ardizzon.
- Materiale del corso di “Metodi avanzati per l’ottimizzazione delle macchine”, Ernesto Benini.
- Guida di Workbench®.



## Ringraziamenti

Questo elaborato costituisce la sintesi di un lavoro che si pone come la naturale conclusione di un percorso universitario durato cinque anni e che nel suo piccolo riassume tutto quello che questi anni hanno significato.

Non sono mancate, infatti, le difficoltà e i momenti in cui alcuni ostacoli al proseguimento sono sembrati insormontabili; tuttavia la volontà e l'interesse per gli argomenti analizzati mi hanno permesso di svolgere questo lavoro con passione e senso critico e di raggiungere un obiettivo significativo dal punto di vista professionale.

Ringrazio, innanzitutto, la mia famiglia e tutti gli amici che mi hanno sostenuto in questo lungo percorso e che hanno saputo accettare alcune rinunce e sopportare alcuni momenti in cui gli impegni e le necessità non permettevano dei momenti di svago.

Ringrazio, inoltre, il professor Guido Ardizon, la professoressa Giovanna Cavazzini e l'ing. Filippo Costaganna per avermi permesso di svolgere un lavoro di tesi che tratta di argomenti di mio fortissimo interesse e di approfondire in maniera significativa alcuni aspetti trattati in maniera marginale durante i normali corsi universitari; li ringrazio soprattutto per i consigli e il supporto durante la preparazione del lavoro.

Infine, un ringraziamento particolare a me stesso per essere stato capace di svolgere tutto questo con il massimo impegno e la serietà che da sempre mi hanno contraddistinto; in qualunque modo questa avventura si concluda dentro di me so di aver già vinto, perché dopotutto vincere è l'unica cosa che conta.

*Alex Schiavon*

