

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA



Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale

**OTTIMIZZAZIONE STRUTTURALE DI UNA PALA
DI ROTORE EOLICO DA 100 kW**

Relatore

Prof. Ugo Galvanetto

Correlatore

Prof. Ernesto Benini

Laureando

Andrea Mattara

ANNO ACCADEMICO 2013/2014

RINGRAZIAMENTI

Volevo ringraziare i professori Galvanetto e Benini per avermi dato quest'opportunità, permettendomi di sviluppare un mio progetto, dandomi fiducia e sostenendomi nelle difficoltà impreviste che ho incontrato. Un ringraziamento obbligato anche all'ingegner Dipasquale per il supporto tecnico, senza il quale non sarei riuscito a portare a compimento la mia tesi. Infine la mia gratitudine va alla mia famiglia e a Mirka per avermi aiutato così tanto in tutti questi anni permettendomi di raggiungere questo traguardo per me così importante.

Indice

1) Introduzione	Pg. 6
2) Sistemi Eolici	Pg. 8
2.1) Cenni sull'evoluzione delle turbine eoliche	
2.2) La risorsa eolica: caratteristiche, tipologie e sfruttamento	
3) Pala in Esame	Pg.17
4) Modello di Calcolo	Pg.25
4.1) Introduzione al modello	
4.2) Calcolo delle proprietà delle sezioni	
4.3) Carichi applicati e calcolo delle tensioni	
5) Algoritmi Genetici	Pg.38
6) Parametrizzazione	Pg.43
7) Processi di Ottimizzazione	Pg.48
8) Conclusioni e Sviluppi Futuri	Pg.54
9) Indice delle Figure	Pg.55
10) Appendice A	Pg.57
11) Appendice B	Pg.64
12) Bibliografia	Pg.77

1 Introduzione

Scopo di questo scritto è presentare un modello realizzato interamente in ambiente MATLAB che attui la simulazione strutturale di una pala di turbina eolica dalla potenza nominale di 100 kW realizzata in materiale omogeneo ed isotropo.

Successivamente questo modello costituirà la base per l'attuazione di un processo di ottimizzazione della pala stessa volto ad massimizzare (o minimizzare) alcune caratteristiche della pala in esame come ad esempio la massa o la resistenza strutturale.

Saranno investigate sia diverse parametrizzazioni che diverse funzioni obiettivo con lo scopo di realizzare uno strumento di analisi e progettazione preliminare alternativo all'analisi ad elementi finiti che unisca una notevole rapidità di esecuzione ad una facilità di personalizzazione da parte dell'utente.

Nel secondo capitolo verranno esposti i punti principali dell'evoluzione delle turbine eoliche e alcune caratteristiche fondamentali della risorsa nonché l'incidenza anche economica della produzione energetica relativa al settore.

Nel terzo capitolo verrà presentata la pala di rotore eolico che costituisce l'oggetto d'analisi di questo scritto. Saranno presentate le caratteristiche geometriche basilari che ne definiscono la forma esterna ed inoltre la composizione strutturale prevista all'interno. Sarà compresa inoltre una panoramica delle caratteristiche globali dell'impianto di riferimento di cui la pala studiata fa parte. Nel quarto capitolo viene presentato il modello di calcolo che sta alla base di questo scritto.

Vengono qui affrontate le procedure necessarie ad arrivare al calcolo delle proprietà della pala studiata come l'area di sezione, la posizione dei centri di massa ed i momenti di inerzia per arrivare al valore della massa della pala eolica. Inoltre sarà esposto il modello che permette di ricavare a partire dai carichi le tensioni presenti in essa.

Il quinto descriverà l'algoritmo genetico utilizzato esponendo le caratteristiche fondamentali che lo distinguono. Ci si soffermerà sui meccanismi fondamentali relativi al concetto di individuo e di cromosoma, passando per i meccanismi utilizzati per la selezione, riproduzione e mutazione per poi finire con i procedimenti necessari per mantenere un'adeguata diversità nelle soluzioni.

Il sesto esporrà la modalità in cui le variabili del problema di ottimizzazione vengono gestite. Nello specifico vengono riportati procedimenti necessari per ridurre drasticamente il numero di variabili coinvolte senza però togliere generalità alla soluzione. Questo avviene principalmente tramite delle curve di Bézier.

Il settimo capitolo saranno presentati i risultati del processo di ottimizzazione portato a termine, esponendo sia il tipo di variabili che metodo di trattamento delle stesse nel modello. Saranno introdotte le condizioni di vincolo, sia funzionali che laterali, presenti.

L'ottavo capitolo si occupa di concludere il tema presentato riassumendone le caratteristiche e fornendo numerosi spunti per eventuali prosecuzioni future di questo progetto.

Nelle due appendici finali sono poi contenuti i listati dei programmi utilizzati nelle elaborazioni al computer nonché i dati di input necessari per inizializzare le simulazioni.

2 Sistemi Eolici

2.1 Cenni sull'evoluzione delle turbine eoliche

Le macchine eoliche assieme a quelle idrauliche sono state tra le prime forme di attuazione meccanica che hanno permesso all'umanità di slegare la produzione di lavoro (e successivamente di energia) dal mero sforzo manuale di uomini od animali.

Sebbene non vi siano documentazioni universalmente accettate al riguardo, esistono tuttavia delle tracce dell'utilizzo della risorsa eolica già nella civiltà Babilonese (~700 a.C.) ed in quella Indiana (~400 a.C.).

Purtroppo non è chiaro se questi progetti siano stati poi effettivamente messi in opera ma la prima inconfutabile presenza di macchine che sfruttino l'energia del vento è data dai numerosi mulini costruiti in Europa nel XIII secolo.

Si trattava di macchine molto popolari e diffuse nel territorio, erano ad asse orizzontale e costituiti di una struttura fissa di supporto alla base sulla quale si ergeva una porzione superiore in grado di ruotare per seguire la direzione del vento e che alloggiava il rotore.

I materiali coinvolti erano chiaramente quelli di maggior disponibilità all'epoca ovvero mattoni e legno (per le parti inferiori e superiori) mentre porzioni di stoffa facenti la funzione di vele completavano la struttura.



Figura 2.1 Antico mulino Inglese

Sebbene queste applicazioni fossero piuttosto rozze rispetto agli attuali sviluppi tecnologici è notevole lo sviluppo a cui queste macchine sono state soggette, infatti già in simili costruzioni vengono previste soluzioni tecniche quali la rastremazione e lo svergolamento delle pale in prossimità dell'estremità per ottimizzarne l'efficienza aerodinamica.

In questo stadio d'evoluzione tecnologica le strutture erano principalmente destinate al pompaggio dell'acqua o alla macinazione di cereali ed è obbligatorio ricordare alcune tappe successive particolarmente significative che hanno portato il settore dello sfruttamento dell'energia eolica ai livelli attuali.

La prima da considerare è quella caratterizzata dall'enorme diffusione negli Stati Uniti di quello che è stato poi soprannominato il "multipala americano".



Figura 2.2 Mulino multipala americano

Sebbene il diametro piuttosto ridotto (solitamente alcuni metri), veniva utilizzato per il pompaggio di acqua nei terreni agricoli e ne vennero costruite e commercializzate numerose varianti che nel complesso costituirono milioni di turbine installate nella metà del XVII secolo.

Per arrivare alle prime applicazioni di produzione di energia elettrica si deve aspettare i primi anni del 1900, i primi modelli messi in opera di progettazione danese raggiungevano la potenza di 5 kW e sebbene inizialmente servissero per approvvigionare insediamenti isolati si diffusero via via moltiplicandosi sul territorio.

In questo periodo si sono moltiplicate le iniziative da parte di diverse organizzazioni a livello globale mirate ad espandere la conoscenza riguardo alle turbine eoliche generando sia notevoli incrementi nella produzione di potenza che un gran numero di soluzioni tecniche tra le più svariate, anche per rispondere alle necessità dettate sia dal mercato sia dall'impellente e variegata attività impiegata nello sviluppo di queste macchine.

Tra i più notevoli sviluppi del periodo si possono notare sia alcuni strumenti di regolazione della potenza prodotta, come la regolazione del “pitch” della pala per mantenere costante la velocità di rotazione della pala al variare delle condizioni del vento ma soprattutto l’introduzione di modelli di nuova concezione tuttora in uso come la turbina Darrieus e la Savonius.

Entrambe portano il nome del rispettivo inventore e sono macchine ad asse verticale, tuttavia il principio di funzionamento è diametralmente opposto infatti mentre la prima sfrutta la forza aerodinamica di portanza che si genera sulla pala la seconda si affida alla resistenza aerodinamica generata dalla presenza della parete curva.

Nella seconda metà del XX secolo in particolare si sono succedute notevoli migliorie tecnologiche in questo campo come l’introduzione delle prime pale in fibra di vetro o il graduale ma costante aumento tanto delle dimensioni che delle potenze delle macchine installate, tuttavia queste soluzioni non garantivano ancora la produzione di energia a prezzi concorrenziali rispetto le altre fonti energetiche tradizionali.

Questa situazione però mutò con la crisi energetica del 1973 col conseguente innalzamento del costo del petrolio, in seguito alla quale sia ingegneri che legislatori dovettero rivalutare l’importanza dell’energia eolica, portando così al proliferare di studi riguardanti svariati aspetti come: modellazione della risorsa, tecniche di riduzione dei costi ed integrazione nella rete, sviluppi delle strutture e delle modalità di costruzione.

Proprio in seguito a questi eventi si venne a creare interesse presso la NASA per l’argomento iniziando così un programma di durata trentennale che ebbe origine con il modello MOD-0.



Figura 2.3 Turbina MOD-0

Operativa negli anni 1975-1982 questa turbina integrava in sé lo stato dell’arte delle conoscenze in campo dei materiali, della sensoristica e dell’aerodinamica e generava una potenza pari a 100 kW.

Oltre a questa pietra miliare dell'energia eolica, che fornì una buona base per successive esperienze nell'ambito di turbine di grandi dimensioni, il programma ha avuto in seguito molti altri successi tra cui la produzione (solo quattro anni dopo lo sviluppo della MOD-0) della seconda installazione con potenza superiore al megawatt.

Table 5.1 Specifications of ERDA and DOE				
Two-Bladed Horizontal-Axis Wind Turbines				
	MOD-0	MOD-0A	MOD-1	MOD-2
Rotor r/min	40	40	34.7	17.5
Generator output power (kW)	100	200	2000	2500
Rotor coefficient of performance, $C_{P \max}$	0.375	0.375	0.375	0.382
Cut-in wind speed at hub height (m/s)	4.3	5.4	7.0	6.3
Rated wind speed at hub height (m/s)	7.7	9.7	14.6	12.4
Shutdown wind speed at hub height (m/s)	17.9	17.9	19.0	20.1
Maximum wind speed (m/s)	66	67	66	66
Rotor diameter (m)	37.5	37.5	61	91.5
Hub height (m)	30	30	46	61
Coning angle	7°	7°	12°	0°
Effective swept area (m ²)	1072	1140	2920	6560
Airfoil section, NACA-	23,000	23,000	44XX	230 XX
Weight of two blades (kg)	2090	2090	16,400	33,200
Generator voltage, line to line	480	480	4160	4160

Tabella 1 Specifiche delle turbine eoliche NASA

Anche grazie a questi risultati si è visto negli anni successi l'affermarsi nel campo delle turbine eoliche ad asse verticale (HAWT nella letteratura anglofona) del cosiddetto modello "danese" che attualmente è quello più facilmente riconoscibile.

L'utilizzo di due sole pale è stato via via abbandonato in favore della configurazione classica con tre, inoltre è stata abbandonata la disposizione del rotore a valle della torre, diminuendo così le irregolarità nel flusso d'aria che la pala incontra percorrendo una rivoluzione attorno al mozzo generando così minor rumore e trasmettendo inoltre minori vibrazioni alla struttura.

La torre stessa di supporto ha vissuto notevoli trasformazioni infatti si è passati dalle ingombranti e poco efficienti strutture reticolari alle più snelle installazioni tubolari che riducono grandemente l'effetto di bloccaggio del flusso d'aria inoltre l'utilizzo di materiali innovativi come i materiali compositi insieme a nuovi processi di formatura quali l'infusione di resina a vuoto hanno portato alla creazione di soluzioni commerciali il cui diametro del rotore arriva ad oggi sui 120 metri. In parallelo con la aumento di dimensioni delle strutture si è assistito anche ad un elevarsi della potenza prodotta.

Sono ad oggi presenti modelli, utilizzati spesso in installazioni off-shore, dalla potenza pari ad 8 MW.

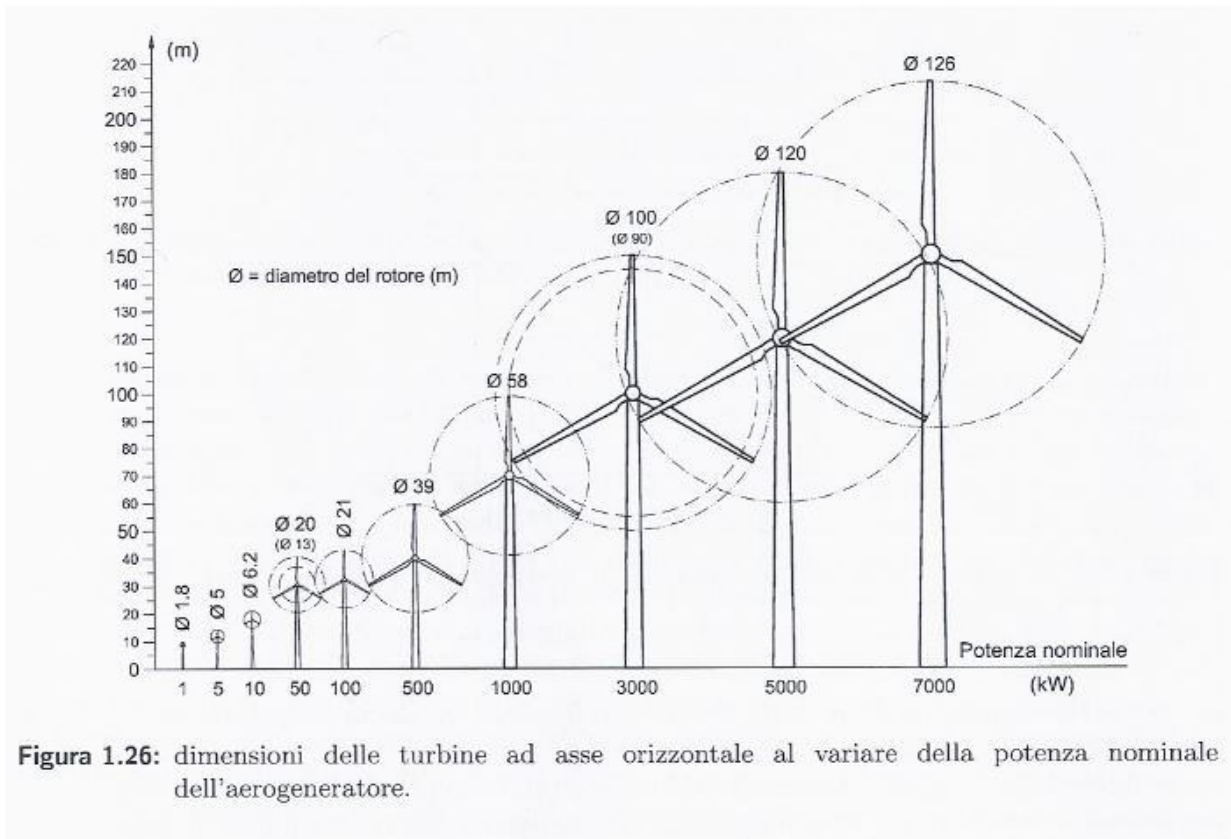


Figura 1.26: dimensioni delle turbine ad asse orizzontale al variare della potenza nominale dell'aerogeneratore.

Figura 2.4 Correlazione tra diametro del rotore e potenza prodotta

2.1 La risorsa eolica: caratteristiche, tipologie e sfruttamento

In questa sezione saranno presentati alcuni aspetti generali della risorsa eolica come: impatto presente e previsto sul territorio italiano dell'energia eolica.

In primo luogo questa è una delle fonti di energia rinnovabile ovvero una delle fonti energetiche che vengono fornite dal pianeta il cui sfruttamento non va ad intaccarne le risorse né i bilanci energetici, ha anche altre proprietà che la caratterizzano come la concentrazione. Infatti la quantità di energia che può essere resa disponibile per metro quadrato di macchina è molto ridotta rispetto ad altre fonti. L'energia eolica assieme a quella solare è una fonte a bassissima concentrazione infatti se l'eolico riesce a raggiungere i 2 kW/m^2 il solare si assesta generalmente sui 220 W/m^2 e questi, per confronto, sono valori che si discostano molto da altre modalità di produzione di energia: ad esempio l'energia idraulica può raggiungere la concentrazione di 5 MW/m^2 di macchina ma questo è da valutare nell'ottica dell'assenza nel caso delle macchine eoliche di apparati o impianti volti a concentrare ed indirizzare opportunamente il flusso nella macchina.

Un altro fattore rilevante è quello relativo all'inquinamento, le fonti rinnovabili infatti non producono inquinamento termico o chimico, non essendo coinvolte combustioni, ma sono presenti alcuni punti principali che sono deterrenti all'installazione di queste macchine: inquinamento sonoro dovuto al rumore generato nella rotazione delle pale, inquinamento visivo, dovuto all'impatto visuale che specie le installazioni di grandi dimensioni possono generare e i danni collegati all'interazione con la fauna avicola.

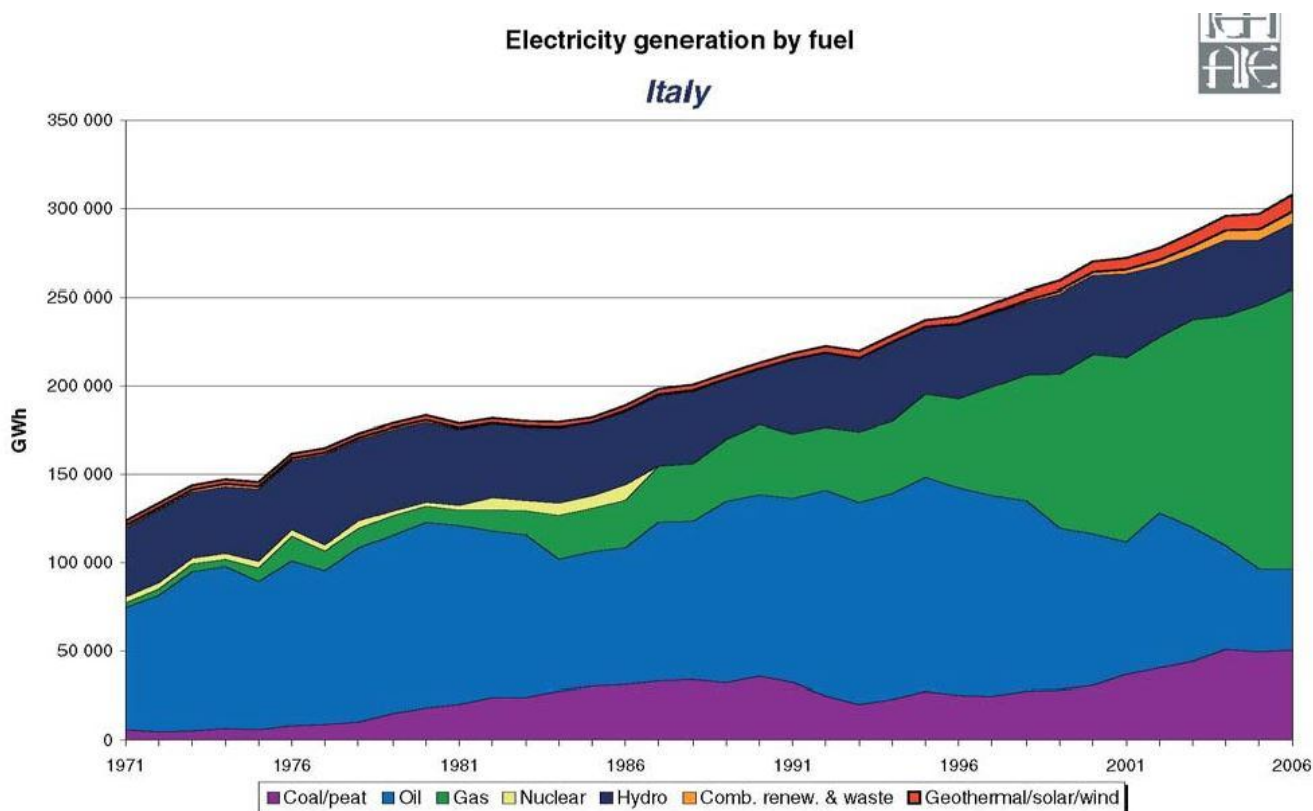


Figura 2.5 Fonti di produzione energia elettrica in Italia

Un ulteriore aspetto da considerare è quello legato all'irregolarità della risorsa oltre che alla non accumulabilità della stessa.

Diversamente da quanto risulta possibile grazie ai bacini per l'energia idraulica con l'eolico è d'obbligo lo sfruttamento della risorsa solo quanto questa è disponibile (come per il solare) e di conseguenza si rende molto difficile se non impossibile per questa fonte di energia seguire la domanda energetica dell'utenza nel suo variare nel tempo.

La non regolarità del vento inoltre è insita nella sua natura, sebbene con una prolungata ed estensiva raccolta di dati sul sito interessato sia facile riconoscere la direzione e l'intensità in cui il flusso d'aria soffi più probabilmente non vi è mai la certezza che queste condizioni si verifichino sempre in tutta la durata di esercizio della turbina.

Tanto è vero che a differenza di molte altre macchine motrici in una turbina eolica viene identificata una condizione nominale di funzionamento cui di solito opera solo per periodi che non superano il 15% del totale mentre raggiunge la potenza massima solo tra l' 1-10% del tempo di funzionamento.

Sebbene questi ultimi punti non vadano a favore dell'energia eolica si può sottolineare come questa risorsa, di concerto con le altre fonti rinnovabili, sia di grande importanza per esempio in un paese come l'Italia in cui vengono importate il 13% del fabbisogno di energia elettrica e ben l' 80% delle materie prime necessarie alla sua produzione.



Figura 2.6 Potenza eolica installata sul territorio nazionale

Considerando infatti che nel solo anno 2010 per sopperire a questa importazione è stata necessaria una spesa pari a 51,7 miliardi di euro si può vedere come l'affermarsi in questo campo sia importante per ridurre non solo le emissioni inquinanti ma anche per aumentare la sicurezza energetica del paese riducendone la dipendenza dall'estero ed evitando la fluttuazione dei prezzi ma anche contribuendo a migliorare la bilancia commerciale del Paese garantendo altresì sviluppo occupazionale ed innovazione tecnologica.

Questi motivi, assieme al costo di produzione che è il più basso tra le rinnovabili, spiega l'esplosione che il settore ha avuto già nel triennio 2008-2010 in cui sono stati installati in Italia impianti per una potenza pari a 3100 MW, attestandosi sostanzialmente alla metà delle nuove installazioni in campo rinnovabile.

Significativo inoltre è come la taglia media delle macchine installate in Italia nel 2003 era di appena 560 kW di potenza per unità, mentre ad oggi la taglia media delle turbine che vengono installate è di 2,5 MW.

Risulta significativo fornire alcune precisazioni relative alla natura della risorsa eolica, come si vede nella figura sottostante, questa è ben più consistente in determinate aree del sud Italia, specie al largo delle due isole maggiori.

Allo stesso tempo però si deve ricordare che esistono aree in cui, per speciali condizioni orografiche e di microclima in cui esiste una buona ventosità.

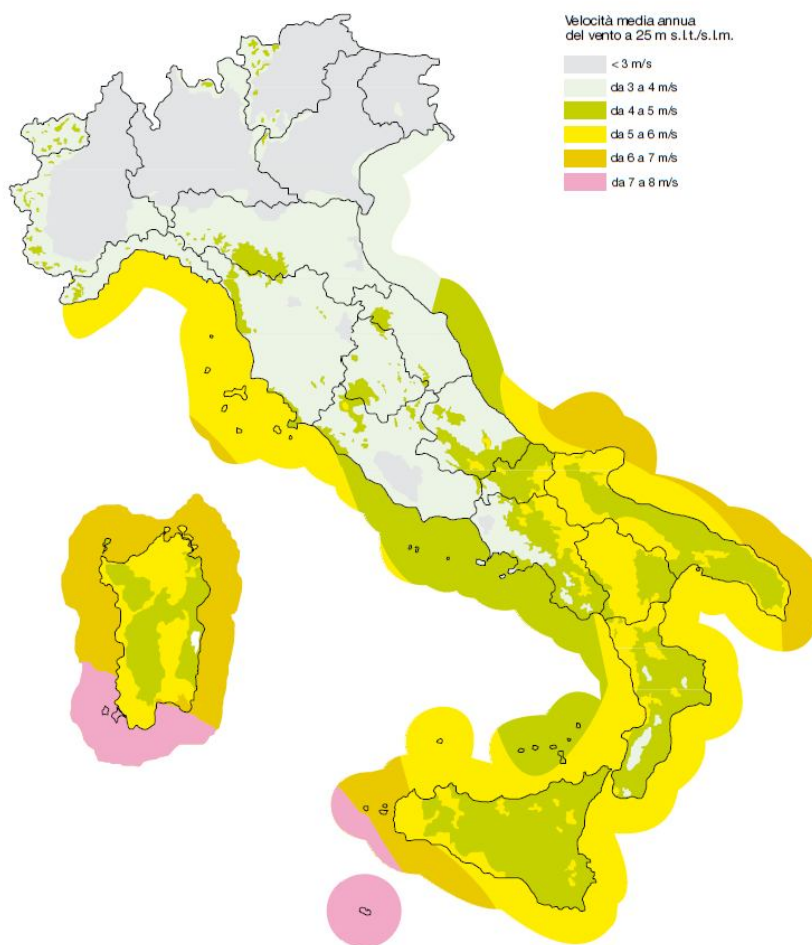


Figura 2.7 Atlante Eolico italiano

Questo oltre a riprendere fedelmente la distribuzione delle zone con maggior potenza installata indica che la convenienza risiede nel sostenere la costruzione di nuovi impianti di tipologia off-shore.

Questi impianti posti anche a chilometri dalla linea di costa beneficiano di notevoli vantaggi rispetto a quelli posti nell'entroterra: innanzitutto godono di ventosità maggiori e ma è molto importante anche la facilità nella scelta di un sito adatto, questo essendo presenti molte meno preoccupazioni riguardo all'eventuale impatto visuale delle turbine o altri vincoli relativi alla costruzione di macchine di grandi dimensioni.

Questo insieme alla tendenza di costruire in zone limitrofe un assieme di turbine (detto wind farm) riesce a ridurre costi come quello di installazione ed allacciamento ed è una delle due direzioni più interessanti in cui il settore dell'eolico si sta muovendo.

Degno di nota è anche un campo diametralmente opposto cioè quello delle turbine utilizzate nella microgenerazione. La dimensione molto ridotta ne permette la messa in opera e successiva manutenzione in contesto urbano con estrema facilità oltre ad essere una forma di approvvigionamento valida non solo per utilizzatori non connesse alla rete elettrica ma anche per integrare i consumi effettuati da utenze domestiche rendendole autosufficienti.

3 Pala in Esame

Verrà ora presentata la pala di rotore eolico che costituisce l'oggetto di investigazione di questa tesi. Come già menzionato si tratta di una pala appartenente ad una turbina eolica ad asse orizzontale il cui rotore ha diametro esterno pari a 24m, altre caratteristiche primarie sono la lunghezza delle pale che ammonta a 9,5m e la potenza nominale della macchina equivalente a 100 kW.

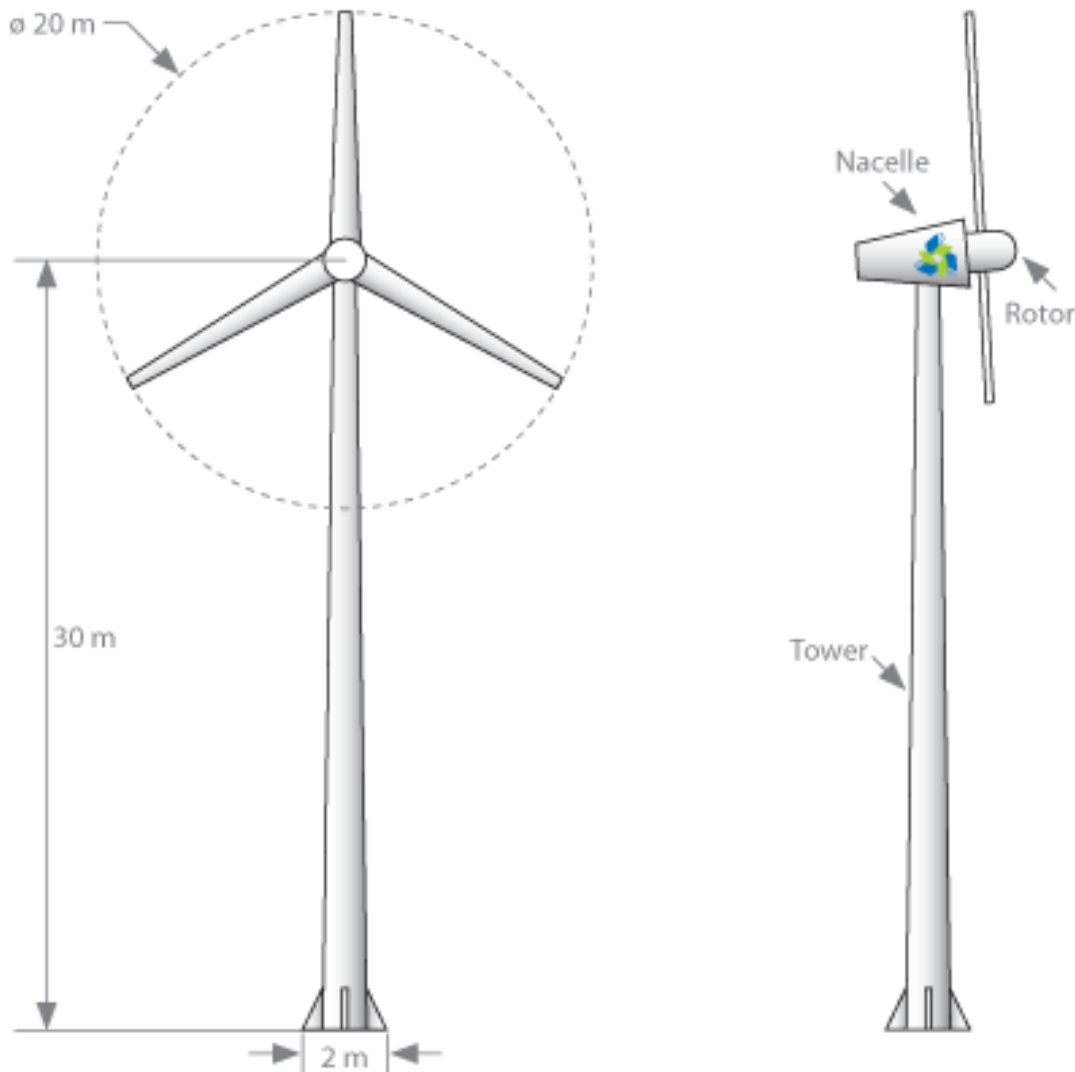


Figura 3.1 Schema di una turbina eolica analoga a quella studiata

La dimensione della turbina rapportata alla potenza prodotta la colloca tra le macchine di piccola taglia infatti:

$$\text{Potenza Specifica} = \frac{P_n}{A_{\text{rotore}}} = 0.22 \quad (1)$$

Questa pone in relazione l'area compresa entro il diametro esterno della pala (cioè l'area spazzata da essa) con la potenza nominale della turbina.

Come si può vedere dalla tabella sottostante questo valore è inferiore a quello che divide le macchine di piccola da quelle di media taglia.

IMPIANTO MOTORE	Potenza specifica [kW/m ²]
Eolico di piccola taglia	0,1 ÷ 0,25
Eolico di media taglia	0,2 ÷ 0,3
Eolico di grande taglia	0,3 ÷ 0,5
Turbina per camino solare	1,0 ÷ 2,0
Ruota idraulica	1,2 ÷ 20
Turbina idraulica	2 ÷ 12 · 10 ³

Tabella 2 Distinzione turbine in base alla potenza specifica

Si possono esporre poi alcune grandezze relative all'esercizio di questa macchina:

- Velocità di cut-in 4m/s
- Velocità di cut-out 25m/s
- Velocità nominale 15 m/s

Questa macchina inoltre è fornita di un sistema di regolazione; questo serve a massimizzare la produzione energetica mantenendo il funzionamento dei diversi componenti della turbina entro i limiti di velocità e di carico ma anche per prevenire i carichi estremi (carichi transitori compresi), inoltre per fornire un'adeguata qualità della potenza immessa in rete.

Tutto questo è svolto con il fine ultimo di garantire il funzionamento sicuro della turbina.

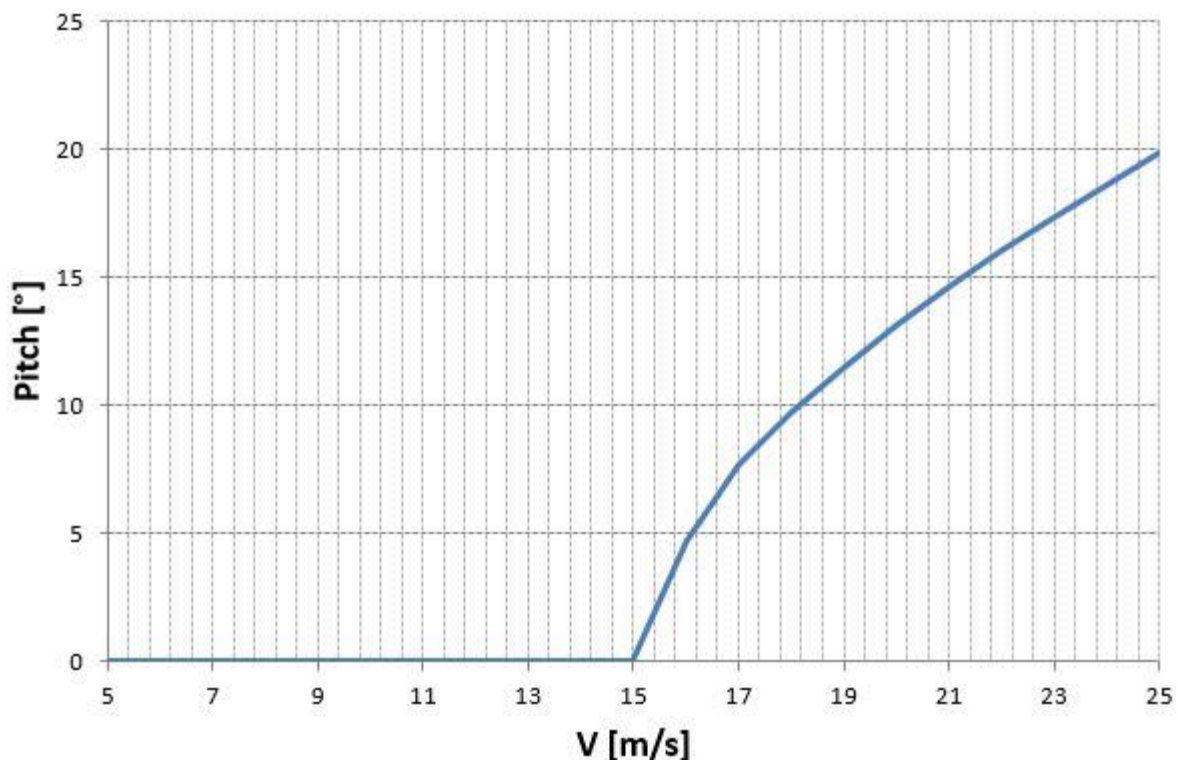


Figura 3.2 Regolazione dell'angolo di pitch al variare della ventosità

Generalmente i sistemi di regolazione sono distinti in:

- Regolazione dello stallo
- Regolazione di Pitch

Il primo solitamente non fornisce un sistema di controllo attivo, oltre all'utilizzo di freni meccanici, e si basa sul principio per il quale all'aumentare della velocità del vento incidente una pala in rotazione ad una velocità fissa vede aumentare l'angolo d'attacco delle pale che una volta superato un valore critico specifico per ogni profilo aerodinamico genera un distacco di vena ovvero lo stallo e questo limita la potenza a livelli accettabili.

Il secondo invece viene applicato su turbine eoliche a velocità sia fissa che variabile e realizza il controllo della potenza estratta dal fluido variando l'angolo di pitch delle pale cioè ruotandole attraverso un meccanismo dedicato attorno al loro asse longitudinale.

Solitamente per velocità del vento inferiori a quella nominale l'angolo di pitch resta fisso e si opera con velocità variabile del rotore. In seguito con l'aumentare della velocità del vento e il raggiungimento della velocità nominale viene azionato il meccanismo di rotazione in modo tale da controllare la potenza in uscita mantenendola al valore nominale ma anche per controllare la velocità del rotore facendo in modo che si mantenga (entro i limiti accettabili) nell'intorno della velocità nominale.

Inoltre è possibile effettuare un'ulteriore regolazione durante le raffiche di vento, infatti la potenza generata è mantenuta costante mentre la velocità del rotore aumenta.

Questo aumento transitorio di energia del vento viene accumulato nella macchina sotto forma di incremento dell'energia cinetica del rotore. In modo opposto se la velocità del vento crolla improvvisamente, la riduzione della coppia aerodinamica fa decelerare il rotore e la potenza generata viene mantenuta comunque costante attraverso l'energia cinetica accumulata nel rotore.

Nel caso in cui la velocità del vento si mantenga elevata, l'angolo di Pitch viene variato per ridurre l'efficienza aerodinamica con il risultato di ridurre la velocità del rotore ed in casi estremi anche portare le pale "in bandiera" in modo tale da fornire la massima sicurezza in caso di ventosità estrema.

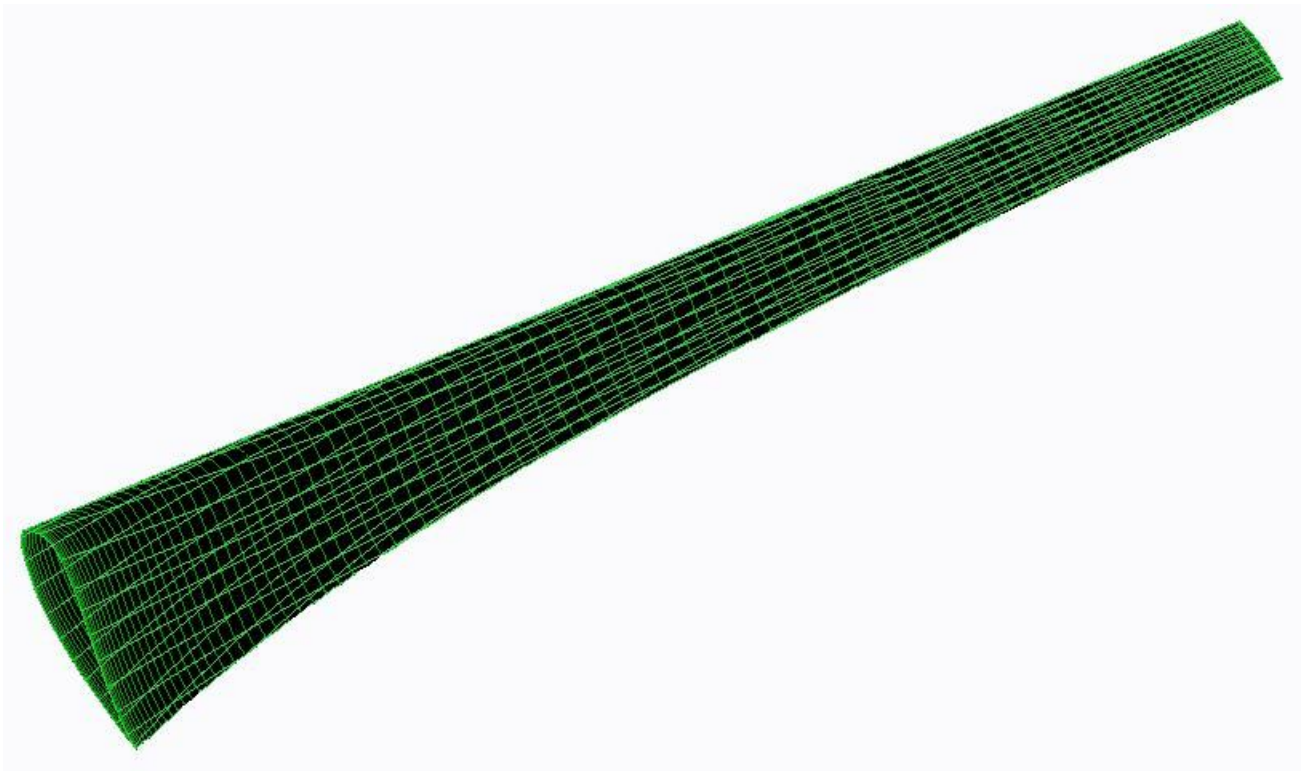


Figura 3.3 Modello tridimensionale della pala

La figura precedente anticipa la forma della pala studiata che, come in effetti avviene nella realtà, è generata da una distribuzione continua e fluida di profili uno contiguo all'altro.

Tuttavia questo è generato a partire da una sequenza discreta di valori di corda e di twist di un numero limitato di sezioni, per la precisione 100, che si susseguono a partire dal mozzo fino all'estremità della pala.

Ecco ora riportati gli andamenti di queste due grandezze:

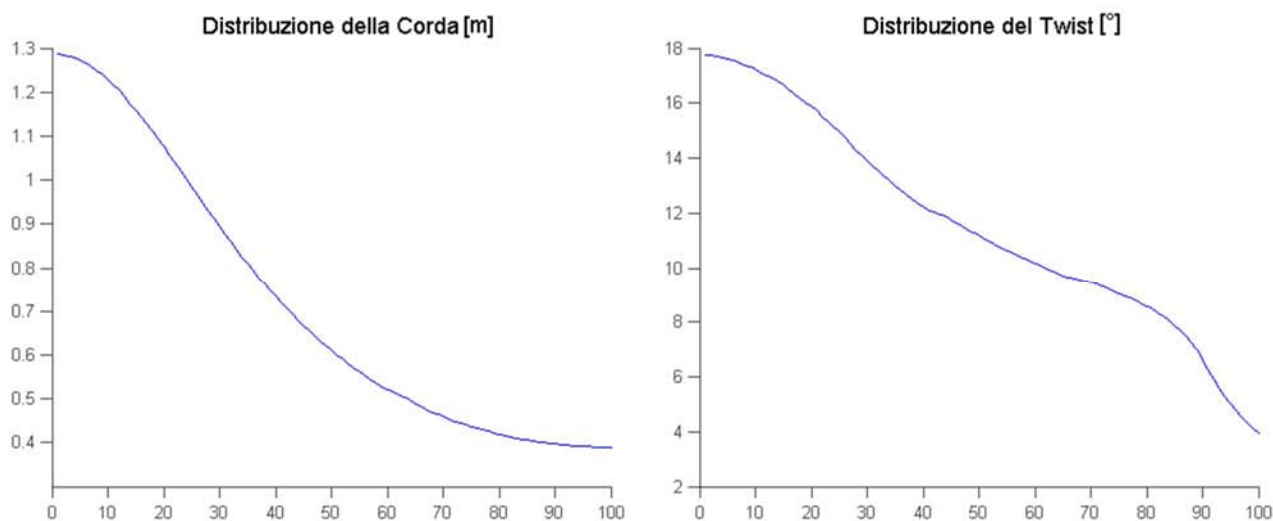


Figura 3.4 Andamento di corda ed angolo di svergolamento nelle sezioni considerate

Risulta immediatamente visibile come la pala si assottigli partendo da valori di corda superiori ai 120 cm al mozzo fino a poco meno di 40 cm al tip. Per quanto riguarda l'angolo di twist si vede come in effetti era logico aspettarsi che allontanandosi dalla radice della pala emergesse la necessità di ruotare i profili in modo sempre più marcato così da preservare l'angolo ottimale di incidenza della sezione.

Come è già stato accennato la pala è composta da un numero finito di sezioni e queste a loro volta non differiscono unicamente per le diverse corde o angoli di calettamento ma esistono nel complesso tre differenti profili aerodinamici che si avvicinano uno dopo l'altro proseguendo lungo la lunghezza della pala.

Il primo profilo utilizzato è l'S823. Questo profilo comprende il primo terzo di sezioni più prossime al mozzo.

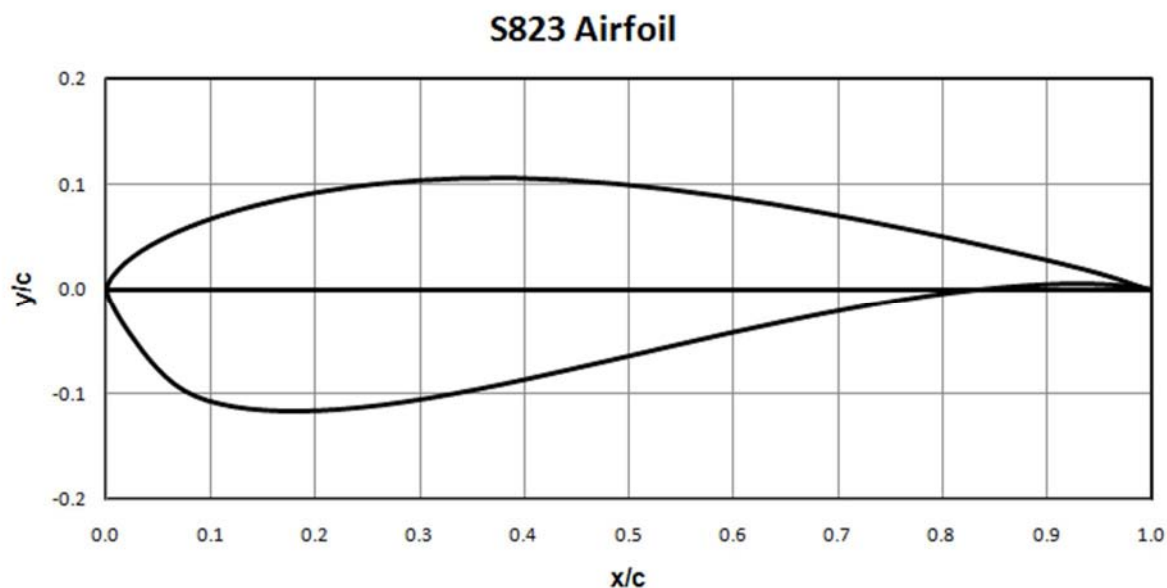


Figura 3.5 Profilo S823

Per la porzione centrale della pala invece si è fatto uso di un profilo simile l'S821.

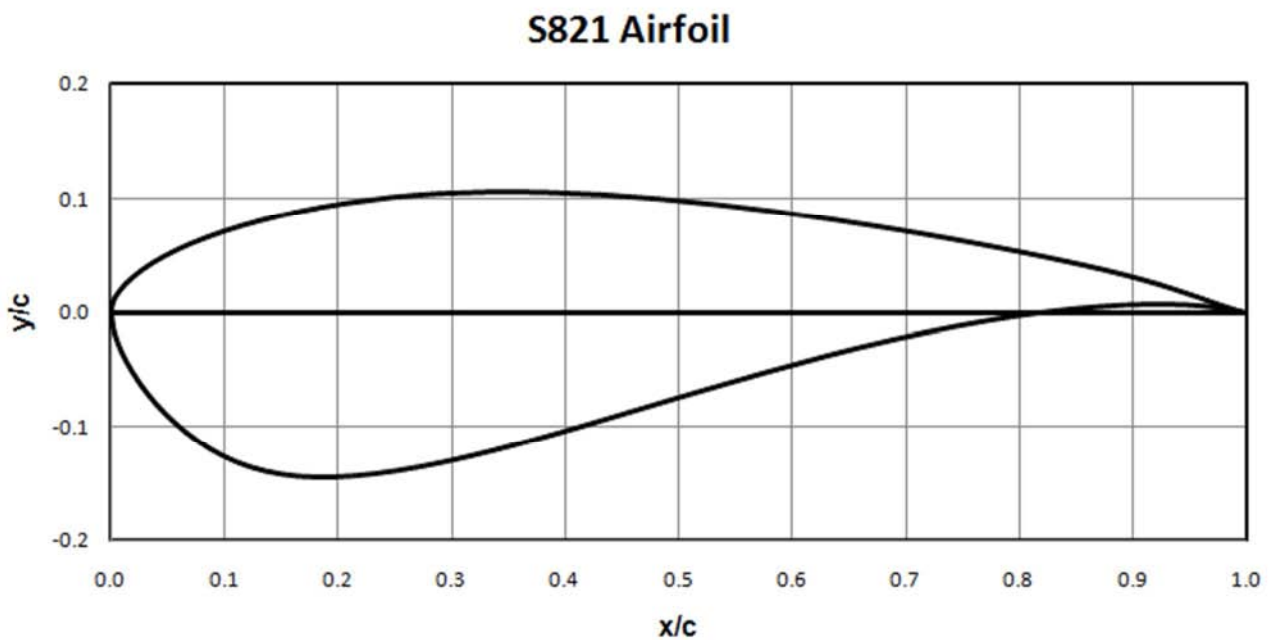


Figura 3.6 Profilo S821

Invece per la sezione relativa al terzo più esterno della struttura la scelta è caduta sul S820

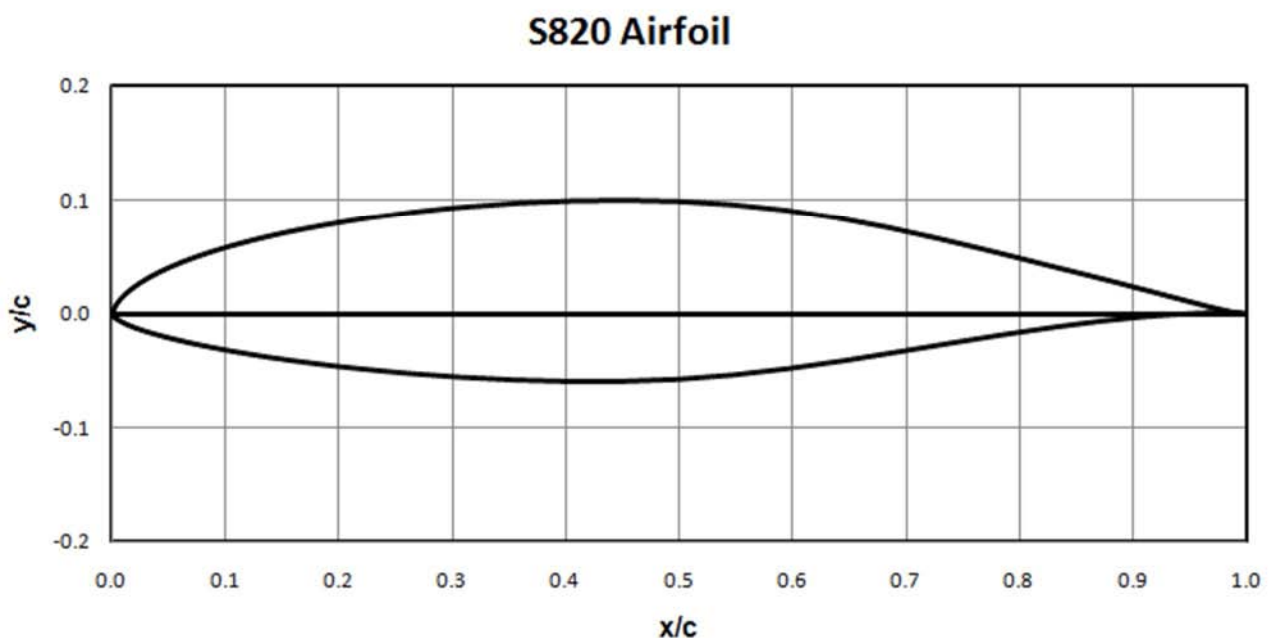


Figura 3.7 Profilo S820

Questi profili sono stati sviluppati specificatamente per l'utilizzo in turbine eoliche con rotore di diametro compreso tra i 20-40 metri e sono stati ricavati in base ad un processo di analisi ed ottimizzazione volto a massimizzare principalmente due obiettivi: limitare il coefficiente di

portanza al tip della pala a valori il più prossimi possibile al valore di 1.00 e in modo opposto cercando di ottenere il valore massimo possibile dello stesso coefficiente nella sezione al mozzo. Il secondo obiettivo invece consisteva nel mantenere bassi coefficienti di resistenza aerodinamica nel campo in cui i profili generassero un coefficiente di portanza tra il 0.2 ed il 0.8. Come è facilmente visibile tutti i profili utilizzati, in particolar modo i primi due, sono piuttosto spessi ed il S823 è quello che presenta il più pronunciato leading edge ma questo deriva da una delle condizioni di vincolo poste in questo processo di ricerca ovvero mantenere lo spessore massimo del profilo al di sopra di un valore di soglia, che ad esempio per il profilo S823 è pari al 21% della corda.

Ecco ora una visione di insieme della pala in cui viene sottolineato l'avvicinarsi dei tre differenti profili integrando le informazioni fornite finora riguardo l'andamento della corda, del twist e della tipologia di profilo usato per ottenere l'oggetto di questo studio.

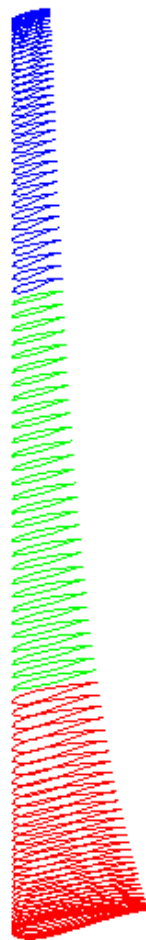


Figura 3.8 Rappresentazione delle sezioni che costituiscono la pala

Per concludere questo capitolo relativo alla presentazione dell'oggetto degli studi si introduce l'aspetto strutturale della pala.

Compiendo alcune semplificazioni si può affermare che la pala può essere pensata come costituita di due parti principali: la "skin" esterna che indirizza il fluido convenientemente così da conseguire la massima efficienza aerodinamica ed la struttura interna di supporto spesso detta "spar".

Sebbene la skin assolva il principale compito di dare una forma ed un contorno ben preciso alla pala sarebbe un errore dire che si limita a questo infatti anch'essa contribuisce a supportare i carichi presenti.

Esistono sul mercato svariate soluzioni per ovviare al problema strutturale di sopportare i carichi presenti ma quelle più diffuse sono due:

La prima affida la funzione di rinforzo strutturale ad un numero di lamine di supporto, in numero variabile a seconda della grandezza della turbina, che si collegano alle estremità con la skin.

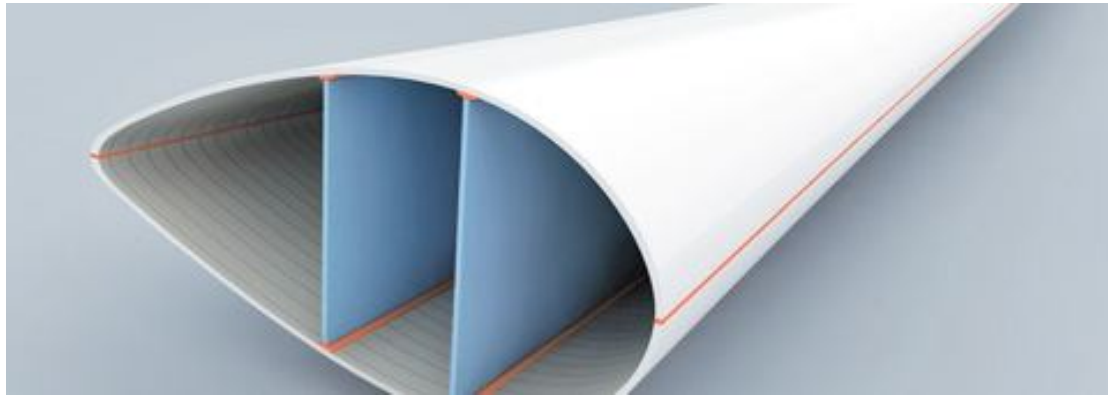


Figura 3.9 Strutture di supporto interne alla pala

La seconda invece prevede l'utilizzo di una "box-beam" ovvero una trave (in parete sottile) a cassone che percorre longitudinalmente la pala. Anche in questo caso la trave viene in contatto con la skin ma questo avviene per tutta la lunghezza dei due tratti inferiori e superiori.

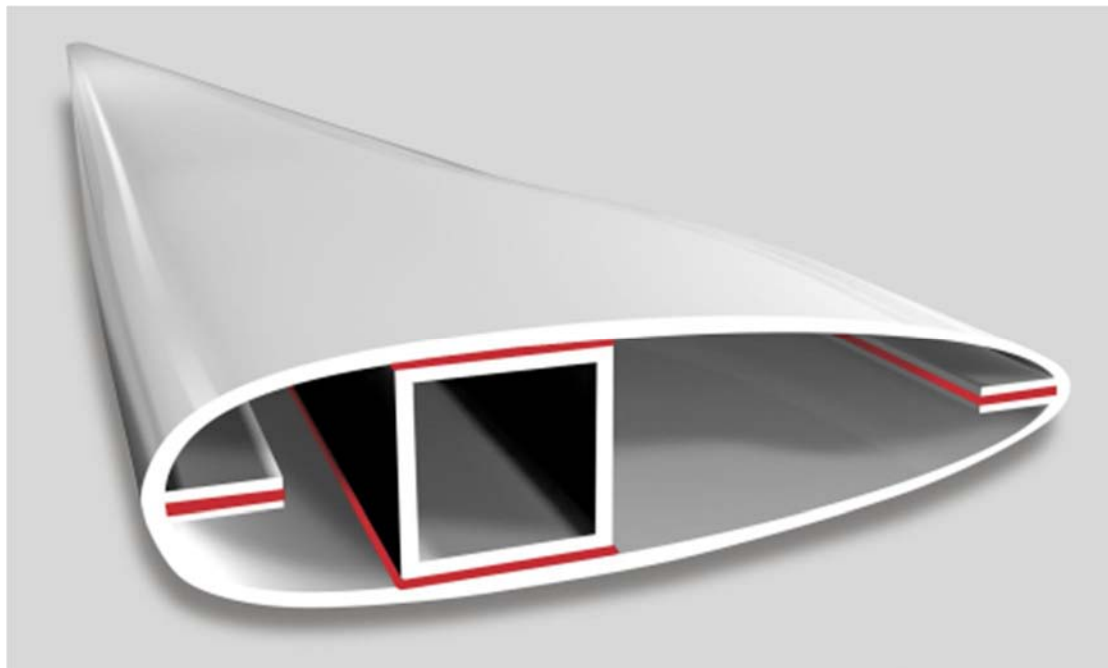


Figura 3.10 Trave a cassone a supporto della struttura interna

Generalmente, specie nelle macchine di grandi dimensioni, vengono previsti ad intervalli regolari delle strutture volte sia a favorire il trasferimento del carico, che ad aumentare la rigidità della struttura agendo di fatto come le centine delle ali di un aeroplano.

Per quanto riguarda i materiali è opportuno sottolineare come al variare della taglia e della potenza prodotta siano impiegati i prodotti più diversi: dalla balsa nei modelli più piccoli per installazioni ad uso domestico fino a complessi laminati in materiale composito ma anche materiali metallici.

Nella pala considerata si è scelto di optare per una trave a cassone interna che segua fedelmente il profilo esterno dettato dalla geometria fornita, inoltre per quanto riguarda il materiale, come verrà

spiegato meglio nel prossimo capitolo, si è optato per una lega di alluminio, materiale isotropo ed omogeneo.

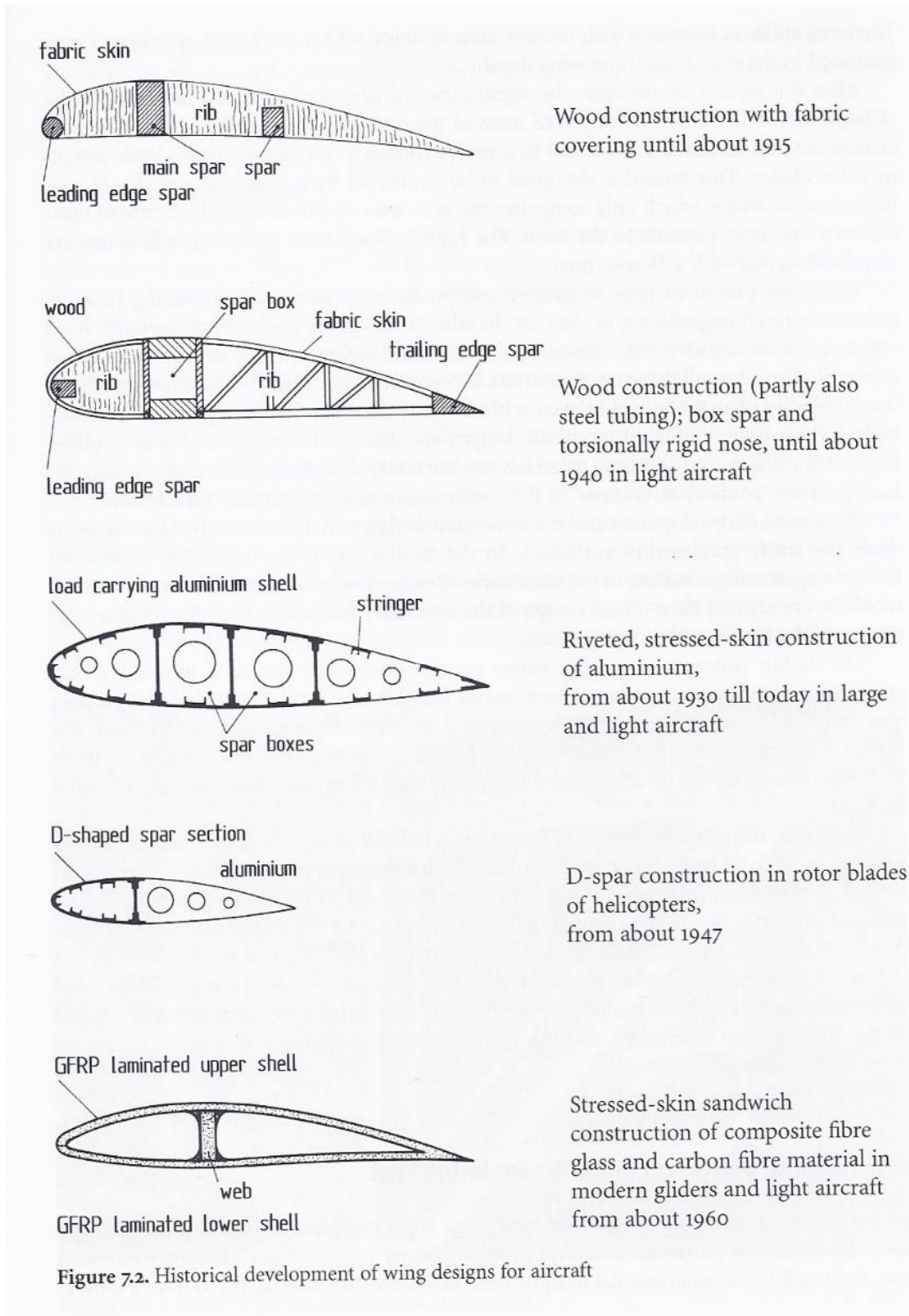


Figura 3.11 Tipologie costruttive della struttura palare interna

4 Modello di Calcolo

4.1 Introduzione al modello

Questa sezione sarà dedicata alla presentazione del modello di calcolo che costituisce le fondamenta dello studio che viene qui descritto. Come prima cosa è necessario introdurre il sistema di riferimento utilizzato nello sviluppo di tutto il modello.

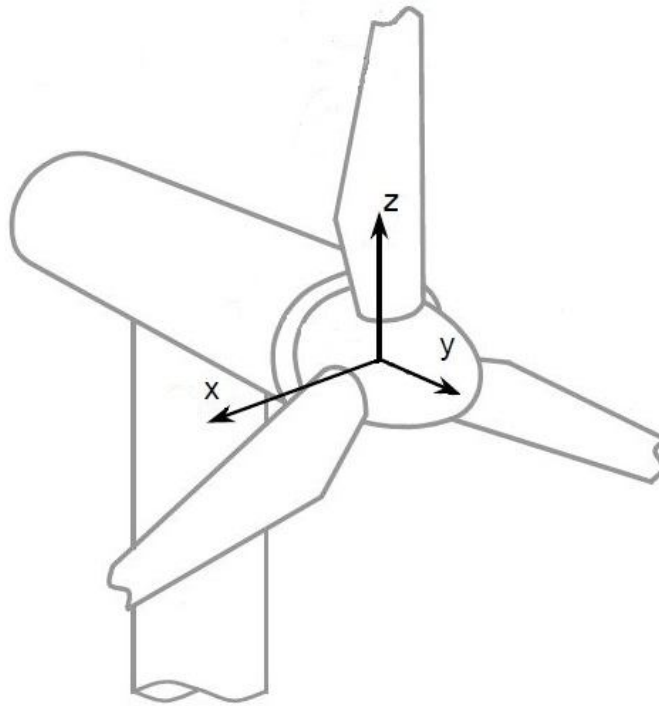


Figura 4.1 Disposizione del sistema di riferimento utilizzato

Il sistema di riferimento utilizzato ha origine al centro geometrico del mozzo ed è orientato in modo da porre l'asse z coincidente con l'asse longitudinale della pala, mentre gli assi x ed y ortogonali ad esso giacciono nel piano della sezione.

Il modello è composto di due sezioni principali: una prima parte in cui la pala viene discretizzata opportunamente per poi proseguire con il calcolo delle grandezze che la caratterizzano (come la massa), mentre in una seconda si sfruttano queste informazioni per pervenire alla conoscenza dello stato di tensione presente nella struttura della pala.

Affrontando la discretizzazione della pala si deve ricordare come questa avvenga lungo due distinti livelli.

Il primo è relativo alla discretizzazione operata lungo l'asse longitudinale della pala; si forza infatti la struttura a variare non in modo fluido e continuo come avviene nella realtà ma per incrementi finiti. Nello specifico la pala è discretizzata in 100 sezioni differenti e questo comporta l'approssimazione della geometria della pala ad una serie di 99 conci costituiti dalla traslazione rigida delle sezioni lungo l'asse z .

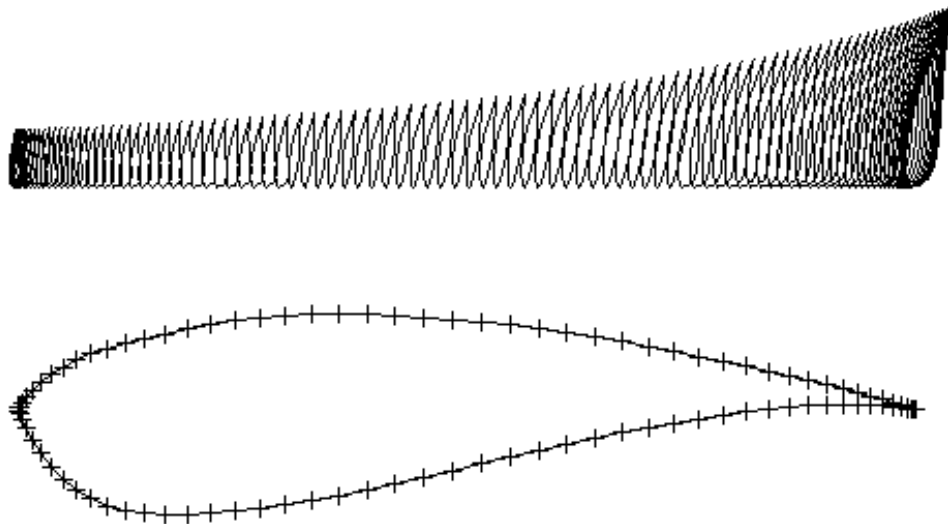


Figura 4.2 I due livelli di discretizzazione della pala

La seconda invece riguarda la discretizzazione effettuata nei singoli profili; per questi sono state adottate delle distribuzioni di punti posti ad una spaziatura non uniforme ma che segue la regola dell' "half-cosine spacing" che genera un minore spaziatura tra i punti al trailing edge ed al leading edge. Per ogni profilo sono stati utilizzati 100 punti.

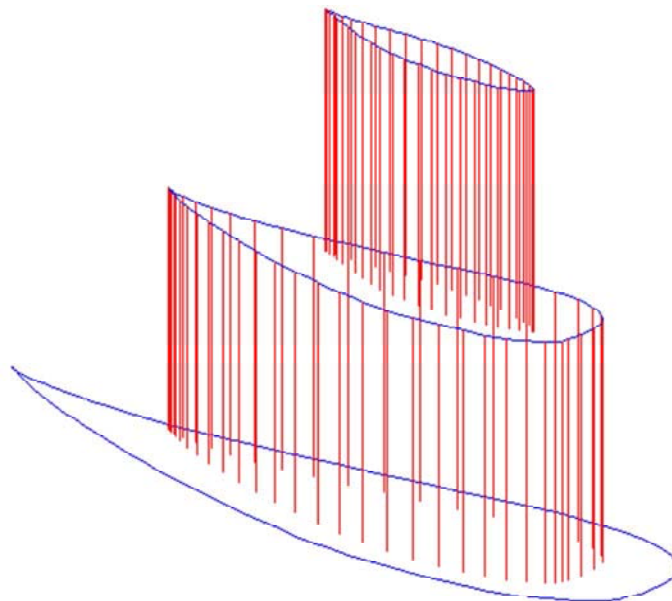


Figura 4.3 Rappresentazione di successione di conci

Per quanto riguarda la struttura interna della pala si devono introdurre alcune scelte effettuate nel corso della modellazione volte a semplificare l'elaborazione.

Si considera la pala composta solo dello strato esterno (skin) e della trave di supporto interna quindi non sono previsti ulteriori meccanismi di rinforzo ne tanto meno schiume o altri materiali che svolgano funzioni di riempimento all'interno della sezione.

Viene previsto inoltre una aderenza perfetta tra la box-beam e le due skin poste all'intradosso ed all'estradosso e questo accostamento genera nelle zone di contatto porzioni della sezione ove il materiale presente ha uno spessore doppio rispetto alle restanti parti. Di conseguenza si viene a definire la topologia della sezione di seguito illustrata.

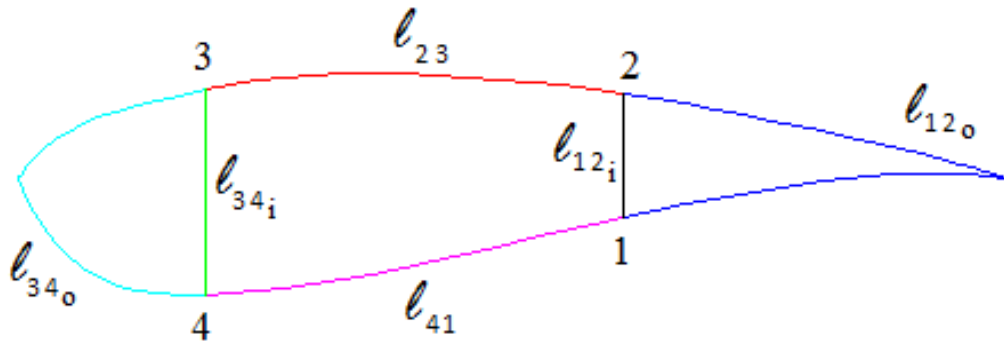


Figura 4.4 Topologia della sezione

Come si può vedere in questa modellazione non sono più presenti distinzioni tra la skin e la trave a cassone al suo interno ma ne sono visibili solo due pareti cioè i lati l_{12i} ed l_{34i} che d'ora in poi verranno denominate spars.

Così facendo si è venuta a creare una geometria composta di sei differenti lati che uniscono i punti di congiunzione tra le spars ed il rivestimento esterno.

4.2 Calcolo delle proprietà delle sezioni

Ora si prosegue con l'esposizione della parte di modello volta al calcolo delle proprietà delle sezioni. Come si potrà vedere dalle formulazioni matematiche seguenti l'operazione di integrazione tipica dei calcoli per solidi continui verrà sistematicamente sostituita con l'operatore sommatoria, questo a causa della discretizzazione precedentemente presentata.

La prima e più elementare caratteristica della sezione ad essere individuata è l'area della singola sezione. Questa si ottiene innanzitutto come unione delle aree dei sei singoli tratti che la costituiscono.

$$\text{Area sezione} = \sum l_i * t_i \quad (2)$$

Per stimare i singoli contributi è necessaria la conoscenza della lunghezza dei singoli lati, questo si raggiunge grazie all'espressione:

$$\text{Lunghezza lato}_i = l_i = \sum_{j=\text{punto 1}}^{\text{punto finale}} \sqrt{((x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2)} \quad (3)$$

Si tratta di ricavare tutte le distanze tra punti successivi che formano ogni lato presente nella sezione per poi sommarli in quella che risulterà essere la lunghezza totale del lato della sezione.

Infine, moltiplicando questa lunghezza per lo spessore collegato, si ottiene l'area di ognuno dei sei lati della sezione.

Le aree dei componenti della sezione vengono subito utilizzate per conseguire un'ulteriore informazione ovvero il centro di massa della sezione.

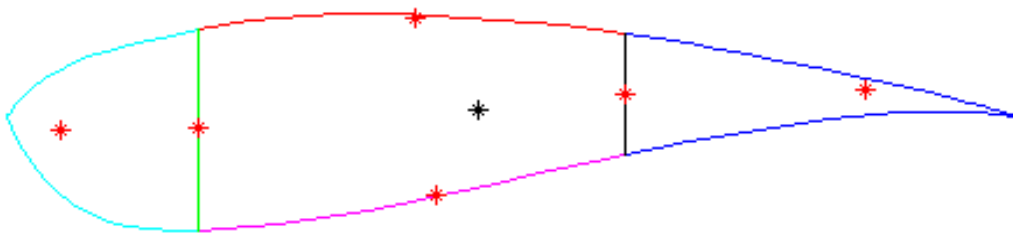


Figura 4.5 Centro di massa della sezione e delle singole porzioni

Partendo dalle aree dei singoli lati e dalla conoscenza della rispettiva disposizione nello spazio si ottengono in primo luogo i centri di massa dei sei lati della sezione.

$$\text{Centro di Massa} = \frac{\sum_i \text{Area}_i * CM_i}{\text{Area sezione}} \quad (4)$$

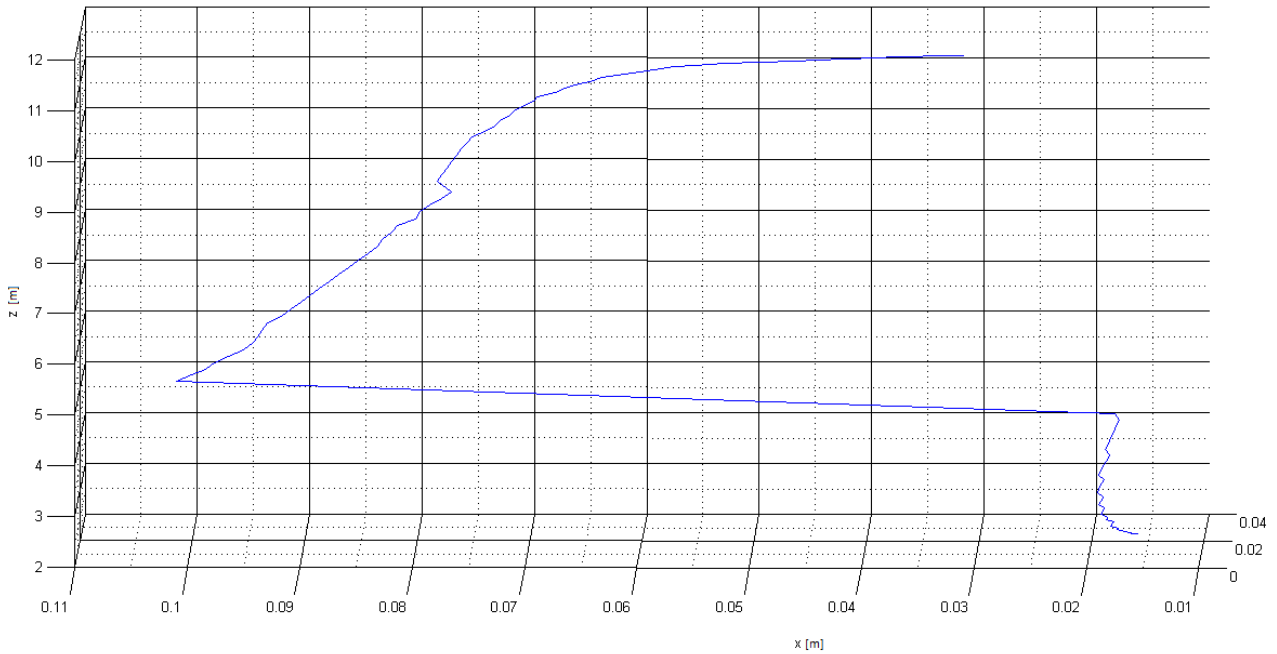


Figura 4.6 Posizione dei centri di massa delle sezioni

L'immagine precedente non è stata presentata in scala per enfatizzare la ridotta variabilità nella posizione del centro di massa nelle varie sezioni.

Lo scostamento massimo rilevato è inferiore agli 8 cm e questo, considerando che la lunghezza della pala è superiore ai 9 metri, porta ad affermare che è ragionevole pensare alla pala come ad una trave (in parete sottile) rettilinea.

Successivamente, si ricava il centro di massa della sezione operando come nell'equazione (4) in modo analogo a quanto si verifica nel calcolo del centro di massa di un sistema di punti.

Partendo da quanto calcolato precedentemente si può arrivare al calcolo di ulteriori tre parametri caratteristici della sezione, che saranno fondamentali nella parte di modellazione relativa al calcolo delle tensioni.

Si tratta dei tre momenti di inerzia di superficie della sezione detti : I_{xx} , I_{yy} e I_{xy} .

Per conseguire questo risultato si è proceduto sommando nei tre casi i contributi dati da tutti i segmenti:

$$I_{xx} = \sum_i A_i (y_i - y_{CM})^2 \quad (5)$$

$$I_{yy} = \sum_i A_i (x_i - x_{CM})^2 \quad (6)$$

$$I_{xy} = \sum_i A_i (x_i - x_{CM})(y_i - y_{CM}) \quad (7)$$

A titolo di esempio vengono riportati i valori assumibili dai momenti di inerzia di una sezione basata sul profilo S823 al variare delle posizioni delle due spar.

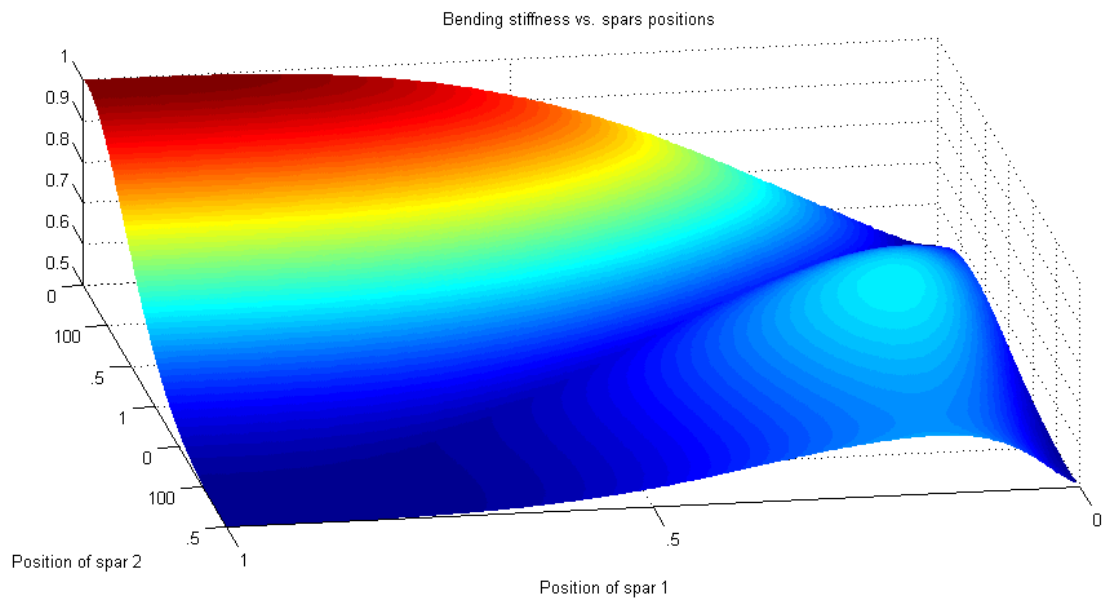


Figura 4.7 Momento d'inerzia I_{xx} della sezione al variare della posizione delle spar

In questo caso, come in quello che segue il valore del momento d'inerzia risultante è stato normalizzato rapportando tutti i risultati al valore massimo riscontrato. Presento ora il risultato analogo riscontrato per il momento di inerzia I_{yy} .

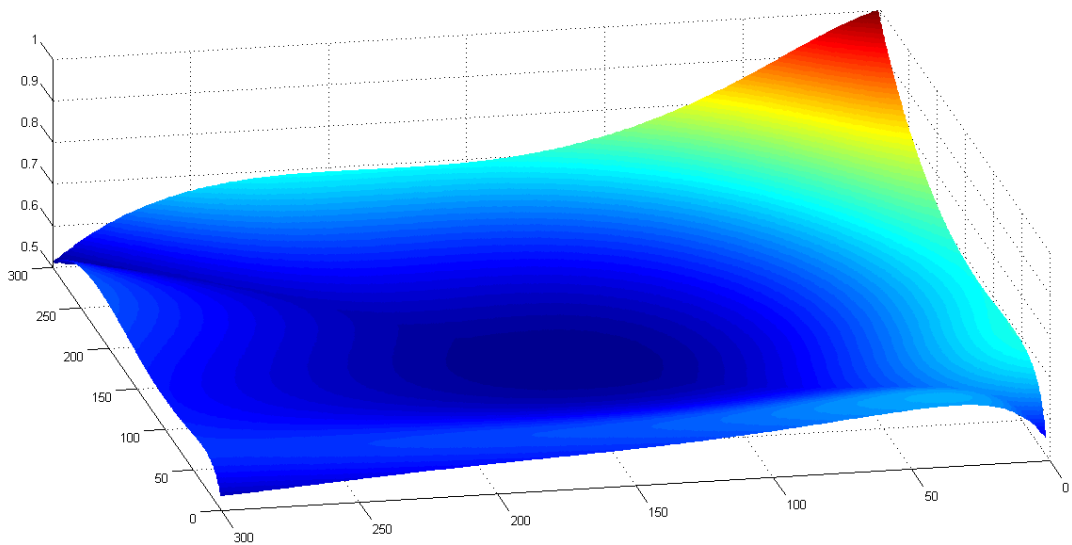


Figura 4.8 Momento d'inerzia I_{yy} della sezione al variare della posizione delle spar

L'ultima proprietà intrinseca alla pala che viene calcolata è anche la più importante, non solo perché fa uso di diversi risultati ma anche perché costituirà la grandezza da minimizzare nei successivi processi di ottimizzazione.

$$Massa\ Pala = \sum_i Area_i * lunghezza_i \quad (8)$$

Come mostra l'equazione la massa della pala è data dall'aggregazione di tutti i contributi dei singoli conci che la costituiscono e questo si traduce, essendo questi rettilinei e con sezione trasversale costante, nella sommatoria delle aree di sezione moltiplicate per la lunghezza del conco stesso. Prima di proseguire nell'ultima parte di questo capitolo relativa alle sollecitazioni è d'obbligo soffermarsi per chiarire la tipologia di materiale compone la pala.

Tra i materiali più usati vi sono sia materiali metallici che compositi specie a base di fibre di vetro o di carbonio, tuttavia per questo progetto si è scelto di utilizzare un materiale che fosse sia omogeneo che isotropo e conseguentemente la scelta è caduta su una lega di alluminio ad alta resistenza caratterizzata dalla spiccata resistenza a frattura e alla stress-corrosion oltre che ad una buona duttilità. Una delle caratteristiche principali per cui viene utilizzato è anche l'elevata resistenza specifica.

Table 7.1. Strength and stiffness parameters of materials in principle available for rotor blades

Parameter Material	Spec. weight γ g/cm ³	Strength limit σ_B N/mm ²	Modulus of elasticity E kN/mm ²	Spec. breaking strength σ_B/γ km	Spec. modulus of elasticity E/γ 10 ³ km	Fatigue strength $\pm\sigma_A$ 10 ⁷ N/mm ²
Steel St 52	7.85	520	210	6.6	2.7	60
Alloyed steel 1.7735.4	7.85	680	210	8.7	2.7	70
Aluminium AlZnMgCu	2.7	480	70	18	2.6	40
Aluminium AlMg5 (weldable)	2.7	236	70	8.7	2.6	20
Titanium alloy 3.7164.1	4.5	900	110	20	2.4	—
Fibre glass/epoxy* composite	1.7	420	15	24.7	0.9	35
Carbon fibre/ epoxy* composite	1.4	550	44	39	3.1	100
Aramide fibre/ epoxy* composite	1.25	450	24	36	1.9	—
Wood (Sitka Spruce)	0.38	appr. 65	appr. 8	appr. 17	appr. 2.1	appr. 20
Wood/epoxy*	0.58	appr. 75	appr. 11	appr. 13	appr. 1.9	appr. 35

*EP-matrix 40 vol.%

Tabella 3 Tipologie di materiali utilizzati per pale eoliche

4.3 Carichi applicati e calcolo delle tensioni

Nell'ultima parte di questo capitolo saranno presentati carichi agenti sulla pala eolica considerata nonché la procedura per il calcolo delle tensioni che essi inducono sulla struttura. Generalmente il campo fluido in cui operano le turbine eoliche è caratterizzato da una profonda variabilità sia spaziale che temporale, questo è dovuto sia alla presenza inevitabile di turbolenza nel flusso incidente alla pala ma anche a variazioni in direzione od intensità che si svolgono sia nel breve che nel lungo periodo. Inoltre anche la presenza della torre di supporto ha influenza sul campo di moto dell'aria e questo genera usualmente una disomogeneità nei carichi al trascorrere del tempo. Inoltre sono presenti anche carichi esterni dovuti a altre cause come ad esempio quelli centrifughi, gravitazionali e giroscopici.

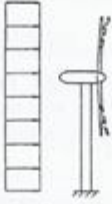


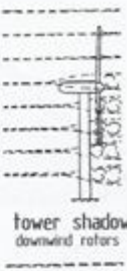
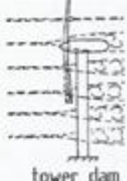



		Aerodynamic forces	Inertial and gravity forces
unsteady loads	steady loads	 steady mean wind speed	 centrifugal forces
	cyclic loads	 vertical wind shear  tower shadow downwind rotors  tower shadow upwind rotors	 gravity forces  gyroscopic forces
	non-cyclic loads	 wind turbulence	

Figura 4.9 Tipologie di carichi agenti sulla turbina

Nello sviluppo di questo modello sono stati considerati solo due tipologie di carico:

- Carico Aerodinamico
- Carico Centrifugo

In primo luogo viene presa in esame la sollecitazione aerodinamica. Questa agisce nel piano stesso dei profilo che compongono la pala e può essere suddivisa in due componenti principali, la forza assiale e la forza normale che sono disposte in modo tale da essere parallele e normali alla corda del profilo.

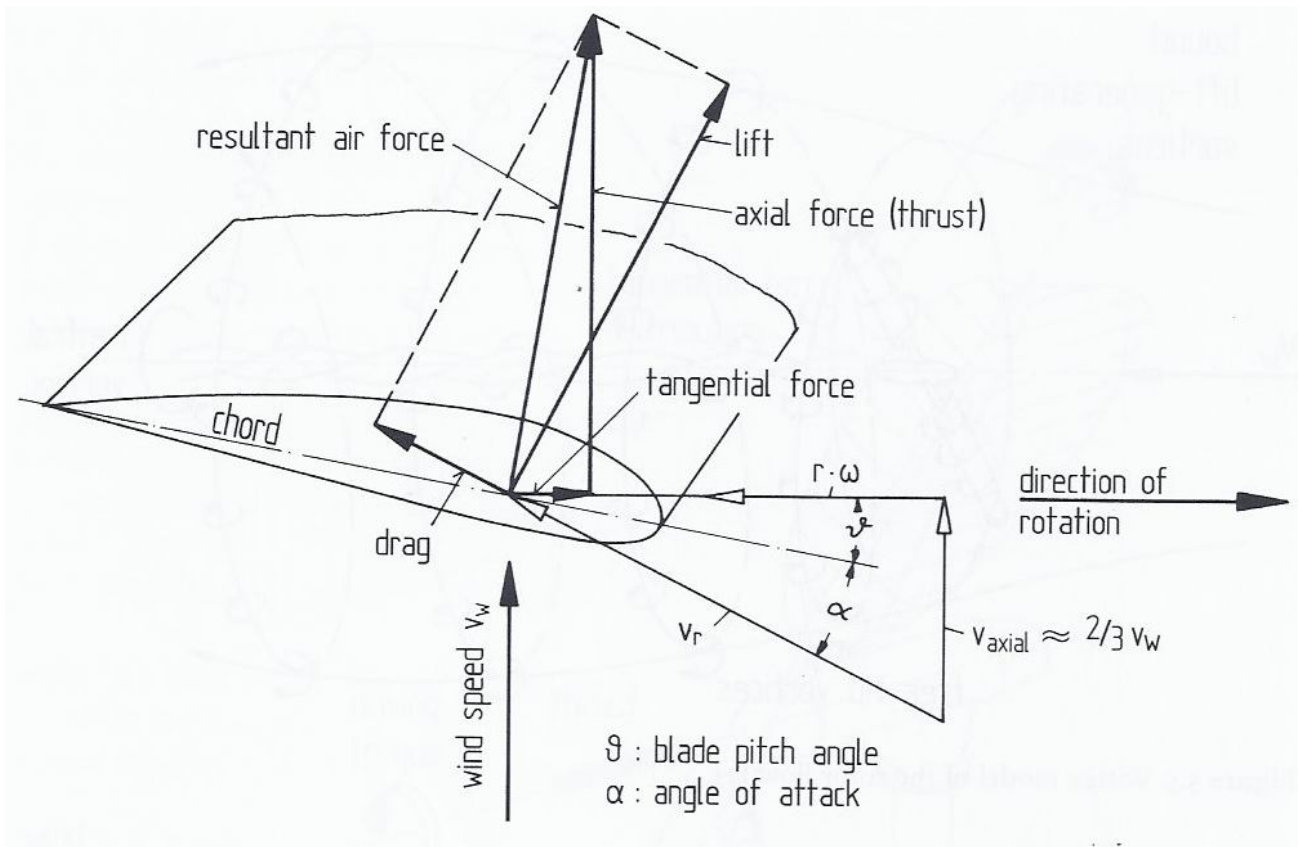


Figura 4.10 Forze applicate sul profilo della pala eolica

Queste due forze sono state fornite sotto forma di una distribuzione finita di coefficienti aerodinamici relativi alle cento sezioni che costituiscono la pala.

Esaminando i dati e sfruttando le relazioni seguenti è possibile ricostruire i carichi aerodinamici distribuiti agenti sull'intera struttura.

$$N_i = \frac{1}{2} \rho c c_n v_{rel}^2 \quad (9)$$

$$A_i = \frac{1}{2} \rho c c_a v_{rel}^2 \quad (10)$$

Queste si riferiscono però solamente ad una sezione i-esima, riportando la relazione in modo da valutare tutte le porzioni della pala si ottiene il carico distribuito delle forze agenti (assiali e tangenziali).

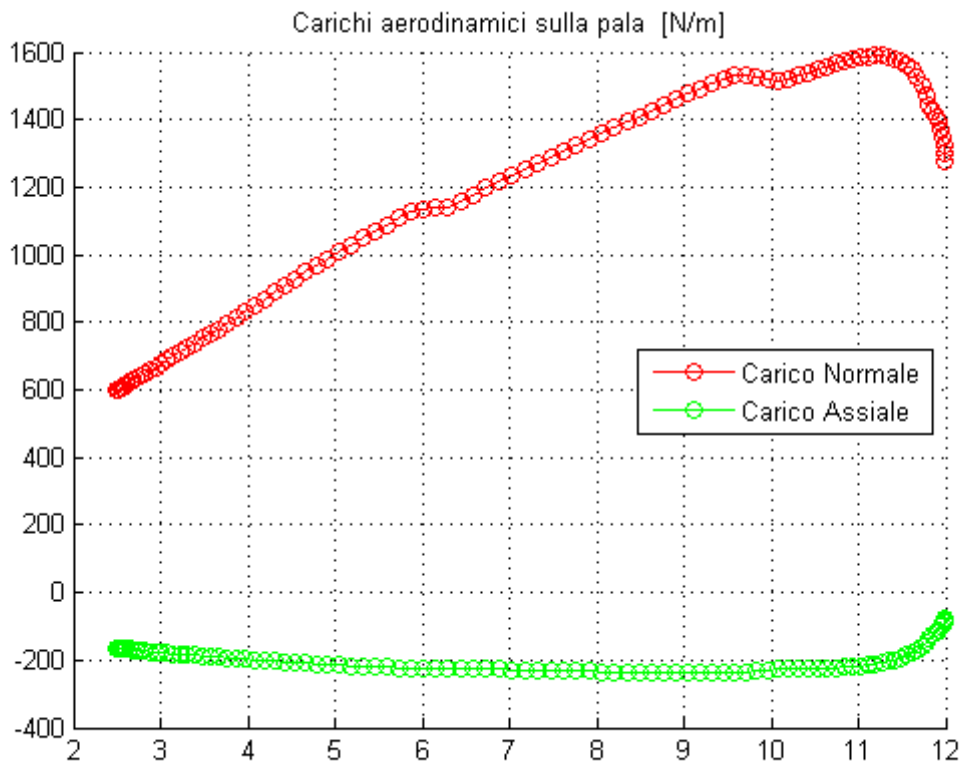


Figura 4.11 Carichi aerodinamici assiali e tangenziali agenti sulla pala

Come si vede si tratta dal punto di vista dimensionale di forze distribuite e quindi per calcolare l'effettiva forza agente sul concio di trave si deve sfruttare la seguente relazione.

$$\begin{cases} \text{Forza Normale}_i = N_i \cdot \text{Lunghezza concio}_i \\ \text{Forza Assiale}_i = A_i \cdot \text{Lunghezza concio}_i \end{cases} \quad (11)$$

Per quanto riguarda i carichi centrifughi si sfruttano le conoscenze guadagnate anteriormente riguardanti le masse dei singoli concio, infatti la forza agente su di ogni sezione è data dalla sommatoria delle forze centrifughe applicate ad ogni singolo concio di trave posto in posizione più esterna rispetto a quello considerato.

$$F_{CENTRIFUGA_j} = \sum_{j=\text{sezione } i}^{\text{sezione finale}} m_i \omega^2 r_i \quad (12)$$

Possedendo la conoscenza delle forze agenti sulla struttura e delle caratteristiche fisiche e geometriche della stessa è possibile concludere il modello calcolando le tensioni che si vengono a creare.

Data la natura della struttura, molto allungata lungo la direzione longitudinale rispetto alle altre dimensioni e dato il piccolo spessore delle pareti coinvolte è possibile approssimare questa struttura ad una trave in parete sottile composta di tre celle chiuse. L'omissione del contributo del taglio sullo stato tensionale risultante è una responsabilità ingente ma considerando il risparmio in termini di tempo computazionale conseguente e la bontà dei risultati ottenuti (esposti in seguito) si confida che questa scelta non pregiudichi eccessivamente la precisione del modello.

Basandosi su questo si può affermare che nel complesso la struttura è assimilabile ad una trave soggetta a flesso-trazione, nella quale le tensioni presenti hanno le seguenti cause.

- Trazione : Esclusivamente a causa della forza centrifuga
- Flessione: Causata sia dalle forze aerodinamiche che dalla forza centrifuga

Sebbene il primo punto non sia fonte di sorprese è necessario elaborare ulteriormente quanto affermato nel secondo. Infatti esiste un contributo flessionale generato dalla forza centrifuga a causa della forma variabile delle sezioni che compongono la pala. Se così non fosse tutti i centri di massa delle sezioni sarebbero perfettamente allineati ma essendo presenti cento profili differenti è indubbio che i relativi centri di massa non possano giacere su di una retta. Quindi per questo motivo la forza centrifuga, che agisce in direzione ortogonale al piano delle sezioni, crea momento flettente seguendo la relazione qui esposta.

$$M_{flettente_j} = \sum_{i=sezione\ j}^{sezione\ finale} F_{CENTR_i} \times \overline{CM_i CM_j} \quad (13)$$

Si opera cioè la sommatoria del prodotto vettoriale tra le forze centrifughe di ogni concio e la distanza presente tra i centri di massa degli stessi e il centro di massa della sezione d'interesse. In modo molto simile si calcola anche il momento flettente causato dalle forze aerodinamiche.

$$M_{flettente_j} = \sum_{i=sezione\ j}^{sezione\ finale} F_{AERO_j} \times \overline{CM_i CM_j} \quad (14)$$

Grazie a queste relazioni è possibile proseguire iniziando il calcolo delle tensioni. In primo luogo si calcolano le tensioni dovute alla sollecitazione di trazione presente.

$$\sigma_{TRAZ_i} = \frac{F_{CENTRIFUGA_i}}{Area\ sezione_i} \quad (15)$$

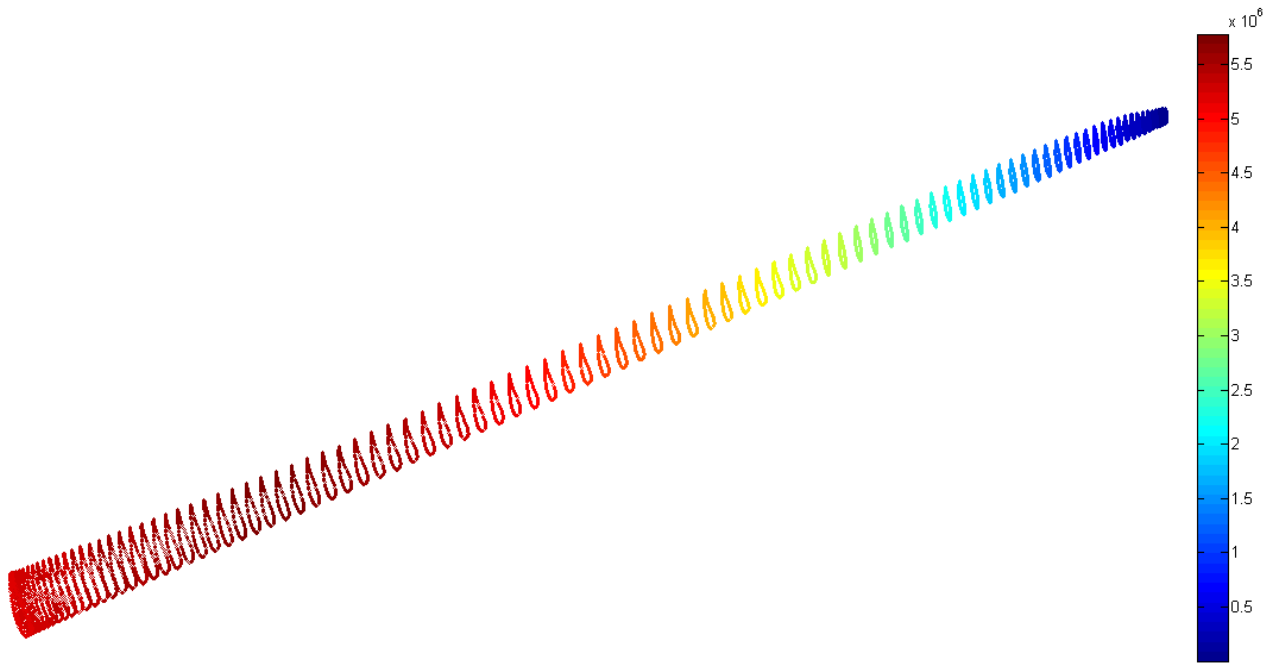


Figura 4.12 Tensione di trazione presente sulla pala

Questa tensione è applicata in modo uniforme in tutti i punti di una determinata sezione. Compatibilmente con quanto aspettato varia inoltre da un valore nullo in prossimità del tip della pala fino a raggiungere il valore massimo (sempre di segno positivo) in prossimità del mozzo. Per quanto riguarda il contributo flessionale si fa riferimento ad un'espressione più complessa che coinvolge i momenti di inerzia delle sezioni.

$$\sigma_{FLESSIONALEi} = \frac{M_y I_{xx} - m_x I_{yy}}{I_{xx} I_{yy} - I_{xy}^2} (x_i - x_{CM}) + \frac{M_x I_{yy} - M_y I_{xx}}{I_{xx} I_{yy} - I_{xy}^2} (y_i - y_{CM})$$

Con questo strumento risulta possibile stimare il contributo tensionale della flessione. Anche in questo caso si assiste ad un incremento dei valori massimi delle tensioni verso la radice.

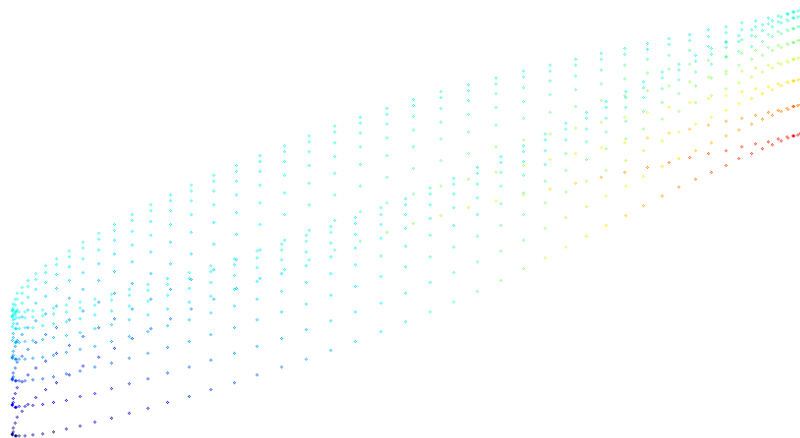


Figura 4.13 Andamento della tensione dovuta alla flessione nelle sezioni terminali

Tuttavia questo contributo a differenza di quello dovuto alla trazione assume valori differenti nei punti che costituiscono la sezione ed inoltre in metà di essi è dotato di segno positivo e nei restanti di segno negativo.

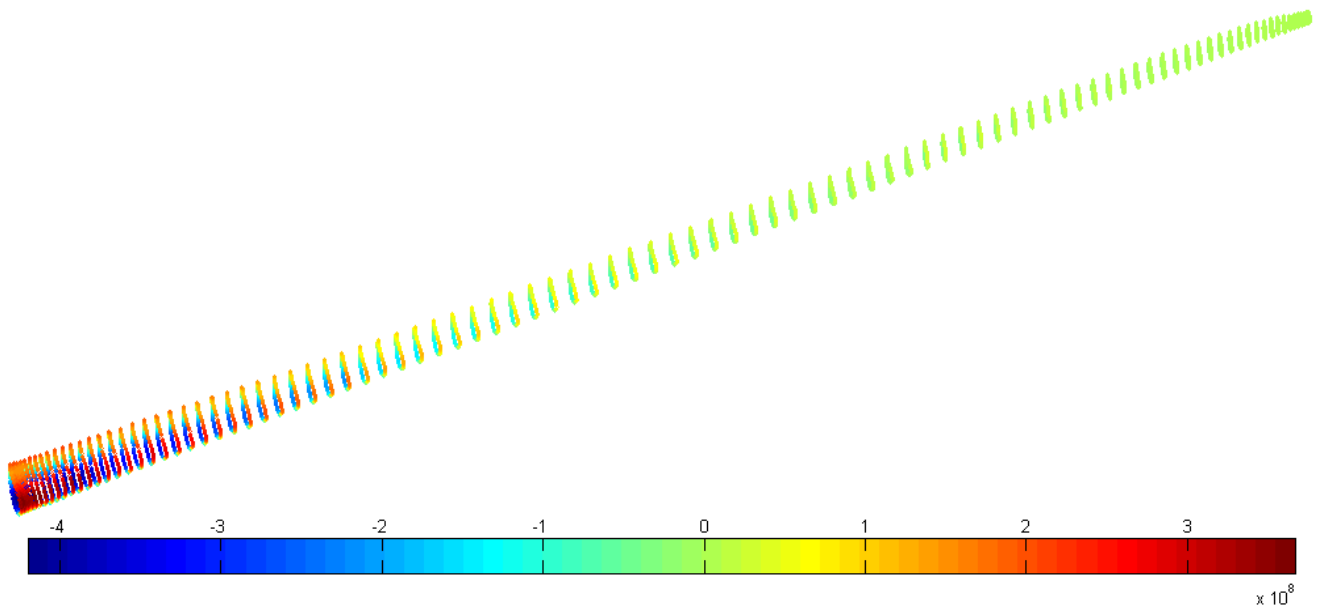


Figura 4.14 Visione globale delle tensioni dovute alla flessione

Per ottenere lo stato di tensione complessivo non resta che sommare i due contributi: flessionale e quello dovuto allo sforzo normale come viene qui riportato.

$$\sigma_{TOTALE_i} = (\sigma_{TRAZIONE_i} + \sigma_{FLESSIONE_i}) \quad (17)$$

L'ultimo elemento che conclude il modello di calcolo consiste nel verificare se la struttura sia in sicurezza. Considerando l'isotropia del materiale utilizzato si può affermare che questo avviene se l'ammontare in valore assoluto delle tensioni in tutti i punti è inferiore al valore della tensione di snervamento del materiale, come viene proposto nella relazione sottostante.

$$|\sigma_{TOTALE_i}| \leq \sigma_{SNERVAMENTO} \quad (18)$$

5 Algoritmi Genetici

Questo capitolo della tesi espone in dettaglio l'algoritmo utilizzato nel processo di ottimizzazione ovvero un algoritmo genetico. Si tratta di algoritmi ideati con lo scopo di imitare le regole ed i meccanismi dell'evoluzione biologica applicandoli a esigenze ingegneristiche.

Sviluppati inizialmente negli anni sessanta da Rosemberg, che per primo introdusse le così dette "strategie evoluzionistiche", non videro applicazioni di importanza considerevole fino ai prime implementazioni attuati da Holland nel 1975 e da Shaffer nel 1984.

In seguito a questo si dovette aspettare un ulteriore decennio perché l'argomento guadagnasse l'importanza che ancora possiede nell'ambito della ricerca scientifica a livello internazionale. Da allora il numero di implementazioni e le varianti esistenti di questo genere di algoritmi di ottimizzazione continua a crescere confermandosi come uno strumento valido nella ricerca operativa e nell'ottimizzazione.

Come prima cosa è interessante esporre i vantaggi generali che questo algoritmo presenta rispetto ai metodi classici:

- Affronta agevolmente problemi non lineari
- Si tratta di un metodo diretto (non è necessario calcolare derivate)
- Ottima capacità di esplorare spazi di ricerca a molte dimensioni
- Evita la convergenza prematura in corrispondenza di minimi/massimi locali
- Gestione efficiente dei problemi multiobiettivo

Tuttavia l'utilizzo di questo metodo di ottimizzazione presenta anche dei problemi, infatti richiede un considerevole numero di valutazioni della funzione obiettivo e questo può portare ad alti costi, se la valutazione richiede molto tempo.

Innanzitutto è necessario chiarire i concetti fondamentali che stanno alla base di qualsiasi processo di ottimizzazione. Per prima cosa le variabili coinvolte sono dette variabili di progetto e sono indicate con \mathbf{x} che viene anche detto vettore delle variabili di decisione. Le funzioni obiettivo che si intendono massimizzare o minimizzare invece sono indicate con la dicitura $f(\mathbf{x})$.

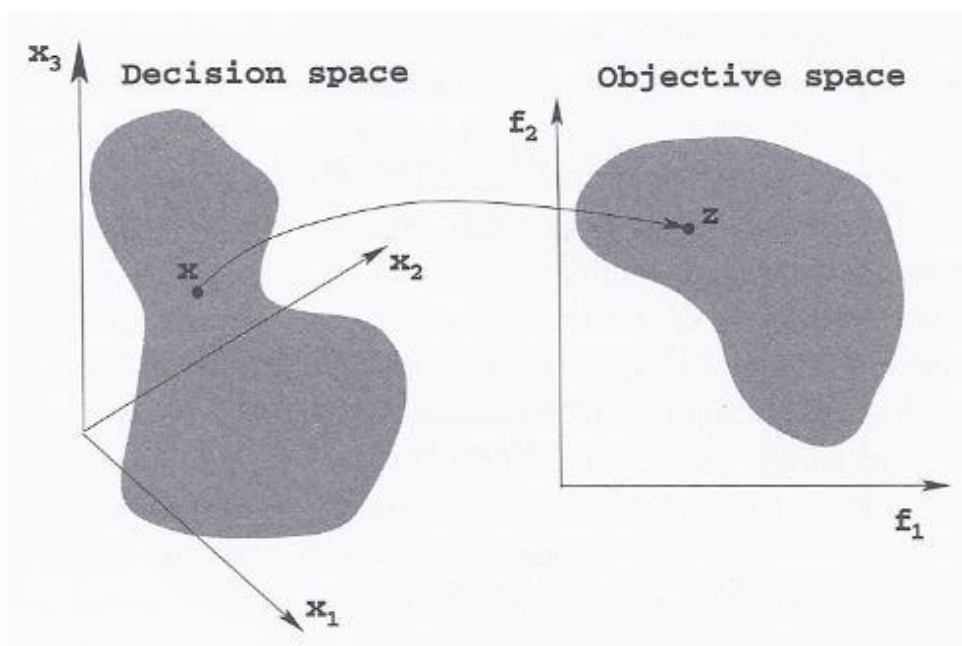


Figure 5.1 Relazione tra spazio delle variabili e spazio degli obiettivi

L'immagine soprastante esprime il legame che il calcolo delle funzioni crea tra lo spazio delle variabili e quello degli obiettivi.

Diversamente dai metodi classici di ottimizzazione gli algoritmi genetici non proseguono nel calcolo attraverso una valutazione sequenziale di una sola soluzione alla volta ma bensì si basano su di un intero insieme di soluzioni chiamato popolazione. Questa, detta anche generazione dei genitori, viene valutata e poi, conseguentemente alle procedure che verranno esposte in seguito, si ottengono i valori delle variabili di decisione che saranno impiegati nell'iterazione successiva, detta generazione dei figli.

Mantenendo una terminologia che richiama gli studi biologici, ove questi algoritmi si fondano, si chiama individuo una singola valutazione delle funzioni obiettivo, la rappresentazione delle variabili di decisione che lo contraddistingue è detto cromosoma, mentre una porzione dello stesso che descrive una singola variabile è denominata gene.

La necessità di codificare le variabili presenti deriva dal fatto che molto spesso queste sono dei numeri reali che devono essere opportunamente elaborati e discretizzati per garantire il successo dei passaggi successivi. Ad esempio è possibile utilizzare una codifica binaria che discretizzi lo spazio di ricerca assegnato alle variabili in un numero finito di intervalli.

$$x = x_{LOW} + \frac{\sum_{i=0,q} bit_i 2^i}{2^{q+1} - 1} (x_{UP} - x_{LOW}) \quad (19)$$

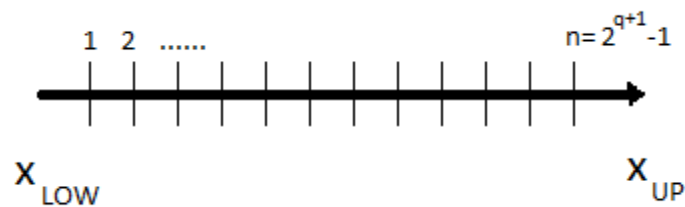


Figura 5.2 Discretizzazione della variabile nell'intervallo previsto

Una volta deciso il numero di bit da considerare e quindi la precisione massima con cui si può descrivere una variabile è possibile ricavare una stringa, ovvero una sequenza di numeri binari che esprime le caratteristiche possedute dall'individuo considerato.

Questa stringa è anche chiamata cromosoma perché contiene tutte le informazioni necessarie per valutare una soluzione ed è proprio questa che viene manipolata da appositi operatori per consentire il proseguimento dell'elaborazione.

Gli operatori impiegati nelle varie versioni degli algoritmi genetici sono svariati tuttavia quelli più comunemente riscontrati sono:

- Selezione
- Ricombinazione
- Mutazione

- Elitarismo

Il primo punto comprende il processo che porta alla scelta tra tutti gli individui che compongono la popolazione di quelli che verranno impiegati per la creazione degli individui della generazione seguente.

<i>Solution, i</i>	F_i	p_i	P_i	$p_i N$
1	25.0	0.25	0.25	1.25
2	5.0	0.05	0.30	0.25
3	40.0	0.40	0.70	2.00
4	10.0	0.10	0.80	0.50
5	20.0	0.20	1.00	1.00

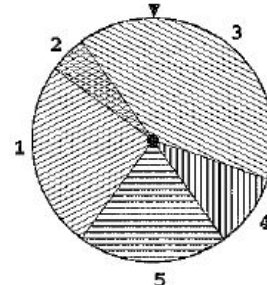


Figura 5.3 Metodo di selezione a roulette

Il processo illustrato in figura mostra il funzionamento del metodo di selezione a roulette. Il processo avviene suddividendo un'ipotetica roulette in spicchi la cui ampiezza sia proporzionale al valore calcolato della funzione obiettivo. In seguito azionando la roulette (nella pratica si genera un numero casuale) si sceglie come genitore l'individuo ove cada la "scelta" della roulette. Con questo metodo, pur conservando una componente casuale, gli individui con migliore valore di fitness hanno maggiori possibilità di trasmettere i propri geni alla generazione successiva.

Un'alternativa esistente è quella della selezione a torneo, in questa variante vengono selezionate coppie di soluzioni valutando i valori delle funzioni obiettivo scartando poi l'individuo caratterizzato dal fitness minore.

La seconda fase del processo è quella responsabile dell'interazione tra i cromosomi di differenti soluzioni. Per generare nuove soluzioni infatti vengono combinate le stringhe appartenenti ad una coppia di individui operando il cross-over su di esse.

Questo consiste nell'individuazione di uno o più punti all'interno della stringa del cromosoma e scambiando le porzioni di geni che ogni individuo figlio eredita dal singolo genitore.

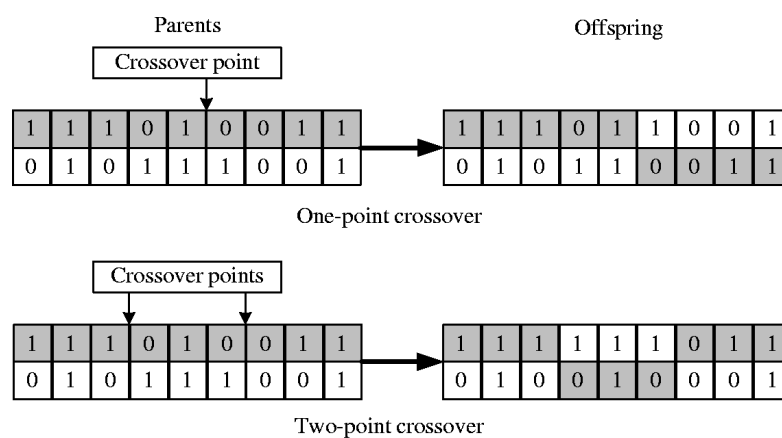


Figura 5.4 Cross-over a punto singolo e a due punti

Spesso questo viene considerato il passaggio più controverso dell'applicazione dell'algoritmo genetico, infatti si può pensare che un eventuale posizionamento "errato" del punto di cross-over

possa scombinare delle sequenze nella stringa che corrispondono a valori promettenti nelle variabili di decisione rendendo vani gli sforzi computazionali effettuati in precedenza.

Tuttavia è stato dimostrato come al susseguirsi delle iterazioni l'azione del cross-over non impedisca il convergere dell'algoritmo alle soluzioni ottimali ma al contrario sia un meccanismo che permette di aumentare la diversità all'interno della popolazione, permettendo così una più efficace esplorazione dello spazio di ricerca.

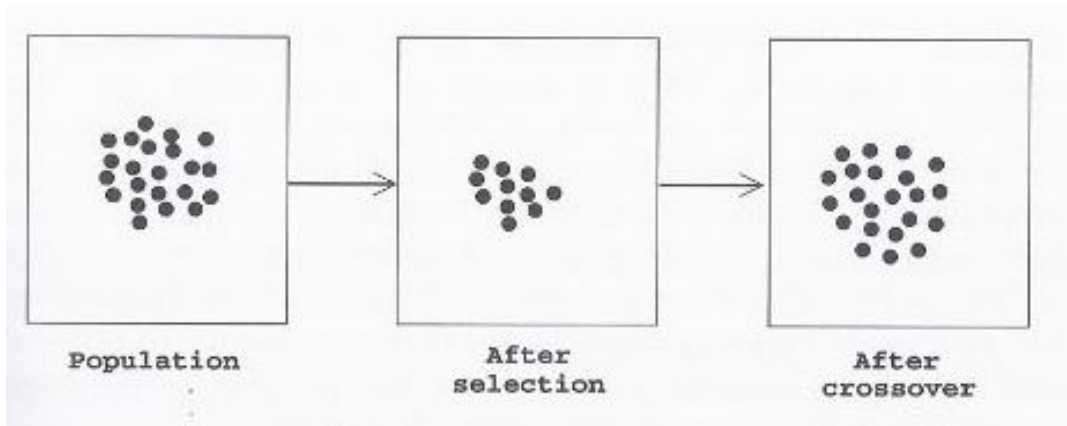


Figura 5.5 Influenza della ricombinazione sulla diversità

L'operatore di mutazione viene utilizzato in modo differente rispetto ai due precedenti. Questo infatti non viene usato sistematicamente per ogni individuo della nuova generazione ma invece agisce in modo imprevedibile e solo per alcuni individui. Si utilizza in genere un contatore collegato ad un generatore di numeri casuali che scorre le stringhe contenenti i geni dell'intera popolazione invertendo il valore di alcuni bit presenti.

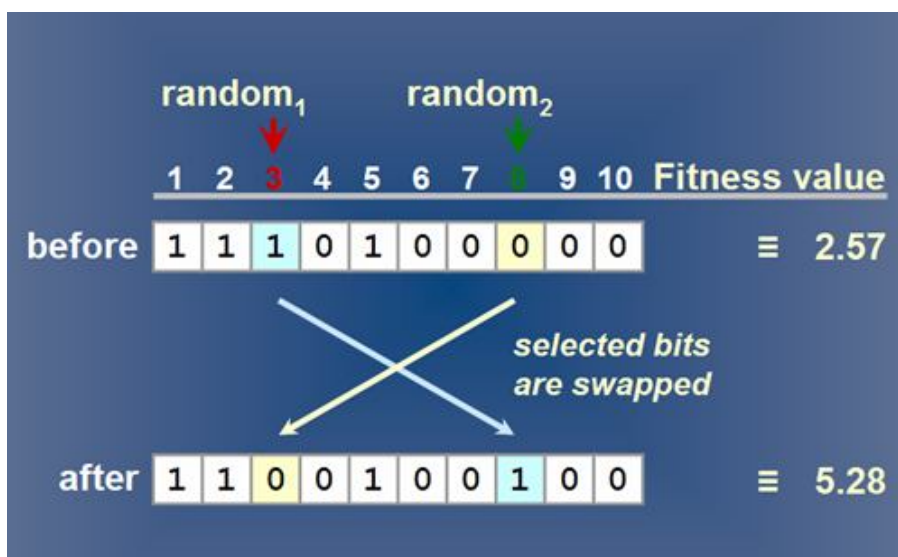


Figura 5.6 Influenza della mutazione sulla stringa

L'ultimo operatore presente nell'algoritmo non interviene allo stesso modo nel processo di generazione degli individui della generazione successiva. Infatti l'elitarismo serve per immagazzinare alcune soluzioni appartenenti alla generazione dei genitori che si distinguono per la particolare bontà del valore della funzione obiettivo conservandole inalterate nella generazione successiva. Questo ha l'effetto di evitare la perdita degli individui migliori che sono stati trovati al procedere delle iterazioni consentendo una maggior velocità di convergenza del processo.

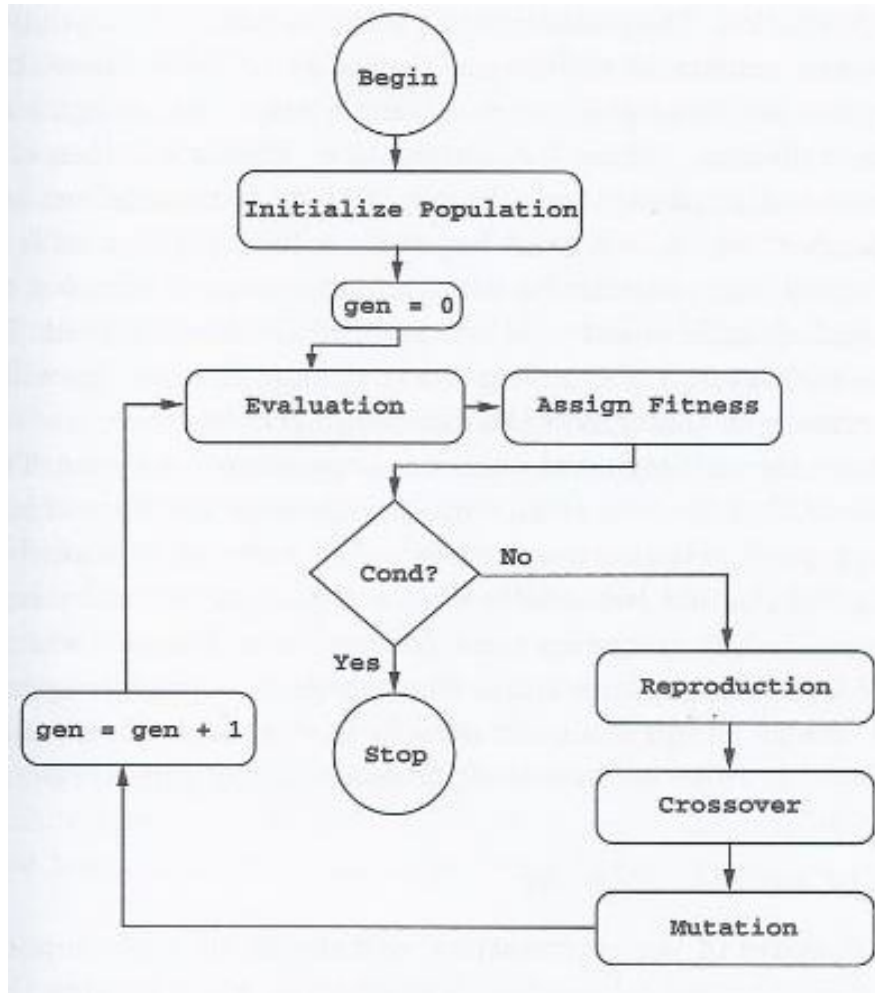


Figura 5.7 Diagramma di funzionamento di un tipico algoritmo genetico

Un ulteriore meccanismo necessario per concludere il processo di ottimizzazione è il controllo della terminazione. Per gli algoritmi genetici spetta all'operatore l'impostazione corretta delle condizioni che, una volta soddisfatte, decretino la fine dell'ottimizzazione. Queste possono essere condizioni relative al numero di generazioni da calcolare, fissando quindi il tempo limite concesso all'elaborazione oppure può essere posta una tolleranza relativa al valore della funzione obiettivo. Quindi una volta che la variazione tra i valori del fitness calcolato risultino minori del valore di soglia, si interrompe il calcolo. Un'ultima alternativa attinge da entrambe le procedure e limita il numero massimo di generazioni di stallo ovvero quelle in cui il progresso del fitness dell'individuo migliore non supera la tolleranza impostata.

6 Parametrizzazione

Questo capitolo tratterà la generazione, gestione e messa in opera dei parametri necessari per poter svolgere lo scopo finale di questa tesi, un processo di ottimizzazione volto a migliorare alcune caratteristiche della pala studiata.

La parametrizzazione nasce dalla necessità di trovare un equilibrio tra due esigenze conflittuali:

- Creare un modello che esplori liberamente lo spazio di ricerca
- Ridurre il più possibile i tempi di calcolo

Appare subito evidente come la prima sia volta ad un utilizzo libero del maggior numero possibile di variabili così da comprendere il maggior numero possibile di configurazioni, facendo in modo di esplorare meticolosamente lo spazio di ricerca. Questo allo stesso tempo si rivela antieconomico considerando il gran numero di soluzioni decisamente impraticabili che vengono valutate.

In modo diametralmente opposto il secondo punto sottolinea l'esigenza sempre presente di massimizzare le prestazioni dello stesso processo di ottimizzazione riducendo in primo luogo i tempi computazionali e grazie a questo anche i costi collegati.

Anche in questo caso insistere al massimo su di questo aspetto porta a delle conseguenze avverse: vincolando il sistema troppo strettamente gli si impedisce di evolvere verso il minimo globale generando così soluzioni più scadenti in termini di prestazioni e vanificando (almeno in parte) lo sforzo prodotto.

Chiarita l'importanza di una corretta parametrizzazione si deve ora proseguire indicando dove venga applicata. Le variabili di decisione sono la posizione delle spar e lo spessore del materiale che costituisce la pala ed in totale si tratta di un numero notevole di variabili: ben 201.

Il loro numero può essere notevolmente ridotto utilizzando una serie di curve parametriche note come curve di Bézier.

Sviluppate dall'ingegnere francese Pierre Bézier sono alla base di numerosi applicazioni moderne usate sia nel disegno al calcolatore che nella grafica computerizzata.

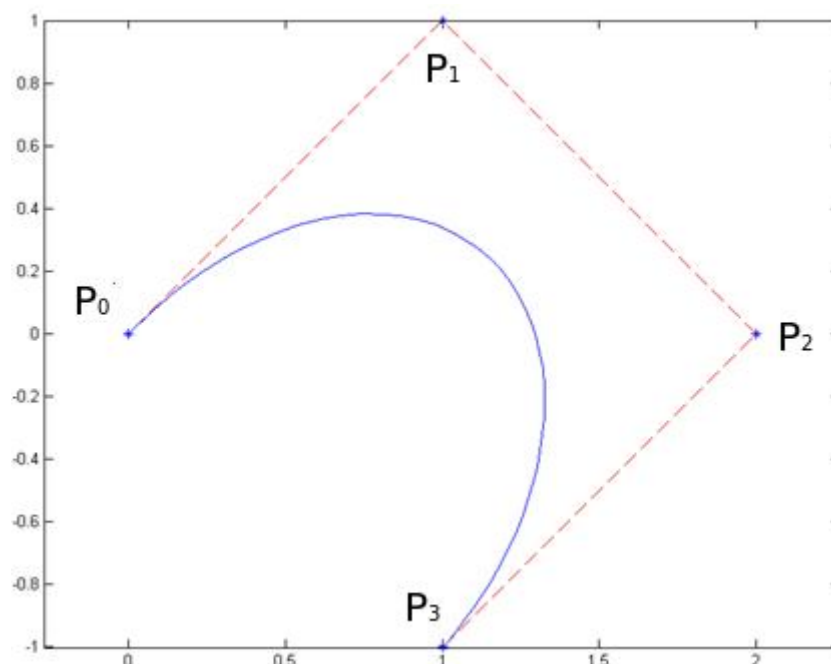


Figura 6.1 Curva di Bézier e relativo poligono di controllo

Queste curve parametriche sono modificabili semplicemente agendo sulla posizione di un numero limitato di punti che fanno parte del cosiddetto poligono di controllo. Per chiarire maggiormente il legame tra questi e la curva risultante si riporta la formula generale di una curva di Bézier.

$$\begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \end{pmatrix} = \sum_{i=0}^n C_n^i t^i (1-t)^{n-i} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix} \quad (19)$$

Come si vede la curva parametrica prosegue nel proprio percorso, determinato dai punti di controllo al variare del parametro t e dove i termini C_n^i sono i polinomi di Bernstein.

Queste curve sono molto utilizzate negli ambiti sia di analisi che di ottimizzazione fluidodinamica di profili alari, questo è dovuto all'estrema semplicità dell'implementazione. Infatti prendendo un poligono di controllo formato da soli tre punti sarà sufficiente calcolare i termini di un polinomio di terzo grado.

Una proprietà molto utile in questo senso è quella della tangenza. Infatti la curva è tangente al primo e all'ultimo tratto del poligono di controllo (i segmenti P_0P_1 ed P_2P_3) questa caratteristica non è stata sfruttata nello svolgimento di questo progetto ma è prassi comune invece nell'ambito dell'ottimizzazione fluidodinamica perché con pochi accorgimenti è possibile impostare nel modo migliore alcune parti di grande importanza nei profili come la curvatura al bordo d'attacco.

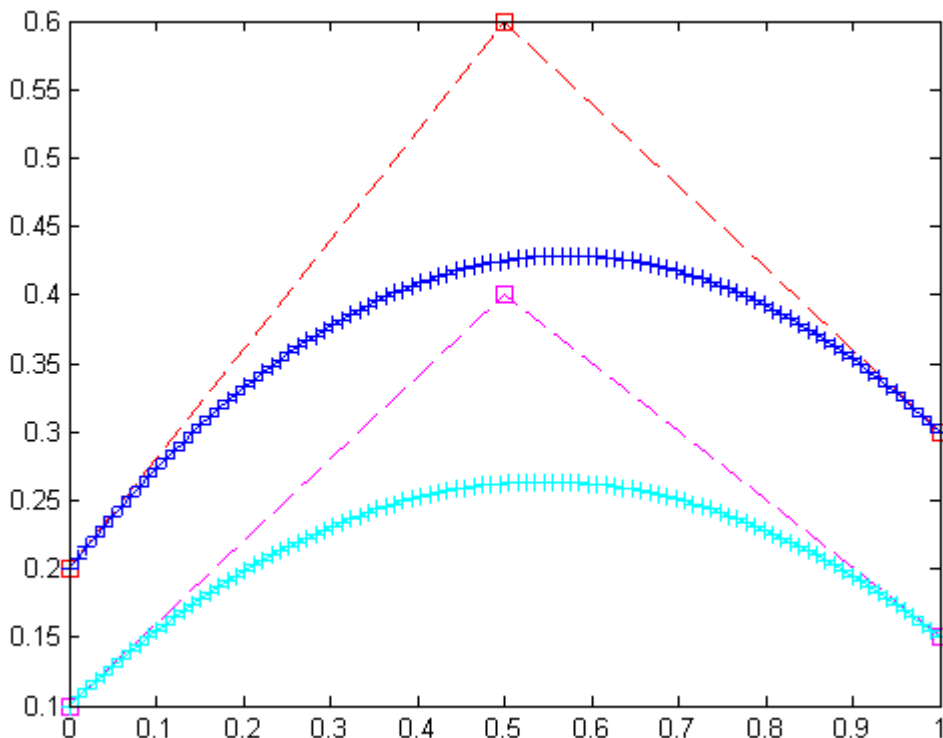


Figura 6.2 Curva di Bézier relativa alle spar delle sezioni

In questo modello si applica una curva di Bézier per descrivere la posizione di tutte le spar più vicine al bordo d'attacco, cioè il lato l_{34i} della sezione ed un'altra per tutte le spar maggiormente prossime al bordo d'uscita, cioè il lato l_{12i} .

Come si vede nell'immagine precedente è scelto inizialmente di seguire una parametrizzazione il più semplice possibile e quindi adoperare un poligono di controllo formato da soli tre punti.

$$B(t) = (1 - t)^2 P_0 + 2(1 - t)t P_1 + t^2 P_2, \quad t \in [0,1] \quad (20)$$

Questa è la formulazione analitica della curva utilizzata che, dato il grado massimo dei termini che la compongono fa parte delle curve quadratiche di Bézier.

Per far sì che la parametrizzazione abbia un significato fisico si devono però prevenire alcuni fenomeni:

- Impedire che le spar siano esterne al contorno del profilo
- Impedire la creazione di nodi o cuspidi nelle curve
- Impedire l'incrocio tra le due curve

Il primo punto è realizzato grazie ad un'ulteriore proprietà delle curve di Bézier. Queste infatti sono sempre contenute nell'involucro convesso dei punti appartenenti al proprio poligono di controllo.

Di conseguenza per limitare la posizione delle spar è sufficiente vincolare dei limiti all'escursione dei punti del poligono di controllo.

Il secondo problema è facilmente risolvibile tramite il seguente espediente: è sufficiente vincolare la posizione lungo x dei punti del poligono di controllo rendendo possibile solamente la traslazione in direzione parallela all'asse delle ordinate. Così da obbligare la curva a passare in modo "ordinato" dal primo all'ultimo punto di controllo e di conseguenza senza creare dei nodi in essa.

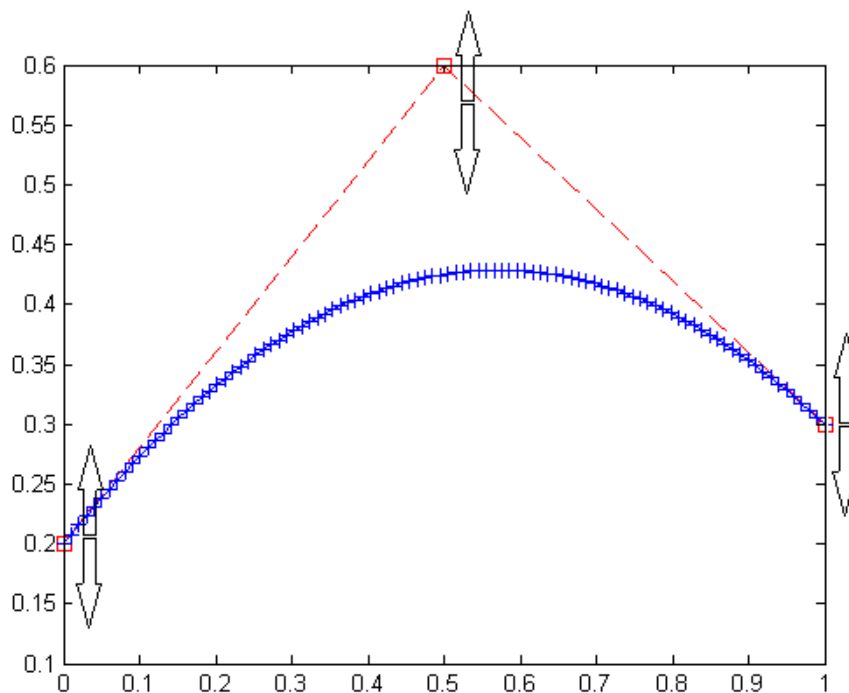


Figura 6.3 Movimenti consentiti ai punti del poligono di controllo

Inoltre in modo contingente si ottiene il dimezzamento del numero di variabili collegate. Il terzo punto invece non viene gestito direttamente dalla porzione di programma dedicata alla parametrizzazione ma bensì è l'ottimizzatore che regola il legame tra le variabili assicurandosi che quelle relative alle spar del lato l_{34i} siano più prossime al leading edge di quelle relative al lato l_{12i} . Nelle ultime due illustrazioni si è fatto riferimento alla posizione delle spar all'interno della skin ma non relazionandosi alla loro collocazione effettiva nello spazio bensì in un piano bidimensionale fittizio che viene usato per facilitare il posizionamento delle stesse. In questo piano fittizio l'asse delle ascisse rappresenta, nell'intervallo $[0,1]$ la sequenza delle cento sezioni che compongono la pala mentre l'asse delle ordinate rappresenta la corda dei profili utilizzati. Il valore specifico che la curva di Bézier assume nella sezione i -esima rappresenta la posizione lungo la corda del profilo i -esimo in cui la spar interseca la corda stessa.

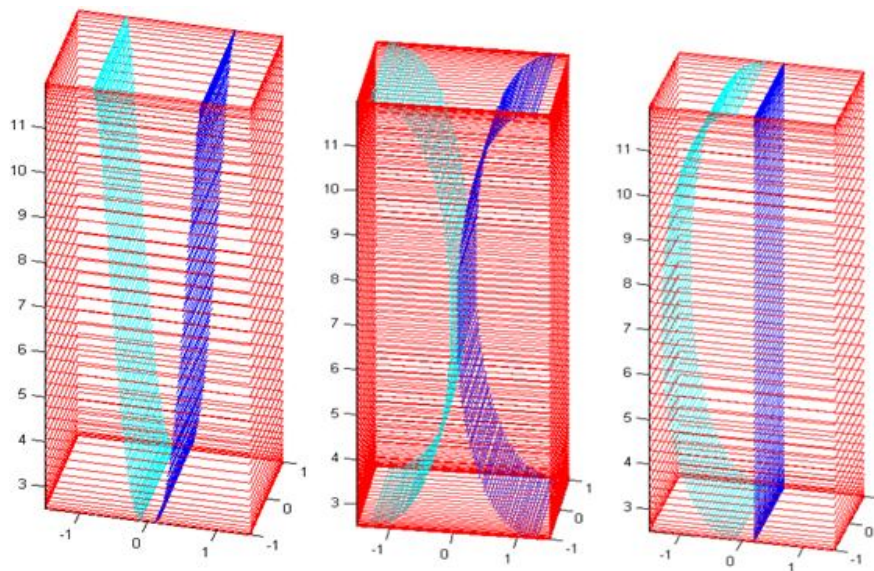


Figura 6.4 Configurazioni della struttura interna per la sezione di test

Tra gli effetti generati da questa tecnica i più rilevanti sono due:

- Tutte le spar sono generate ortogonalmente alla corda del proprio profilo
- La definizione dei limiti da porre alle variabili

La spiegazione del primo punto è immediata in quanto i punti di intersezione spar-corda sono presi quando i profili non sono ancora stati opportunamente ruotati né scalati.

Per quanto riguarda il secondo punto invece la questione è più complessa. La scelta di calcolare

in questo maniera i punti ove si posizioneranno le spar permette di gestire in modo molto più semplice e diretto le variabili. Questo è valido in particolar modo per i limiti superiori ed inferiori che necessariamente si devono imporre alle variabili che così facendo possono variare a partire dal valore 0 in prossimità del leading edge fino ad 1 in vicinanza del trailing edge.

A questo proposito presento qui un caso in cui la parametrizzazione generata è inaccettabile in quanto priva di senso fisico poiché prevede che la trave interna di rinforzo collapsi ad una dimensione trasversale nulla in ben due punti.

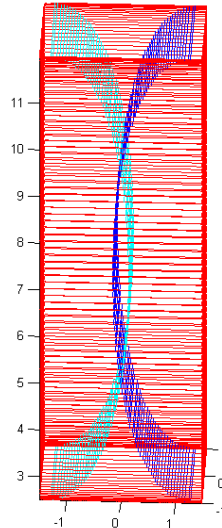


Figura 6.5 Configurazione inaccettabile all'interno della sezione di test

Ecco ora per concludere la rappresentazione della struttura interna della pala effettivamente studiata, sono visibili le spar all'interno ed è distinguibile il ravvicinamento delle due pareti di supporto al tip.

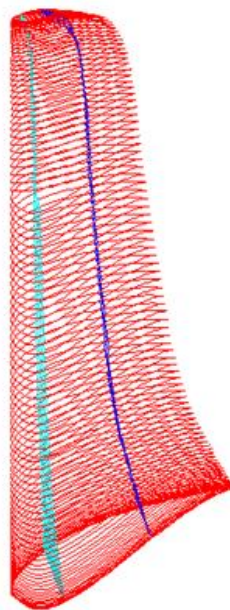


Figura 6.5 Struttura interna della pala studiata

7 Processi di Ottimizzazione

7.1 Introduzione al problema ed ai vincoli

Questo capitolo presenta l'implementazione finale del processo di ottimizzazione della pala eolica. Viene infatti realizzata l'ottimizzazione di una singola funzione obiettivo ovvero la massa della pala, dal punto di vista formale questo può essere espresso dalla funzione:

$$\min f(\mathbf{x}) = \text{Massa Pala}(\mathbf{x}) \quad (21)$$

Dove il vettore \mathbf{x} è il vettore della variabili di decisione su cui il processo di ottimizzazione interviene mentre la massa della pala viene calcolata nella modalità precedentemente esposta nel capitolo 4.

Il numero di variabili impiegate è pari a 7 che sono così suddivise:

- 3 variabili per i punti di controllo della prima spar
- 3 variabili per i punti di controllo della seconda spar
- 1 variabile per lo spessore del materiale

In totale 6 variabili vengono utilizzate per la gestione delle curve di Bézier mentre una è adibita allo spessore che qui viene considerato uniforme in tutta la struttura.

Tuttavia non è concesso a queste variabili di mutare in modo indiscriminato ma vengono fissate delle limitazioni. Queste restrizioni, dette anche vincoli, sono di due tipi: vincoli laterali e vincoli funzionali.

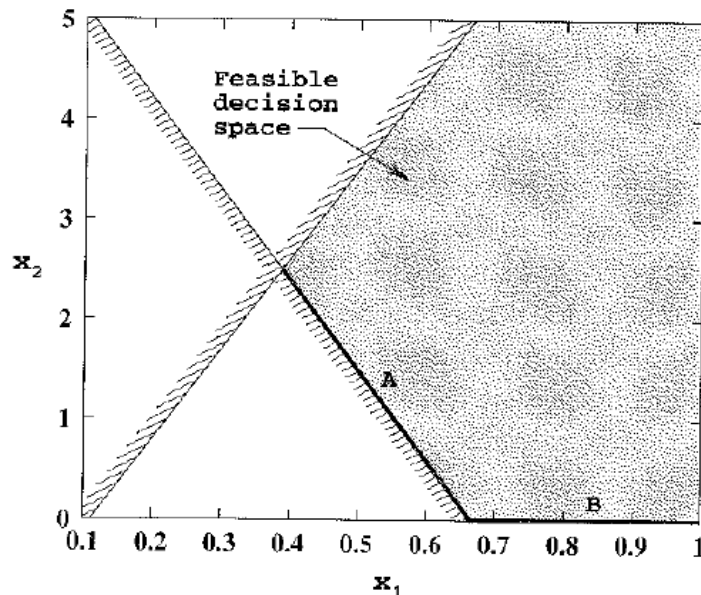


Figura 7.1 Composizione di funzioni di vincolo nello spazio delle variabili di decisione

L'insieme dei vincoli viene definito vincolo di progetto mentre una soluzione che soddisfi tutti i vincoli è detta soluzione ammissibile. Sebbene basilaramente vadano a modificare il problema originario sono fondamentalmente necessarie ed in effetti vengono utilizzate in tutti i processi di ottimizzazione.

Vengono ora riportate le condizioni di vincolo applicate. I vincoli laterali sono posti per limitare entro dei limiti definiti il valore assumibile dalla variabile, in questo caso ad esempio:

$$\left\{ \begin{array}{l} 0.05 \leq x_1 \leq 0.95 \\ 0.05 \leq x_2 \leq 0.95 \\ 0.05 \leq x_3 \leq 0.95 \\ 0.05 \leq x_4 \leq 0.95 \\ 0.05 \leq x_5 \leq 0.95 \\ 0.05 \leq x_6 \leq 0.95 \\ 0.01 \leq x_7 \leq 0.4 \end{array} \right. \quad (22)$$

Come si vede tutti i punti di controllo hanno uguale capacità di movimento all'interno dello spazio di ricerca. Tuttavia come è stato espresso nel capitolo precedente risulta necessario forzare le variabili in modo tale che il modello da esse generato sia fisicamente consistente.

Per questo sono introdotte le prime relazioni di vincolo funzionale:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 \leq x_4 \\ x_2 \leq x_5 \\ x_3 \leq x_6 \end{array} \right. \quad (23)$$

Questo garantisce che i punti di controllo della seconda spar più vicina al trailing edge, e di conseguenza la spar stessa non vadano a scavalcare la prima spar, che è più vicina al bordo d'attacco.

L'ultima funzione di vincolo esistente è relativa alle tensioni presenti sulla struttura esaminata.

$$|\sigma_i| < \sigma_{SNERVAMENTO} = 345 \text{ MPa} \quad (24)$$

Per verifica che la struttura sia in sicurezza si opera la valutazione del valore assoluto delle tensioni in tutti i punti della struttura, le quali devono chiaramente assestarsi a livelli inferiori a quello della tensione di snervamento del materiale.

Si deve a questo punto definire un punto di riferimento con il quale comparare i risultati che verranno restituiti al termine del processo di ottimizzazione. Questo viene realizzato operando una ricerca sistematica in un ampio bacino di possibili configurazioni possibili per pale ove le pareti interne di rinforzo non seguano una curva di Bézier ma siano semplicemente rettilinee.

Una volta ottenuto il valore della funzione obiettivo per tutti questi casi è stato ricavato il valor medio che consiste in 485 kg.

Come si può vedere nell'immagine seguente solo metà dello spazio di ricerca viene effettivamente esplorato. La parte inferiore, di colore blu è dovuta ai vincoli che anche in questo caso sono stati previsti per evitare infondatezze nel calcolo. Per questo alle soluzioni non ammissibili è stato assegnato un valore nullo, per chiarire ulteriormente la grafica inoltre si è deciso di normalizzare i risultati sul valore massimo riscontrato.

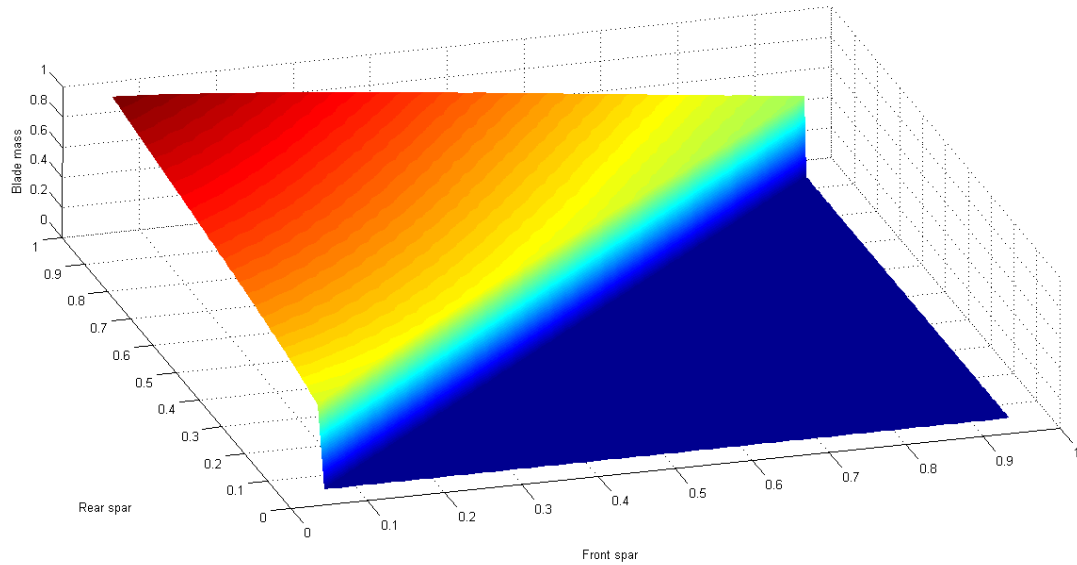


Figura 7.2 Ricerca sistematica della massa totale utilizzando spar rettilinee

Quest'ultima illustrazione mostra come, comprensibilmente, il valore massimo della massa si ottenga qualora si manifestino le seguenti condizioni: la prima spar si mantenga il più vicino possibile al bordo d'attacco e contemporaneamente la seconda spar si assesti in vicinanza del bordo di uscita dei profili. Questo è spiegabile considerando che la lontananza delle due spar genera delle pareti interne di supporto molto corte (i lati l_{12i} ed l_{34i}), ma allo stesso tempo garantisce una lunghezza massima dei lati l_{23} e l_{41} , raddoppiando in effetti lo spessore della skin del profilo.

7.2 Impostazioni algoritmo genetico e risultati

Vengono qui riportati le impostazioni preparatorie all'avvio del processo di ottimizzazione:

- Individui: 50
- Generazioni: 50
- Individui elitari: 5

La relazione empirica tra numero di individui e numero di variabili presenti nel problema che solitamente si adotta è:

$$\text{numero individui} \geq (4 \div 6) \text{numero variabili} \quad (25)$$

Ed in questo caso è pienamente rispettata. Per quanto riguarda le generazioni si può lasciare alla sensibilità dell'operatore la valutazione del numero minimo necessario per arrivare al valore di minimo globale.

Inoltre per stimare il tempo di calcolo che debba trascorrere prima di interrompere l'elaborazione viene in aiuto la visualizzazione in tempo reale fornita da MATLAB dei valori della funzione obiettivo (per ogni generazione) del miglior individuo e la media di tutta la popolazione.

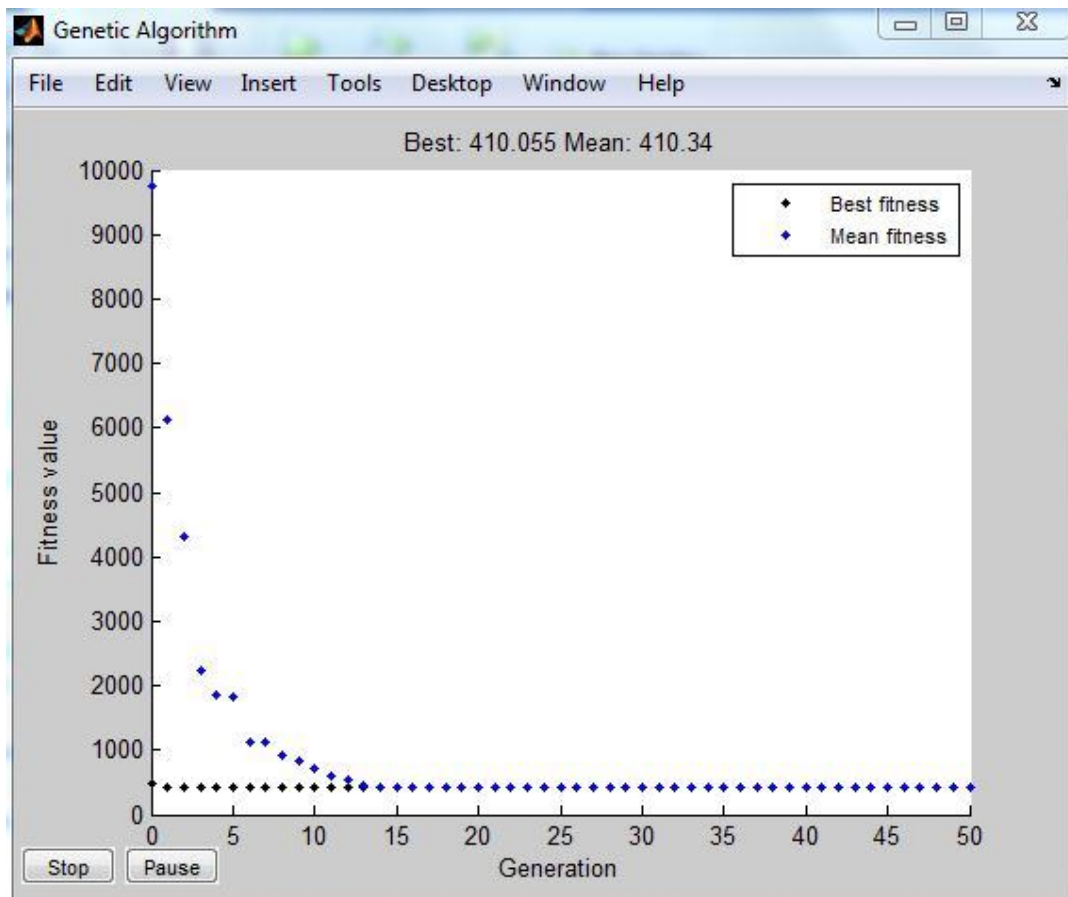


Figura 7.3 Andamento della funzione obiettivo nelle varie generazioni

Infine l'influenza dell'elitarismo viene valutata come un decimo dell'ammontare totale della popolazione così da poter preservare adeguatamente al succedersi delle iterazioni gli individui caratterizzati dal migliore valore della funzione obiettivo.

A titolo informativo riporto inoltre anche la genealogia delle soluzioni calcolate nell'intero processo di ottimizzazione.

Questa rappresenta il legame presente tra gli individui di generazioni successive, inoltre facendo uso di colori differenti permette di distinguere i casi in cui la soluzione sia stata originata da un processo di cross over (in blu) o se sia stata ottenuta grazie all'influenza della mutazione (rosso) o infine se sia stata conservata dalla generazione precedente come un membro di "élite" (in nero). Sebbene non sia possibile distinguere i singoli individui né le loro proprietà è una visualizzazione utile per comprendere più a fondo le dinamiche interne alla popolazione intuendo l'importanza e l'equilibrio esistente tra i tre meccanismi di creazione degli individui: mutazione, riproduzione ed elitismo.

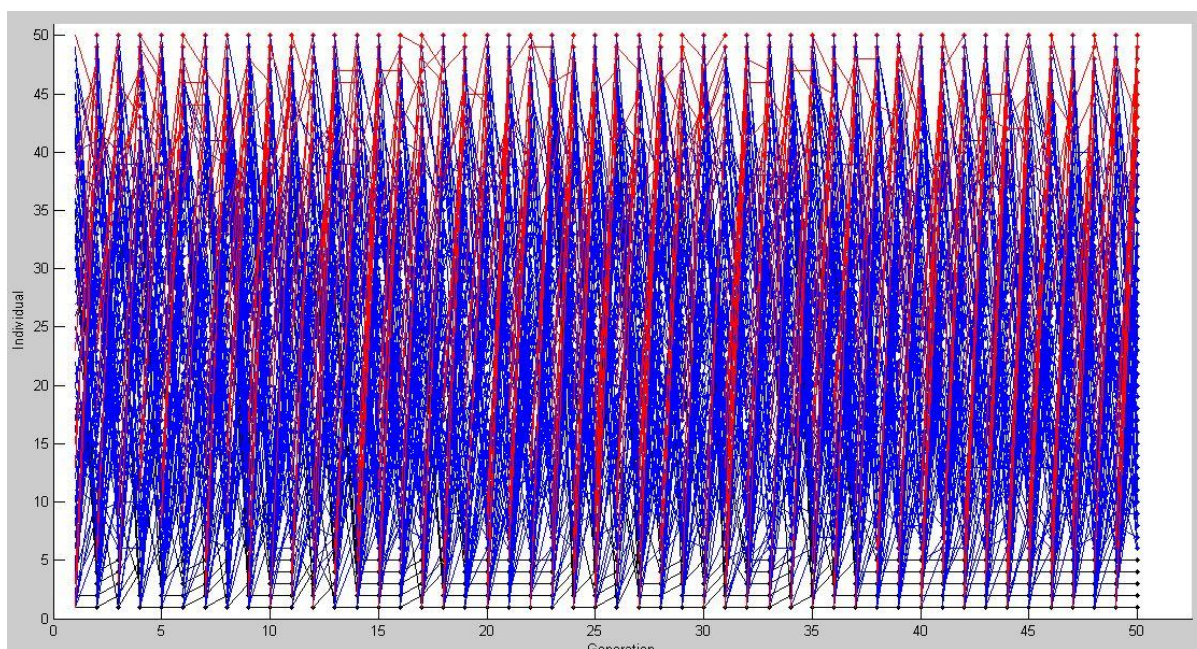


Figura 7.4 Visualizzazione della genealogia delle soluzioni calcolate

Il processo di ottimizzazione si conclude in un breve lasso di tempo, inferiore ai due minuti e di conseguenza, tenendo conto che il numero di valutazioni della funzione obiettivo è risultato pari a 2550, il tempo medio di elaborazione necessario per valutare ogni singola soluzione si assesta sui quattro centesimi di secondo.

Vengono ora presentati i risultati del processo di ottimizzazione, in primo luogo il valore della funzione obiettivo ovvero la massa della pala ottimizzata.

$$\begin{aligned} \text{Massa Pala Ottimizzata} &= 410 \text{ kg} \\ \text{Riduzione rispetto alla baseline} &= -18 \% \end{aligned} \quad (26)$$

Questo risultato è stato generato dal seguente vettore delle variabili di decisione.

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 = 0.2902 \\ x_2 = 0.4310 \\ x_3 = 0.4987 \\ x_4 = 0.5003 \\ x_5 = 0.5500 \\ x_6 = 0.6302 \\ x_7 = 0.0130 \end{array} \right. \quad (27)$$

Risulta subito visibile come la trave interna di supporto non sia molto spessa e presenti la tendenza a restringersi allontanandosi dalla radice della pala.

Inoltre la trave interna ha la caratteristica di giacere in prossimità della mezzeria della sezione in prossimità del mozzo mentre si avvicina al bordo d'uscita proseguendo verso l'estremità della pala. Infine anche il valore assunto dallo spessore è piuttosto vicino al valore imposto come limite inferiore.

Per facilitare la visualizzazione di questa soluzione trovata si presenta una raffigurazione della struttura interna della pala studiata.

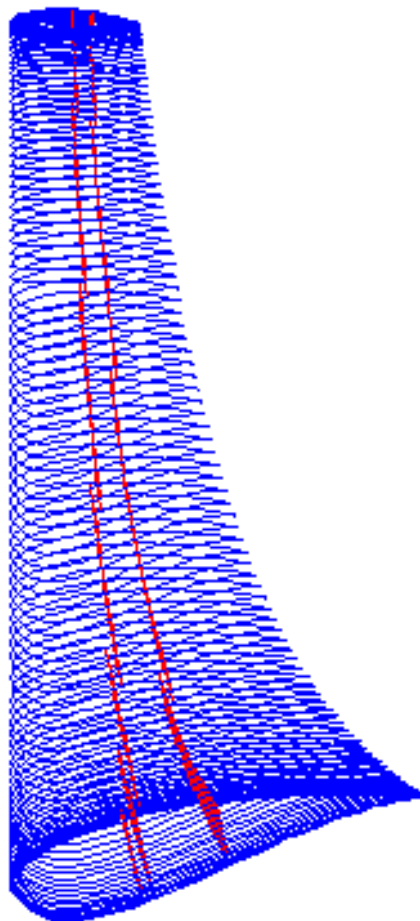


Figura 7.5 Struttura interna della pala ottimizzata

8 Conclusioni e Sviluppi Futuri

In questo scritto è stato esposto un metodo di ottimizzazione strutturale collegato alla riduzione della massa di una pala di rotore eolico da 100 kW.

Contrariamente al solito non è stato utilizzato un codice commerciale ad elementi finiti bensì si è preferito sviluppare interamente in ambiente MATLAB tutto il processo di analisi delle strutture proposte. Allo stesso tempo si deve però ricordare che l'analisi suggerita è tuttavia semplificata e riferisce ad una geometria discretizzata della pala della quale vengono considerate un numero ristretto (cento) di sezioni intermedie.

Le condizioni di carico inoltre sono poste costanti nel tempo e sono composte solamente dalle azioni aerodinamiche e centrifughe. In questa tesi è stato scelto di trascurare l'influenza del taglio sulla struttura in favore delle altre sollecitazioni che agiscono con maggior influenza sulla struttura esaminata.

Per ridurre il numero di variabili coinvolte è stata introdotta una parametrizzazione basata sulle curve di Bézier, così da controllare con solo tre parametri i valori relativi alla posizione di ogni spar.

L'algoritmo che opera il processo di ottimizzazione utilizzato è un'implementazione del NSGA-II cioè un algoritmo genetico. Quest'algoritmo euristico che si ispira all'evoluzione biologica fornisce molte opportunità: l'algoritmo si è dimostrato valido nell'esplorazione dello spazio di ricerca caratterizzato da un numero elevato di dimensioni senza arrestarsi una volta raggiunto un punto di minimo locale. Inoltre è presente il piacere dell'investigare lo schema logico che fenomeni apparentemente casuali riescono a far emergere tra l'immenso numero di soluzioni possibili.

Nel complesso si ritiene che l'approccio qui proposto costituisca un valido strumento per la progettazione preliminare della struttura di una pala eolica, infatti è stato possibile arrivare ad un valore della massa palare pari a 410 kg realizzando una riduzione del 18% rispetto alla baseline.

Questo modello inoltre genera in tempi molto brevi una soluzione ottimizzata valida che può essere poi utilizzata come punto di partenza per studi più approfonditi. Questo è reso possibile anche dalla notevole scalabilità ed adattabilità del codice di programmazione realizzato.

A questo proposito per quanto riguarda gli sviluppi futuri si possono prevedere svariate direzioni in cui possa proseguire il processo di raffinamento del modello attualmente in uso.

In primo luogo sarebbe interessante prevedere la piena influenza degli sforzi di taglio sulla struttura così da avvicinarsi il più possibile all'effettiva condizione di carico presente in una turbina eolica funzionante in un campo fluido e perfettamente regolare.

L'introduzione di materiali compositi inoltre porrebbe una sfida particolarmente stimolante, infatti questo coinvolgerebbe un numero notevole di nuove variabili per controllare il tipo di materiale e l'orientazione dei singoli ply che compongono i laminati. Questo fornirebbe un'opportunità di ricerca di nuovi metodi di parametrizzazione, magari abilitando nell'algoritmo di ottimizzazione la gestione di mixed-integer.

In parallelo con quest'ultima iniziativa sarebbe allettante proseguire il percorso di miglioramento del modello prevedendo un'implementazione in ambito FEM volta allo studio più particolareggiato delle tensioni presenti nel modello della pala.

Queste aggiunte, oltre a rendere il problema nel complesso più stimolante, fornirebbero senza alcun dubbio delle soluzioni di grande interesse ed applicabilità.

9 Indice delle Figure

Figura 2.1	Antico mulino inglese	8
Figura 2.2	Mulino multipala americano	9
Figura 2.3	Turbina MOD-0	10
Figura 2.4	Correlazione tra diametro del rotore e potenza prodotta	12
Figura 2.5	Fonti di produzione energia elettrica in Italia	13
Figura 2.6	Potenza eolica installata sul territorio nazionale	14
Figura 2.7	Atlante Eolico italiano	15
Figura 3.1	Schema di una turbina eolica analoga a quella studiata	17
Figura 3.2	Regolazione dell'angolo di pitch al variare della ventosità	18
Figura 3.3	Modello tridimensionale della pala	19
Figura 3.4	Andamento di corda ed angolo di svergolamento nelle sezioni considerate	20
Figura 3.5	Profilo S823	20
Figura 3.6	Profilo S821	21
Figura 3.7	Profilo S820	21
Figura 3.8	Rappresentazione delle sezioni che costituiscono la pala	22
Figura 3.9	Strutture interne di supporto separati tra loro	23
Figura 3.10	Trave a cassone a supporto della struttura interna	23
Figura 3.11	Tipologie costruttive della struttura palare interna	24
Figura 4.1	Disposizione del sistema di riferimento utilizzato	25
Figura 4.2	I due livelli di discretizzazione della pala	26
Figura 4.3	Rappresentazione di successione di conci	26
Figura 4.4	Topologia della sezione	27
Figura 4.5	Centro di massa della sezione e delle singole porzioni	28
Figura 4.6	Posizione dei centri di massa delle sezioni	29
Figura 4.7	Momento d'inerzia I_{xx} della sezione al variare della posizione delle spar	30
Figura 4.8	Momento d'inerzia I_{yy} della sezione al variare della posizione delle spar	30
Figura 4.9	Tipologie di carichi agenti sulla turbina	32
Figura 4.10	Forze applicate sul profilo della pala eolica	33
Figura 4.11	Carichi aerodinamici assiali e tangenziali agenti sulla pala	34
Figura 4.12	Tensione di trazione presente sulla pala	36
Figura 4.13	Andamento della tensione dovuta alla flessione nelle sezioni terminali	36
Figura 4.14	Visione globale delle tensioni dovute alla flessione	37
Figura 5.1	Relazione tra spazio delle variabili e spazio degli obiettivi	38
Figura 5.2	Discretizzazione della variabile nell'intervallo previsto	39
Figura 5.3	Metodo di selezione a roulette	40
Figura 5.4	Cross-over a punto singolo e a due punti	40
Figura 5.5	Influenza della ricombinazione sulla diversità	41
Figura 5.6	Influenza della mutazione sulla stringa	41
Figura 5.7	Diagramma di funzionamento di un tipico algoritmo genetico	42
Figura 6.1	Curva di Bèzier e relativo poligono di controllo	43
Figura 6.2	Curva di Bèzier relativa alle spar delle sezioni	44
Figura 6.3	Movimenti consentiti ai punti del poligono di controllo	45
Figura 6.4	Configurazioni della struttura interna per la sezione di test	46
Figura 6.5	Configurazione inaccettabile all'interno della sezione di test	47

Figura 6.5	Struttura interna della pala studiata	47
Figura 7.1	Composizione di funzioni di vincolo nello spazio delle variabili di decisione	48
Figura 7.2	Ricerca sistematica della massa totale utilizzando spar rettilinee	50
Figura 7.3	Andamento della funzione obiettivo nelle varie generazioni	51
Figura 7.4	Visualizzazione della genealogia delle soluzioni calcolate	52
Figura 7.5	Struttura interna della pala ottimizzata	53
Tabella 1	Specifiche delle turbine eoliche NASA	11
Tabella 2	Distinzione turbine in base alla potenza specifica	18
Tabella 3	Tipologie di materiali utilizzati per pale eoliche	31

10 Appendice A– Dati Input

Questa sezione si occupa di riportare i dati alla base dell'elaborazione effettuata e presentata in questo scritto.

In primo luogo vengono qui riportati i dati relativi alle coordinate dei profili alari utilizzati nella modellazione della pala.

Profilo S823

estradosso		intradosso	
x/c	y/c	x/c	y/c
1	0	0,000174	-0,001931
0,996182	0,001021	0,0008	-0,004837
0,985647	0,004487	0,002374	-0,009387
0,969834	0,009935	0,010193	-0,023971
0,949208	0,016186	0,021425	-0,041404
0,923311	0,02286	0,03433	-0,059382
0,892433	0,030245	0,049121	-0,076692
0,857144	0,038305	0,065425	-0,091707
0,818037	0,046896	0,084347	-0,102507
0,775723	0,05581	0,108058	-0,10978
0,73081	0,064793	0,136074	-0,114432
0,68389	0,073566	0,168058	-0,116517
0,635537	0,081835	0,203782	-0,116043
0,586291	0,089312	0,243045	-0,113061
0,536666	0,095725	0,285642	-0,107692
0,487145	0,100825	0,331343	-0,100136
0,438182	0,104394	0,379872	-0,090684
0,390202	0,106236	0,430894	-0,079712
0,343554	0,106115	0,483993	-0,067673
0,298349	0,104071	0,538656	-0,055088
0,25503	0,100219	0,594258	-0,042513
0,213826	0,094667	0,650057	-0,03052
0,17515	0,087661	0,70519	-0,019649
0,139404	0,079378	0,758682	-0,010377
0,106993	0,069983	0,809471	-0,003071
0,078238	0,059647	0,856439	0,002045
0,053489	0,048562	0,89846	0,004922
0,032973	0,036935	0,934449	0,005687
0,017013	0,025059	0,963294	0,004594
0,005871	0,013252	0,9839	0,00254
0,001538	0,006021	0,996032	0,000732
0	0	1	0

Profilo S821

estradosso		intradosso	
x/c	y/c	x/c	y/c
0,00004	0,00203	0,00001	-0,00076
0,00037	0,0055	0,00243	-0,01654
0,0011	0,00847	0,00887	-0,03393
0,00234	0,01186	0,01876	-0,05219
0,00405	0,01499	0,0317	-0,07058
0,01212	0,0252	0,04745	-0,08838
0,02684	0,03773	0,06576	-0,10493
0,04636	0,0498	0,08643	-0,11944
0,0704	0,06118	0,10959	-0,1311
0,09865	0,07171	0,13548	-0,13943
0,13075	0,08122	0,16433	-0,14399
0,16633	0,08955	0,19663	-0,14462
0,20495	0,09652	0,23262	-0,1417
0,24618	0,1019	0,27216	-0,13552
0,2897	0,10538	0,31514	-0,12635
0,33539	0,10684	0,36142	-0,11455
0,383	0,10642	0,41081	-0,10062
0,43214	0,10431	0,463	-0,08518
0,48234	0,10066	0,51756	-0,06893
0,53312	0,09566	0,57389	-0,05266
0,58396	0,08955	0,63119	-0,03717
0,63429	0,08254	0,6885	-0,02322
0,68353	0,07489	0,74465	-0,01147
0,73105	0,0668	0,79836	-0,00239
0,77624	0,05851	0,84823	0,00376
0,81848	0,05016	0,89291	0,007
0,85715	0,04192	0,93109	0,00763
0,89164	0,03377	0,96165	0,00615
0,92166	0,02552	0,98346	0,0034
0,9474	0,01733	0,99601	0,00093
1	0	1	0

Profilo S820

estradosso		intradosso	
x/c	y/c	x/c	y/c
0,00013	0,00133	0,00001	-0,00041
0,00364	0,0091	0,00032	-0,00187
0,01172	0,01811	0,00117	-0,003
0,02425	0,02758	0,00258	-0,00423
0,0412	0,03708	0,01207	-0,00946
0,06255	0,04637	0,02754	-0,01514
0,08815	0,05531	0,04834	-0,02097
0,11774	0,06379	0,07403	-0,02684
0,15102	0,07167	0,10419	-0,0326
0,18764	0,07884	0,13841	-0,03813
0,22719	0,0852	0,17622	-0,0433
0,26923	0,09063	0,21715	-0,04798
0,3133	0,09501	0,26072	-0,05203
0,35891	0,09825	0,30638	-0,05533
0,40555	0,10022	0,3536	-0,05772
0,45272	0,10079	0,40183	-0,05903
0,49988	0,09978	0,4505	-0,059
0,54666	0,09688	0,49923	-0,05721
0,593	0,09196	0,54807	-0,0534
0,63875	0,08518	0,59707	-0,04785
0,68373	0,07668	0,64604	-0,04093
0,72795	0,06688	0,69476	-0,03316
0,77109	0,05656	0,74277	-0,02532
0,81244	0,04635	0,78923	-0,01803
0,85123	0,03666	0,833325	-0,01172
0,88668	0,02775	0,87388	-0,00668
0,91818	0,01962	0,9102	-0,00304
0,94544	0,01242	0,94132	-0,00077
0,96806	0,00661	0,96644	0,00029
0,98531	0,00263	0,9849	0,00047
0,99624	0,00057	0,9962	0,0002
1	0	1	0

Ecco ora la tabella riportante alcune grandezze caratteristiche della pala in esame quali:

- Posizione radiale (distanza dal mozzo)
- Corda
- Angolo di twist
- Velocità relativa del vento
- Posizione del centro di pressione

Inoltre sono riportati i valori dei coefficienti aerodinamici relativi alla sezione, in particolare:

- Il coefficiente di portanza C_l
- Il coefficiente di resistenza C_d
- Il coefficiente di momento $C_{m_{c/4}}$
(al quarto di corda)
- Coefficiente di forza assiale C_a
- Coefficiente di forza normale C_n

Si ricordano alcune caratteristiche generali relative alle condizioni di esercizio della turbina:

Velocità nominale del vento: $V = 15 \text{ m/s}$

Velocità di rotazione delle pale: $\Omega = 65 \text{ rpm}$

La tabella seguente è stata suddivisa secondo i tre profili utilizzati nelle specifiche sezioni.

Profilo S823

posrad [m]	alpha [°]	alpha [rad]	c [m]	vrel [m/s]	Cm,c/4 [-]	Cl [-]	Cd [-]	Cn [-]	Ca [-]	Xcp [m]
2,502	17,738	0,310	1,287	22,260	-0,067	1,588	0,065	1,532486978	-0,421603623	0,377848221
2,509	17,720	0,309	1,285	22,297	-0,067	1,588	0,065	1,532338146	-0,421248805	0,377336838
2,521	17,692	0,309	1,282	22,359	-0,067	1,587	0,065	1,53209999	-0,4206723	0,376485118
2,537	17,652	0,308	1,278	22,446	-0,067	1,587	0,064	1,531756167	-0,419856965	0,375293614
2,557	17,601	0,307	1,273	22,557	-0,067	1,586	0,064	1,531311764	-0,418822672	0,373678968
2,582	17,540	0,306	1,266	22,694	-0,067	1,585	0,063	1,530793119	-0,417586916	0,371809688
2,612	17,470	0,305	1,259	22,855	-0,067	1,585	0,062	1,530177736	-0,41615646	0,369606004
2,646	17,391	0,304	1,250	23,041	-0,067	1,583	0,062	1,529491346	-0,41455138	0,367066882
2,685	17,304	0,302	1,240	23,253	-0,067	1,582	0,061	1,528738831	-0,412792463	0,364113858
2,728	17,210	0,300	1,229	23,490	-0,067	1,581	0,060	1,527916126	-0,410895677	0,360912793
2,775	17,111	0,299	1,217	23,752	-0,067	1,580	0,058	1,527054942	-0,408898168	0,357306909
2,827	17,008	0,297	1,204	24,039	-0,067	1,578	0,057	1,526149497	-0,406823134	0,353456486
2,883	16,905	0,295	1,189	24,352	-0,067	1,577	0,056	1,524848668	-0,40446445	0,349451852
2,943	16,801	0,293	1,174	24,690	-0,067	1,575	0,055	1,523494532	-0,402065975	0,345129985
3,008	16,667	0,291	1,159	25,054	-0,067	1,572	0,054	1,521742812	-0,398971053	0,340863659
3,076	16,501	0,288	1,144	25,442	-0,068	1,569	0,053	1,519572829	-0,395169913	0,336766861
3,149	16,335	0,285	1,128	25,856	-0,068	1,566	0,051	1,517403006	-0,391388486	0,332475187
3,225	16,172	0,282	1,111	26,295	-0,068	1,563	0,050	1,515251732	-0,387678831	0,327849427
3,306	16,013	0,279	1,094	26,759	-0,069	1,560	0,048	1,513150043	-0,384084599	0,322960202
3,390	15,871	0,277	1,075	27,250	-0,069	1,556	0,047	1,509692427	-0,380246281	0,317861296
3,478	15,714	0,274	1,057	27,765	-0,069	1,551	0,046	1,505713126	-0,375991254	0,312787302
3,569	15,514	0,271	1,040	28,303	-0,07	1,545	0,044	1,500636636	-0,370612636	0,308166224
3,665	15,323	0,267	1,022	28,867	-0,07	1,539	0,043	1,495739512	-0,365479185	0,303329105
3,763	15,140	0,264	1,004	29,454	-0,07	1,533	0,041	1,491048104	-0,360616132	0,298280177
3,865	14,963	0,261	0,985	30,064	-0,071	1,529	0,040	1,487368715	-0,356217164	0,293065998
3,971	14,752	0,257	0,966	30,696	-0,072	1,528	0,038	1,486887386	-0,352248085	0,288301451
4,079	14,519	0,253	0,949	31,350	-0,073	1,526	0,036	1,486347274	-0,347864815	0,28389342
4,190	14,302	0,250	0,931	32,027	-0,074	1,525	0,034	1,485833985	-0,343785492	0,279246142
4,305	14,101	0,246	0,913	32,725	-0,075	1,523	0,032	1,485356945	-0,340022078	0,274428285
4,422	13,917	0,243	0,894	33,445	-0,076	1,520	0,031	1,482924421	-0,335804497	0,269591582
4,542	13,715	0,239	0,878	34,185	-0,078	1,514	0,030	1,477623148	-0,330200005	0,265444753
4,665	13,527	0,236	0,861	34,945	-0,079	1,508	0,028	1,472675969	-0,325032685	0,261091545
4,790	13,355	0,233	0,843	35,724	-0,08	1,502	0,027	1,468122619	-0,320320102	0,256593984
4,918	13,182	0,230	0,826	36,521	-0,081	1,497	0,026	1,463545362	-0,315631723	0,252146703

Profilo S821

posrad [m]	alpha [°]	alpha [rad]	c [m]	vrel [m/s]	Cm,c/4 [-]	Cl [-]	Cd [-]	Cn [-]	Ca [-]	Xcp [m]
5,048	12,994	0,227	0,811	37,334	-0,041	1,491	0,025	1,458416931	-0,310509536	0,225505676
5,180	12,832	0,224	0,795	38,165	-0,042	1,483	0,025	1,451155003	-0,305173848	0,221675017
5,314	12,684	0,221	0,779	39,012	-0,043	1,475	0,024	1,444506618	-0,300333848	0,217640463
5,449	12,524	0,219	0,764	39,873	-0,044	1,467	0,024	1,437245664	-0,295104668	0,214000359
5,587	12,366	0,216	0,749	40,748	-0,044	1,459	0,023	1,430127271	-0,290033952	0,210441107
5,726	12,222	0,213	0,734	41,635	-0,045	1,452	0,022	1,423600162	-0,285433753	0,206808508
5,867	12,104	0,211	0,720	42,536	-0,046	1,439	0,022	1,412001776	-0,280555767	0,203246331
6,009	12,025	0,210	0,707	43,450	-0,046	1,414	0,021	1,387097877	-0,274262512	0,200113074
6,152	11,957	0,209	0,693	44,374	-0,046	1,388	0,020	1,361954381	-0,2681545	0,196899939
6,296	11,901	0,208	0,680	45,307	-0,047	1,362	0,019	1,336472584	-0,262215823	0,193663606
6,441	11,760	0,205	0,668	46,244	-0,047	1,351	0,019	1,326870393	-0,257052923	0,190733351
6,587	11,626	0,203	0,655	47,189	-0,048	1,342	0,019	1,318358429	-0,252325148	0,187714981
6,734	11,503	0,201	0,643	48,140	-0,049	1,334	0,018	1,310495877	-0,24800197	0,184658367
6,881	11,385	0,199	0,632	49,095	-0,049	1,325	0,018	1,302935047	-0,243883764	0,181842443
7,028	11,274	0,197	0,621	50,055	-0,05	1,318	0,018	1,295853027	-0,240062204	0,179104823
7,176	11,173	0,195	0,610	51,017	-0,05	1,311	0,018	1,28937267	-0,236594085	0,176293954
7,324	11,063	0,193	0,600	51,982	-0,051	1,303	0,018	1,282280869	-0,232832824	0,173645608
7,472	10,943	0,191	0,590	52,947	-0,051	1,294	0,017	1,27412708	-0,228681122	0,171172362
7,619	10,834	0,189	0,580	53,913	-0,052	1,286	0,017	1,266108759	-0,224768465	0,168692744
7,766	10,729	0,187	0,570	54,878	-0,052	1,278	0,017	1,258483473	-0,221077072	0,166235141
7,913	10,627	0,185	0,561	55,840	-0,053	1,270	0,017	1,250979819	-0,217479032	0,16397244
8,059	10,532	0,184	0,553	56,800	-0,053	1,262	0,017	1,243973717	-0,214150488	0,161705449
8,204	10,442	0,182	0,544	57,755	-0,053	1,255	0,017	1,237430384	-0,21106239	0,159443791
8,348	10,350	0,181	0,536	58,705	-0,054	1,248	0,017	1,230644723	-0,207889658	0,157439613
8,491	10,264	0,179	0,528	59,649	-0,054	1,241	0,016	1,2242853	-0,204937885	0,15539595
8,633	10,183	0,178	0,520	60,586	-0,054	1,235	0,016	1,218325191	-0,202189781	0,153358719
8,774	10,079	0,176	0,514	61,515	-0,055	1,227	0,016	1,21065251	-0,198684541	0,151874155
8,913	9,968	0,174	0,509	62,435	-0,055	1,218	0,016	1,202480139	-0,194986299	0,150589636
9,051	9,862	0,172	0,503	63,345	-0,056	1,210	0,016	1,194636203	-0,191484484	0,14931452

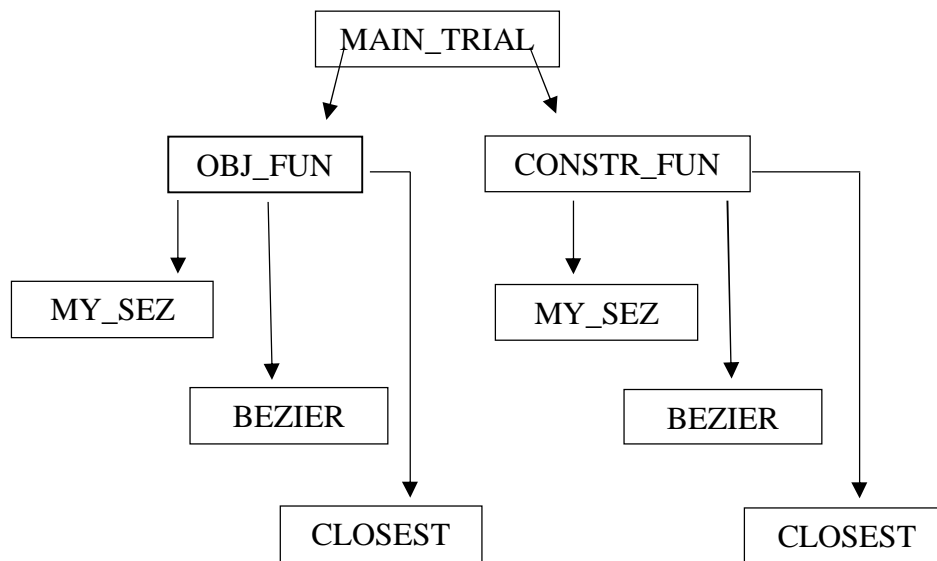
Profilo S820

posrad [m]	alpha [°]	alpha [rad]	C [m]	vrel [m/s]	Cm,c/4 [-]	Cl [-]	Cd [-]	Cn [-]	Ca [-]	Xcp [m]
9,187	9,771	0,171	0,497	64,244	-0,04	1,203	0,016	1,187966759	-0,18853273	0,14084178
9,320	9,716	0,170	0,490	65,132	-0,04	1,198	0,016	1,183905422	-0,186745887	0,13892831
9,452	9,664	0,169	0,482	66,007	-0,04	1,194	0,016	1,180049939	-0,185059736	0,137039291
9,582	9,614	0,168	0,475	66,868	-0,04	1,190	0,016	1,176372429	-0,18345944	0,13513679
9,710	9,561	0,167	0,469	67,716	-0,041	1,175	0,016	1,161391659	-0,179659046	0,133790039
9,835	9,506	0,166	0,464	68,548	-0,041	1,155	0,016	1,141414818	-0,174923374	0,132709351
9,958	9,451	0,165	0,459	69,365	-0,041	1,135	0,016	1,122262488	-0,170401276	0,131651254
10,078	9,395	0,164	0,454	70,164	-0,042	1,116	0,016	1,103935346	-0,166089613	0,130616591
10,195	9,314	0,163	0,449	70,944	-0,042	1,109	0,016	1,096624182	-0,163450316	0,129572686
10,310	9,228	0,161	0,445	71,704	-0,043	1,104	0,016	1,091779756	-0,16119692	0,128580723
10,421	9,142	0,160	0,441	72,445	-0,043	1,098	0,016	1,08692135	-0,158955645	0,127578084
10,530	9,055	0,158	0,437	73,166	-0,043	1,093	0,016	1,082020758	-0,156711998	0,12664845
10,635	8,968	0,157	0,433	73,866	-0,044	1,088	0,015	1,07718663	-0,154483668	0,12580154
10,737	8,879	0,155	0,429	74,543	-0,045	1,083	0,015	1,072403274	-0,152238885	0,125064431
10,835	8,787	0,153	0,426	75,198	-0,045	1,078	0,015	1,067454429	-0,149933683	0,124362624
10,931	8,690	0,152	0,422	75,830	-0,046	1,072	0,015	1,062272994	-0,14754072	0,123698504
11,022	8,588	0,150	0,419	76,437	-0,046	1,067	0,014	1,056791908	-0,145031436	0,12311448
11,110	8,469	0,148	0,416	77,020	-0,047	1,060	0,014	1,050363185	-0,142118167	0,122671604
11,194	8,337	0,146	0,413	77,577	-0,048	1,052	0,014	1,04325089	-0,138927916	0,122299206
11,275	8,196	0,143	0,411	78,108	-0,049	1,044	0,013	1,035614118	-0,135546191	0,122013784
11,351	8,043	0,140	0,408	78,611	-0,05	1,036	0,013	1,027317329	-0,131921509	0,121819621
11,424	7,877	0,137	0,406	79,087	-0,051	1,025	0,013	1,017448319	-0,127852752	0,121738064
11,492	7,695	0,134	0,403	79,534	-0,052	1,014	0,012	1,006193829	-0,123354005	0,121729918
11,557	7,491	0,131	0,401	79,950	-0,053	1,001	0,012	0,993544412	-0,118393728	0,121927982
11,617	7,257	0,127	0,400	80,336	-0,055	0,986	0,012	0,979097991	-0,112849054	0,122304117
11,673	6,986	0,122	0,398	80,688	-0,057	0,968	0,011	0,962287186	-0,106555296	0,122917061
11,725	6,664	0,116	0,397	81,005	-0,059	0,948	0,011	0,942574808	-0,09925634	0,123966964
11,772	6,281	0,110	0,395	81,284	-0,062	0,924	0,010	0,919132141	-0,090892958	0,1253439
11,815	5,922	0,103	0,394	81,532	-0,065	0,903	0,010	0,898752534	-0,083575282	0,126876992
11,854	5,586	0,098	0,393	81,751	-0,069	0,889	0,009	0,885283632	-0,077742802	0,128735057
11,888	5,286	0,092	0,392	81,942	-0,072	0,876	0,008	0,873169541	-0,072647155	0,130415074
11,918	5,010	0,087	0,391	82,104	-0,075	0,865	0,007	0,862032357	-0,068087077	0,132054491
11,943	4,767	0,083	0,391	82,238	-0,077	0,849	0,007	0,846397085	-0,063639551	0,133278388
11,963	4,538	0,079	0,390	82,343	-0,079	0,834	0,006	0,831411807	-0,05955026	0,134473286
11,979	4,322	0,075	0,390	82,417	-0,08	0,819	0,006	0,817202535	-0,05578875	0,135723255
11,991	4,116	0,072	0,389	82,462	-0,082	0,805	0,006	0,803721415	-0,052323805	0,13697992
11,998	3,927	0,069	0,389	82,477	-0,083	0,790	0,005	0,788099564	-0,048853799	0,138043445

11 Appendice B – Programmi Matlab

Vengono riportati in questa sezione i listati di tutti i programmi MATLAB utilizzati nello svolgimento del processo di ottimizzazione presentato in questo scritto.

Di seguito viene rappresentato lo schema a blocchi che descrive il comportamento dell'insieme dei programmi di seguito riportati, in modo particolare viene rappresentata la gerarchia presente tra le funzioni che compongono il modello.



Script Principale del Processo di Ottimizzazione

```
% Programma principale del trial #1

% Le variabili presenti sono 7:
% 6 per la posizione delle 2 spar ed il settimo per lo spessore della parete

tic

nvars=7;

% Definizione delle condizioni di vincolo
A=[1 0 0 -1 0 0 0;
   0 1 0 0 -1 0 0;
   0 0 1 0 0 -1 0];
b=zeros(3,1);

Aeq=[];
beq=[];

% Definizione dell' ampiezza dello spazio di ricerca

LB=[0.05*ones(1,nvars-1),0.01];
UB=[0.95*ones(1,nvars-1),0.4];

% Definizione delle opzioni relative al processo e lancio del processo di
% ottimizzazione

options =
gaoptimset('PlotFcns',@gaplotbestf,'PopulationSize',50,'Generations',50,...
           'EliteCount',5);
[x,Fval,exitFlag,Output]=ga(@obj_fun,nvars,A,b,Aeq,beq,LB,UB,[],options)

toc
```

Programma della Funzione Obiettivo

```
function mass_tot= obj_fun(spar)
% Questa funzione calcola il valore della funzione obiettivo del problema:
% la massa della pala

%% In questa sezione vengono inseriti i dati necessari all' elaborazione

%Inserimento dei caratteristiche di base della pala in esame

rho=2780;% kg/m^3
omega=65*2*pi/60; %rad/s

% Lettura dei file recanti le caratteristiche dei profili e della pala

airfoil_root=dlmread('s823p50.txt');
airfoil_middle=dlmread('s821p50.txt');
airfoil_tip=dlmread('s820p50.txt');
prop=dlmread('prop_full.txt');

rad_dist=prop(:,1);
alfa=prop(:,2);
corda=prop(:,4);

% Inizializzazione delle variabili: centro di massa, momenti di inerzia e
% area di sezione per ogni sezione della pala

cm=zeros(100,2);
mom_inerzia=zeros(100,3);
area_sez=zeros(100,1);

%% Questa sezione verifica che gli input siano conformi con quanto
% ipotizzato e che rientrino nei limiti imposti

% Verifica dell'assenza di intersezione tra le spar

if spar(1)>spar(4)
    [spar(1),spar(4)]=deal(spar(4),spar(1));
end

if spar(2)>spar(5)
    [spar(2),spar(5)]=deal(spar(5),spar(2));
end

if spar(3)>spar(6)
    [spar(3),spar(6)]=deal(spar(6),spar(3));
end

% Si ricavano le curve parametriche che rappresentano le due spar a partire dai
% punti di controllo, posti a intervalli fissi ed equispaziati lungo x

% Prima spar
[~,xspar1]=bezier([0,.5,1],spar(1:3));

% Seconda spar
[~,xspar2]=bezier([0,.5,1],spar(4:6));

% Verifica che le spar siano sempre compresi tra il leading ed il trailing edge
```

```

lowerlimit=0.05;
upperlimit=0.95;

xspar1(xspar1<lowerlimit)=lowerlimit;
xspar2(xspar2>upperlimit)=upperlimit;

%% Questa sezione si occupa di calcolare la aree di sezione arrivando così
% al valore della funzione obiettivo

% Scelgo il profilo di base a seconda del numero di sezione
for n_sez=1:100

    if n_sez>=1 && n_sez<=34
        coord=airfoil_root;
    elseif n_sez>34 && n_sez<=63
        coord=airfoil_middle;
    elseif n_sez>63
        coord=airfoil_tip;
    end
    x=coord(:,1);
    N=numel(x(:,1));

    % Si approssima la posizione lungo x della spar a quella di un punto
    esistente
    % nel profilo discretizzato
    [~, index1u ] = closest(x(1:ceil(N/2)),xspar1(n_sez));
    [~, index1l ] = closest(x(ceil(N/2):end),xspar1(n_sez));
    [~, index2u ] = closest(x(1:ceil(N/2)),xspar2(n_sez));
    [~, index2l ] = closest(x(ceil(N/2):end),xspar2(n_sez));

    index1l=ceil(index1l+N/2)-1;
    index2l=ceil(index2l+N/2)-1;

    % I profili delle singole sezioni vengono portati alle dimensioni effettive
    % ruotando e scalando i profili di base seguendo le proprietà fornite

    coord=coord.*corda(n_sez);
    coord(:,3)=rad_dist(n_sez)*ones(numel(coord(:,1)),1);
    R=[cosd(alfa(n_sez)), -
    sind(alfa(n_sez)), 0;sind(alfa(n_sez)), cosd(alfa(n_sez)), 0;0,0,1];
    coord=(R*coord)';
    x=coord(:,1);
    y=coord(:,2);

    % Definizione dello spessore
    thickness=spar(7);
    % La seguente subroutine calcola le caratteristiche geometriche della
    sezione

    [cm(n_sez,1:2),mom_inerzia(n_sez,1:3),area_sez(n_sez)]=mysez(x,y,thickness,[inde
    x1l index1u index2l index2u]);

end

% Calcolo della funzione obiettivo: la massa della pala

mass_tot=rho*trapz(rad_dist,area_sez);
end

```

Programma della Funzione di Vincolo

```
function [c,ceq]=constr_fun(spar)

% Questa funzione si occupa di garantire che le sollecitazioni presenti
% nella pala rientrino entro i limiti di sicurezza

%% In questa sezione vengono inseriti i dati necessari all' elaborazione

%Inserimento dei caratteristiche di base della pala in esame

rho=2780;% kg/m^3
omega=65*2*pi/60; %rad/s

% Lettura dei file recanti le caratteristiche dei profili e della pala

airfoil_root=dlmread('s823p50.txt');
airfoil_middle=dlmread('s821p50.txt');
airfoil_tip=dlmread('s820p50.txt');
prop=dlmread('prop_full.txt');

rad_dist=prop(:,1);
alfa=prop(:,2);
corda=prop(:,4);
lift=prop(:,16);
drag=prop(:,17);

% Inizializzazione delle variabili: centro di massa, momenti di inerzia e
% area di sezione per ogni sezione della pala

cm=zeros(100,2);
mom_inerzia=zeros(100,3);
area_sez=zeros(100,1);

%% Questa sezione verifica che gli input siano conformi con quanto
% ipotizzato e che rientrino nei limiti imposti

% Verifica dell'assenza di intersezione tra le spar

if spar(1)>spar(4)
    [spar(1),spar(4)]=deal(spar(4),spar(1));
end

if spar(2)>spar(5)
    [spar(2),spar(5)]=deal(spar(5),spar(2));
end

if spar(3)>spar(6)
    [spar(3),spar(6)]=deal(spar(6),spar(3));
end

% Si ricavano le curve parametriche che rappresentano le due spar a partire dai
% punti di controllo, posti a intervalli fissi ed equispaziati lungo x

% Prima spar
[~,xspar1]=bezier([0,.5,1],spar(1:3));

% Seconda spar
```

```

[~,xspar2]=bezier([0,.5,1],spar(4:6));

% Verifica che le spar siano sempre compresi tra il leading ed il trailing edge

lowerlimit=0.05;
upperlimit=0.95;

xspar1(xspar1<lowerlimit)=lowerlimit;
xspar2(xspar2>upperlimit)=upperlimit;

%% Questa sezione si occupa di calcolare la aree di sezione arrivando così
% al valore della funzione obiettivo

% Inizializzo la variabile che conterra tutti punti della pala
% discretizzata
coord_pala=zeros(100*100,3);

% Scelgo il profilo di base a seconda del numero di sezione
for n_sez=1:100

    if n_sez>=1 && n_sez<=34
        coord=airfoil_root;
    elseif n_sez>34 && n_sez<=63
        coord=airfoil_middle;
    elseif n_sez>63
        coord=airfoil_tip;
    end
    x=coord(:,1);
    N=numel(x(:,1));

    % Si approssima la posizione lungo x della spar a quella di un punto
    esistente
    % nel profilo discretizzato
    [~, index1u ] = closest(x(1:ceil(N/2)),xspar1(n_sez));
    [~, index1l ] = closest(x(ceil(N/2):end),xspar1(n_sez));
    [~, index2u ] = closest(x(1:ceil(N/2)),xspar2(n_sez));
    [~, index2l ] = closest(x(ceil(N/2):end),xspar2(n_sez));

    index1l=ceil(index1l+N/2)-1;
    index2l=ceil(index2l+N/2)-1;

    % I profili delle singole sezioni vengono portati alle dimensioni effettive
    % ruotando e scalando i profili di base seguendo le proprietà fornite

    coord=coord.*corda(n_sez);
    coord(:,3)=rad_dist(n_sez)*ones(numel(coord(:,1)),1);
    R=[cosd(alfa(n_sez)), -
sind(alfa(n_sez)),0;sind(alfa(n_sez)),cosd(alfa(n_sez)),0;0,0,1];
    coord=(R*coord)';
    x=coord(:,1);
    y=coord(:,2);
    z=coord(:,3);
    %
    coord_pala((1+N*(n_sez-1)):(N*n_sez),:)=x,y,z];

% Definizione dello spessore
thickness=spar(7);

```

```

    % La seguente subroutine calcola le caratteristiche geometriche della
sezione

[cm(n_sez,1:2),mom_inerzia(n_sez,1:3),area_sez(n_sez)]=mysez(x,y,thickness,[inde
x1l index1u index2l index2u]);

end

%% Questa sezione si occupa di calcolare le sollecitazioni presenti sulla pala

% Calcolo della forza centrifuga e della conseguente sigma di trazione
% agente sulla pala

forza_centr=zeros(100,1);
sigma_centr=zeros(100,1);

for ii=99:-1:1

forza_centr(ii)=forza_centr(ii+1)+omega^2*(rho*mean(area_sez(ii:ii+1))*(rad_dist
(ii+1)-rad_dist(ii))*mean(rad_dist(ii:ii+1)));
    sigma_centr(ii)=forza_centr(ii)/area_sez(ii);
end

% Modifico il vettore delle sigma di trazione per renderlo confrontabile
% con le sollecitazioni flessionali

sigmacentr=reshape(repmat(sigma_centr',N,1),numel(coord_pala(:,1)),1);

% A partire dai carichi distribuiti su tutta la lunghezza calcolo le due
% forze aerodinamiche agenti su ogni concio di trave

forza_lift=zeros(100,1);
forza_drag=zeros(100,1);
for ii=1:99
    forza_lift(ii)=mean([lift(ii),lift(ii+1)]*(rad_dist(ii+1)-rad_dist(ii)));
    forza_drag(ii)=mean([drag(ii),drag(ii+1)]*(rad_dist(ii+1)-rad_dist(ii)));
end

% Compongo le tre componenti della forza che genera momento flettente
% sulla pala: due aerodinamiche e una centrifuga

forza_tot=[forza_drag,forza_lift,forza_centr];

% Calcolo i due momenti flettenti

mf=zeros(100,3);
for ii=100:-1:1

    for iii=100:-1:ii+1
        mom=cross([cm(iii,:),rad_dist(iii)]-
[cm(ii,:),rad_dist(ii)],forza_tot(iii,:));
        mf(ii,1:3)= mf(ii,1:3)+mom;
    end
end

% Si procede ora con il calcolo delle tensioni di flessione in ogni punto di
% ogni sezione della pala

for ii=1:100

```

```

    A=(mf(ii,2)*inerzia(ii,1)-
mf(ii,1)*inerzia(ii,3))/(inerzia(ii,1)*inerzia(ii,2)-inerzia(ii,3)^2);
    B=(mf(ii,1)*inerzia(ii,2)-
mf(ii,2)*inerzia(ii,3))/(inerzia(ii,1)*inerzia(ii,2)-inerzia(ii,3)^2);

    for iii=1:N
        sigma_flex((N*(ii-1))+iii)=(A*(coord_pala((N*(ii-1))+iii),1)-
cm(ii,1))...
            +B*(coord_pala((N*(ii-1))+iii),2)-cm(ii,2));

    end

end

% Qui i contributi della sigma di trazione e flessionale vengono sommati

sigma_tot=sigma_flex+sigmacentr';

%% Questa sezione confronta il valore delle tensioni calcolate con la sigma
% di snervamento del materiale

% Caratteristiche del materiale della pala
sigma_snerv=345e6;

% Calcolo dello scostamento tra la tensione presente e la tensione di
% snervamento del materiale
c=abs(sigma_tot)-sigma_snerv;

ceq=[];

end

```

Programma per la valutazione delle proprietà della singola sezione

```
function [CM,I,Area]=mysez(x,y,thickness,spar_index)
% Questo programma valuta alcune proprietà della sezione come:
% Posizione del centro di massa, Area della sezione, Momenti di inerzia
% della sezione (Ixx,Iyy ed Ixy)

% Identificazione dei punti di connessione tra skin e spar
index1l=spar_index(1);
index1u=spar_index(2);
index2l=spar_index(3);
index2u=spar_index(4);

% Coordinate lungo x delle connessioni
x34iu=x(index1u);
x34il=x(index1l);
x12iu=x(index2u);
x12il=x(index2l);

% Segmenti che vanno a formare la skin
x12o=[x(index2l:end);x(2:index2u)];
y12o=[y(index2l:end);y(2:index2u)];
n12o=numel(x12o);
x23=x(index2u:index1u);
y23=y(index2u:index1u);
n23=numel(x23);
x34o=x(index1u:index1l);
y34o=y(index1u:index1l);
n34o=numel(x34o);
x41=x(index1l:index2l);
y41=y(index1l:index2l);
n41=numel(x41);

% Segmenti che vanno a formare le spar
nspar=50;
x34i=linspace(x34il,x34iu,nspar)';
y34i=linspace(y(index1l),y(index1u),nspar)';
x12i=linspace(x12il,x12iu,nspar)';
y12i=linspace(y(index2l),y(index2u),nspar)';

%% In questa sezione vengono calcolati aree e centri di massa dei singoli
segmenti

% Lato 12o
centx_12o=zeros(1,n12o-1);
centy_12o=zeros(1,n12o-1);
segarea_12o=zeros(1,n12o-1);
for i=1:n12o-1
% Centro di massa del segmento
centx_12o(i) = (x12o(i) + x12o(i+1))/2;
centy_12o(i) = (y12o(i) + y12o(i+1))/2;
% Area del segmento
segarea_12o(i) = thickness * sqrt( (y12o(i) - y12o(i+1))^2 + (x12o(i) -
x12o(i+1))^2);

end
area12o=sum(segarea_12o);

% Lato 23
centx_23=zeros(1,n23-1);
```



```

centy_23=zeros(1,n23-1);
segarea_23=zeros(1,n23-1);
for i=1:n23-1
% Centro di massa del segmento
centx_23(i) = (x23(i) + x23(i+1))/2;
centy_23(i) = (y23(i) + y23(i+1))/2;
% Area del segmento
segarea_23(i) = 2*thickness * sqrt( (y23(i) - y23(i+1))^2 + (x23(i) -
x23(i+1))^2);

end
area23=sum(segarea_23);

% Lato 34o
centx_34o=zeros(1,n34o-1);
centy_34o=zeros(1,n34o-1);
segarea_34o=zeros(1,n34o-1);
for i=1:n34o-1
% Centro di massa del segmento
centx_34o(i) = (x34o(i) + x34o(i+1))/2;
centy_34o(i) = (y34o(i) + y34o(i+1))/2;
% Area del segmento
segarea_34o(i) = thickness * sqrt( (y34o(i) - y34o(i+1))^2 + (x34o(i) -
x34o(i+1))^2);

end
area34o=sum(segarea_34o);

% Lato 41
centx_41=zeros(1,n41-1);
centy_41=zeros(1,n41-1);
segarea_41=zeros(1,n41-1);
for i=1:n41-1
% Centro di massa del segmento
centx_41(i) = (x41(i) + x41(i+1))/2;
centy_41(i) = (y41(i) + y41(i+1))/2;
% Area del segmento
segarea_41(i) = 2*thickness * sqrt( (y41(i) - y41(i+1))^2 + (x41(i) -
x41(i+1))^2);

end
area41=sum(segarea_41);

% Lato 12i
centx_12i=zeros(1,nspar-1);
centy_12i=zeros(1,nspar-1);
segarea_12i=zeros(1,nspar-1);
for i=1:nspar-1
% Centro di massa del segmento
centx_12i(i) = (x12i(i) + x12i(i+1))/2;
centy_12i(i) = (y12i(i) + y12i(i+1))/2;
% Area del segmento
segarea_12i(i) = thickness * sqrt( (y12i(i) - y12i(i+1))^2 + (x12i(i) -
x12i(i+1))^2);

end
areal2i=sum(segarea_12i);

% Lato 34i
centx_34i=zeros(1,nspar-1);
centy_34i=zeros(1,nspar-1);
segarea_34i=zeros(1,nspar-1);

```

```

% Centro di massa del segmento
centx_34i(i) = (x34i(i) + x34i(i+1))/2;
centy_34i(i) = (y34i(i) + y34i(i+1))/2;
% Area del segmento
segarea_34i(i) = thickness * sqrt( (y34i(i) - y34i(i+1))^2 + (x34i(i) -
x34i(i+1))^2);

area34i=sum(segarea_34i);

%% Questa sezione si occupa di assemblare i risultati parziali ottenendo le
% grandezze relative all'intera sezione

sez_centx=[centx_12o,centx_23,centx_34o,centx_41,centx_12i,centx_34i];
sez_centy=[centy_12o,centy_23,centy_34o,centy_41,centy_12i,centy_34i];
tot_area=[segarea_12o,segarea_23,segarea_34o,segarea_41,segarea_12i,segarea_34i]
;

% Area totale della sezione
Area=area12o+area23+area34o+area41+area12i+area34i;

% Posizione del centro di massa della sezione
cmx=sum(tot_area.*sez_centx)/Area;
cmy=sum(tot_area.*sez_centy)/Area;
CM=[cmx,cmy];

% Momenti di inerzia della sezione
Ixx=sum(tot_area.*((sez_centy-CM(2)).*(sez_centy-CM(2))));
Iyy=sum(tot_area.*((sez_centx-CM(1)).*(sez_centx-CM(1))));
Ixy=sum(tot_area.*((sez_centx-CM(1)).*(sez_centy-CM(2))));

I=[Ixx,Iyy,Ixy];

end

```

Programma che realizza la curva parametrica di Bézier

```
function [xbezier,ybezier] = bezier(Xcontrol,Ycontrol)

% Questa funzione genera le coordinate della curva di Bezier a partire
% dalle coordinate dei punti di controllo

%Controllo del vettore dei dati in ingresso
if size(Xcontrol,2)>1
    Xcontrol = Xcontrol';
end
if size(Ycontrol,2)>1
    Ycontrol = Ycontrol';
end

%Numero punti di controllo
nPoints =length(Xcontrol(:,1));
n = nPoints-1;

%% Calcolo della componente C_n_i:

    %Inizializzazione
    C_n_i = zeros(n,1);
    for i = 1:n+1
        index = i-1;
        C_n_i(i) = factorial(n)/(factorial(index)*factorial(n-index));
    end

%% Questa sezione realizza il calcolo dei punti della curva

    % Numero di punti
    npnt = 100;

    % Parametro t della curva
    t =linspace(0,1,npnt);

    xbezier = zeros(length(t),1);
    ybezier = zeros(length(t),1);

    for j=1:length(t)
        tt = t(j);
        X_sum = 0;
        Y_sum = 0;
        for ind = 1:n+1
            i = ind-1;
            X_sum = X_sum+C_n_i(ind) *tt^i*(1-tt)^(n-i)*Xcontrol(ind);
            Y_sum = Y_sum+C_n_i(ind) *tt^i*(1-tt)^(n-i)*Ycontrol(ind);
        end
        xbezier(j) = X_sum;
        ybezier(j) = Y_sum;
    end

end
```

Funzione che approssima le variabili di progetto al profilo discretizzato

```
function [closest,index] = closest(x,val)
%Questa funzione approssima il valore fornito a quello più prossimo
%appartente al vettore in ingresso (fornendone anche l'indice)

delta = abs(x-val);
[~,index] = min(delta);
closest=x(index);
end
```

12 Bibliografia

- [1] Megson T.H.G., “*Aircraft Structures for Engineering Students, Fourth Edition*”, Elsevier, 2010.
- [2] Palabazzer R., ” *Sistemi Eolici*”, Rubettino Editore, 2004.
- [3] Soboyejo W., ”*Mechanical Properties of Engineered Materials*”, CrC Press, 2002.
- [4] Deb K., ” *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*”, Wiley, 2001.
- [5] Coello Coello C. et al., ”*Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*”, Taylor & Francis, 1996.
- [6] Spera D. A., “*Wind Turbine Technology*”, ASME Press, 1994
- [7] Battisti L., “*Gli Impianti Motori Eolici*”, Green Place Energies, 2011
- [8] Hau E., “*Wind Turbines*”, Springer, 2006
- [9] The Mathworks Inc., “*Global Optimization Toolbox User's Guide*”, 2013
- [10] Megson T.H.G., “*Introduction to Aircraft Structural Analysis*”, Elsevier, 2010
- [11] Sun C. T., “*Mechanics of Aircraft Structures*”, Wiley, 2006
- [12] Det Norske Veritas, “*Guidelines for Design of Wind Turbines*”, Jydsk Centraltrykkeri, 2002
- [13] Pavesi G., Dispense dal corso di “*Macchine per l'utilizzo di fonti rinnovabili*”, corso di laurea magistrale in ingegneria energetica, Università di Padova, Anno accademico 2009/2010
- [14] ART S.r.l. per conto di RSE S.p.A., “*Energia eolica e sviluppo locale Territori, green Economy e processi partecipativi*”, 2011
- [15] Somers D. M. per conto di NREL, “*The S822 and the S823 Airfoils October 1992—December 1993*”, 2005

Siti internet consultati:

- [16] <<http://www.mathworks.it/it/help/gads/>>
Pagina web di Mathwoks Inc. relativa al supporto utente per il Global Optimization Toolbox
- [17] <<http://www.northernpower.com/>>
Produttore di turbine eoliche analoghe a quella studiata

- [18] <<http://atlanteolico.rse-web.it/viewer.htm/>>
Atlante Eolico Italiano
- [19] <<http://www.gse.it/it/EnergiaFacile/guide/Energiaelettrica/Eolico/Pages/default.aspx/>>
Sito internet di “Gestore Servizi Energetici”
- [20] <<http://wind.nrel.gov/>>
Sezione del sito del National Renewable Energy Laboratory relativa all’energia eolica