

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica e Nucleare

Tesi di Laurea Magistrale

**Studio analitico per la progettazione di una
turbina microeolica con rotore stampato in 3D
e generatore sincrono**



Relatore

Prof. Filippo Spertino

Correlatore

Ing. Alessandro Ciocia

Candidato

Dario Garelo

A.A. 2017/2018

Indice generale

Elenco dei simboli	1
Introduzione.....	3
1 Le turbine eoliche	5
1.1 Storia delle turbine eoliche	5
1.2 Classificazioni.....	12
1.2.1 In base al tipo di propulsione.....	12
1.2.2 In base all'orientamento dell'asse del rotore.....	14
1.2.3 In base al tipo di generatore elettrico impiegato.....	15
1.2.4 In base al numero di pale	17
1.2.5 In base alla posizione relativa tra rotore e vento incidente.....	18
1.2.6 In base alla potenza nominale o al diametro del rotore	19
1.2.7 In base al tipo di mozzo	20
1.2.8 In base al controllo della potenza	21
1.2.9 In base al sistema di orientamento.....	24
1.3 Componenti di una grande turbina eolica ad asse orizzontale.....	24
1.4 Componenti di una turbina microeolica ad asse orizzontale	27
1.5 Turbine microeoliche: applicazioni	30
2 Aerodinamica delle turbine eoliche.....	33
2.1 Teoria impulsiva assiale e limite di Betz	33
2.2 Principio di funzionamento di una turbina eolica ad asse orizzontale.....	42
2.3 Profilo alare.....	45
2.4 Lo svergolamento delle pale	46
3 Dimensionamento del generatore	49
3.1 Calcolo teorico delle prestazioni del rotore	49
3.2 Scelta del generatore elettrico	56
4 La stampa 3D.....	67
4.1 Classificazione delle tecniche di stampa 3D.....	69

4.2	Descrizione delle tecniche di stampa 3D	70
4.2.1	Selective laser sintering (SLS)	70
4.2.2	Direct metal laser sintering (DMLS)	72
4.2.3	Electron beam melting (EBM)	72
4.2.4	Laser Engineered Net Shaping (LENS).....	73
4.2.5	Three Dimensional Printing (3DP).....	74
4.2.6	3D Multi Jet Fusion	78
4.2.7	Fused Deposition Modelling (FDM)	79
4.2.8	Laminated object manufacturing (LOM)	80
4.2.9	Drop on demand (DOD)	82
4.2.10	Polyjet.....	83
4.2.11	Multi Jet Modelling (MJM) o Multi Jet Printing (MJP).....	83
4.2.12	Digital Light Processing (DLP).....	83
4.2.13	Stereolitografia (SLA)	84
5	Prove di costruzione delle pale.....	87
5.1	Prima soluzione di stampa	91
5.2	Seconda soluzione di stampa	94
5.3	Terza soluzione di stampa.....	96
5.4	Quarta soluzione di stampa.....	98
5.5	Verniciatura	102
	Conclusioni.....	109
	Appendice A	111
	Potenza meccanica e coppia	111
	Appendice B	115
	Curve caratteristiche dell'alternatore.....	115
	Bibliografia.....	121

Ringraziamenti

Si ringrazia l'azienda Sharebot, con sede a Nibionno (LC), per la collaborazione e per la stampa 3D di alcune delle pale di prova.

Un ringraziamento particolare va ad Adriano Piroso, il tecnico specializzato che si è occupato della verniciatura di una pala.

Elenco dei simboli

a	Fattore di induzione assiale (-)
A	Area della sezione del tubo di flusso (m^2)
A	Area spazzata dal rotore (m^2)
C	Coppia (N·m)
C_D	Coefficiente di resistenza (-)
C_L	Coefficiente di portanza (-)
C_P	Coefficiente di potenza (-)
C_T	Coefficiente di spinta (-)
F_C	Forza responsabile della coppia motrice (N)
F_D	Resistenza aerodinamica (N)
F_L	Portanza aerodinamica (N)
F_S	Spinta sulla sezione della pala (N)
F_{ris}	Forza risultante (N)
g	Accelerazione di gravità (m/s^2)
h	Quota (m)
\dot{m}	Portata (kg/s)
p	Pressione (Pa)

P	Potenza meccanica all'albero (W)
P_{el}	Potenza elettrica (W)
P_{max}	Potenza meccanica massima (W)
$P_{el\ max}$	Potenza elettrica massima (W)
R	Raggio dell'area spazzata dal rotore (m)
Re	Numero di Reynolds (-)
R_x	Distanza della sezione dall'asse di rotazione (m)
T	Spinta sulla turbina (N)
U	Velocità del vento (m/s)
V_x	Velocità periferica in corrispondenza della sezione considerata (m/s)
W_x	Velocità del vento relativa rispetto al sistema di riferimento della pala (m/s)
α	Angolo di attacco ($^{\circ}$)
β	Angolo di passo ($^{\circ}$)
η_{el}	Rendimento del generatore elettrico (-)
φ	Angolo tra la direzione di W_x e la direzione di V_x ($^{\circ}$)
λ	Rapporto di velocità periferica, <i>tip speed ratio</i> (-)
μ	Viscosità dinamica (Pa·s)
ν	Viscosità cinematica (m^2/s)
ρ	Densità (kg/m^3)
σ	Solidità (-)
ω	Velocità angolare del rotore (rad/s)

Introduzione

Questa tesi si colloca nell'ambito di un lavoro che ha coinvolto e potrà coinvolgere più tesisti al fine di progettare, costruire e provare in galleria del vento il prototipo di una turbina microeolica ad asse orizzontale con rotore stampato in 3D e generatore sincrono a magneti permanenti.

La prima tesi svolta nell'ambito di questo progetto è stata realizzata dallo studente Luca Roberto all'Universidad Politecnica de Madrid grazie al programma europeo di interscambio Erasmus Plus. La tesi di Luca Roberto, dal titolo "Wind tunnel measurements and numerical simulations of a 3D printed wind turbine, optimized using MATLAB" è incentrata sulla progettazione, sulla costruzione e sulle prove in galleria del vento di un prototipo con diametro dell'area spazzata dal rotore pari a 46 cm, 5 pale fisse, configurazione controvento e generatore sincrono a magneti permanenti. La geometria del rotore è stata definita e ottimizzata per basse velocità del vento, la velocità del vento di progetto è stata fissata a 10 m/s. Per l'ottimizzazione del profilo alare e per il calcolo dei coefficienti di portanza e di resistenza Luca Roberto ha usato QBLADE. Per calcolare le distribuzioni ottimali della corda e dell'angolo di torsione ha creato un codice MATLAB basato sulla teoria di Schmitz, mentre per il calcolo delle prestazioni del rotore ha sviluppato un altro codice MATLAB basato sulla Blade Element Momentum Theory (BEM Theory). A seguito delle prove condotte in galleria del vento, Luca Roberto ha confrontato la curva del coefficiente di potenza in funzione del rapporto di velocità periferica (*tip speed ratio*) calcolata con MATLAB con quella misurata sperimentalmente ed ha riscontrato una buona coincidenza.

Lo scopo della mia tesi è uno studio per la progettazione di un nuovo prototipo con rotore di dimensioni doppie rispetto a quello realizzato da Luca Roberto. La geometria del rotore non viene modificata, vengono solo raddoppiate le dimensioni. Il nuovo rotore ha un diametro pari a 92 cm. Gli obiettivi della tesi sono due: in primo luogo il calcolo teo-

rico delle prestazioni del nuovo rotore e il dimensionamento del generatore elettrico, in secondo luogo la determinazione del metodo migliore per la stampa 3D delle pale.

Il primo capitolo della tesi riguarda la storia delle turbine eoliche, le possibili classificazioni e i componenti che costituiscono le turbine ad asse orizzontale. Si spiega che cosa si intende per turbina microeolica, si descrivono i componenti e quali sono le applicazioni di queste piccole turbine.

Nel secondo capitolo si affrontano alcuni concetti in merito all'aerodinamica delle turbine eoliche, si ricava il limite di Betz e si spiega il principio di funzionamento delle turbine ad asse orizzontale.

Il terzo capitolo è dedicato al dimensionamento del generatore elettrico per il nuovo rotore pentapala. Il dimensionamento parte dal calcolo delle prestazioni del nuovo rotore, quindi dal calcolo delle curve della potenza meccanica e della coppia in funzione della velocità angolare alle diverse velocità del vento.

Il quarto capitolo riguarda la tecnologia della stampa 3D, si presenta una classificazione delle diverse tecniche sulla base dello stato di aggregazione del materiale prima della stampa e si descrivono una ad una le tecnologie che si sono affermate sul mercato.

Nell'ultimo capitolo si descrivono quattro diversi metodi per la costruzione delle pale, tutti fanno uso di stampanti 3D con tecnologia FDM (*Fused Deposition Modelling*), si individua il metodo migliore e si verifica se con la verniciatura è possibile eliminare i difetti superficiali tipici della stampa 3D FDM.

1 Le turbine eoliche

1.1 Storia delle turbine eoliche

L'umanità ha imparato a sfruttare l'energia eolica sin dai tempi più antichi. Le imbarcazioni a vela sono il primo esempio di sfruttamento del vento come fonte di energia. In epoche più recenti l'invenzione del mulino a vento ha permesso all'uomo di convertire l'energia cinetica del vento in energia meccanica, disponibile per diversi impieghi: il pompaggio dell'acqua, la macinazione dei cereali, il taglio del legname e l'azionamento di strumenti.

Il primo mulino a vento del quale si hanno testimonianze storiche risale al IX secolo d.C. e venne costruito dai persiani.



Figura 1.1 - Mulino a vento ad asse verticale. Regione del Seistan, Afghanistan. Fonte: [17]

Tali mulini erano ad asse verticale e funzionavano grazie alla resistenza aerodinamica, venivano utilizzati per macinare il grano [14].

Il mulino a vento ad asse orizzontale probabilmente fu inventato in Europa in modo indipendente rispetto ai mulini a vento ad asse verticale orientali. La prima informazione verificabile sull'esistenza di mulini a vento in Europa risale al 1180, secondo tale fonte erano presenti mulini a vento nel Ducato della Normandia [17].



Figura 1.2 - Mulino a vento europeo, Germania. Fonte: [17]

Il vento continuò ad essere la principale fonte di energia in Europa fino al periodo subito precedente alla prima rivoluzione industriale. Il carbone aveva molti vantaggi che il vento non possedeva. Il carbone poteva essere trasportato ovunque fosse necessario e utilizzato ogni volta che lo si desiderava. Quando il carbone veniva usato per alimentare una macchina a vapore, la potenza meccanica in uscita dalla macchina poteva essere modulata per adattarsi al carico.

I mulini a vento europei avevano raggiunto un alto livello di raffinatezza prima della propria fine. I mulini erano dotati di meccanismi per l'imbardata, le pale avevano quasi acquisito un profilo alare ed iniziavano ad essere svergolate. La potenza in uscita di alcune macchine poteva essere regolata da un sistema di controllo automatico.

Mentre i mulini europei erano giunti alla fine del proprio impiego, nell'Ovest degli Stati Uniti, i mulini per il pompaggio dell'acqua vivevano un periodo di florida espansione. Tali mulini erano caratteristici per le loro pale multiple ed erano spesso chiamati "fan mills".

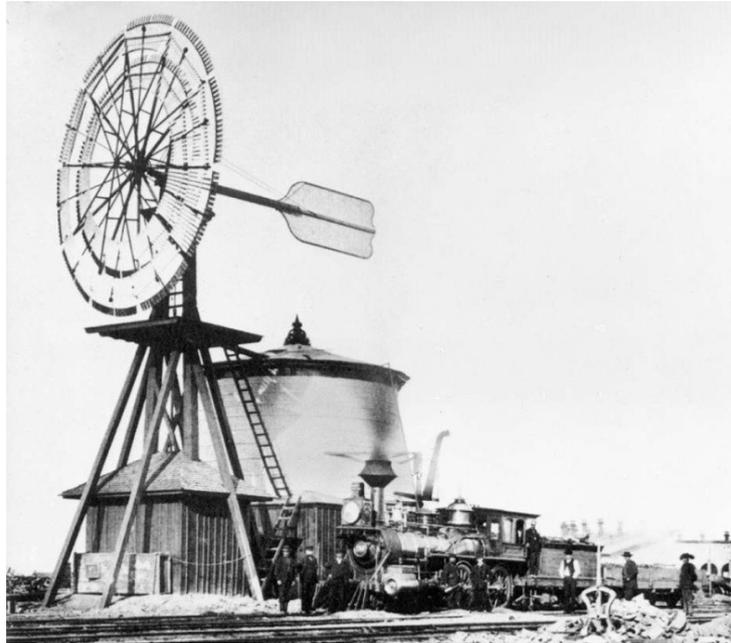


Figura 1.3 - Mulino a vento americano usato per approvvigionare un serbatoio d'acqua della Union Pacific Railroad a Laramie, 1848. Fonte: [17]

I primi generatori eolici di elettricità comparvero verso la fine del XIX secolo. Negli Stati Uniti il primo esempio degno di nota fu costruito da Charles Brush a Cleveland, Ohio nel 1888. Negli anni seguenti anche altri costruttori realizzarono piccole turbine eoliche. Tra i pionieri del settore vi fu Marcellus Jacobs, Figura 1.4.



Figura 1.4 - Jacobs "wind charger" (diametro del rotore \cong 4 m, potenza nominale da 1,8 a 3 kW), 1932. Fonte: [17]

Le turbine Jacobs avevano tre pale. Le sezioni delle pale erano veri e propri profili alari, simili a quelle delle piccole turbine eoliche di oggi. Erano incorporate in un sistema di potenza su scala residenziale che includeva batterie per l'accumulo di energia.

La diffusione dei piccoli generatori eolici si arrestò durante gli anni Trenta a causa dell'espansione della rete elettrica centralizzata che avveniva sotto la spinta della "Rural Electrification Administration".

La prima metà del XX secolo vide l'ideazione e la costruzione di un gran numero di turbine eoliche. La Danimarca fu uno dei paesi più produttivi. Tra il 1891 e il 1918 Poul La Cour costruì più di 100 turbine con potenze nell'intervallo tra i 20 e i 35 kW. Una delle caratteristiche più eccezionali era che l'elettricità veniva usata per produrre idrogeno e l'idrogeno era poi usato per l'illuminazione.

Subito dopo la Seconda Guerra Mondiale Johannes Jul eresse la turbina Gedser da 200 kW nella Danimarca sud-orientale, Figura 1.5.



Figura 1.5 - Turbina Gedser, Danimarca (diametro del rotore 24 m, potenza nominale 200 kW), 1957. Fonte: [17]

La turbina Gedser era innovativa poiché impiegava lo stallo aerodinamico per il controllo della potenza e usava un generatore ad induzione. Queste due innovazioni consentirono alla Danimarca di avere un ruolo importante nel settore eolico negli anni Ottanta del Novecento.

Il pioniere del settore eolico in Germania fu Ulrich Hütter. Il suo lavoro si concentrò sull'applicazione dei moderni principi dell'aerodinamica al progetto delle turbine eoli-

che. Uno dei progetti più importanti di Hütter fu la turbina W-34 che aveva un diametro del rotore pari a 34 m e una potenza nominale di 100 kW, fu eretta nel 1958.



Figura 1.6 - Turbina W-34, Germania, 1958-1968. Fonte: [17]

Negli Stati Uniti la prima e più significativa grande turbina eolica, fu la macchina Smith-Putnam, eretta a Grandpa's Knob nel Vermont nel 1941 [14], [17]. Con un diametro di 53,3 m e una potenza nominale di 1,25 MW, questa era la più grande turbina eolica mai costruita prima di allora e lo fu per molti anni a venire. La turbina fu soggetta alla rottura di una pala nel 1945 e il progetto venne abbandonato.



Figura 1.7 - Turbina Smith-Putnam, Vermont, USA (diametro del rotore 53,3 m, potenza nominale 1,25 MW), 1941. Fonte: [17]

Negli Stati Uniti, nonostante la crescente consapevolezza sulle questioni ambientali, non accadde nulla di nuovo nello sviluppo dell'eolico fino alla crisi petrolifera di metà anni Settanta. Sotto l'amministrazione Carter il Dipartimento Energia degli Stati Uniti (Department of Energy DOE) sponsorizzò un certo numero di progetti per favorire lo sviluppo della tecnologia eolica. La maggior parte delle risorse erano state stanziare per le grandi macchine. Queste macchine avevano potenze dai 100 kW, 38 m di diametro, NASA MOD-0 fino a 3,2 MW Boeing MOD-5B, 98 m di diametro.

Nonostante gli sforzi del DOE il vero sviluppo del settore eolico si verificò in seguito a cambiamenti nella struttura normativa del settore dei servizi e nell'erogazione di incentivi.

Il governo federale degli Stati Uniti, attraverso il Public Regulatory Act del 1978, richiedeva all'ente erogatore di permettere di connettere le turbine eoliche alla rete e di pagare il "costo evitato" per ogni kWh che le turbine fornivano alla rete.

Lo stato che forniva i migliori incentivi e che aveva regioni con venti buoni era la California.

Nel giro di pochi anni migliaia di turbine eoliche furono installate in California, in particolare sul passo Altamont, sul passo San Gorgonio e sul passo Tehachapi. Una tipica installazione è mostrata in Figura 1.8.



Figura 1.8 - Parco eolico con turbine MAN-Aeroman sul passo Tehachapi, 1986. Fonte[17]

I primi anni della corsa all'eolico californiana sono stati pieni di difficoltà. Molte macchine erano ancora essenzialmente prototipi. Una detrazione fiscale sull'investimento, al contrario di una detrazione fiscale sulla produzione, non era il modo migliore di incoraggiare lo sviluppo e l'impiego di macchine produttive. Quando la detrazione fiscale federale venne revocata dall'amministrazione Regan nei primi anni Ottanta, il settore eolico collassò.

Dopo la fine della corsa all'eolico, la maggior parte dei produttori statunitensi aveva cessato l'attività. I produttori danesi, anch'essi presenti nei parchi eolici californiani, in qualche modo erano sopravvissuti.

Durante gli anni Novanta il punto focale della costruzione di turbine eoliche si spostò definitivamente in Europa, in particolare in Germania e in Danimarca.

Le preoccupazioni riguardo al riscaldamento globale e i continui timori riguardo al nucleare sono sfociati in una forte crescita del settore eolico, come dimostra la Figura 1.9.

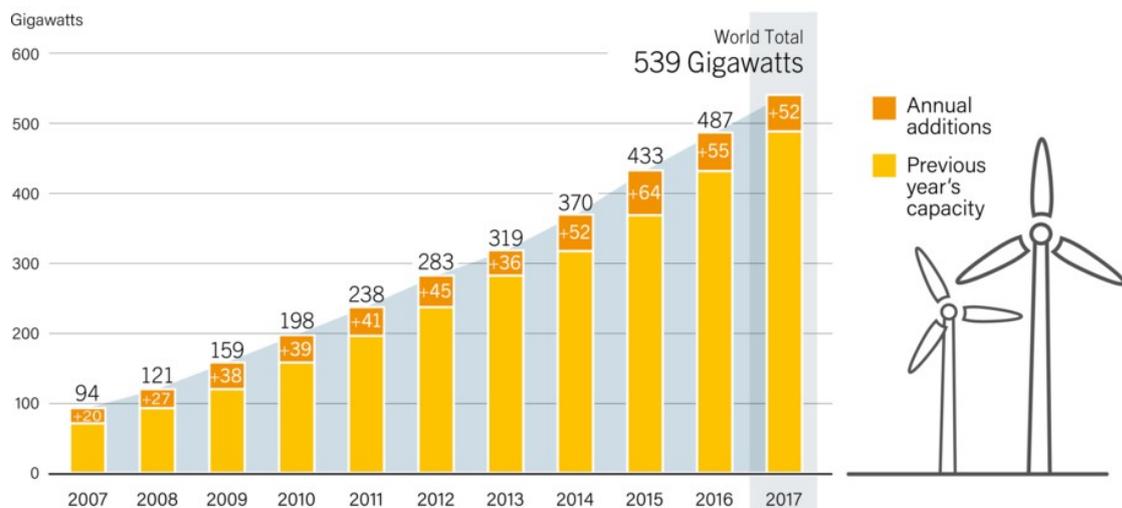


Figura 1.9 - Potenza installata a livello globale e incremento annuale. Fonte: [18]

1.2 Classificazioni

Le turbine eoliche possono essere classificate in base a diversi parametri.

1.2.1 In base al tipo di propulsione

Le turbine eoliche possono funzionare sfruttando la resistenza aerodinamica o la portanza.

I primi mulini a vento, i mulini Seistan, Figura 1.1, sfruttavano la resistenza aerodinamica: una superficie investita dal vento, a causa della resistenza aerodinamica, è soggetta ad una forza nella stessa direzione del vento. Il principio di funzionamento si dimostra inefficiente perché all'aumentare della velocità di rotazione la velocità relativa del vento diminuisce. L'efficienza è ulteriormente ridotta dalla resistenza della vela che si muove controvento. Spesso la vela che si muove controvento è protetta da una barriera. Se non è così le superfici sono curve, in modo da avere un più basso coefficiente di resistenza quando ritornano nel vento. Un esempio di turbina che funziona sfruttando la resistenza aerodinamica è la turbina Savonius, Figura 1.10. Anche l'anemometro a copette funziona sulla base della resistenza aerodinamica.



Figura 1.10 - Turbine Savonius. Fonte: [19]

L'altro metodo di propulsione è la portanza aerodinamica. Il comportamento aerodinamico dei rotori che sfruttano la portanza aerodinamica è caratterizzato dal peso relativo tra portanza e resistenza create dall'interazione del profilo alare con il flusso di aria.

La portanza è dovuta alla differenza di pressione tra ventre (superficie inferiore) e dorso (superficie superiore) del profilo alare: sul dorso la velocità è maggiore mentre la pressione è minore, sul ventre la velocità è minore mentre la pressione è maggiore.

La resistenza diminuisce l'efficienza del rotore agendo contro la portanza nella generazione della coppia motrice. In fase di progettazione bisogna cercare di massimizzare la portanza mantenendo controllata la resistenza.

Il principio di funzionamento dei rotori basati sulla portanza aerodinamica è descritto nel dettaglio nel paragrafo 2.2.

Le turbine eoliche che sfruttano la portanza aerodinamica sono le più comuni turbine ad asse orizzontale, siano esse monopala, bipala, tripala o multipala e le turbine Darrieus nelle diverse configurazioni: Φ , Δ o H.



Figura 1.11 - Turbina Darrieus di tipo Φ , potenza nominale 4MW, Canada 1987. Fonte: [17]

Esistono anche rotori nati dalla combinazione di una turbina Darrieus, solitamente di tipo Φ , con una turbina Savonius. Tali rotori sfruttano sia la resistenza aerodinamica sia la portanza.



Figura 1.12 - Turbina Savonius / Φ -Darrieus, potenza nominale 700W. Fonte: [20]

1.2.2 In base all'orientamento dell'asse del rotore

In base alla posizione relativa tra asse di rotazione e terreno, le turbine eoliche possono essere classificate in due categorie: turbine ad asse verticale e turbine ad asse orizzontale.

- Le turbine ad asse verticale (vertical axis wind turbine, VAWT) hanno asse di rotazione perpendicolare al terreno.

Vantaggi:

- sono omnidirezionali e non richiedono meccanismi di imbardata per orientarsi nella direzione del vento;
- l'asse di rotazione verticale permette l'installazione del moltiplicatore di giri e del generatore a terra, ciò semplifica la struttura;
- sono meno sensibili alla direzione del vento e quindi si possono installare ad altezze minori rispetto alle turbine ad asse orizzontale.

Svantaggi:

- efficienza più bassa rispetto alle turbine ad asse orizzontale;
- non sono in grado di auto avviarsi e normalmente richiedono una coppia di avviamento esterna, la turbina Savonius fa eccezione;
- presentano problemi di stabilità strutturale;
- bassa potenza a parità di area spazzata rispetto alle turbine ad asse orizzontale;
- difficoltà nel controllare la velocità del rotore;
- velocità di cut-in più alta rispetto alle turbine ad asse orizzontale.

- Le turbine ad asse orizzontale (horizontal axis wind turbine, HAWT) hanno asse di rotazione parallelo al terreno.

Vantaggi:

- alta efficienza;
- sono in grado di auto avviarsi, non richiedono una coppia di avviamento esterna;
- stabilità strutturale accettabile;
- potenza elevata e modulabile tramite la regolazione del passo;
- velocità di cut-in più bassa.

Svantaggi:

- richiedono un sistema di imbardata per l'orientamento del rotore nella direzione del vento;
- necessitano di una pesante navicella orientabile, posizionata all'altezza del mozzo;
- sono più sensibili alla direzione del vento e quindi normalmente vengono installate ad altezze maggiori;

- generano più rumore.

Generalmente le turbine ad asse orizzontale hanno prestazioni migliori rispetto alle turbine ad asse verticale. Per tale motivo le turbine ad asse orizzontale dominano il mercato delle grandi turbine commerciali. Le turbine ad asse verticale trovano impiego nelle applicazioni di bassa potenza, dove sono richiesti compattezza, basso impatto paesaggistico e bassa rumorosità.

Le turbine ad asse verticale competono con le turbine ad asse orizzontale quando sono presenti condizioni di alta turbolenza: in questi casi il rotore orientabile delle turbine ad asse orizzontale soffre di più rispetto alle turbine ad asse verticale.

1.2.3 In base al tipo di generatore elettrico impiegato

La potenza meccanica di una turbina eolica è convertita in potenza elettrica da un generatore in corrente alternata o da un generatore in corrente continua.

Il generatore in corrente alternata può essere sia una macchina sincrona, sia una macchina ad induzione, l'ultimo tipo è il più usato nel settore eolico [21].

Generatore in corrente continua (dinamo)

Fino ai primi anni Ottanta le macchine elettriche in corrente continua sono state usate come motori per la facilità nel controllo della velocità.

Nel corso del XX secolo un numero limitato di turbine eoliche in bassa potenza sono state dotate di generatori in corrente continua. Tali generatori si preferivano rispetto agli altri quando l'elettricità poteva essere usata in corrente continua.

Attualmente le macchine elettriche in corrente continua, nella versione *brushless* a magneti permanenti, vengono usate come generatori per turbine di piccola taglia, potenze inferiori ai 100 kW. Questo è dovuto al fatto che la capacità dei magneti permanenti è limitata.

La versione convenzionale della macchina in corrente continua è caduta in disuso a causa della scarsa affidabilità dovuta alla presenza del commutatore a lamelle e delle spazzole [21].

Generatore sincrono (alternatore)

Il generatore sincrono è il generatore più utilizzato per la conversione della potenza meccanica in potenza elettrica per la rete. Per questo motivo la macchina sincrona è una macchina consolidata. La macchina lavora a velocità costante in relazione alla frequenza fissa da erogare. Perciò non è adatta all'esercizio a velocità variabile in impianti eolici senza convertitori elettronici di potenza. Inoltre, la macchina sincrona convenzionale richiede corrente continua per eccitare il campo del rotore e usa spazzole in grafite su anelli collettori montati sull'albero del rotore. Questo è motivo di inaffidabilità della

macchina. Le moderne macchine sincrone sono realizzate senza spazzole poiché la corrente di campo (corrente continua) è generata sul rotore stesso. L'affidabilità migliora notevolmente mentre il costo si riduce.

La necessità di avere una corrente di campo può essere eliminata usando un rotore a riluttanza, nel quale il funzionamento in sincronismo si ottiene grazie alla coppia di riluttanza. La potenza della macchina a riluttanza è limitata a decine di kW. Attualmente si stanno studiando macchine a riluttanza per piccoli generatori eolici.

La macchina sincrona, quando connessa alla rete elettrica, ha diversi vantaggi rispetto alla macchina ad induzione. Essa non richiede potenza reattiva dalla rete. Ciò si traduce in una maggiore qualità della potenza all'interfaccia con la rete. Questo vantaggio è più pronunciato quando il parco eolico è connesso ad una rete di piccole dimensioni usando una lunga linea di trasmissione in bassa tensione. Per tale motivo gli impianti installati in California nei primi anni Ottanta usavano generatori sincrini.

Gli impianti eolici attuali sono connessi a grandi reti usando linee corte e la quasi totalità usa generatori ad induzione.

Il generatore sincrono è raramente utilizzato in sistemi eolici con moltiplicatore di giri. Tuttavia, il generatore sincrono a bassa velocità risulta vantaggioso per le turbine eoliche senza moltiplicatore di giri (*direct-drive*) a velocità variabile. Per queste turbine il generatore è completamente disaccoppiato dalla rete tramite un convertitore elettronico di potenza connesso allo statore, il rotore è eccitato da un circuito di eccitazione o da magneti permanenti [21].

Generatore ad induzione (generatore asincrono)

Il primo vantaggio della macchina ad induzione è la robusta costruzione senza spazzole che non richiede un circuito in corrente continua.

Gli svantaggi della macchina in corrente continua e della macchina sincrona sono eliminati nella macchina ad induzione il che garantisce un basso costo di investimento, ridotta manutenzione e migliori prestazioni in transitorio.

Per questi motivi il generatore ad induzione è ampiamente utilizzato nei grandi parchi eolici e per piccoli impianti idroelettrici.

La macchina è disponibile in numerosi livelli di potenza, fino a diversi MW e oltre. Per costo e affidabilità molti sistemi eolici usano macchine ad induzione come generatori elettrici [21].

1.2.4 In base al numero di pale

Le turbine ad asse orizzontale possono essere classificate in base al numero di pale del rotore. La velocità angolare delle turbine ad asse orizzontale è inversamente proporzionale al numero di pale: le turbine veloci hanno poche pale mentre quelle lente hanno molte pale.

Si introduce un parametro chiamato solidità (*solidity*), esso è il rapporto tra l'area occupata dalle pale e l'area del disco battuto [1].

$$\sigma = \frac{\text{area occupata dalle pale}}{\text{area del disco battuto}} \quad (1.1)$$

A partire da questo parametro le turbine eoliche ad asse orizzontale sono classificate in:

- turbine multipala: alta solidità ($\sigma > 0,8$);
- turbine a elica: bassa solidità ($\sigma < 0,1$).

Le turbine con rotore multipala sono caratterizzate da un alto numero di pale che può variare da 6 a 24 e quindi alta solidità. L'elevata solidità si traduce in una elevata coppia di avvio e in una velocità ridotta. Queste caratteristiche fanno sì che l'applicazione fondamentale per queste turbine sia il pompaggio dell'acqua. Esse non sono usate per la conversione dell'energia cinetica del vento in energia elettrica a causa della bassa velocità angolare.

Le turbine ad elica sono caratterizzate da una velocità angolare elevata e questa proprietà le rende appropriate per l'accoppiamento con i generatori elettrici. Lo svantaggio di queste turbine consiste nella bassa coppia di avvio. Tra le turbine con rotore ad elica il più comune è il rotore tripala. Questo rotore presenta un vantaggio particolare: il momento polare di inerzia rispetto all'asse di imbardata è costante ed è indipendente dalla posizione del rotore. Questa caratteristica contribuisce ad un esercizio fluido anche durante l'imbardata. Invece, un rotore a due pale ha un più basso momento d'inerzia quando le pale sono verticali rispetto a quando esse sono orizzontali. Usando più di tre pale si possono avere rotori il cui momento d'inerzia è indipendente dalla posizione ma i rotori con più di tre pale sono raramente usati. Ciò è dovuto all'aumento del costo [14].

1.2.5 In base alla posizione relativa tra rotore e vento incidente

A seconda della posizione relativa tra rotore e vento incidente una turbina eolica ad asse orizzontale può essere:

- controvento, quando il vento attraversa prima le pale e poi supera la navicella;
- sottovento, in caso contrario.

Tabella 1.1 - Caratteristiche delle configurazioni controvento e sottovento

Controvento	Sottovento
È necessario un sistema di orientamento attivo	Sistema di orientamento passivo ottenuto inclinando di pochi gradi le pale
Un orientamento controllato del rotore non determina sforzi aggiuntivi sulle pale	Sforzi aggiuntivi sulle pale dovuti all'orientamento non controllato della macchina
Coppia costante durante la rotazione	La torre crea una scia che porta a fluttuazioni della coppia e della potenza, inoltre, a causa di un carico ciclico le pale sono soggette a fatica

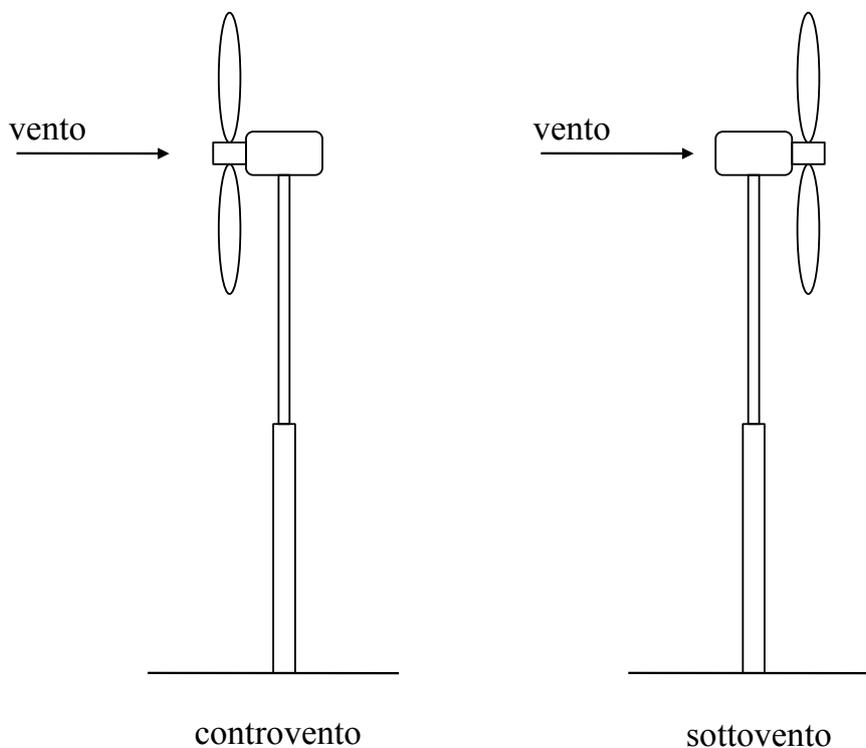


Figura 1.13 - Configurazioni controvento e sottovento

1.2.6 In base alla potenza nominale o al diametro del rotore

La potenza in uscita delle turbine eoliche varia in un ampio spettro, può andare dai pochi watt di una turbina microeolica a diversi megawatt di una grande turbina.

La classificazione delle turbine eoliche in base alla potenza in uscita o al diametro del rotore non è univoca infatti a seconda della fonte si trovano informazioni contrastanti. Alcune fonti suddividono le turbine in base alla potenza in uscita, altre danno priorità alle dimensioni come criterio di classificazione.

Le dimensioni di una turbina eolica sono un parametro importante in quanto la potenza in uscita dipende dal quadrato del raggio dell'area spazzata dal rotore. Quindi, se si raddoppiano le dimensioni del rotore, a parità di vento incidente, la potenza in uscita quadruplica.

Secondo il *National Renewable Energy Laboratory (NREL)* una possibile classificazione delle turbine sulla base della potenza nominale è riportata in Tabella 1.2.

Tabella 1.2 - Classificazione delle turbine in base alla potenza nominale

TAGLIA	POTENZA NOMINALE	APPLICAZIONI
Piccola	Meno di 10 kW	Case, fattorie, luoghi isolati
Media	Tra 10 kW e 250 kW	Villaggi, sistemi ibridi, generazione distribuita
Grande	Tra 250 kW e 2 MW	Parchi eolici, generazione distribuita

Un'altra definizione di piccola turbina eolica viene fornita dalla normativa IEC 61400-2:2013-12 dal titolo "Wind turbines, Part 2: Small wind turbines" recepita con normativa italiana CEI EN 61400-2. Secondo tale normativa le piccole turbine eoliche sono quelle con area spazzata dal rotore minore di 200 m². Si nota che la normativa non fa riferimento alla potenza nominale ma all'area spazzata dal rotore.

Un'ulteriore classificazione si trova nel testo di Paul Gipe, "Energia dal vento in piccola scala" [16], ed è riportata in Tabella 1.3.

Secondo tale classificazione le turbine microeoliche sono quelle con diametro del rotore compreso tra 0,5 e 1,25 m. Il prototipo di turbina che si studia in questa tesi ha diametro del rotore pari a 92 cm, quindi si può classificare come turbina microeolica.

Le turbine microeoliche sono solitamente impiegate per applicazioni di bassa potenza in luoghi dove non è disponibile la rete elettrica. Vengono impiegate per ricaricare le batterie che alimentano: la strumentazione di bordo delle imbarcazioni a vela, le recinzioni elettrificate, la segnaletica stradale, le stazioni di monitoraggio.

Tabella 1.3 - Classificazione delle turbine eoliche per dimensione. Fonte: [16]

Taglia	Diametro del rotore (m)	Area spazzata (m ²)	Potenza nominale standard* (kW)	
Micro	0,5-1,25	0,2-1,2	0,04	0,25
Mini	1,25-3	1,2-7,1	0,25	1,4
Domestica	3-10	7-79	1,4	16
			Potenza nominale tipica	
Piccolo commerciale	10-20	79-314	25	100
Medio commerciale	20-50	314-1963	100	1000
Grande commerciale	50-100	1963-7854	1000	3000
* Potenza nominale standard = area spazzata · 200 W/m ²				

1.2.7 In base al tipo di mozzo

Le moderne turbine ad asse orizzontale usano tre tipi di mozzo: mozzo rigido, mozzo oscillante e mozzo per pale incernierate.

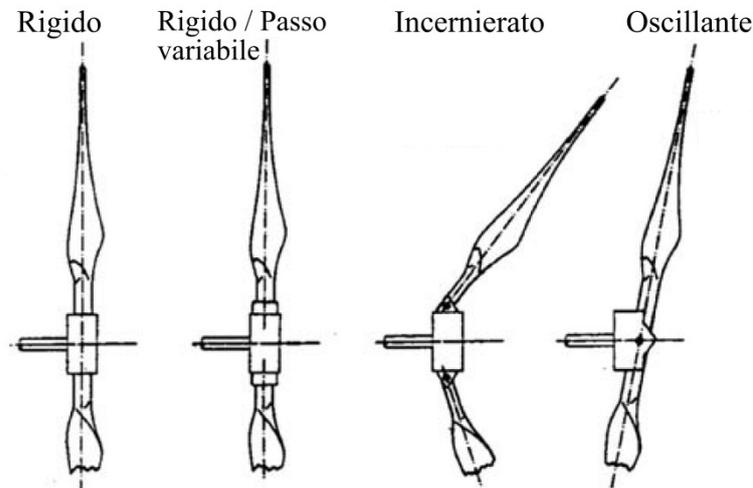


Figura 1.14 - Tipi di mozzo. Fonte: [14]

I mozzi rigidi (*rigid hubs*) hanno tutte le parti principali fisse rispetto all'albero. Sono i più comuni e sono impiegati su tutte le macchine con tre o più pale. Il termine mozzo rigido include quei mozzi in cui il passo delle pale può essere variato ma in cui nessun altro movimento delle pale è consentito [14].

I mozzi oscillanti (*teetering hubs*) consentono il movimento relativo tra la parte che collega le pale e quella che collega l'albero. Quando una pala si muove in un verso l'altra si muove nel verso opposto. I mozzi oscillanti sono comunemente usati per le turbine eoliche monopala e bipala. Ciò è dovuto al fatto che un mozzo oscillante può ridurre i carichi dovuti a sbilanciamenti aerodinamici o i carichi dovuti a effetti dinamici dalla rotazione del rotore o dall'imbardata della turbina [14].

I mozzi per pale incernierate, o mozzi incernierati (*hinged hubs*), consentono il movimento indipendente delle pale rispetto al piano di rotazione. Questi mozzi, attualmente, non sono impiegati da nessuna turbina commerciale ma sono stati utilizzati su certe turbine storicamente importanti, quale per esempio la turbina Smith-Putnam e stanno suscitando nuovo interesse [14].

1.2.8 In base al controllo della potenza

I metodi più comuni di controllo della potenza, per i rotori ad asse orizzontale, sono: la regolazione passiva per stallo delle pale (*passive stall control*) e la regolazione attiva del passo (*active pitch control*). Tuttavia esistono anche altri metodi di controllo della potenza: la regolazione passiva del passo (*passive pitch control*), la regolazione attiva per stallo delle pale (*active stall control*) e il controllo dell'imbardata (*yaw control*).

Le definizioni di alcuni termini che si citano in questo paragrafo verranno date nel paragrafo 2.2.

Regolazione passiva per stallo delle pale (*passive stall control*)

La forma più semplice di controllo della potenza è la regolazione passiva per stallo delle pale. Essa fa uso della riduzione del coefficiente di portanza (*lift coefficient*) e dell'associato incremento del coefficiente di resistenza (*drag coefficient*) a seguito dello stallo per porre un limite alla potenza in uscita quando la velocità del vento aumenta, senza la necessità di nessuna variazione nella geometria della pala. Il passo fisso della pala è scelto in modo che la turbina raggiunga la propria potenza massima o la propria potenza nominale alla velocità del vento desiderata.

Le macchine regolate tramite stallo presentano delle incertezze nel comportamento aerodinamico post-stallo. Ciò può risultare in previsioni non accurate del livello di potenza e dei carichi sulle pale alla velocità del vento nominale e al di sopra di essa [15].

Regolazione attiva del passo (*active pitch control*)

La regolazione attiva del passo consente la limitazione della potenza oltre la velocità del vento nominale ruotando la pala attorno al proprio asse nella direzione che riduce l'angolo di attacco e quindi riduce il coefficiente di portanza, un processo noto come regolazione verso la messa in bandiera (*blade feathering*). I maggiori benefici della rego-

lazione attiva del passo sono l'aumento dell'energia convertita e la riduzione dei carichi sulla turbina [15].

Regolazione passiva del passo (*passive pitch control*)

Un'alternativa per attivare la regolazione del passo della pala e per limitare la potenza consiste nel progettare la pala e il proprio mozzo in modo che la pala possa ruotare sotto l'azione dei carichi presenti su di essa e che possa raggiungere la desiderata variazione del passo alle più alte velocità del vento [15]. Spesso si sfrutta la forza centrifuga agente sulla pala per variare il passo. In questo caso la pala è collegata al mozzo tramite una vite ed è tenuta in posizione da una molla precaricata. Quando la forza centrifuga sulla pala supera il precarico della molla la pala si muove verso l'esterno comprimendo la molla e ruotando attorno al proprio asse. Sfortunatamente, sebbene il principio sia semplice da enunciare, è difficile da raggiungere nella pratica perché la variazione richiesta dell'angolo di passo con la velocità del vento generalmente non coincide con la corrispondente variazione del carico della pala. In Figura 1.15 si rappresenta questo sistema applicato alla punta di una pala.

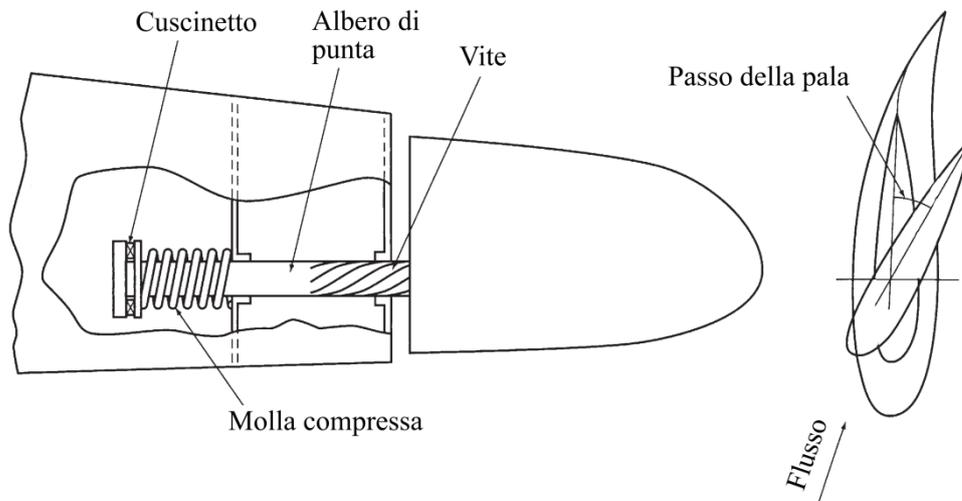


Figura 1.15 - Regolazione passiva del passo di punta pala. Fonte: [15]

Tra le poche turbine microeoliche, con diametro del rotore minore di 1,25 m, dotate della regolazione passiva del passo ci sono le Superwind 350 e 353. Il sistema è stato studiato per evitare che la turbina raggiunga velocità di rotazione troppo elevate quando la velocità del vento supera la velocità nominale di 12,5 m/s. Per fare ciò quando la velocità del vento supera tale soglia le pale si portano in bandiera in modo automatico sfruttando la forza centrifuga.

Regolazione attiva per stallo delle pale (*active stall control*)

La regolazione attiva tramite stallo delle pale consente la limitazione della potenza oltre la velocità del vento nominale regolando il passo delle pale inizialmente verso lo stallo. Si nota che è la direzione opposta rispetto a quella impiegata per la regolazione attiva del passo e per tale motivo è chiamata anche regolazione negativa del passo (*negative pitch control*). A più alte velocità del vento, comunque, è solitamente necessario regolare il passo delle pale verso la messa in bandiera al fine di mantenere la potenza in uscita a livello nominale.

Si è trovato che sono sufficienti piccole variazioni del passo per mantenere la potenza in uscita a livello nominale, perciò la velocità di variazione del passo non necessita di essere ampia quanto quella per la regolazione positiva del passo [15].

Controllo dell'imbardata (*yaw control*)

Poiché la maggior parte delle turbine ad asse orizzontale è dotata di un meccanismo di controllo dell'imbardata per mantenere la turbina nella direzione del vento si può usare tale meccanismo per ruotare la turbina e porre l'asse di rotazione disallineato rispetto alla direzione del vento. In tal modo si può limitare la potenza in uscita.

Questa tecnologia (utilizzata dal prototipo italiano Gamma 60 della Aeritalia-West) non è stato poi sviluppato su nessuna macchina commerciale di dimensioni medio – grandi.

Attualmente un controllo passivo dell'imbardata è presente su una turbina microeolica della Marlec, la Rutland FM910-4. Questa turbina ha un asse di imbardata che non interseca la direzione longitudinale della macchina ma è spostato in posizione eccentrica. Con l'aumentare della spinta del vento sul rotore la turbina tende a ruotare attorno all'asse di imbardata, quindi il piano del rotore non è più perpendicolare alla direzione del vento e la potenza diminuisce.

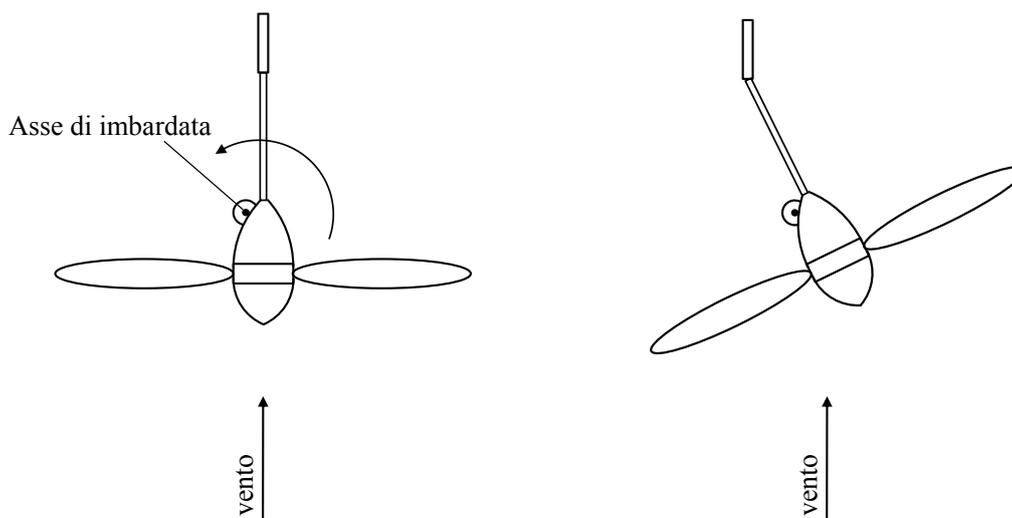


Figura 1.16 - Controllo della potenza tramite controllo passivo dell'imbardata

1.2.9 In base al sistema di orientamento

Le turbine eoliche ad asse orizzontale possono essere classificate in base al sistema di orientamento, infatti possono essere dotate di un sistema di imbardata attivo oppure di un sistema di imbardata libero o passivo.

Il sistema di imbardata serve per mantenere l'albero del rotore allineato con la direzione del vento. Il componente principale è un grande cuscinetto che connette il basamento alla torre.

Un sistema di imbardata attivo, generalmente usato per le turbine controvento, è dotato di uno o più motori di imbardata, ognuno dei quali aziona un pignone contro una ruota dentata collegata al cuscinetto di imbardata. Tale meccanismo è controllato da un sistema di controllo dell'imbardata automatico con il proprio sensore della direzione del vento abitualmente montato sulla navicella della turbina eolica. Alcune volte vengono usati freni di imbardata per mantenere la navicella in posizione [14].

I sistemi di imbardata liberi o passivi si possono auto allineare con il vento senza bisogno di un sistema di controllo specifico. Tali sistemi sono comunemente usati sulle macchine sottovento e sulle turbine di piccola taglia. In quest'ultimo caso si tratta solitamente di turbine in configurazione controvento dotate di un timone di coda che consente alla turbina di mantenere il piano del rotore perpendicolare alla direzione del vento.

1.3 Componenti di una grande turbina eolica ad asse orizzontale

I componenti di una grande turbina eolica ad asse orizzontale sono:

- il rotore;
- la trasmissione;
- il generatore;
- la navicella e il sistema d'imbardata;
- la torre e le fondazioni;
- i controlli;
- il sistema elettrico.

Rotore

Il rotore di una turbina eolica è costituito dal mozzo e dalle pale. Oggi la maggior parte delle turbine hanno rotori controvento con tre pale. Per quanto riguarda il controllo della potenza la maggior parte delle turbine di taglia media, specialmente quelle costruite in Danimarca, avevano pale a passo fisso e regolazione passiva per stallo. Invece le macchine costruite negli Stati Uniti erano dotate della regolazione del passo.

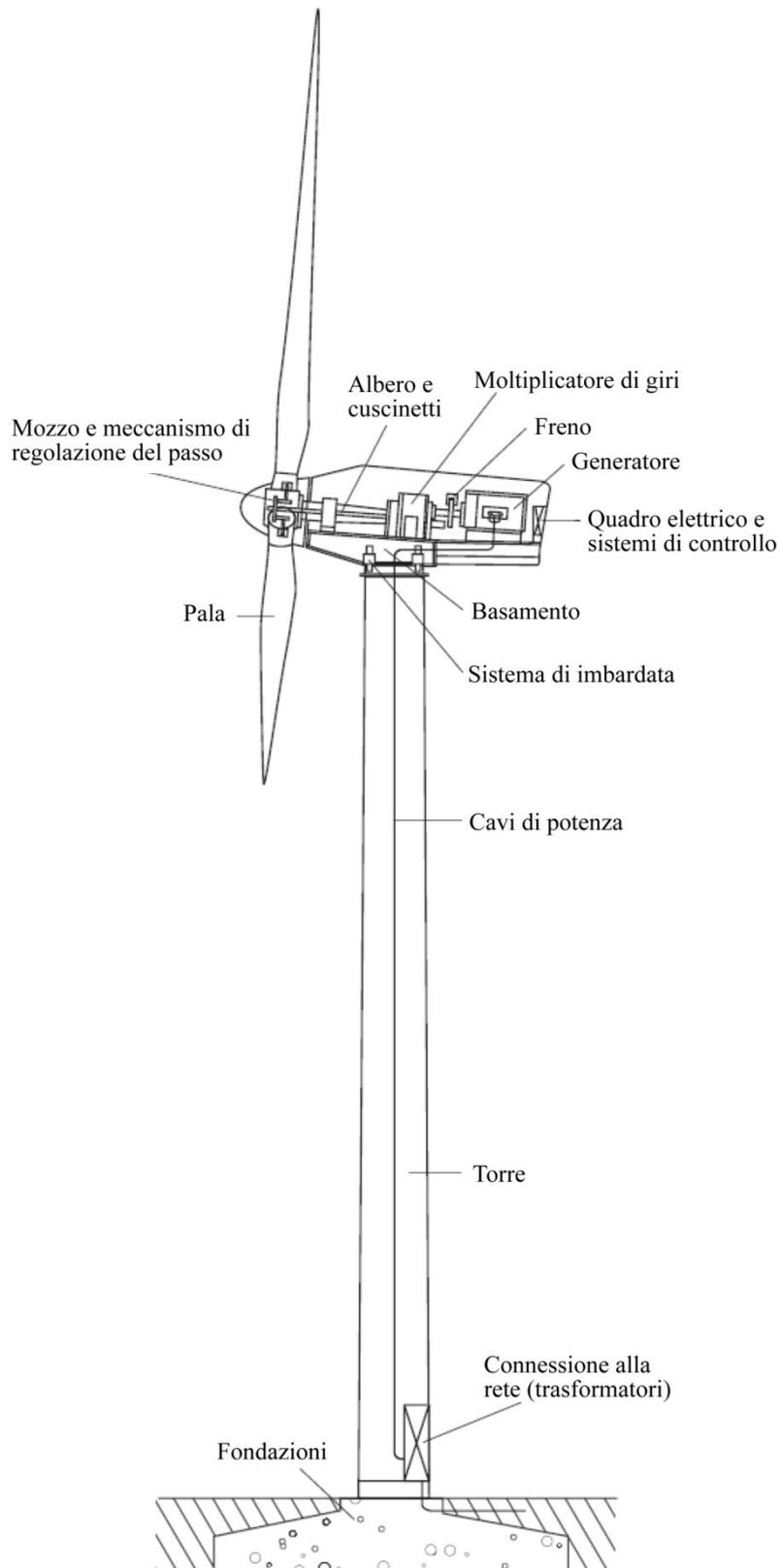


Figura 1.17 - Componenti di una grande turbina eolica ad asse orizzontale. Fonte: [17]

Attualmente, per le macchine più grandi, si fa ampio uso della regolazione del passo. Le pale sono realizzate con materiali compositi, il materiale più utilizzato è la resina rinforzata con fibra di vetro [14].

Trasmissione

La trasmissione è costituita da un albero lento (dalla parte del rotore), un moltiplicatore di giri e un albero veloce (dalla parte del generatore elettrico). Gli altri componenti della trasmissione sono: i cuscinetti di supporto, uno o più giunti, un freno. Lo scopo del moltiplicatore di giri è di aumentare la velocità di rotazione del rotore da un basso valore (decine di giri al minuto) fino ad una velocità appropriata a far funzionare un generatore standard (centinaia o migliaia di giri al minuto) [14]. Il moltiplicatore di giri è un componente di grandi dimensioni, può avere una massa pari a quasi 20 tonnellate per una turbina da 2-2,5 MW. Il moltiplicatore dispone sempre di un sistema di raffreddamento, solitamente a due stadi (olio/acqua/aria) [1]. Nelle turbine eoliche sono usati due tipi di moltiplicatori: assi paralleli e planetario. Per le macchine più grandi (approssimativamente sopra i 500 kW), i vantaggi di peso e dimensioni dei moltiplicatori a planetario diventano più pronunciati [14]. L'affidabilità del moltiplicatore è il punto debole delle turbine, infatti i problemi si presentano in modo serio dopo cinque o sette anni di esercizio. Nei 20 anni di esercizio di una turbina si devono prevedere una o due sostituzioni dell'intero moltiplicatore, specialmente nei siti molto ventosi [1]. Alcune turbine eoliche usano generatori a bassa velocità, progettati in modo specifico da non richiedere il moltiplicatore di giri [14].

Generatore

Quasi tutte le turbine usano o generatori sincroni o generatori ad induzione. Entrambi questi generatori implicano una velocità di rotazione del rotore costante o quasi costante quando il generatore è direttamente connesso alla rete elettrica.

La maggior parte delle turbine eoliche installate in applicazioni connesse in rete usa generatori ad induzione. Il principale vantaggio dei generatori ad induzione è che sono robusti, economici e facili da connettere alla rete.

Sia i generatori sincroni sia i generatori ad induzione possono funzionare a velocità variabile quando usati con appropriati convertitori elettronici di potenza. L'uso di una turbina a velocità variabile porta diversi vantaggi, tra i principali: la riduzione del logorio della turbina e il potenziale esercizio della turbina alla massima efficienza su un ampio intervallo di velocità del vento [14].

Navicella e sistema d'imbardata

La navicella custodisce gli organi della trasmissione, il generatore elettrico, i quadri elettrici, i sistemi di controllo, i sistemi di raffreddamento. L'elemento portante della na-

vicella è il basamento, esso permette il montaggio e il corretto allineamento del generatore elettrico e dei componenti della trasmissione. La copertura della navicella protegge il contenuto dagli agenti atmosferici.

La navicella è montata su un grande cuscinetto reggispinta e il movimento di orientamento (imbardata) è garantito da un apposito motore elettrico, infatti, la maggior parte delle grandi turbine è dotata di un sistema d'imbardata attivo.

Torre e fondazioni

I tipi principali di torri attualmente in uso sono il tipo autoportante che usa tubi di acciaio, le torri a traliccio e le torri in cemento. L'altezza della torre è tipicamente 1 o 1,5 volte il diametro del rotore ma in qualsiasi caso è di almeno 20 m. La rigidità della torre è uno dei fattori principali nella dinamica della turbina eolica a causa delle possibili vibrazioni accoppiate tra torre e rotore [14].

Le fondazioni della torre sono a plinto, sia nel caso onshore sia in quello offshore. Per le turbine offshore su fondali bassi si adottano anche strutture a traliccio perché offrono minore resistenza all'azione delle onde. Per i fondali alti sono previste piattaforme galleggianti come quelle petrolifere [1].

Controlli

Il sistema di controllo di una turbina eolica include i seguenti componenti:

- Sensori – velocità, posizione, temperatura, corrente, tensione, ecc.;
- Controlli – meccanismi meccanici, circuiti elettrici, computer;
- Amplificatori di potenza – switch, amplificatori elettrici, pompe idrauliche e valvole;
- Attuatori – motori, pistoni, magneti e solenoidi.

Sistema elettrico

In aggiunta al generatore, le turbine eoliche usano altri componenti elettrici. Alcuni esempi sono cavi, quadri elettrici, trasformatori, convertitori elettronici di potenza, condensatori di correzione del fattore di potenza, motori per il controllo dell'imbardata e del passo.

1.4 Componenti di una turbina microeolica ad asse orizzontale

Come visto nel paragrafo 1.2.6 non esiste una definizione univoca per distinguere le turbine microeoliche dalle altre turbine, tuttavia, secondo la classificazione della Tabella

1.3, si possono considerare come turbine microeoliche quelle con diametro del rotore inferiore a 1,25 m.

Date le ridotte dimensioni le turbine microeoliche sono macchine estremamente semplici rispetto alle grandi turbine. Vengono impiegate per ricaricare batterie e alimentare dispositivi che richiedono bassa potenza (decine o centinaia di watt).

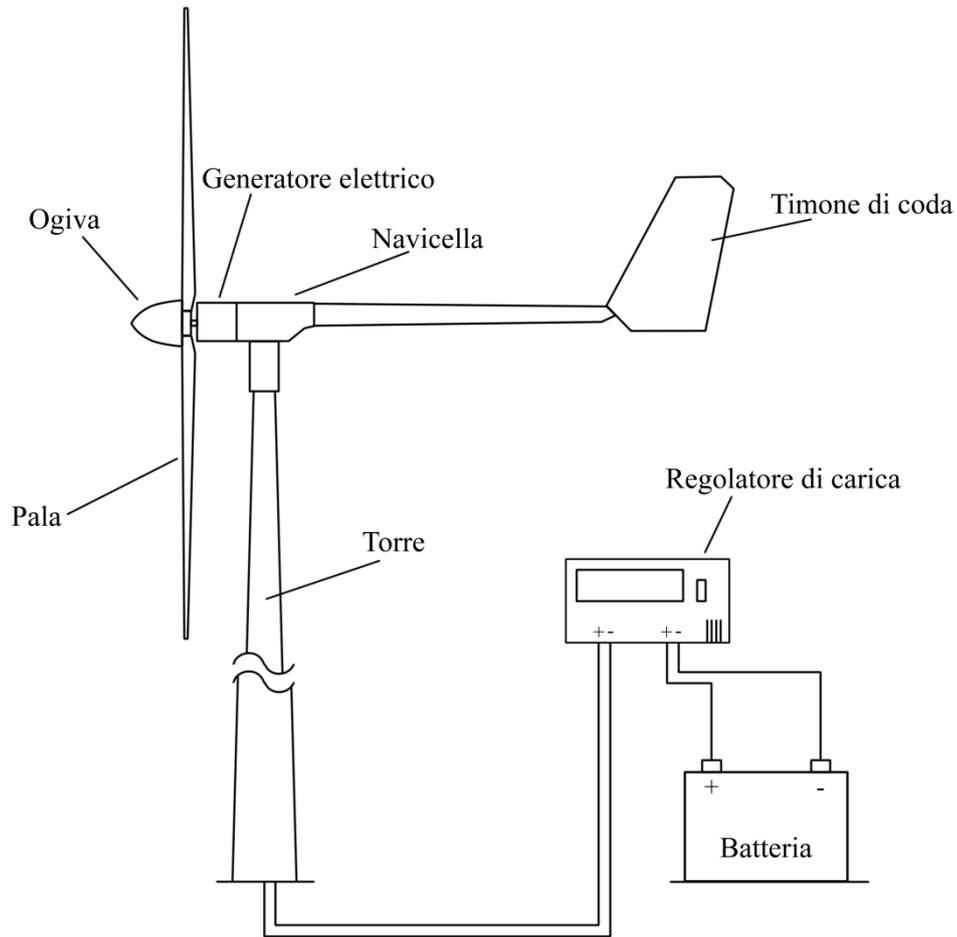


Figura 1.18 - Componenti di una turbina microeolica ad asse orizzontale

I componenti principali di una turbina microeolica ad asse orizzontale sono:

- il rotore;
- il generatore elettrico;
- la navicella;
- il timone di coda;
- la torre;
- il regolatore di carica;
- le batterie.

Rotore

Il rotore delle turbine microeoliche è costituito dalle pale e dal mozzo. Solitamente il rotore è in configurazione controvento e le pale sono fisse perciò il controllo della potenza avviene tramite regolazione passiva per stallo. Fanno eccezione le Superwind 350 e 353, di cui si è parlato nel paragrafo 1.2.8, in quanto sono dotate di un sistema di regolazione passiva del passo basato sulla forza centrifuga. Il numero di pale varia a seconda del modello, ci sono diverse turbine con tre pale ma non sono rare quelle con cinque o sei pale. Il materiale delle pale può essere fibra di carbonio o materiale polimerico.

Generatore elettrico

Il generatore elettrico delle turbine microeoliche è collegato direttamente al rotore senza l'impiego del moltiplicatore di giri. La maggior parte delle turbine è dotata di un generatore sincrono a magneti permanenti di tipo trifase. Quasi sempre il generatore ha un elevato numero di poli per sopperire all'assenza del moltiplicatore di giri.

Navicella

Nelle turbine microeoliche la navicella ha una funzione strutturale in quanto serve per sostenere il rotore, il generatore elettrico e il timone di coda; in alcuni casi contiene anche i componenti elettrici ed elettronici che servono per trasformare la corrente alternata a frequenza e tensione variabile in uscita dal generatore in corrente continua. La navicella è dotata di un cuscinetto reggispira e di anelli collettori che consentono il movimento reciproco tra torre e turbina.

Timone di coda

Le turbine microeoliche non hanno un sistema di imbardata attivo come quello delle grandi turbine ma sono dotate di un timone di coda. Il timone di coda serve per mantenere il piano del rotore in posizione ortogonale rispetto alla direzione del vento.

Torre

Le turbine microeoliche devono essere installate quasi sempre su torri controventate che si possono inclinare poiché la scarsa potenza in gioco non giustifica torri maggiormente elaborate.

Regolatore di carica

Le turbine microeoliche, con diametro del rotore inferiore a 1,25 m, vengono impiegate per ricaricare batterie e alimentare dispositivi che richiedono bassa potenza. Spesso vengono impiegate in sistemi ibridi fotovoltaico eolico. Per tale motivo solitamente il regolatore di carica è in grado di gestire oltre alla turbina microeolica uno o più pannelli fotovoltaici. Uno dei compiti del regolatore di carica è di evitare la sovraccarica delle

batterie. Solitamente il regolatore di carica è dotato di un interruttore (*manual shutdown switch*) che serve per rallentare la turbina ed interrompere il processo di carica, questo interruttore può essere azionato solo se la turbina non sta ruotando ad elevata velocità. Se possibile bisogna prima posizionare la turbina sottovento per farla rallentare. Un altro componente solitamente presente nel regolatore di carica è il diodo di blocco che serve per evitare conflitti con altre sorgenti di carica collegate allo stesso blocco di batterie, quale per esempio un motore a combustione interna.

Batterie

Le batterie sono un elemento fondamentale del sistema. Bisogna impiegare batterie a ciclo profondo (*deep cycle batteries*) perché sono progettate e costruite per scaricarsi a fondo periodicamente prima di essere ricaricate. Le batterie a ciclo profondo si distinguono dalle batterie da avviamento, come quelle delle auto, in quanto queste ultime sono progettate per erogare la breve scarica di corrente necessaria per avviare un motore. Le piastre delle batterie per uso ciclico hanno una massa attiva più densa rispetto alle piastre standard delle batterie da avviamento; questo le mette in condizione di sopportare le sollecitazioni dei cicli di scarica profonda senza perdere massa attiva o capacità.

1.5 Turbine microeoliche: applicazioni

Le turbine microeoliche sono solitamente impiegate per applicazioni di bassa potenza, decine o centinaia di watt, in luoghi dove non è disponibile la rete elettrica.



Figura 1.19 - Impianto ibrido eolico fotovoltaico per alimentare un sistema radio. Fonte:[22]

Vengono impiegate per ricaricare le batterie che alimentano: la strumentazione di bordo delle imbarcazioni a vela, le recinzioni elettrificate, la segnaletica stradale, le stazioni di monitoraggio (meteorologiche, sismiche, della qualità dell'aria), i sistemi di videosorveglianza, i sistemi per le telecomunicazioni. Spesso le turbine vengono installate in sistemi ibridi eolico fotovoltaici di cui si riporta lo schema di connessione alla batteria in Figura 1.20.

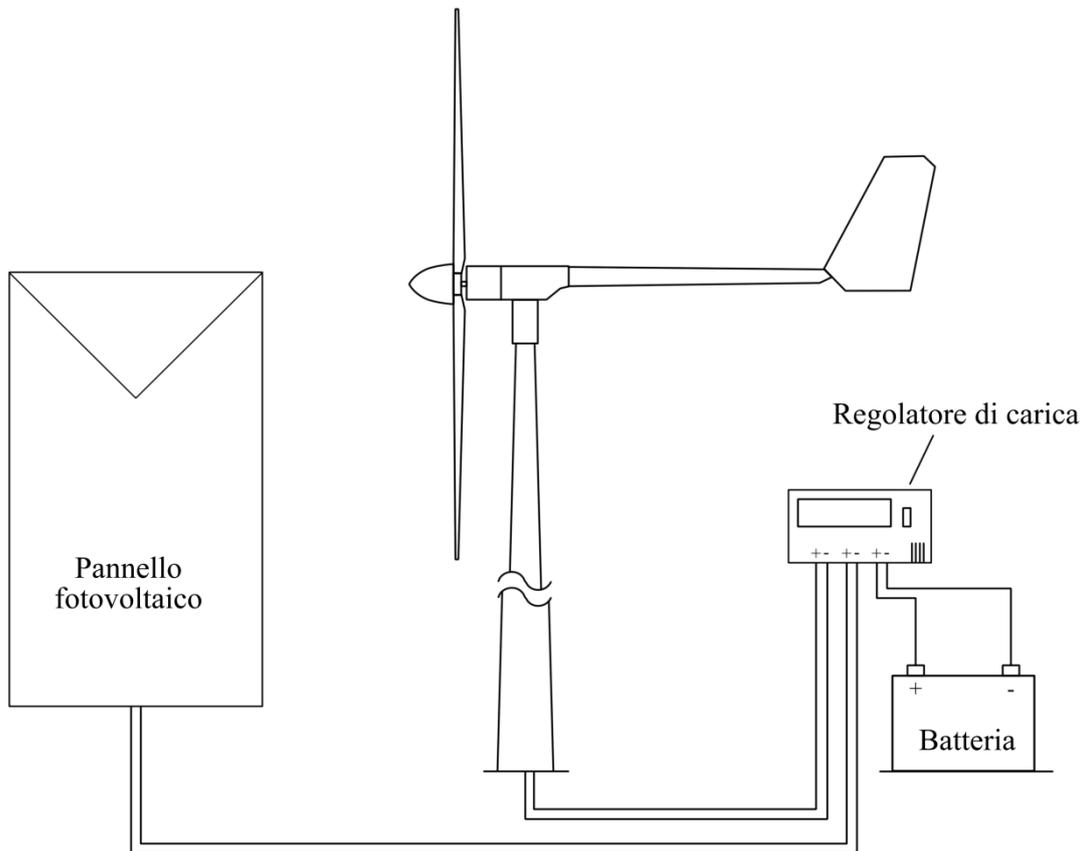


Figura 1.20 - Schema di connessione per un sistema ibrido eolico fotovoltaico



Figura 1.21 - Turbina microeolica installata su un'imbarcazione a vela. Fonte: [22]

2 Aerodinamica delle turbine eoliche

2.1 Teoria impulsiva assiale e limite di Betz

Un semplice modello, generalmente attribuito a Betz (1926), può essere usato per determinare la potenza di un rotore ideale e la spinta del vento su di esso. Questo semplice modello è basato sulla legge di conservazione della quantità di moto [14].

Si consideri un tubo di flusso che contiene il rotore della turbina ideale (Figura 2.1).

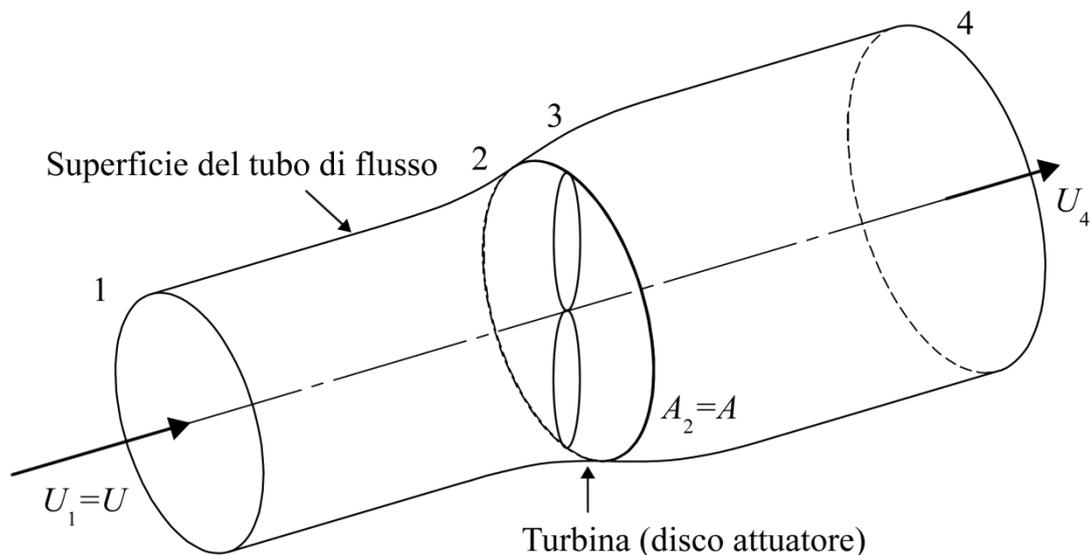


Figura 2.1 - Tubo di flusso

I numeri in Figura 2.1 indicano le diverse sezioni trasversali:

- 1 - sezione d'ingresso
- 2 - sezione immediatamente a monte del disco attuatore (rotore ideale)
- 3 - sezione immediatamente a valle del disco attuatore
- 4 - sezione di uscita.

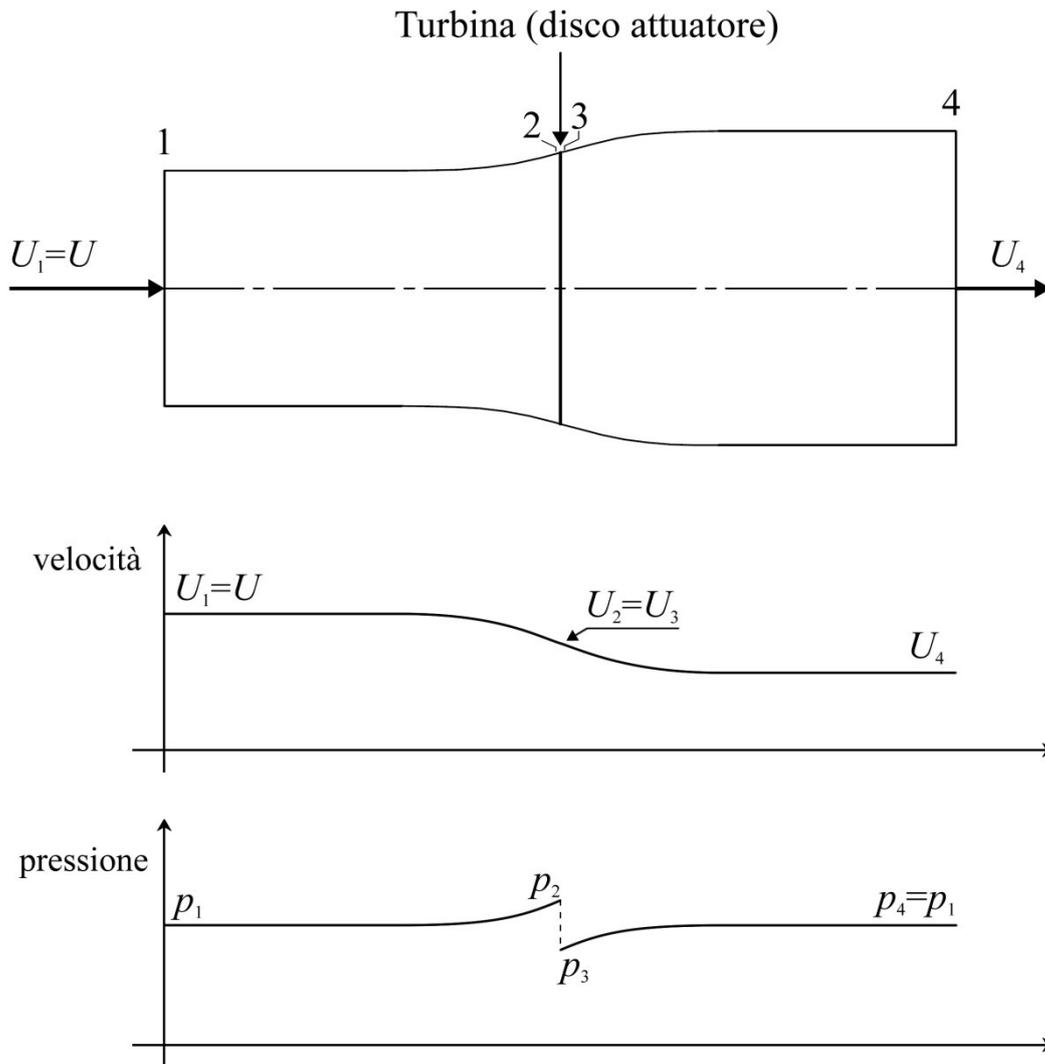


Figura 2.2 - Andamento della velocità e della pressione

Il flusso è presente solo attraverso le sezioni trasversali e non attraverso la superficie laterale del tubo di flusso. La turbina è rappresentata da un disco attuatore uniforme che crea una discontinuità di pressione nel tubo di flusso di aria che fluisce attraverso di esso. Il disco attuatore è illustrato in figura come un rotore bipala ma ciò non deve trarre in inganno in quanto tale teoria non è limitata a nessun particolare tipo di turbina eolica.

Questa analisi usa le seguenti ipotesi:

- Flusso omogeneo, incomprimibile e stazionario
- Fluido non viscoso
- Numero infinito di pale
- Spinta uniforme sul disco o sull'area del rotore
- Scia priva di rotazione
- Pressione statica lontano dal rotore, sia a monte sia a valle di esso, uguale alla pressione statica dell'ambiente indisturbato

Applicando la legge di conservazione della quantità di moto al volume di controllo che racchiude l'intero sistema, si può trovare la forza netta sul disco attuatore contenuto nel volume di controllo. Questa forza prende il nome di spinta, T , dal corrispondente termine inglese, thrust. Per la legge di conservazione della quantità di moto, per un flusso unidimensionale, incomprimibile, stazionario, la spinta è uguale e opposta alla variazione della quantità di moto del flusso di aria:

$$T = U_1(\rho AU)_1 - U_4(\rho AU)_4 \quad (2.1)$$

Dove ρ è la densità, A è l'area della sezione, U è la velocità dell'aria e i pedici indicano i valori delle grandezze in corrispondenza delle sezioni numerate in Figura 2.1.

Per un flusso stazionario e per un fluido incomprimibile $(\rho AU)_1 = (\rho AU)_4 = \dot{m}$, dove \dot{m} è la portata.

Quindi:

$$T = \dot{m}(U_1 - U_4) \quad (2.2)$$

La spinta è positiva, quindi la velocità a valle del rotore, U_4 , è minore della velocità del flusso libero, U_1 . Sia a destra, sia a sinistra del rotore non viene compiuto alcun lavoro. Perciò il teorema di Bernoulli può essere usato nei due volumi di controllo da entrambi i lati del disco attuatore.

Il teorema di Bernoulli è valido se sono soddisfatte le seguenti ipotesi: fluido non viscoso e incomprimibile, flusso stazionario e irrotazionale. L'equazione di Bernoulli ci dice che la somma della pressione (p), dell'energia cinetica per unità di volume ($\frac{1}{2}\rho U^2$) e della energia potenziale per unità di volume (ρgh) è costante in tutti i punti lungo una linea di corrente.

$$p + \frac{1}{2}\rho U^2 + \rho gh = \text{costante}$$

Sia a monte, sia a valle del disco attuatore l'energia potenziale per unità di volume non subisce variazioni o subisce variazioni trascurabili a seconda della linea di corrente che si considera.

Nel tubo di flusso a monte del disco:

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho U_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho U_2^2 \quad (2.3)$$

Nel tubo di flusso a valle del disco:

$$p_3 + \frac{1}{2}\rho U_3^2 = p_4 + \frac{1}{2}\rho U_4^2 \quad (2.4)$$

Dove si assume che le pressioni statiche lontano dal rotore, a monte e a valle di esso, siano uguali ($p_1 = p_4$) e che la velocità attraverso il disco rimanga la stessa ($U_2 = U_3$).

La spinta può anche essere espressa come la somma netta delle forze su ogni lato del disco attuatore:

$$\boxed{T = A_2(p_2 - p_3)} \quad (2.5)$$

Si ricava il termine ($p_2 - p_3$) dalle equazioni (2.3) e (2.4). Dall'equazione (2.3) si ricava p_2

$$p_2 = p_1 + \frac{1}{2}\rho U_1^2 - \frac{1}{2}\rho U_2^2$$

Dall'equazione (2.4) si ricava p_3

$$p_3 = -\frac{1}{2}\rho U_3^2 + p_4 + \frac{1}{2}\rho U_4^2$$

Quindi

$$p_2 - p_3 = p_1 + \frac{1}{2}\rho U_1^2 - \frac{1}{2}\rho U_2^2 + \frac{1}{2}\rho U_3^2 - p_4 - \frac{1}{2}\rho U_4^2$$

Poiché $p_1 = p_4$ e $U_2 = U_3$ l'equazione precedente si riduce a

$$p_2 - p_3 = \frac{1}{2}\rho U_1^2 - \frac{1}{2}\rho U_4^2 = \frac{1}{2}\rho(U_1^2 - U_4^2)$$

Ora si sostituisce il termine $p_2 - p_3$ così ottenuto nell'equazione (2.5) e si ottiene:

$$\boxed{T = \frac{1}{2}\rho A_2(U_1^2 - U_4^2)} \quad (2.6)$$

Eguagliando le espressioni della spinta dalle Equazioni (2.2) e (2.6) e riconoscendo che la portata è $\rho A_2 U_2$, si ottiene:

$$\dot{m}(U_1 - U_4) = \frac{1}{2}\rho A_2(U_1^2 - U_4^2)$$

$$\begin{aligned}\rho A_2 U_2 (U_1 - U_4) &= \frac{1}{2} \rho A_2 (U_1^2 - U_4^2) \\ U_2 (U_1 - U_4) &= \frac{1}{2} (U_1^2 - U_4^2) \\ U_2 (U_1 - U_4) &= \frac{1}{2} (U_1 + U_4)(U_1 - U_4)\end{aligned}$$

$$\boxed{U_2 = \frac{U_1 + U_4}{2}} \quad (2.7)$$

Perciò, la velocità del vento in corrispondenza del piano del rotore, usando questo semplice modello, è la media delle velocità a monte e a valle.

Se si definisce il **fattore di induzione assiale**, a , come la diminuzione frazionaria della velocità del vento tra l'ingresso e il piano del rotore allora

$$\boxed{a = \frac{U_1 - U_2}{U_1}} \quad (2.8)$$

$$U_1 a = U_1 - U_2$$

$$U_2 = U_1 - U_1 a$$

$$U_2 = U_1(1 - a) \quad (2.9)$$

Dalla (2.7) si ricava U_4

$$2U_2 = U_1 + U_4$$

$$U_4 = 2U_2 - U_1$$

Si sostituisce U_2 con l'Equazione (2.9)

$$U_4 = 2U_1(1 - a) - U_1$$

$$U_4 = 2U_1 - 2aU_1 - U_1$$

$$U_4 = U_1(1 - 2a) \quad (2.10)$$

La quantità, $U_1 a$, è spesso indicata come la velocità indotta sul rotore, in tal caso la velocità del vento sul rotore è una combinazione della velocità del vento indisturbata e della velocità del vento indotta. All'aumentare del fattore di induzione assiale a partire da 0, la velocità del vento oltre il rotore diminuisce sempre di più. Se $a = \frac{1}{2}$, la velocità del vento a valle del rotore è diminuita fino a zero e questa semplice teoria non è più applicabile.

La potenza in uscita, P , è uguale alla spinta moltiplicata per la velocità in corrispondenza del disco attuatore:

$$P = TU_2 = \frac{1}{2} \rho A_2 (U_1^2 - U_4^2) U_2 = \frac{1}{2} \rho A_2 U_2 (U_1 + U_4)(U_1 - U_4) \quad (2.11)$$

Sostituendo U_2 e U_4 con le Equazioni (2.9) e (2.10)

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{2} \rho A_2 U_1 (1-a) [U_1 + U_1(1-2a)] [U_1 - U_1(1-2a)] \\ P &= \frac{1}{2} \rho A_2 U_1 (1-a) U_1 (2-2a) U_1 (2a) \\ P &= \frac{1}{2} \rho A_2 U_1^3 4a(1-a)^2 \end{aligned}$$

Se si effettua un cambiamento di notazione e si indica l'area del disco attuatore A_2 con A e la velocità del flusso indisturbato U_1 con U si ottiene:

$$P = \frac{1}{2} \rho A U^3 4a(1-a)^2 \quad (2.12)$$

Le prestazioni del rotore di una turbina eolica sono abitualmente caratterizzate dal **coefficiente di potenza**, C_p :

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A U^3} = \frac{\text{Potenza meccanica all'albero}}{\text{Energia cinetica entrante nell'unità di tempo}} \quad (2.13)$$

Il coefficiente di potenza adimensionale rappresenta la frazione dell'energia cinetica entrante nell'unità di tempo che è estratta dal rotore. Ricordando l'Equazione (2.12), il coefficiente di potenza si riduce ad una funzione del solo fattore di induzione assiale:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A U^3} = \frac{\frac{1}{2} \rho A U^3 4a(1-a)^2}{\frac{1}{2} \rho A U^3}$$

$$C_p = 4a(1-a)^2 \quad (2.14)$$

Se si deriva C_p rispetto ad a e si pone la derivata uguale a zero si ottengono i punti di massimo e di minimo locali e i punti di flesso orizzontale; osservando il grafico del C_p in funzione di a o studiando il segno della derivata prima si può capire se si tratta di un punto di massimo, di minimo o di flesso orizzontale.

Il fattore di induzione assiale non può assumere qualsiasi valore dell'asse reale in quanto al di fuori di un certo intervallo si verificano condizioni che sono fisicamente impossibili. In particolare $0 < a < 1/2$.

Ricordando che $a = \frac{U_1 - U_2}{U_1}$ si osserva che a è maggiore di zero poiché U_2 non può essere maggiore di U_1 , infatti la velocità del vento diminuisce e non il contrario. Al limite quando $a = 0$ significa che $U_2 = U_1$ ovvero che il vento non diminuisce la propria

velocità in corrispondenza del disco attuatore e non c'è variazione di energia cinetica e scambio di energia tra vento e rotore. Tale condizione si verifica se si rimuove il disco attuatore dal tubo di flusso. In questo caso il tubo di flusso assume forma cilindrica.

Per capire che cosa succede quando $a=1/2$ si fa ricorso all'espressione della velocità in uscita:

$$U_4 = U_1(1-2a)$$

Se $a=1/2$ allora $U_4=0$, condizione che non è fisicamente possibile e che richiederebbe $A_4 = \infty$.

Per $a>1/2$ la velocità in uscita U_4 assume valori negativi e ciò significa avere una velocità in uscita dal tubo di flusso con la stessa direzione ma verso opposto rispetto alla velocità in ingresso, quindi una condizione impossibile dal punto di vista fisico.

Si calcola la derivata del coefficiente di potenza C_p rispetto ad a .

$$C_p = 4a(1-a)^2 = 4a(1+a^2-2a) = 4a^3 - 8a^2 + 4a$$

$$\frac{dC_p}{da} = 12a^2 - 16a + 4$$

Si pone $\frac{dC_p}{da} = 0$:

$$12a^2 - 16a + 4 = 0$$

$$3a^2 - 4a + 1 = 0$$

$$a = \frac{2 \pm \sqrt{4-3}}{3} = \begin{cases} 1 & \text{impossibile poiché } 0 < a < 1/2 \\ \frac{1}{3} & \end{cases}$$

Si ottengono due soluzioni reali distinte di cui una è impossibile ed osservando il grafico riportato in Figura 2.3 si può affermare che in $a=1/3$ il coefficiente di potenza presenta un punto di massimo. Perciò:

$$C_{P,\max} = 4a(1-a)^2 = \frac{16}{27} = 0,5926 \quad (2.15)$$

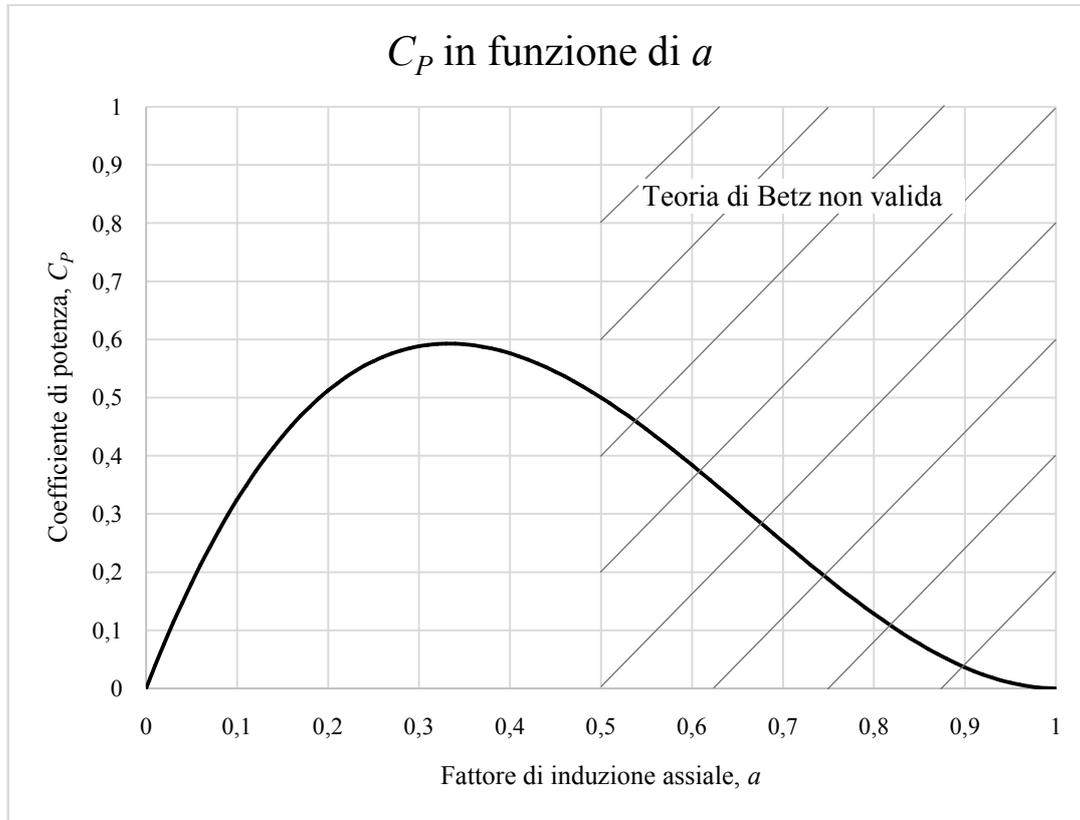


Figura 2.3 - Grafico del coefficiente di potenza in funzione del fattore di induzione assiale

Quando $a=1/3$ il flusso attraverso il disco attuatore corrisponde ad un tubo di flusso con un'area della sezione di monte pari a $2/3$ l'area del disco. L'area della sezione di valle, la sezione 4, è doppia rispetto all'area del disco. Questo risultato indica che, se un rotore ideale venisse progettato e messo in esercizio in modo che la velocità del vento in corrispondenza del rotore fosse $2/3$ della velocità del vento indisturbata, allora lavorerebbe in condizioni di massima potenza [14].

Dalle Equazioni (2.6) e (2.10), si può esprimere la spinta assiale sul disco in funzione del fattore di induzione assiale.

A partire dall'Equazione (2.6) si sostituisce U_4 con l'Equazione (2.10)

$$T = \frac{1}{2} \rho A_2 (U_1^2 - U_4^2) = \frac{1}{2} \rho A_2 [U_1^2 - U_1^2 (1-2a)^2] = \frac{1}{2} \rho A_2 U_1^2 (1-1-4a^2+4a)$$

$$T = \frac{1}{2} \rho A_2 U_1^2 [4a(1-a)] \tag{2.16}$$

In modo simile alla potenza, la spinta su una turbina eolica può essere caratterizzata da un **coefficiente di spinta** adimensionale:

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho A U^2} = \frac{\text{Forza di spinta}}{\text{Forza dinamica}} \tag{2.17}$$

Il coefficiente di spinta rappresenta la frazione della forza dinamica del vento che viene trasmessa al rotore della turbina eolica.

$$C_T = \frac{\frac{1}{2} \rho A_2 U_1^2 [4a(1-a)]}{\frac{1}{2} \rho A U^2} = 4a(1-a)$$

$$C_T = 4a(1-a) \quad (2.18)$$

Si rappresenta in Figura 2.4 l'andamento del coefficiente di spinta in funzione del fattore di induzione assiale.

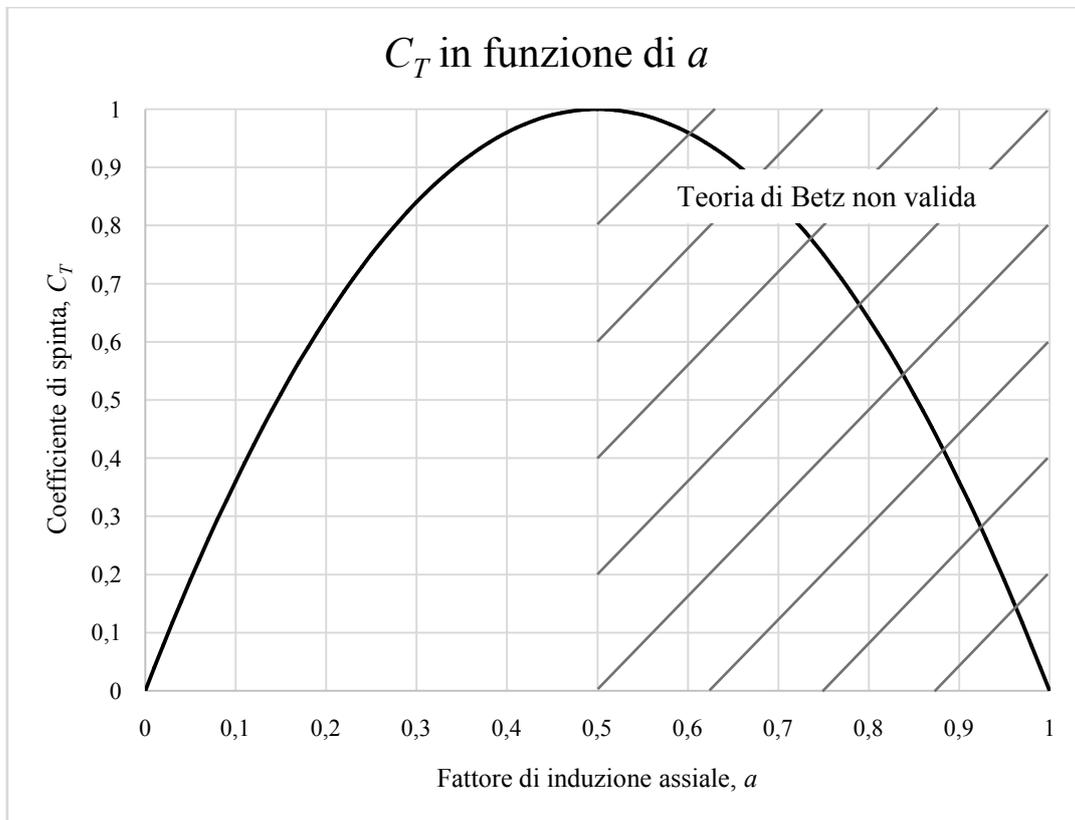


Figura 2.4 - Grafico del coefficiente di spinta in funzione del fattore di induzione assiale

$C_T = -4a^2 + 4a$ ha andamento parabolico, presenta concavità rivolta verso il basso e vertice in $a = 1/2$ e $C_T = 1$ quindi il punto di massimo assoluto corrisponde al vertice della parabola.

Anche in questo caso bisogna ricordare che la teoria di Betz ha validità solo per $0 < a < 1/2$. In condizioni di massima potenza, quando $a = 1/3$, $C_T = 8/9$.

2.2 Principio di funzionamento di una turbina eolica ad asse orizzontale

Si consideri la vista frontale di una turbina a tre pale, in rotazione alla velocità angolare ω a causa della presenza di vento nel piano del rotore con velocità $U_2=U(1-a)$, direzione normale al piano del foglio e verso entrante (Figura 2.5).

Si individui una sezione trasversale (S-S') di una pala ad una distanza R_x dall'asse di rotazione.

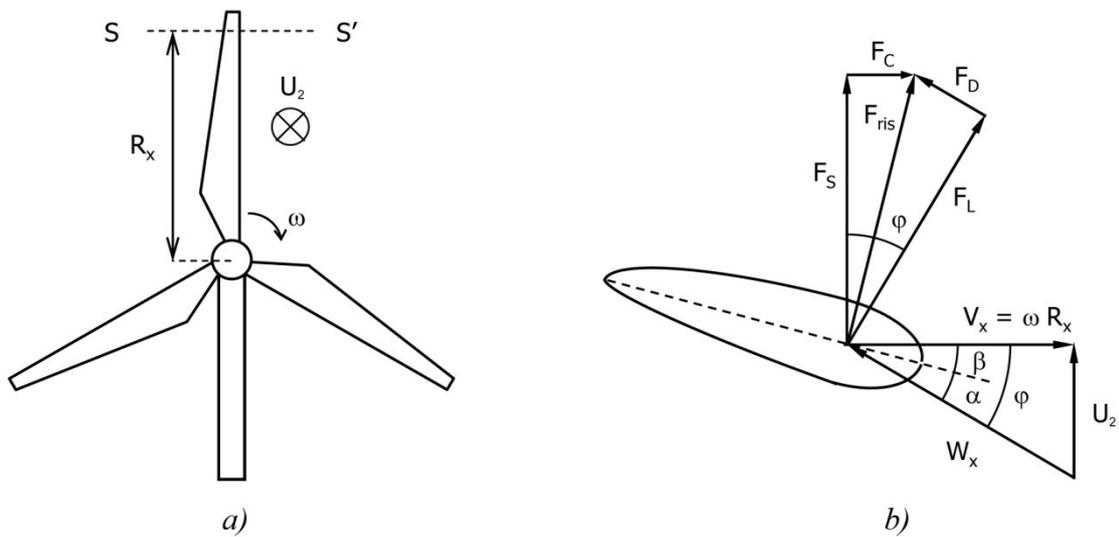


Figura 2.5 - Cinematica e dinamica della pala.

La Figura 2.5 b è la sezione trasversale vista dall'alto. La cinematica della pala è descritta da un triangolo di velocità i cui lati sono U_2 , V_x e W_x .

La relazione vettoriale tra queste grandezze è:

$$\vec{W}_x = \vec{U}_2 - \vec{V}_x \quad (2.19)$$

Al variare della distanza dall'asse di rotazione R_x cambia il profilo alare e il triangolo di velocità.

\vec{U}_2 è la velocità del vento sul piano del rotore $U_2=U(1-a)$ dove U è la velocità del vento imperturbata e a è il fattore di induzione assiale;

\vec{V}_x è la velocità periferica in corrispondenza della sezione considerata $V_x=\omega R_x$;

\vec{W}_x è la velocità del vento relativa rispetto al sistema di riferimento della pala;

α è l'angolo di attacco (o di incidenza), è l'angolo tra la direzione della corda alare e la direzione del vettore W_x ;

β è l'angolo di passo, è l'angolo tra la direzione della corda alare e la direzione del vettore V_x ;

φ è l'angolo tra la direzione di W_x e la direzione di V_x .

Vale la seguente relazione:

$$\varphi = \alpha + \beta \quad (2.20)$$

Passando alla dinamica della pala, la velocità W_x crea, interagendo con il profilo, due componenti di forza sulla pala: la portanza F_L (*lift*), normale al vettore W_x e la resistenza F_D (*drag*), parallela al medesimo vettore.

La portanza è direttamente proporzionale al quadrato della velocità relativa secondo un coefficiente chiamato coefficiente di portanza (*lift coefficient*), funzione dell'angolo di attacco:

$$F_L \propto C_L(\alpha) \cdot W_x^2 \quad (2.21)$$

Anche la resistenza è direttamente proporzionale al quadrato della velocità relativa ma secondo un coefficiente chiamato coefficiente di resistenza (*drag coefficient*), funzione dell'angolo di attacco:

$$F_D \propto C_D(\alpha) \cdot W_x^2 \quad (2.22)$$

Il coefficiente di portanza assume valori maggiori rispetto al coefficiente di resistenza a parità di angolo di attacco α . Esso, inoltre, presenta un andamento crescente all'aumentare di α solo fino a circa 15° oltre il quale diminuisce bruscamente per il fenomeno dello stallo.

Invece il coefficiente di resistenza è sempre crescente all'aumentare di α .

In Figura 2.6 si rappresenta, a titolo di esempio, l'andamento del coefficiente di portanza e del coefficiente di resistenza per un profilo alare simmetrico, il NACA 0012, in funzione dell'angolo di attacco e del numero di Reynolds.

Il numero di Reynolds è definito come:

$$\text{Re} = \frac{UL}{\nu} = \frac{\rho UL}{\mu} = \frac{\text{forza inerziali}}{\text{forza viscosse}} \quad (2.23)$$

Dove ρ è la densità del fluido, μ è la viscosità dinamica, $\nu = \mu / \rho$ è la viscosità cinematica, U ed L sono la velocità e la lunghezza che caratterizzano la scala del flusso [14]. Nel caso in esame queste sono la velocità del vento relativa rispetto al sistema di riferimento della pala (W_x) e la lunghezza della corda alare.

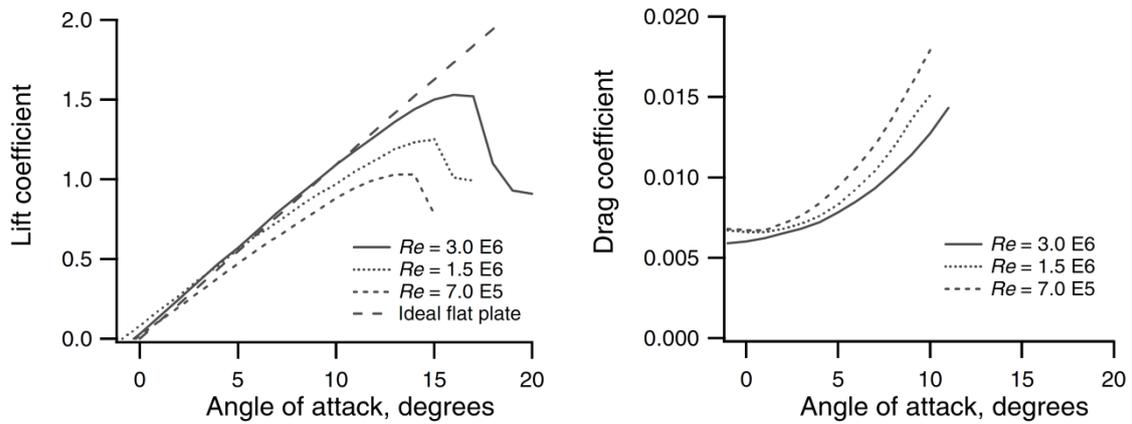


Figura 2.6 - Coefficiente di lift e coefficiente di drag per il profilo alare simmetrico NACA 0012.
Fonte: [14]

La forza risultante (F_{ris}) dalla composizione vettoriale della portanza e della resistenza si può nuovamente scomporre secondo due assi ortogonali, dei quali uno è parallelo alla direzione della velocità periferica V_x e l'altro è parallelo alla velocità del vento U .

La componente secondo la direzione della velocità periferica F_C è la forza che è responsabile della coppia motrice; la componente secondo la direzione del vento F_S è la spinta che fa flettere la pala e che si scarica sulla torre della turbina.

La direzione della portanza F_L e la direzione della spinta F_S individuano ancora l'angolo φ .

In formule si può scrivere:

$$F_C = F_L \sin \varphi - F_D \cos \varphi \quad (2.24)$$

Si nota che la portanza è responsabile della forza motrice, mentre la resistenza la riduce.

$$F_S = F_L \cos \varphi + F_D \sin \varphi \quad (2.25)$$

Si osserva che portanza e resistenza contribuiscono entrambe ad aumentare la spinta, anche se è prevalente la portanza.

2.3 Profilo alare

Le sezioni delle pale di una turbina eolica hanno la forma di profili alari. Si presentano i termini che descrivono il profilo alare, si veda la Figura 2.7.

La linea d'inarcamento medio (*mean camber line*) è il luogo dei punti equidistanti dalla superficie superiore (dorso) e dalla superficie inferiore (ventre) del profilo. I punti più estremi della linea d'inarcamento medio sono il bordo di attacco (*leading edge*), il bordo che è investito dal vento per primo e il bordo di uscita (*trailing edge*), quello che il vento oltrepassa prima di lasciare il profilo. Il segmento rettilineo che connette il bordo di attacco al bordo d'uscita è la linea di corda (*chord line*) del profilo e la distanza tra il bordo di attacco e il bordo d'uscita misurata lungo la linea di corda è chiamata corda, c , del profilo (*chord*). La curvatura (*camber*) è la distanza tra la linea d'inarcamento medio e la linea di corda, misurata perpendicolarmente alla linea di corda. Lo spessore (*thickness*) è la distanza tra il dorso e il ventre, anch'essa misurata perpendicolarmente alla linea di corda. Infine, l'angolo di attacco α , è definito come l'angolo tra la velocità relativa del vento e la linea di corda. Nella figura non è mostrata la lunghezza della pala in quanto perpendicolare alla sezione. I parametri geometrici che hanno un effetto sulle prestazioni aerodinamiche di un profilo alare sono: il raggio del bordo di attacco, la linea d'inarcamento medio, lo spessore massimo, la distribuzione dello spessore e l'angolo del bordo d'uscita [14].

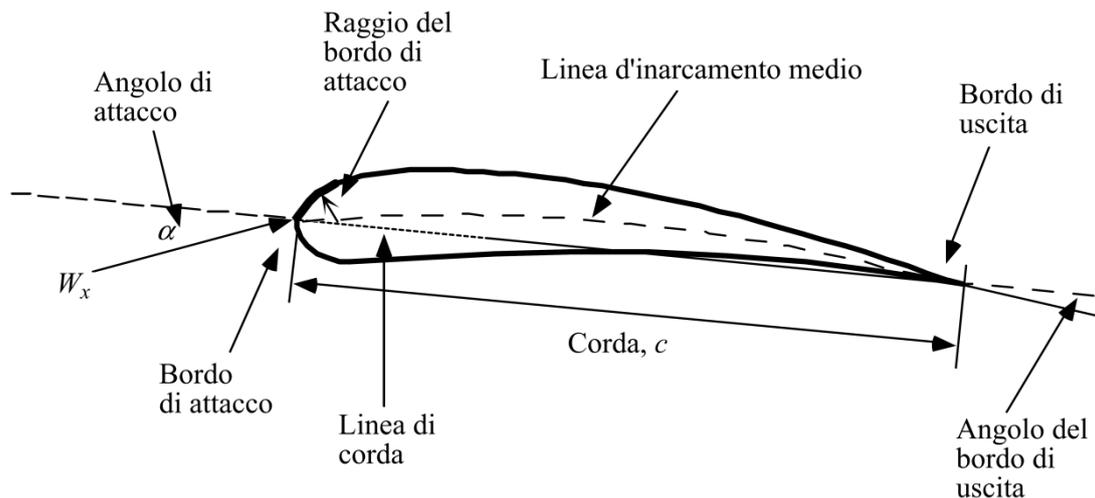


Figura 2.7 - Nomenclatura del profilo alare. Fonte: [14]

2.4 Lo svergolamento delle pale

In questo paragrafo si risponde alla domanda: perché le pale delle turbine eoliche sono svergolate?

Si considera una pala in cui l'angolo di torsione (*twist angle*) della sezione di punta pala è nullo. L'angolo di torsione aumenta progressivamente spostandosi dalla punta della pala verso la base. In corrispondenza della base raggiunge il valore massimo.

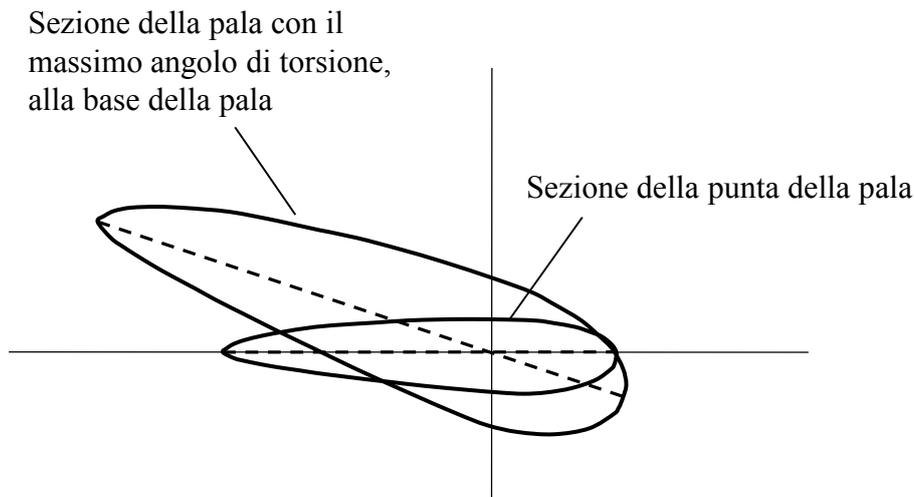


Figura 2.8 - Sezioni della base e della punta di una pala svergolata

Si rappresenta in Figura 2.9 il triangolo di velocità per la sezione in corrispondenza della punta della pala. Si nota che la velocità periferica (V_p) di questa sezione è elevata poiché la distanza dall'asse di rotazione è massima.

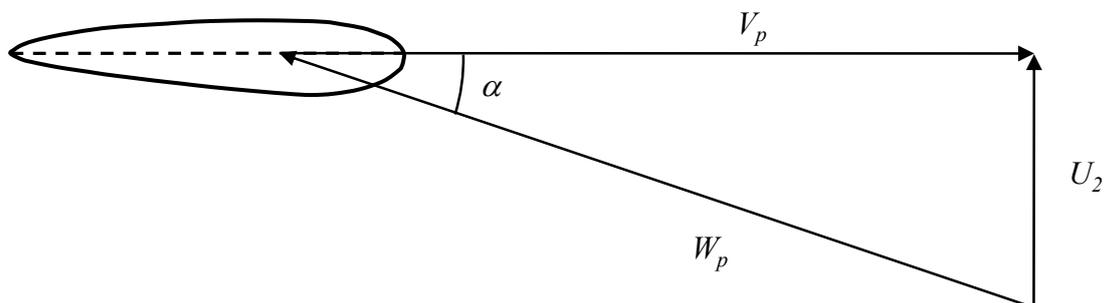


Figura 2.9 - Triangolo di velocità per la sezione di punta pala

Se la pala non fosse svergolata la sezione più prossima alla base della pala avrebbe angolo di torsione nullo, come mostrato in Figura 2.10. La velocità del vento nel piano del rotore (U_2) è uguale per tutte le sezioni della pala mentre la velocità periferica $V_x = \omega R_x$

diminuisce spostandosi verso sezioni prossime alla base. In corrispondenza della base la velocità periferica è pari a V_b , di molto inferiore rispetto a V_p , come si nota dal confronto tra la Figura 2.9 e la Figura 2.10. In definitiva se la pala non fosse svergolata il triangolo di velocità alla base della pala presenterebbe un angolo di attacco (α) molto elevato, il che significherebbe avere il profilo alare in condizioni di stallo.

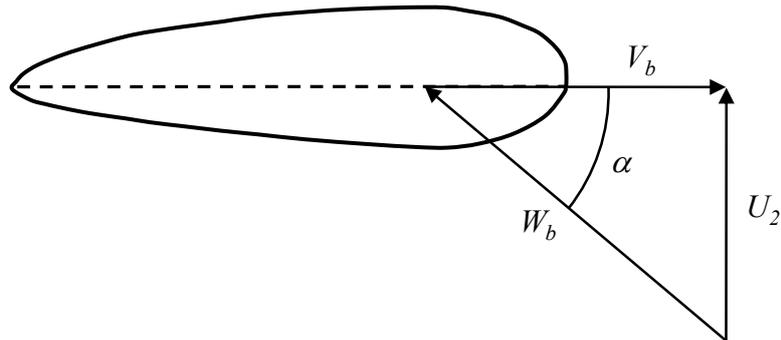


Figura 2.10 - Triangolo di velocità per la sezione alla base di una pala non svergolata

Aumentando l'angolo di torsione per le sezioni prossime alla base della pala, l'angolo di attacco si riduce, come si vede in Figura 2.11 e si evita la condizione di stallo. Per questo motivo le pale delle turbine eoliche vengono progettate e realizzate svergolate.

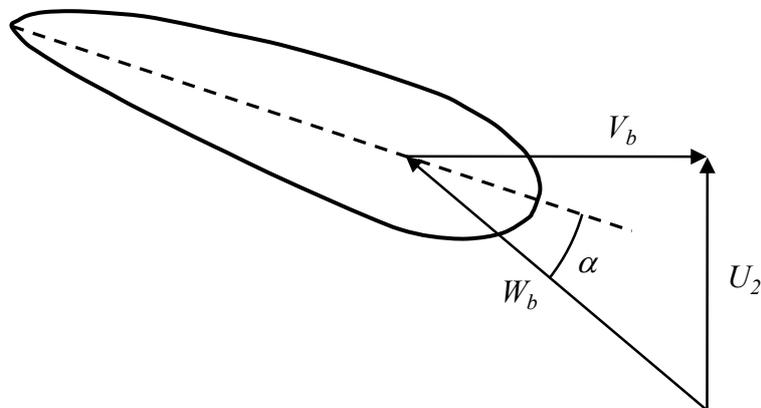


Figura 2.11 - Triangolo di velocità per la sezione alla base di una pala svergolata

3 Dimensionamento del generatore

3.1 Calcolo teorico delle prestazioni del rotore

A partire dalla curva del coefficiente di potenza, C_P , in funzione del rapporto di velocità periferica (“tip speed ratio”), λ , si ricavano i grafici della potenza meccanica e della coppia in funzione della velocità angolare. Questi ultimi serviranno per il dimensionamento del generatore elettrico da accoppiare al rotore.

La curva del coefficiente di potenza era stata calcolata dall’autore della tesi di laurea magistrale, che è alla base di questo lavoro, per un rotore con identica forma, ma dimensioni dimezzate. In particolare il raggio dell’area spazzata dal rotore era di 23 cm, raddoppiando le dimensioni il nuovo raggio arriva a 46 cm.

La curva del C_P in funzione di λ non cambia al variare delle dimensioni del rotore infatti essa dipende solo dalla forma della turbina e non dalla sua scala di dimensione [1].

Si riporta in Figura 3.1 il grafico del coefficiente di potenza in funzione del “tip speed ratio”.

Si nota che l’andamento del coefficiente di potenza non è regolare per valori del “tip speed ratio” minori di 1,5. Ciò è dovuto a problemi di convergenza del codice MATLAB[®] che è stato creato da Luca Roberto per ottimizzare la geometria delle pale e calcolare le prestazioni del rotore.

Per evitare di enfatizzare il problema nei successivi passaggi si approssima l’andamento del coefficiente di potenza con una funzione polinomiale del quarto ordine ricavata come linea di tendenza. La funzione polinomiale è:

$$C_P = 0,0068\lambda^4 - 0,0842\lambda^3 + 0,2379\lambda^2 - 0,0151\lambda + 0,0082 \quad (3.1)$$

In Figura 3.2 la linea di tendenza è rappresentata tratteggiata.

Si usa la funzione polinomiale per calcolare il coefficiente di potenza ai diversi valori del rapporto di velocità periferica. I valori ottenuti si riportano in Tabella 3.2, mentre in Figura 3.3, si rappresenta l'andamento del coefficiente dopo la modifica apportata.

Tabella 3.1 - Coefficiente di potenza¹

λ	C_p
0,2	0,0132
0,6	0,0603
1,0	0,1780
1,4	0,2371
1,8	0,3213
2,2	0,3783
2,6	0,4211
3,0	0,4003
3,4	0,2894
3,8	0,1728
4,2	0,0196

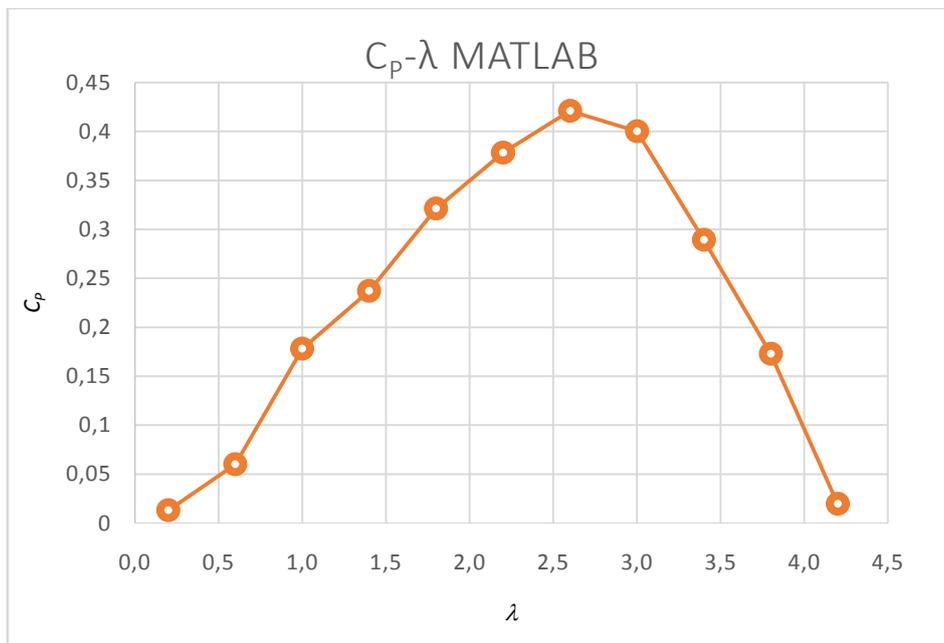


Figura 3.1 - Grafico del coefficiente di potenza in funzione del "tip speed ratio"¹

¹Tabella e grafico tratti dalla tesi di laurea magistrale "Wind tunnel measurements and numerical simulations of a 3D printed wind turbine, optimized using MATLAB"; Relatori: Prof. Filippo Spertino, Prof. Carlos Veganzones Nicolás; Candidato: Roberto Luca

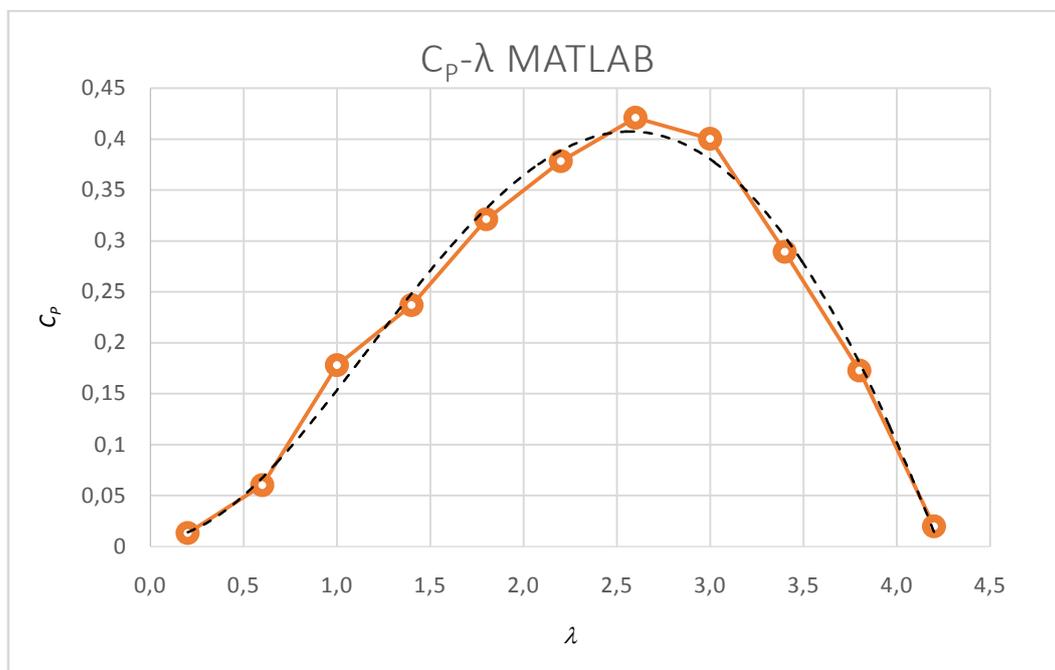


Figura 3.2 - C_p in funzione di λ e relativa linea di tendenza

Tabella 3.2 - Coefficiente di potenza modificato

λ	C_p
0,2	0,0140
0,6	0,0675
1,0	0,1536
1,4	0,2484
1,8	0,3321
2,2	0,3892
2,6	0,4080
3,0	0,3814
3,4	0,3063
3,8	0,1838
4,2	0,0191

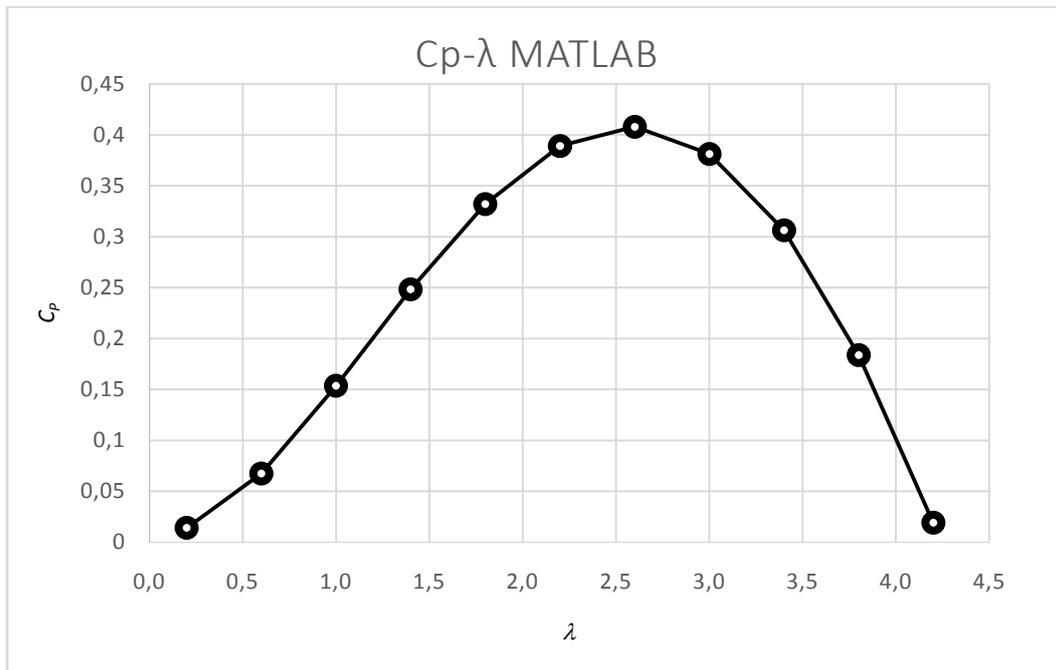


Figura 3.3 - Grafico del C_p in funzione di λ modificato

Il “tip speed ratio”, λ , è il rapporto tra la velocità tangenziale di punta pala e la velocità indisturbata del vento a monte del rotore:

$$\lambda = \frac{\omega R}{U} \quad (3.2)$$

Dove ω è la velocità angolare del rotore in radianti al secondo, R è il raggio dell'area spazzata dal rotore in metri e U è la velocità indisturbata del vento a monte del rotore in metri al secondo.

Fissata la velocità del vento, ad ogni valore di λ è possibile associare un diverso valore della velocità angolare ω . Dall'equazione (3.2):

$$\omega = \frac{\lambda U}{R}$$

Inoltre, per ogni valore di λ , fissata la velocità del vento, è possibile calcolare la potenza meccanica all'albero utilizzando l'equazione (2.13):

$$P = C_p(\lambda) \frac{1}{2} \rho A U^3 = C_p(\lambda) \frac{1}{2} \rho \pi R^2 U^3$$

Dove $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ è la densità dell'aria a 15°C e 1 atmosfera.

Si ottengono così diversi valori di potenza meccanica al variare della velocità angolare, per una fissata velocità del vento.

A partire dalla potenza meccanica è possibile risalire alla coppia, C :

$$C = \frac{P}{\omega} \quad (3.3)$$

Si riporta in Tabella 3.3 un esempio di calcolo della potenza meccanica e della coppia al variare della velocità angolare, considerando una velocità del vento pari a 6 m/s.

Tabella 3.3 - Potenza meccanica e coppia ad una velocità del vento di 6 m/s

λ	C_P	ω (rad/s)	ω (giri/min)	P (W)	C (Nm)
0,2	0,0140	2,61	25	1	0,5
0,6	0,0675	7,83	75	6	0,8
1,0	0,1536	13,04	125	14	1,0
1,4	0,2484	18,26	174	22	1,2
1,8	0,3321	23,48	224	29	1,2
2,2	0,3891	28,70	274	34	1,2
2,6	0,4080	33,91	324	36	1,1
3,0	0,3814	39,13	374	34	0,9
3,4	0,3063	44,35	423	27	0,6
3,8	0,1838	49,57	473	16	0,3
4,2	0,0191	54,78	523	2	0,0

Si ripete lo stesso calcolo per diversi valori della velocità del vento: 8 m/s, 10 m/s, 12 m/s, 14 m/s, 16 m/s. Si considera questo intervallo di velocità poiché la velocità di progetto del rotore è 10 m/s. Si riportano tutti i risultati nell'appendice A e si rappresentano i grafici della potenza e della coppia in funzione della velocità angolare in Figura 3.4 e in Figura 3.5. In Figura 3.6 si riporta il grafico della potenza meccanica massima in funzione della velocità del vento.

Alle velocità del vento considerate il rotore funziona con velocità angolari comprese tra 0 e 1400 giri/min. La potenza meccanica raggiunge un massimo pari a 680 W quando la velocità del vento è di 16 m/s e la velocità angolare è pari a 864 giri/min. La coppia massima è pari a 8,8 Nm ad una velocità del vento di 16 m/s e una velocità angolare di 598 giri/min.

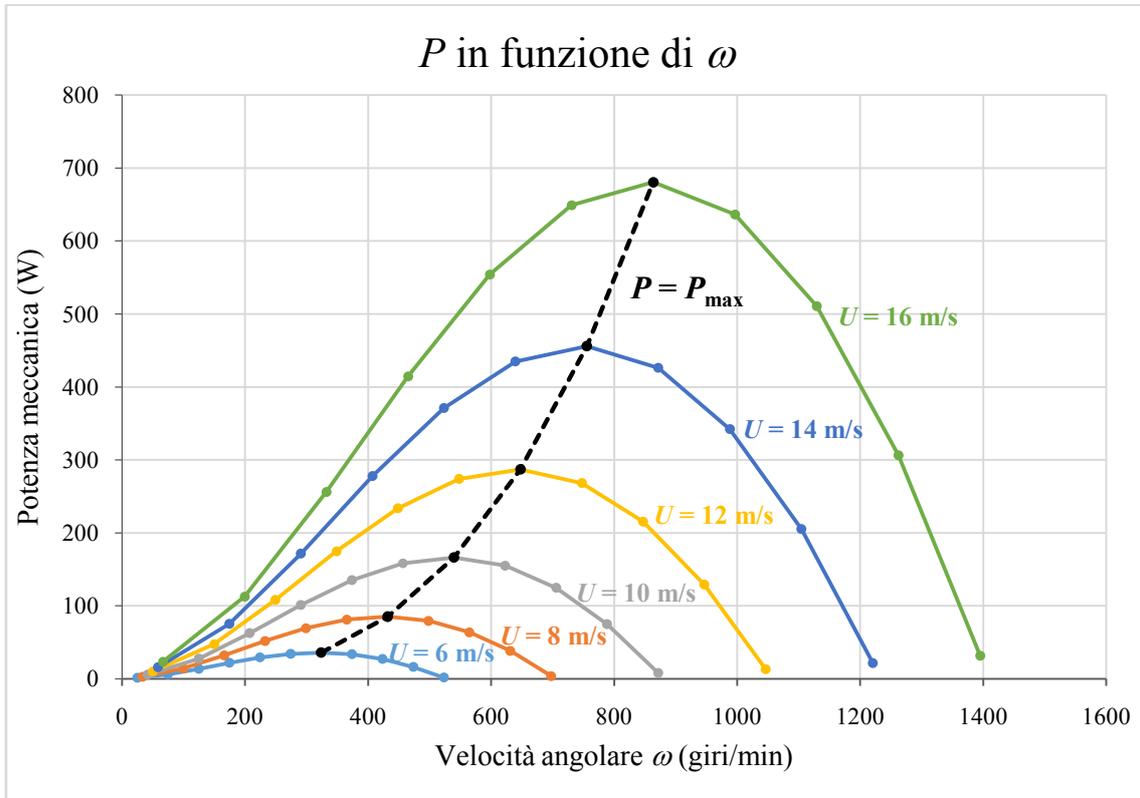


Figura 3.4 - Grafico della potenza meccanica all'albero in funzione della velocità angolare a diverse velocità del vento

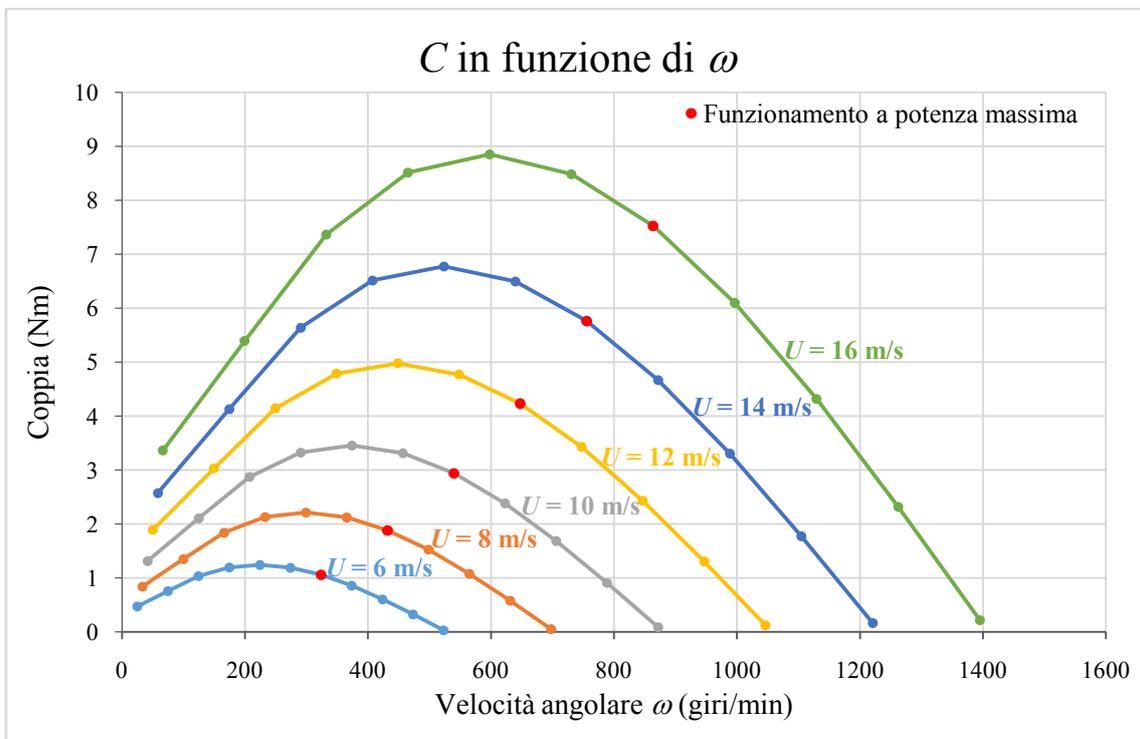


Figura 3.5 - Grafico della coppia in funzione della velocità angolare a diverse velocità del vento

Per una data velocità del vento la velocità angolare alla quale si ha la massima potenza meccanica è diversa dalla velocità angolare alla quale si ha la massima coppia.

Nel punto di funzionamento a massima coppia non si raggiunge la massima potenza meccanica. La strategia di esercizio di un sistema eolico ben progettato consiste nel cercare di mantenere la velocità angolare del rotore prossima a quella di massima potenza. Poiché il punto di massima potenza cambia al variare della velocità del vento, la velocità del rotore deve essere corretta in base alla velocità del vento per forzare il rotore a funzionare alla potenza massima P_{max} . Ciò può essere fatto con un sistema a velocità variabile.

Tabella 3.4 - Potenza meccanica massima alle diverse velocità del vento

U (m/s)	ω (rad/s)	ω (giri/min)	P_{max} (W)
6	33,91	324	36
8	45,22	432	85
10	56,52	540	166
12	67,83	648	287
14	79,13	756	456
16	90,43	864	680

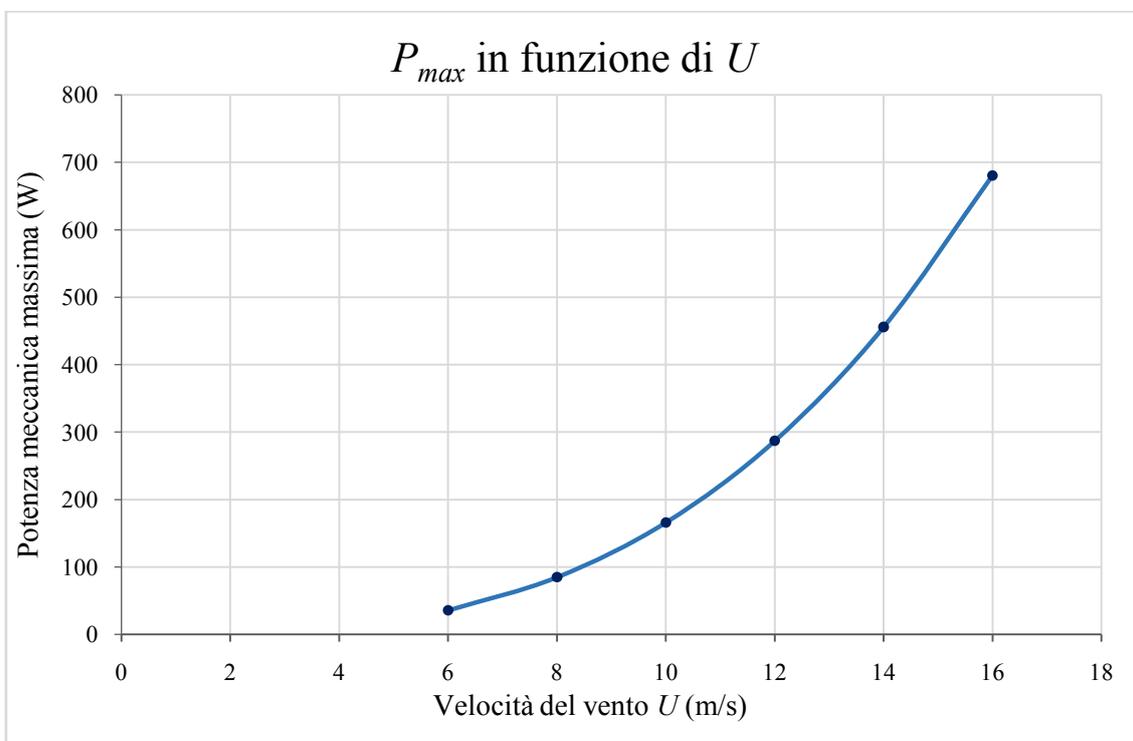


Figura 3.6 - Grafico della potenza meccanica massima in funzione della velocità del vento

3.2 Scelta del generatore elettrico

Nella scelta del generatore elettrico bisogna tenere conto di vincoli di diversa natura. In primo luogo sussistono vincoli geometrici in quanto il generatore elettrico deve avere un diametro esterno minore del diametro esterno del mozzo o di poco superiore per evitare di influenzare l'aerodinamica del rotore. Un secondo vincolo consiste nell'intervallo di velocità di funzionamento del rotore rispetto all'intervallo di velocità di funzionamento del generatore elettrico, i due intervalli devono essere confrontabili e in particolare il generatore elettrico deve avere un intervallo di velocità più ampio rispetto all'intervallo di velocità del rotore. In ultimo bisogna considerare le curve della coppia in funzione della velocità angolare del rotore, quindi le curve di coppia motrice rispetto alla curva della coppia in ingresso limite propria del generatore elettrico.

Per le turbine microeoliche i generatori elettrici più appropriati sono i generatori sincroni a magneti permanenti.

Il diametro esterno del mozzo della turbina microeolica in fase di studio è pari a 120 mm quindi il diametro esterno del generatore elettrico deve essere minore di tale valore o di poco superiore.

Come visto nel paragrafo 3.1 l'intervallo di velocità di funzionamento del rotore va da 0 a 1400 giri/min quindi il generatore elettrico deve avere un intervallo di velocità di funzionamento più ampio.

È stata individuata un'azienda che produce alternatori per il settore eolico e idroelettrico, si tratta della ALXION.

I generatori prodotti dall'azienda vengono forniti non assemblati, il rotore e lo statore sono forniti come due parti separate, infatti il rotore non è montato all'interno dello statore, come mostrato in Figura 3.7. L'utente deve montare, centrare e allineare le due parti [13]. In alternativa l'alternatore può essere fornito con il rotore e lo statore montati, centrati e allineati assialmente su una specifica flangia di montaggio chiamata FMDT (Flange of Mounting – Disassembly and Transport), si veda la Figura 3.8. Tale flangia è solo uno strumento per facilitare l'assemblaggio, una volta che rotore e statore sono assemblati con la turbina, la flangia FMDT deve essere smontata.

L'azienda produce alternatori con le seguenti caratteristiche:

- potenze nominali che vanno dai 200 W ai 95 kW;
- velocità nominali dagli 80 giri/min ai 1500 giri/min;
- diametri esterni che vanno dai 145 mm ai 795 mm;
- Diversi valori di tensione disponibili fino ai 500 V.

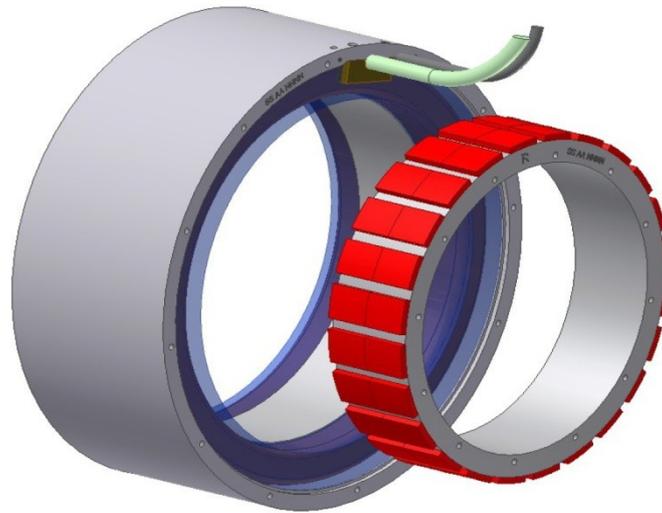


Figura 3.7 - Fornitura standard degli alternatori ALXION STK: rotore e statore non assemblati.
Fonte: [13]

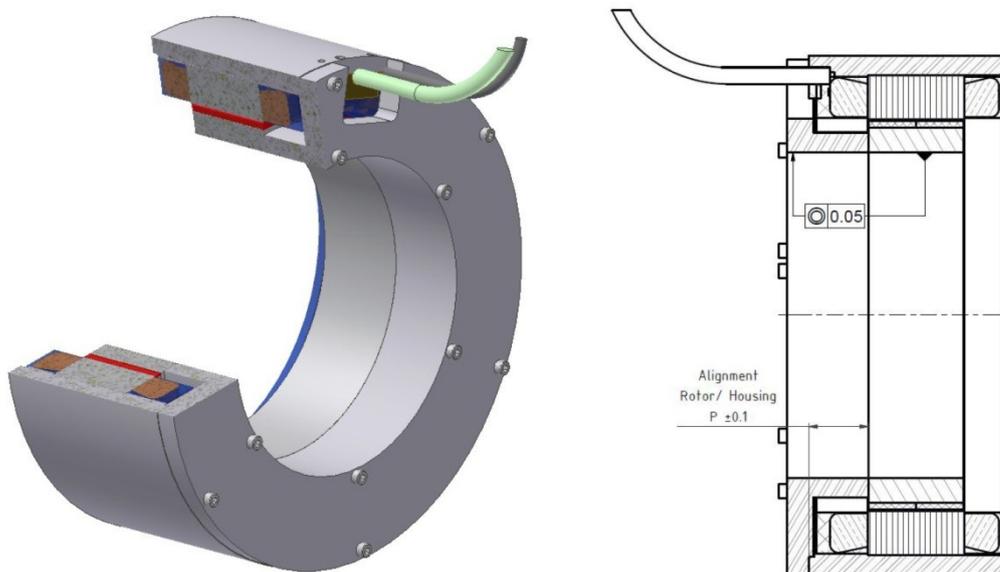


Figura 3.8 - Fornitura con FMDT (Flange of Mounting – Disassembly and Transport). Fonte: [13]

Lo statore è costituito da un alloggiamento esterno realizzato in lega di alluminio, esso sostiene i laminati magnetici, gli avvolgimenti trifase, il cablaggio di potenza e il cablaggio dei sensori termici. I capi degli avvolgimenti sono incapsulati in una resina che ha lo scopo di proteggerli. La superficie esterna dello statore può sopportare gli agenti

atmosferici esterni, ad eccezione di casi specifici, quali per esempio le atmosfere saline. In casi simili è raccomandata una protezione esterna.

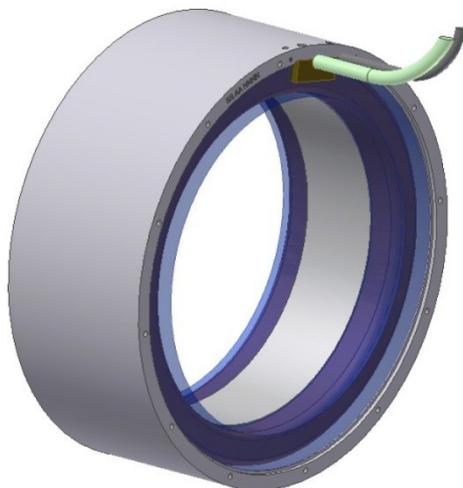


Figura 3.9 - Statore. Fonte: [13]

Il rotore è costituito da un mozzo rotorico in acciaio sul quale sono fissati i magneti permanenti in terre rare. I magneti sono sottoposti a fosfatazione e ricoperti con una vernice anti-corrosione. Il rotore è protetto dalla corrosione con uno strato di grasso [13].



Figura 3.10 - Rotore. Fonte: [13]

Sono disponibili sei famiglie di alternatori ALXION STK, ciò che le distingue è il diametro esterno: 145STK è la famiglia di alternatori con diametro esterno pari a 145 mm. Le altre cinque famiglie sono: 190STK, 300STK, 400STK, 500STK, 800STK.

La sigla identificativa di ogni modello riporta i caratteri XM dove X è un numero che va da 1 a 9. X rappresenta il numero di corone di magneti lungo la direzione assiale, per esempio il 145STK4M e il 145STK8M hanno lo stesso diametro esterno ma il primo ha 4 corone di magneti mentre il secondo ha 8 corone di magneti lungo la direzione assiale, ciò significa che il secondo ha una lunghezza assiale maggiore rispetto al primo.

Per ogni modello esistono due diverse versioni che si distinguono per la diversa velocità nominale, per gli avvolgimenti e per il cablaggio di potenza.

Il principio è che la tensione nominale di linea alla velocità nominale e alla potenza nominale è sempre pari a circa 230 V ac. Alla velocità nominale più alta la potenza nominale è più alta e, poiché la tensione nel punto di esercizio nominale è la stessa per entrambe le versioni, la corrente nominale per la versione a velocità più alta è maggiore.

L'alternatore può ruotare ad una velocità angolare più alta rispetto alla velocità nominale menzionata nel catalogo, tuttavia la tensione non deve superare i 500 V. Considerando per esempio l'alternatore 145STK2M nella versione con velocità nominale pari a 650 giri/min, la propria tensione a vuoto è 365 V a 650 giri/min. In prima approssimazione la tensione aumenta linearmente con l'aumentare del numero di giri quindi si può utilizzare la proporzione seguente:

$$365 : 500 = 650 : x$$

$$x = \frac{500 \cdot 650}{365} = 890 \frac{\text{giri}}{\text{min}}$$

Utilizzando l'alternatore 145STK2M, nella versione con velocità nominale pari a 650 giri/min, la velocità angolare non deve superare la soglia degli 890 giri/min.

L'applicazione più consona per la turbina microeolica considerata in questo studio è la ricarica di batterie e non la connessione alla rete elettrica. Infatti, la connessione alla rete richiederebbe l'impiego di un inverter, che ha un consumo in stand-by troppo elevato rispetto alla quantità di energia elettrica che si riesce ad ottenere con la turbina.

Per poter utilizzare la microturbina eolica come sistema per la ricarica di batterie è richiesta l'adozione di un convertitore elettronico che si occupi della conversione da tensione variabile in corrente alternata a tensione fissa in corrente continua.

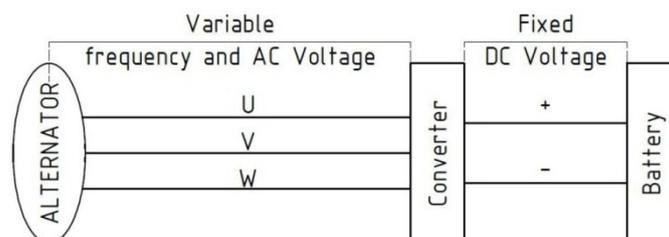


Figura 3.11 - Schema di connessione dell'alternatore alle batterie. Fonte: [13]

Gli alternatori STK sono dotati di due tipi di sensori termici per controllare la temperatura degli avvolgimenti:

- Misurazione lineare della temperatura degli avvolgimenti per mezzo di un resistore lineare KTY 84: 575 Ω a 20 °C; 1000 Ω a 100 °C;
- Sicurezza termica degli avvolgimenti per mezzo di un resistore PTC (Positive Temperature Coefficient): resistenza minore di 100 Ω per temperature accettabili; resistenza maggiore di 1300 Ω per temperature superiori a 160 °C (massima temperatura accettabile per gli avvolgimenti).

I sensori di temperatura sono connessi con un cavo esterno costituito da due coppie di fili da 0,25 mm², la resistenza KTY 84 è collegata alla coppia di fili verde / giallo mentre la resistenza PTC alla coppia marrone / bianco.

Il diametro esterno del mozzo del rotore è pari a 120 mm quindi la scelta ricade su uno dei modelli della famiglia 145STK poiché il diametro esterno è 145 mm.

In Tabella 3.5 sono riportate le caratteristiche tecniche degli alternatori ALXION 145STK. Come già anticipato, per ogni modello, esistono due versioni che si distinguono per la diversa velocità nominale, per gli avvolgimenti e per il cablaggio di potenza. Nel caso degli alternatori ALXION 145STK esiste una versione con velocità nominale pari a 650 giri/min e limite di velocità pari a 890 giri/min e un'altra versione con velocità nominale pari a 1500 giri/min e limite di velocità pari a 1908 giri/min.

Poiché l'intervallo di velocità di funzionamento del rotore è compreso tra 0 e 1400 giri/min, se si considerano velocità del vento fino ai 16 m/s, è evidente che la versione adatta all'accoppiamento con il rotore è quella con velocità nominale pari a 1500 giri/min.

Scegliendo tale versione si ha un margine di sicurezza in quanto il generatore elettrico può funzionare senza problemi fino a velocità angolari pari ai 1908 giri/min.

Tabella 3.5 - Caratteristiche tecniche degli alternatori ALXION 145STK. Fonte: [13]

			145STK2M		145STK4M		145STK6M		145STK8M	
Rated speed		Rpm	650	1500	650	1500	650	1500	650	1500
Rated Power at Rated speed	Rated power (1)(2)	W	571	1752	1307	3389	1962	4904	2633	6462
	Input torque at rated speed(1)(2)	N.m	11.2	13.9	25.4	25.2	36	35.9	47.8	47
	Efficiency at rated power (1)(2)	%	75	81	76	86	81	87	81	88
	Current at rated power (1)	Amps	1.4	4.3	3.2	8	4.8	13	6.4	16
	Voltage at rated power (1)(2)(3)	V	244	250	243	260	246	231	249	248
Rated Power at Half speed	Rated Power at half speed (1)(2)	W	204	690	493	1566	739	2319	1075	3097
	Input torque at half speed (1)(2)	N.m	8.9	11.5	20.7	25.4	28.8	36	43.5	47.8
	Efficiency at half speed (1)(2)	%	68	77	70	78	76	82	73	83
	Number of poles (number of pairs of poles)		12 (6)							
	Cogging torque	N.m	0.2		0.4		0.6		0.8	
	Phase resistance at 20°C	Ohm	19.8	4.53	8.6	1.4	4.11	0.59	3.18	0.51
	Phase inductance (5)	mH	105	24	60	10	34	4.9	25.8	4.1
	Voltage at no load (back emf) at 20°C (4)	V	365	393	390	367	357	312	361	334
	Rotor inertia	10 ⁻³ Kg.m ²	1.28		2.24		3.19		4.14	
	Weight	Kg	6.2		10.4		14.5		18.7	
	Power cable square section (6)	mm ²	4x1.5		4x1.5		4x1.5		4x1.5	
	Power cable diameter	mm	Ø8.6		Ø8.6		Ø8.6		Ø8.6	

- (1) Temperatura ambiente: 40 °C.
Velocità del vento che raffredda la carcassa: 10 m/s
Aumento della temperatura degli avvolgimenti < 100 °C
Alloggiamento dello statore a contatto con l'aria o armatura metallica su tutta la propria area periferica a contatto con l'aria
Alloggiamento dello statore fissato su un telaio metallico tale da ottenere un'area pari al doppio della sezione trasversale dell'alloggiamento
- (2) Funzionamento in modalità sinusoidale con fattore di potenza unitario
- (3) Tensione di linea. Il livello di tensione può essere adattato a seconda dell'applicazione; per specifiche richieste contattare l'azienda
- (4) Tensione di linea, alternatore a vuoto, velocità nominale e temperatura pari a 20 °C
- (5) Per corrente alla potenza nominale
- (6) Per correnti inferiori ai 53 A, un cavo
Per correnti superiori a 53 A, quattro singoli cavi in uscita (messo in evidenza in tabella)

La scelta finale del modello viene fatta sulla base delle curve della coppia motrice in funzione della velocità angolare, Figura 3.5. Oltre a tali curve si ha a disposizione la curva della coppia in ingresso limite al variare della velocità per ogni modello riportato in Tabella 3.5. A titolo di esempio si riporta in Figura 3.12 il grafico della coppia in ingresso limite per l'alternatore 145STK2M. L'alternatore può funzionare in tutti i punti al di sotto di tale curva.

A seguito di quest'ultima considerazione si sceglie il generatore elettrico più piccolo tra i modelli disponibili, ovvero quello con il minor numero di corone di magneti lungo la direzione assiale, la cui curva della coppia in ingresso limite sia al di sopra delle curve di coppia motrice. Il modello che soddisfa tutti i requisiti è il 145STK2M con velocità nominale pari a 1500 giri/min, in Figura 3.13 si vede che la curva di coppia in ingresso limite è al di sopra delle curve di coppia motrice.

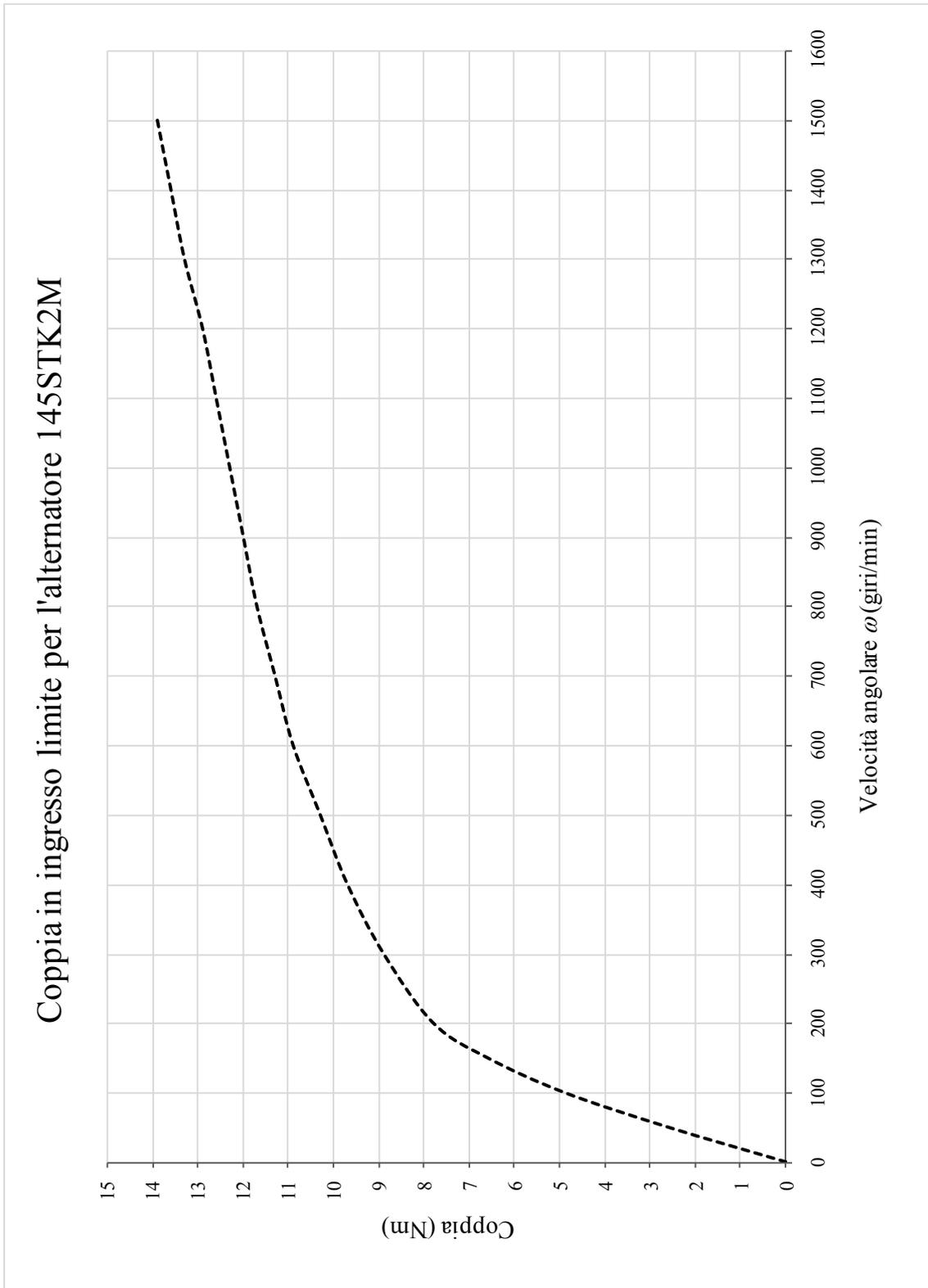


Figura 3.12 - Grafico della coppia in ingresso limite per l'alternatore 145STK2M

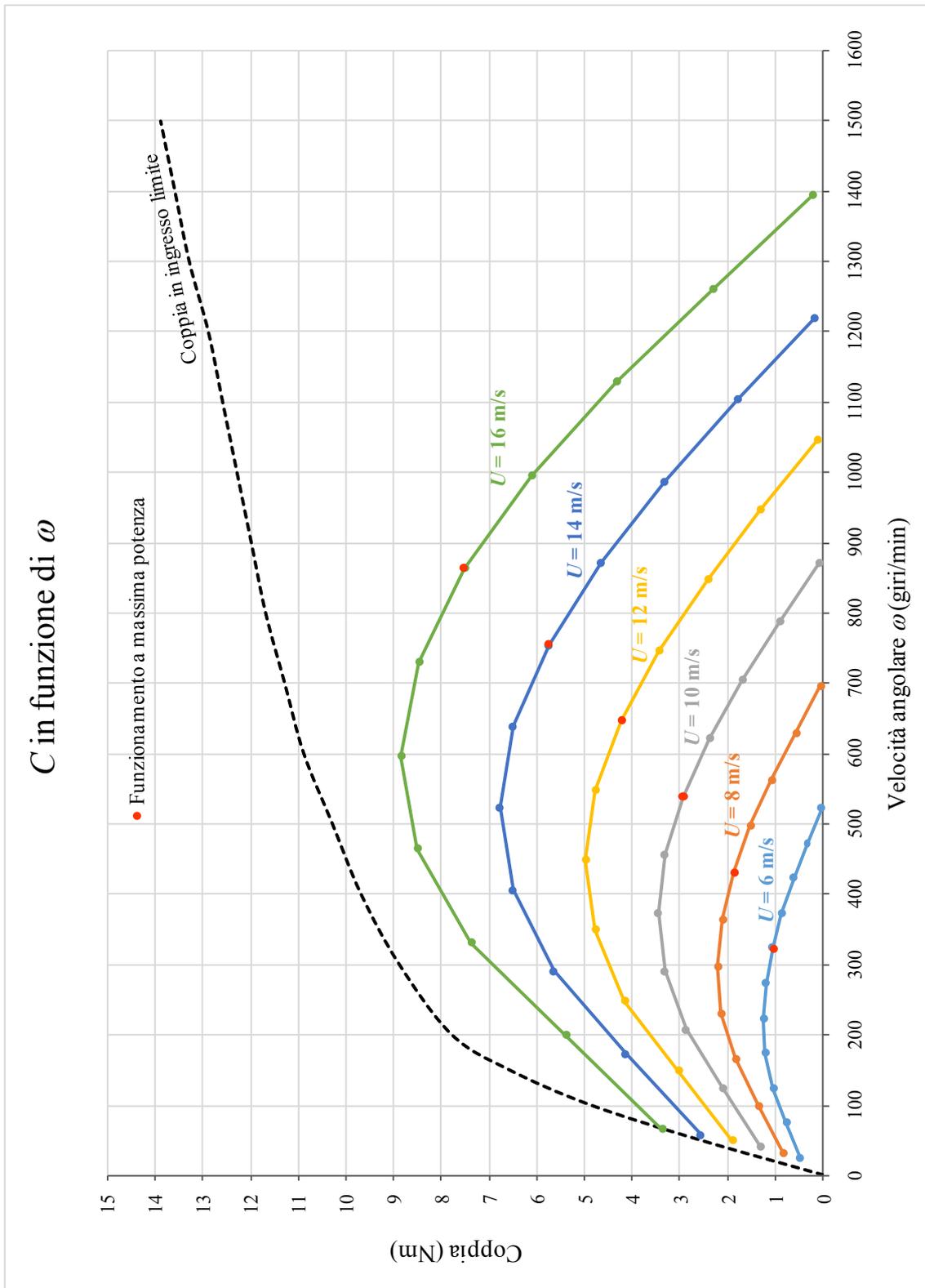


Figura 3.13 - Curva della coppia limite in ingresso all'alternatore a confronto con le curve di coppia motrice alle diverse velocità del vento

Si vuole ora ricavare il grafico della potenza elettrica in funzione della velocità del vento. Per ogni velocità del vento si considera il punto di funzionamento a potenza meccanica massima. Noto il rendimento dell'alternatore è possibile calcolare la potenza elettrica a partire dalla potenza meccanica:

$$P_{el} = \eta_{el} \cdot P \quad (3.4)$$

dove η_{el} è il rendimento dell'alternatore, mentre P è la potenza meccanica.

Applicando l'Equazione (3.4) ai punti di massima potenza meccanica si ottengono i valori di massima potenza elettrica $P_{el\ max}$.

Il rendimento dell'alternatore varia in funzione della velocità angolare e della coppia secondo le curve fornite dal costruttore. Tali curve sono riportate in Appendice B.

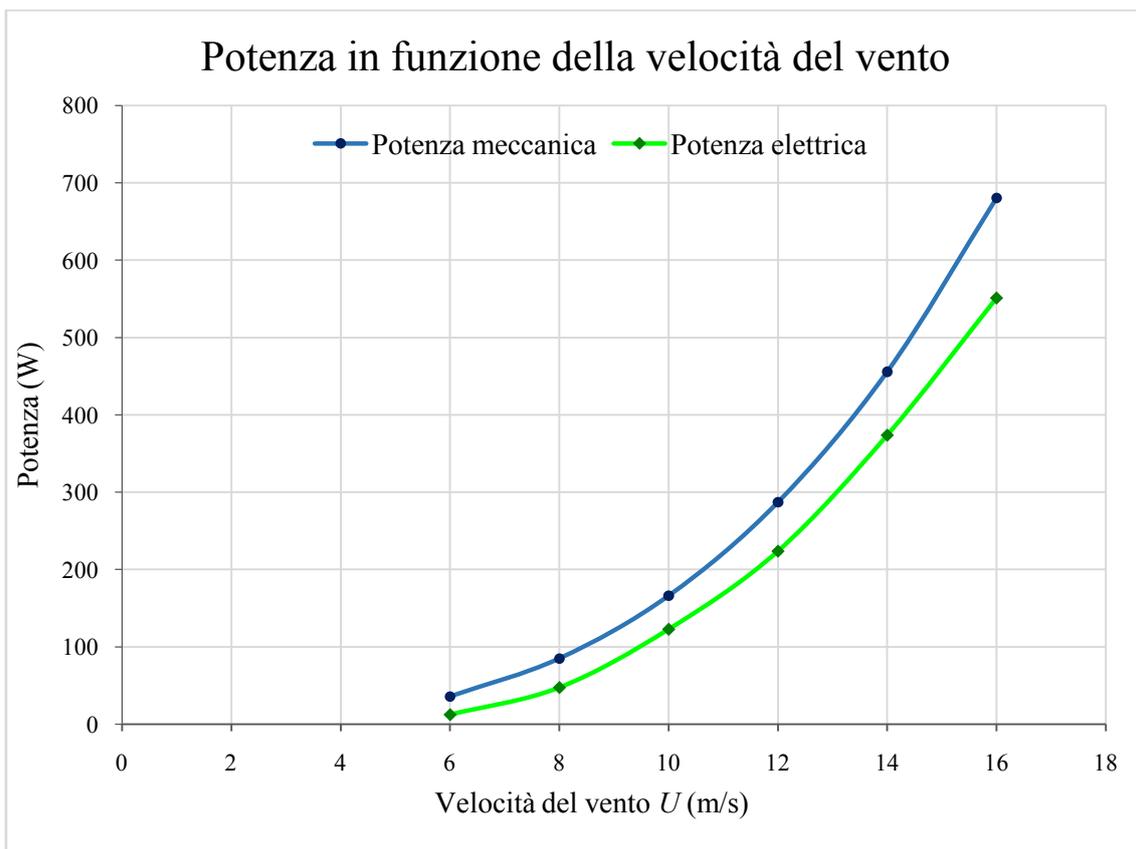


Figura 3.14 - Grafico della potenza meccanica e della potenza elettrica in funzione della velocità del vento

Tabella 3.6 - Potenza meccanica e potenza elettrica massime al variare della velocità del vento

U (m/s)	ω (rad/s)	ω (giri/min)	P_{max} (W)	η_{el}	$P_{el\ max}$ (W)
6	33,91	324	36	0,35	13
8	45,22	432	85	0,56	48
10	56,52	540	166	0,74	123
12	67,83	648	287	0,78	224
14	79,13	756	456	0,82	374
16	90,43	864	680	0,81	551

4 La stampa 3D

Si definisce stampante 3D una macchina che permette di realizzare oggetti tridimensionali con tecnica additiva, strato per strato, a partire da modelli virtuali. La nascita della stampa 3D risale al 1983, anno in cui l'ingegnere statunitense Charles Hull inventò la stereolitografia. Nel 1986 Hull depositò il brevetto "Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects by Stereolithography" di cui si riporta la prima pagina in Figura 4.1 [2]. Sempre nel 1986 fondò la 3D Systems, l'azienda che per prima commercializzò una macchina per la prototipazione rapida, così venivano chiamate le stampanti 3D. Nella stereolitografia il materiale di partenza, un fotopolimero, si trova allo stato liquido (22 in Figura 4.1) ed è contenuto in un'apposita vaschetta (21). All'inizio del processo il piano di stampa sostenuto dall'elevatore si trova appena sotto il pelo libero (23) mentre un sistema ottico focalizza un raggio laser (27) che polimerizzando il fotopolimero costruisce la prima sezione dell'oggetto. Terminata la prima sezione l'elevatore si abbassa e la seconda sezione viene sovrapposta alla prima. Strato per strato l'oggetto prende forma. Se l'oggetto da realizzare presenta delle parti a sbalzo è necessario ricorrere ad appositi supporti che servono nella fase di stampa ma che vengono rimossi alla fine del processo. Fino a pochi anni fa la prototipazione rapida era una tecnologia di nicchia, confinata alle grandi aziende. Nel 2005 nasce la prima stampante 3D open source grazie al progetto RepRap (abbreviazione di *Replicating Rapid-prototyper*), rapidamente si sviluppa un nuovo mercato, quello delle stampanti 3D da scrivania a basso costo. La tecnologia della stampa 3D diventa alla portata non solo delle piccole e medie imprese ma anche di singoli appassionati.

Alla fine degli anni Ottanta sono state brevettate altre tecniche di prototipazione rapida basate su sistemi completamente diversi dalla stereolitografia, si tratta della sinterizzazione laser selettiva (Selective Laser Sintering - SLS) e della fusione di filamenti ter-

moplastici tramite calore (Fused Deposition Modeling - FDM, anche detta Fused Filament Fabrication FFF). Le stampanti 3D di minor costo sfruttano proprio quest'ultima tecnologia che è stata inventata alla fine degli anni 1980 da Scott Crump ma il cui brevetto è scaduto nel 2009.

United States Patent [19]
Hull

[11] **Patent Number:** **4,575,330**
[45] **Date of Patent:** **Mar. 11, 1986**

- [54] **APPARATUS FOR PRODUCTION OF THREE-DIMENSIONAL OBJECTS BY STEREO LITHOGRAPHY**
- [75] **Inventor:** Charles W. Hull, Arcadia, Calif.
- [73] **Assignee:** UVP, Inc., San Gabriel, Calif.
- [21] **Appl. No.:** 638,905
- [22] **Filed:** Aug. 8, 1984
- [51] **Int. Cl.⁴** B29D 11/00; G03C 00/00
- [52] **U.S. Cl.** 425/174.4; 425/174; 425/162; 264/22; 430/269; 156/58; 365/119; 365/120
- [58] **Field of Search** 425/162, 174, 174.4, 425/425; 264/22, 183, 40.1; 430/269; 156/38, 58, 275.5; 365/107, 119, 127

4,252,514	2/1981	Gates	.....	425/162
4,288,861	9/1981	Swainson et al.	.....	365/127
4,292,015	9/1981	Hritz	.....	425/162 X
4,329,135	5/1982	Beck	.....	425/174
4,333,165	6/1982	Swainson et al.	.....	365/127 X
4,374,077	2/1983	Kerfeld	.....	264/22
4,466,080	8/1984	Swainson et al.	.....	365/127 X
4,471,470	9/1984	Swainson et al.	.....	365/127

Primary Examiner—J. Howard Flint, Jr.
Attorney, Agent, or Firm—Fulwider, Patton, Rieber, Lee & Utecht

[57] **ABSTRACT**

A system for generating three-dimensional objects by creating a cross-sectional pattern of the object to be formed at a selected surface of a fluid medium capable of altering its physical state in response to appropriate synergistic stimulation by impinging radiation, particle bombardment or chemical reaction, successive adjacent laminae, representing corresponding successive adjacent cross-sections of the object, being automatically formed and integrated together to provide a step-wise laminar buildup of the desired object, whereby a three-dimensional object is formed and drawn from a substantially planar surface of the fluid medium during the forming process.

- [56] **References Cited**
- U.S. PATENT DOCUMENTS**
- | | | | | |
|-----------|---------|-----------------|-------|-------------|
| 2,708,617 | 5/1955 | Magat et al. | ..... | 264/183 X |
| 2,908,545 | 10/1959 | Teja | ..... | 264/22 X |
| 3,306,835 | 2/1967 | Magnus | ..... | 425/174.4 X |
| 3,635,625 | 1/1972 | Voss | ..... | 425/162 X |
| 3,775,036 | 11/1973 | Winning | ..... | 425/174.4 |
| 3,974,248 | 8/1976 | Atkinson | ..... | 425/162 X |
| 4,041,476 | 8/1977 | Swainson | ..... | 365/119 |
| 4,078,229 | 3/1978 | Swainson et al. | ..... | 365/107 |
| 4,081,276 | 3/1978 | Crivello | ..... | 430/269 |
| 4,238,840 | 12/1980 | Swainson | ..... | 365/119 |

47 Claims, 8 Drawing Figures

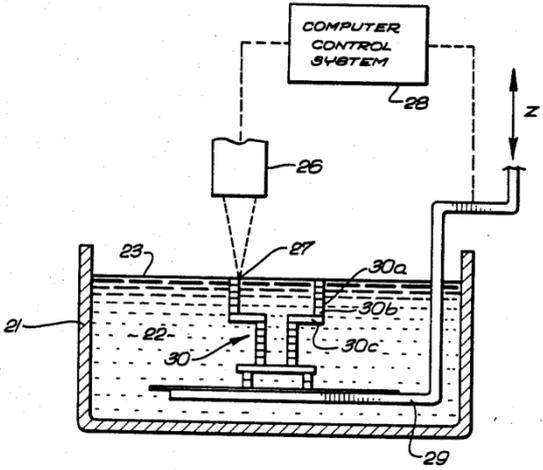


Figura 4.1 - La prima pagina del brevetto depositato da Charles Hull. Fonte: [3]

4.1 Classificazione delle tecniche di stampa 3D

Si cerca ora di fornire un quadro completo delle diverse tecniche di prototipazione rapida che sono state sviluppate nel corso degli anni e che si sono affermate sul mercato. Si presenta in Figura 4.2 una classificazione fatta sulla base dello stato di aggregazione del materiale prima della stampa.

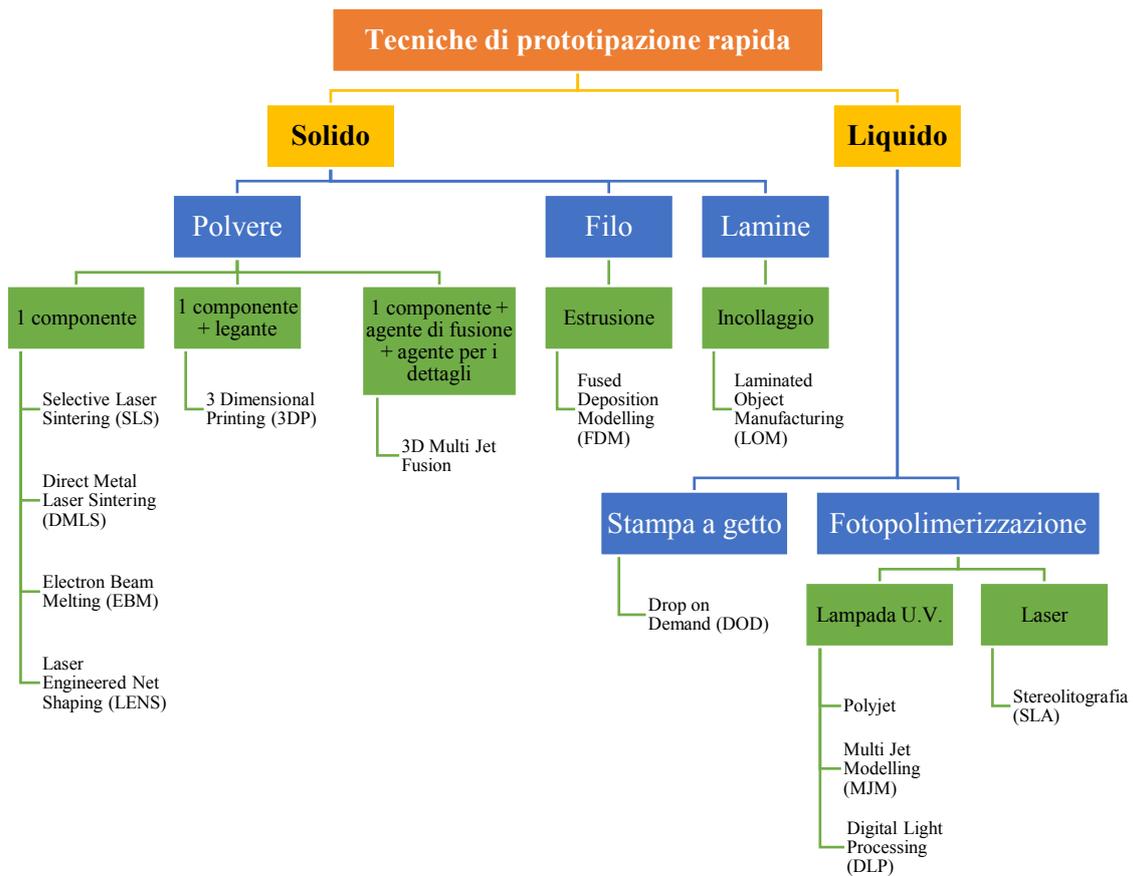


Figura 4.2 - Classificazione delle tecniche di prototipazione rapida secondo il tipo di materiale

Dalla precedente classificazione sono state escluse alcune tecnologie ormai scomparse dal mercato come per esempio: la Solid Ground Curing (SGC) e la Ballistic Particle Manufacturing (BPM).

Si procede con una descrizione delle tecnologie che si sono affermate sul mercato.

4.2 Descrizione delle tecniche di stampa 3D

Le stampanti 3D lavorano costruendo l'oggetto per sovrapposizione di strati, per tale motivo si parla di *additive manufacturing*, manifattura additiva. Queste tecnologie si contrappongono ai più classici metodi di produzione che deformano plasticamente il materiale (laminazione, estrusione, trafilatura, forgiatura e lavorazione delle lamiere), oppure lo rimuovono (tornitura, fresatura, foratura, piallatura, rettifica, sabbatura, elettroerosione), lo aggregano (saldatura, brasatura e incollaggio) oppure ne determinano la forma partendo dal liquido (fonderia), dallo stato solido (metallurgia e sinterizzazione delle polveri) e dallo stato ionizzato (galvanoplastica).

Con il passare degli anni e con i numerosi miglioramenti apportati alle stampanti 3D si è passati dall'impiego di tali tecnologie solo per la fase di prototipazione all'uso per la produzione vera e propria.

Si iniziano a descrivere le varie tecnologie di stampa 3D a partire da quelle che utilizzano come materiale di partenza una polvere.

4.2.1 Selective laser sintering (SLS)

La *selective laser sintering*, sinterizzazione selettiva con il laser, è una tecnologia che utilizza le polveri di materiali differenti (termoplastici, cera, metalli, sabbia) con l'obiettivo di generare componenti funzionali con caratteristiche analoghe a quelli ottenuti con le tecnologie convenzionali.

Le fasi del processo sono le seguenti.

Preparazione del file macchina: con il software per lo *slicing* il modello virtuale viene posizionato e orientato nel volume di lavoro e viene eseguito lo *slicing*, ovvero la suddivisione del modello CAD in strati, per determinare la geometria delle singole sezioni. In questo caso, al contrario della stereolitografia, non vengono generati i supporti per le parti a sbalzo in quanto la polvere non sinterizzata funge da supporto.

Sinterizzazione delle sezioni: è la fase di costruzione dell'oggetto reale. Uno strato di polvere viene depositato e pressato sull'elevatore, la camera di lavoro è mantenuta a una temperatura prossima a quella di fusione della polvere per minimizzare sia l'energia richiesta al laser (potenze variabili tra 50 e 200 W) sia gli effetti del cambiamento di fase. La radiazione fonde i granelli di polvere che si uniscono l'un l'altro dando origine alla sezione. L'elevatore viene abbassato di una quantità pari allo spessore della sezione e il processo si ripete fino alla completa costruzione del modello.

Da quanto descritto risulta evidente che il termine "sinterizzazione" viene utilizzato in modo improprio dal momento che si ha la fusione delle polveri in tempi molto rapidi

sotto il solo effetto del riscaldamento indotto dal laser; manca l'effetto della pressione. Nonostante ciò il termine è ormai diventato di impiego comune nel settore della prototipazione.

Come già detto prima la polvere non sinterizzata funge da supporto.

Pulizia e finitura: al termine del processo, prima di estrarre il prodotto dal letto di polvere che lo circonda, bisogna attendere che l'intero blocco (polvere e prototipi) si raffreddi fino alla temperatura ambiente, per evitare shock termici che si tradurrebbero in deformazioni sul pezzo. Una volta estratti i prototipi dalla camera di lavoro è necessario procedere con una delicata operazione di pulizia che ha lo scopo di rimuovere gli ultimi residui di polvere che solitamente rimangono intrappolati nelle piccole cavità, tale operazione viene eseguita con l'ausilio di un getto di aria compressa.

La finitura del pezzo non può essere effettuata con carta abrasiva; solitamente si ricorre ad operazioni di infiltrazione di cera o più semplicemente ad una verniciatura con resina epossidica.

Rispetto ai processi che fanno uso di fotopolimeri, si ha il vantaggio di poter impiegare materiali del tutto atossici [4].

La Figura 4.3 mostra i principali componenti di una stampante 3D SLS.

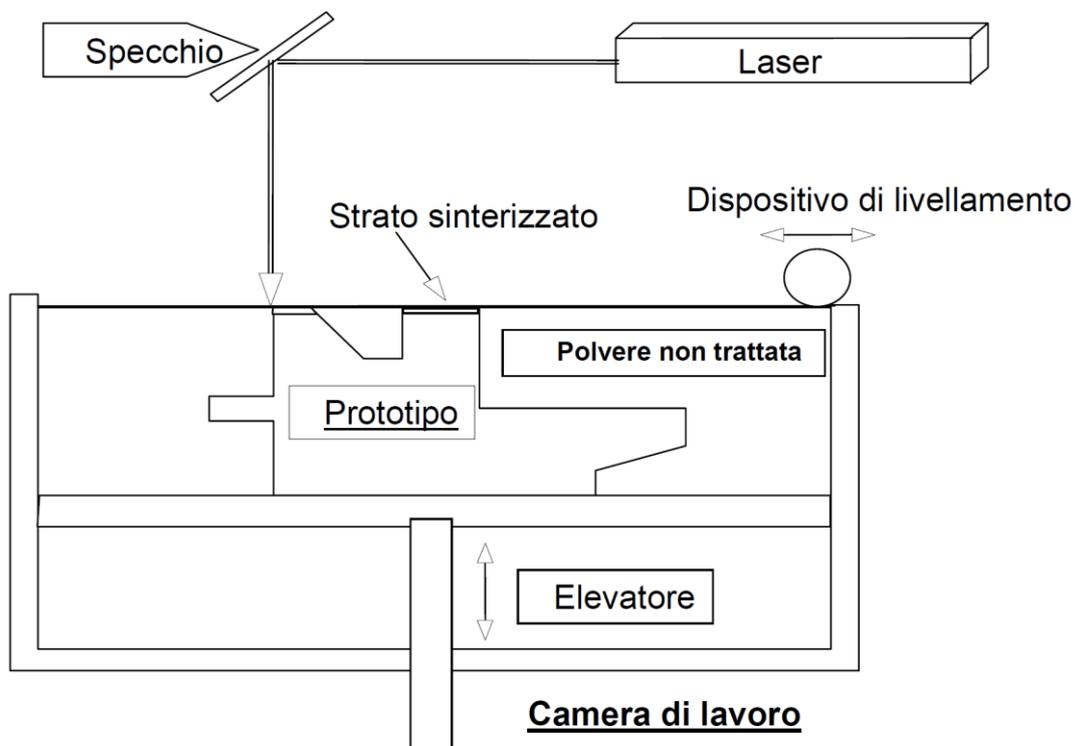


Figura 4.3 - Struttura semplificata di una stampante selective laser sintering (SLS). Fonte: [4].

4.2.2 Direct metal laser sintering (DMLS)

La *direct metal laser sintering* (sinterizzazione laser diretta di metalli) è un'evoluzione della *selective laser sintering*, infatti, anziché usare polveri di materiali termoplastici usa polveri di metalli. È stata sviluppata inizialmente dall'Università del Texas e brevettata nel 1994 dalla tedesca EOS e dalla finlandese ERD. Oggi la DMLS è alla base di tecnologie quali LaserCusing della tedesca Concept Laser, Selective Laser Melting (SLM) della britannica Renishaw e Laser Sintering della francese Phenix System. I campi di applicazione vanno dal settore orafa a quello medico. Con questa tecnologia si possono realizzare protesi medicali e dentali in titanio, cromo cobalto e acciaio inox. Un altro campo di applicazione riguarda la produzione di inserti per stampi ad iniezione e di componenti definitivi per i settori automobilistico ed aerospaziale. La DMLS risulta competitiva quando si tratta di produrre componenti funzionali in metallo con geometrie complesse e con volumi fino a cento pezzi. Scadente finitura superficiale e rischi di deformazione sono i punti deboli di questa tecnologia [2].

4.2.3 Electron beam melting (EBM)

L'*electron beam melting*, fusione a fascio di elettroni, è una tecnologia che prevede la fusione delle polveri di metallo mediante un fascio di elettroni.

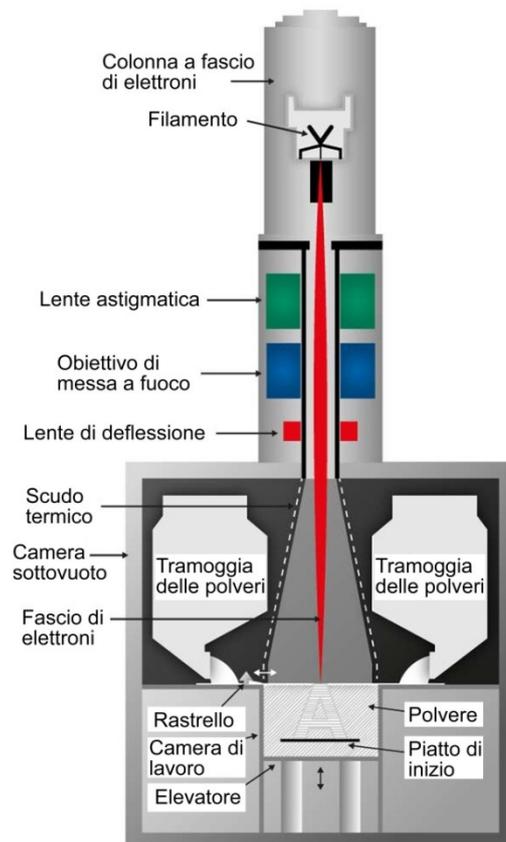


Figura 4.4 - Struttura semplificata di una stampante EBM. Fonte: [6]

Il processo di stampa avviene sotto vuoto perciò la camera di lavoro è completamente sigillata. Il processo è molto veloce e lavora ad alte temperature, perciò si raggiunge una capacità di stampa molto elevata, 80 cm³ all'ora, un valore di rilievo nel panorama della manifattura additiva. Come conseguenza tensioni e distorsioni sono ridotte e si possono raggiungere proprietà meccaniche davvero buone [2], [5]. Questa tecnologia è complessa e richiede un investimento iniziale molto alto. Trova applicazione nel settore aeronautico e aerospaziale grazie soprattutto al suo impiego con le più evolute leghe di titanio. Grazie a questo materiale viene usata nel settore medico per la costruzione di protesi articolari.

4.2.4 Laser Engineered Net Shaping (LENS)

La *laser engineered net shaping*, modellazione netta con il laser, si basa sulla fusione mediante laser di polvere o fili metallici. È stata sviluppata dai Sandia National Laboratories dell'United States Department of Energy (DOE) [2]. Le stampanti 3D con tecnologia LENS possono essere usate nel ciclo di vita di un prodotto per riparazioni, rilavorazioni e per la realizzazione di componenti metallici ad alte prestazioni in materiali quali il titanio, l'acciaio inossidabile e le super leghe.

I sistemi LENS usano un laser ad alta potenza (dai 3 kW ai 4 kW) per fondere metalli polverizzati in strutture tridimensionali completamente piene. Le stampanti 3D LENS usano le informazioni geometriche contenute in un modello solido CAD (Computer-Aided Design) per guidare un processo LENS e costruire il componente strato per strato. Software aggiuntivi e sistemi di controllo ad anello chiuso garantiscono l'integrità geometrica e meccanica della parte.

Il processo LENS è racchiuso in una camera sigillata ermeticamente e depurata con argon affinché i livelli di ossigeno e di umidità siano al di sotto delle 10 parti per milione. Ciò mantiene il componente in costruzione pulito e previene l'ossidazione.

Una volta che il singolo strato è stato depositato, la testa che deposita il materiale si muove su un nuovo strato. L'intera parte viene costruita depositando strati successivi.

Con la tecnologia LENS è possibile depositare materiali diversi in sequenza, quindi è possibile ottenere componenti costruiti in un unico pezzo ma con metalli differenti, risultato non ottenibile con le tecnologie a letto di polvere quali la DMLS e la EBM.

Quando completo, il componente viene rimosso dalla macchina e sottoposto a trattamenti termici, pressatura isostatica a caldo, lavorato a macchina o rifinito [7].



Figura 4.5 - Riparazione di un mozzo tramite tecnologia LENS. Fonte: [7]



Figura 4.6 - Costruzione di un componente tramite tecnologia LENS. Fonte: [7]

4.2.5 Three Dimensional Printing (3DP)

La three dimensional printing, *stampa tridimensionale*, è una tecnologia sviluppata presso il M.I.T. di Boston nel 1993, successivamente commercializzata dalla Z Corporation, società che è stata acquisita dalla 3D System nel 2012 e ribattezzata Color Jet Printing nel 2016.

La three dimensional printing si differenzia dalle altre tecnologie che impiegano un materiale solido in forma di polvere nel metodo impiegato per aggregare le polveri. In par-

ticolare viene usato un collante, spruzzato da una testina, con la tecnica della stampa a getto di inchiostro.

In Figura 4.7 è rappresentato lo schema del processo: in una prima fase viene depositato sul piano di stampa un sottile strato di polvere, successivamente la testina di stampa deposita il collante secondo la geometria della specifica sezione dell'oggetto, il pistone che supporta la camera di lavoro scende di una quantità pari allo spessore dello strato e il processo si ripete ciclicamente fino alla completa costruzione del modello. Prima di poter estrarre l'oggetto dalla camera di lavoro bisogna attendere alcune ore, necessarie affinché la colla asciughi completamente.

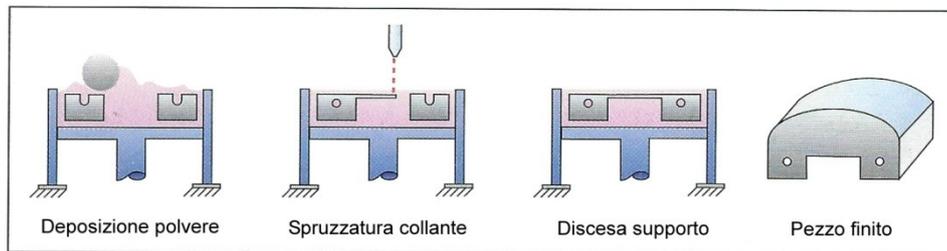


Figura 4.7 - Schema del processo three dimensional printing (3DP). Fonte: [4]



Figura 4.8 - Stampante 3 dimensional printing Z402 della 3D System

Con l'ausilio di un aspiratore e di un pennello si libera il modello dalla polvere che lo circonda (Figura 4.9). Si eliminano i residui di polvere servendosi di un getto di aria compressa e si cosparge l'intero modello con un infiltrante, per esempio si può usare cianoacrilato, al fine di aumentare la resistenza meccanica (Figura 4.10).



Figura 4.9 - Estrazione di un modello dal volume di lavoro

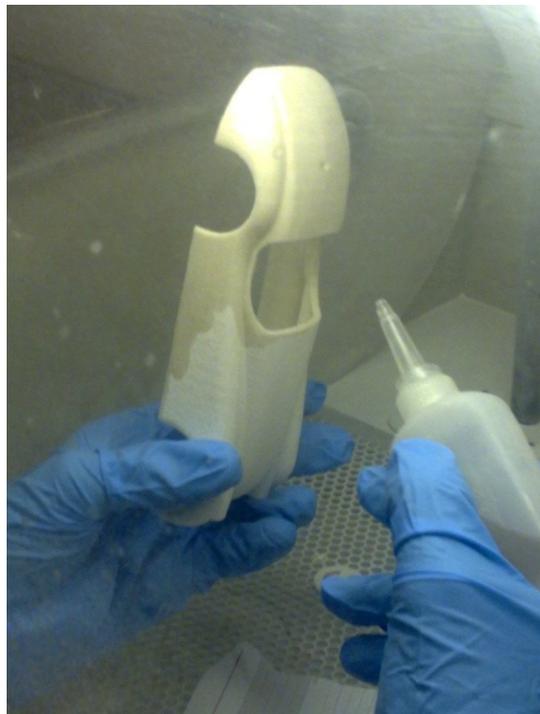


Figura 4.10 - Infiltrazioni con cianoacrilato



Figura 4.11 - Modello pulito e trattato con infiltrante

Come operazione finale l'oggetto può essere verniciato (Figura 4.12). Le stampanti 3D più recenti consentono di ottenere prototipi colorati grazie alla deposizione del collante unito ad un getto di inchiostro colorato. La tecnica di deposizione è uguale a quella delle stampanti a getto di inchiostro tradizionali.

I materiali che si possono usare sono polveri a base di gesso o di amido.

I prototipi ottenuti con la *three dimensional printing* sono prototipi concettuali, come tali possono essere usati per la valutazione della forma e per le verifiche di montaggio, ma non possono essere impiegati per verifiche funzionali.



Figura 4.12 - Modello verniciato

4.2.6 3D Multi Jet Fusion

La *3D Multi Jet Fusion* è l'ultima tecnologia arrivata sul mercato della manifattura additiva, infatti è stata presentata da HP nel 2014 e le prime macchine sono state consegnate ad ottobre 2016. Le macchine attualmente in commercio sono in grado di trattare solo un materiale polimerico termoplastico, la poliammide. Le stampanti vengono vendute in abbinamento ad una stazione chiamata "stazione di elaborazione" e mostrata in Figura 4.13 a destra. Questa stazione serve per caricare la polvere nell'unità di stampa e per rimuovere la polvere ed estrarre gli oggetti stampati alla fine del processo.

L'operazione iniziale consiste nel caricare la polvere nell'unità di stampa e nel collocare questa unità nella stampante vera e propria (Figura 4.13 a sinistra). In una prima fase viene depositato sul piano di stampa un sottile strato di polvere, successivamente la testina di stampa deposita un agente di fusione e un agente per i dettagli secondo la geometria della specifica sezione dell'oggetto, l'area è esposta all'energia proveniente da apposite lampade e le reazioni tra gli agenti e il materiale causano la fusione selettiva del materiale per formare la parte stampata in 3D. Il pistone che supporta la camera di lavoro scende di una quantità pari allo spessore dello strato e il processo si ripete ciclicamente fino alla completa costruzione del modello.

Terminata questa fase il letto di polveri contenente gli oggetti stampati viene fatto raffreddare, dopodiché si procede con l'aspirazione della polvere in eccesso e l'estrazione dei modelli.



Figura 4.13 - Stampante (a sinistra) e stazione di elaborazione (a destra). Fonte: [8]

Secondo quanto riferito da HP questa tecnologia consente di stampare oggetti tridimensionali con una velocità fino a 10 volte superiore rispetto alle tecnologie FDM e SLS.

Una delle peculiarità di questa tecnologia è la possibilità di produrre oggetti in quadricromia [2].

4.2.7 Fused Deposition Modelling (FDM)

La *fused deposition modelling*, modellazione a deposizione fusa, anche detta *fused filament fabrication* (FFF), è una tecnologia che utilizza materiali polimerici sotto forma di fili. È stata inventata alla fine degli anni 1980 da Scott Crump. Per diversi anni è stato presente sul mercato un solo produttore che utilizzava questa tecnologia, l'americana Stratasys. Il brevetto è scaduto nel 2009 e negli ultimi anni sono nate moltissime aziende che producono stampanti 3D a basso costo con tecnologia FDM.

Il processo è suddiviso nelle seguenti fasi.

Preparazione del file macchina: il modello CAD in formato .STL viene importato nel software di *slicing* e viene orientato e posizionato nel volume di lavoro. Vengono creati i supporti dove necessario. Vengono impostati i parametri della stampa, quali il numero di gusci (*shell*), la percentuale di riempimento (*infill*), il tipo di reticolato usato per riempire le sezioni, la velocità dell'estrusore, lo spessore di ogni strato. Viene eseguito lo *slicing* e creato un file contenente le istruzioni per la stampante.

Costruzione delle sezioni: il file ottenuto con il software per lo *slicing*, solitamente in formato .gcode, comanda i movimenti di tutti gli organi della macchina: l'estrusore, il piano di stampa, il motore che controlla l'alimentazione del filamento. Inoltre controlla il riscaldamento e il raffreddamento dell'estrusore e del piano di stampa. Il sistema realizza le sezioni con la deposizione di un filo di materiale termoplastico allo stato fuso tramite una testa di estrusione che si muove nel piano X-Y. Terminata una sezione la testa di estrusione si muove verso l'alto di una quantità pari allo spessore dello strato e la macchina procede alla deposizione della sezione successiva. Esistono macchine in cui non è l'estrusore a muoversi verso l'alto ma è il piano di stampa che si muove verso il basso.

Questa tecnologia necessita di supporti ove sono presenti parti a sbalzo. Esistono stampanti con un unico estrusore, quindi il materiale dei supporti è lo stesso materiale con cui viene costruito il modello. In altri casi le stampanti sono dotate di due estrusori: uno per il modello e uno per il materiale di supporto. In questo secondo caso i supporti spesso si possono rimuovere immergendo il modello in una specifica soluzione.

Le stampanti FDM più economiche hanno un unico ugello e la camera di lavoro è aperta, si trova alla temperatura ambiente, quelle di fascia alta hanno il doppio ugello e la camera di lavoro riscaldata.

Pulizia e finitura: al termine del processo non sono necessarie operazioni di pulizia o post-trattamento, si devono solo eliminare i supporti ed eventualmente si può eseguire una verniciatura per migliorare la rugosità superficiale.

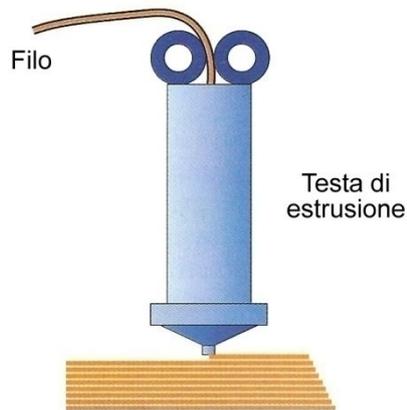


Figura 4.14 - Schema del processo di costruzione fused deposition modelling. Fonte:[4]

4.2.8 Laminated object manufacturing (LOM)

La *laminated object manufacturing* (LOM) fu una delle prime tecniche di manifattura additiva ad essere commercializzata, infatti arrivò sul mercato nel 1991 [9]. Gli elementi principali della macchina sono rappresentati in Figura 4.15.

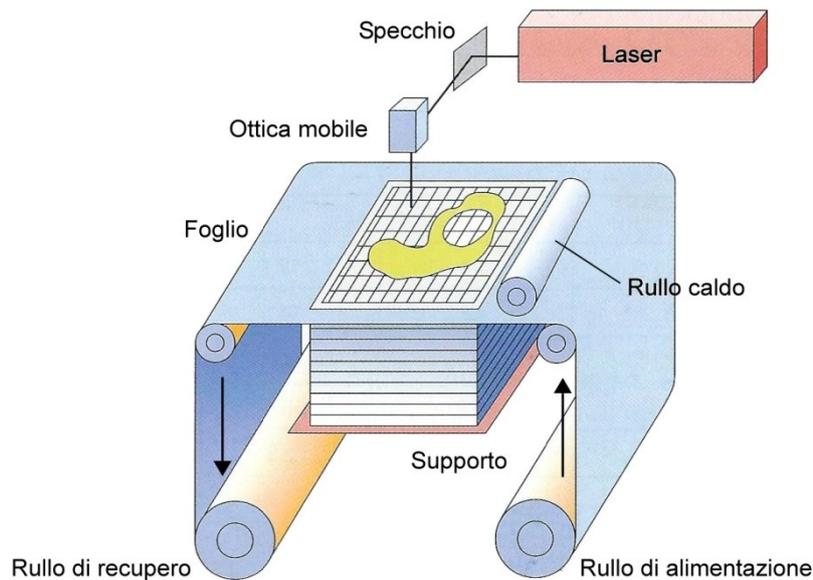


Figura 4.15 - Schema del processo Laminated Object Manufacturing (LOM). Fonte: [4]

La fase di costruzione del prototipo avviene tramite il progressivo incollaggio di fogli di carta, rivestiti nella parte inferiore con polietilene, sui quali viene successivamente ricavata la sezione del pezzo mediante taglio laser.

All'inizio del processo il sistema di trascinamento, costituito dal rullo di alimentazione e dal rullo di recupero, posiziona il foglio di carta nella zona di lavoro. Un rullo caldo passa sul foglio appena posizionato e lo incolla allo strato precedente. Un raggio laser o in alcuni casi un coltello comandato meccanicamente, taglia sul foglio la sezione dell'oggetto e anche una serie di riquadri che faciliteranno la rimozione del materiale in eccesso una volta terminato il processo. Il supporto si abbassa di una quantità pari allo spessore del foglio di carta e il processo si ripete dall'inizio fino al completamento dell'oggetto.

Al termine si ottiene un parallelepipedo di materiale stratificato all'interno del quale è presente il modello. Per estrarlo è necessario rimuovere manualmente il materiale in eccesso, lo si può fare servendosi di utensili tipici della lavorazione del legno.

Per particolari cavi è necessario interrompere periodicamente il processo e rimuovere il materiale dall'interno del pezzo, operazione che non si può svolgere a processo ultimato.

Un pezzo ottenuto con la tecnica LOM presenta una consistenza simile a quella del compensato, tuttavia è caratterizzato da una forte anisotropia lungo la direzione normale a quella di costruzione. Ci sono forti rischi di delaminazione. La rugosità superficiale del pezzo può essere migliorata con l'utilizzo di carta abrasiva. Terminata la carteggiatura è bene procedere con verniciatura per rendere la superficie impermeabile ed impedire che l'umidità dell'aria causi deformazioni.

Gli impieghi della tecnologia LOM sono principalmente le verifiche estetiche e di montaggio. Inoltre i modelli ottenuti con questa tecnica possono essere impiegati in sostituzione dei classici modelli in legno per i processi fusori [4].

Le prime macchine LOM vennero commercializzate nel 1991 da Helisys Inc., USA e successivamente supportate dalla Cubic Technologies, USA, dopo che la Helisys dichiarò bancarotta. Attualmente nuove macchine basate sulla tecnologia LOM sono vendute dalla Mcor Technologies (Irlanda). Questi nuovi sistemi fanno uso di carta bianca come materiale da costruzione e distribuiscono selettivamente l'adesivo solo dove necessario. Poiché il materiale in eccesso non viene incollato, la rimozione risulta agevolata. L'uso di una testina a getto di inchiostro che stampa sulla carta permette la produzione di parti colorate direttamente dal file CAD.

Il principio alla base della tecnologia LOM è stato sviluppato con successo anche per ottenere parti in materiali polimerici, metallici, ceramici e compositi [9]. Solidimension (Be'erot, Israele) sviluppò nel 1999 un sistema di prototipazione commerciale che prevedeva la laminazione di fogli di polivinilcloruro (PVC). Solidimension vendeva le proprie macchine sotto il nome Solido e sotto altri nomi tramite rivenditori. Questa macchina utilizzava un plotter nel piano $x-y$ per tagliare i fogli di PVC e per scrivere con penne "anti colla", che inibivano l'incollaggio in prescritte posizioni. Le macchine Solido non sono più in commercio.

Un'altra tecnologia degna di nota è l'*Ultrasonic Additive Manufacturing* (UAM), conosciuta anche come *Ultrasonic Consolidation* (UC), è un processo a laminazione di fogli (*sheet lamination process*) ibrido che combina la saldatura ad ultrasuoni di strisce metalliche con la fresatura a controllo numerico. Questa tecnologia è stata commercializzata da Solidica Inc., USA nel 2000 e concessa in licenza da Fabrisonics (USA). L'oggetto è costruito su una base avvitata su una piastra riscaldata, con temperature che variano dalla temperatura ambiente fino a circa 200 °C. Le parti sono costruite dal basso verso l'alto e ogni strato è composto di diverse strisce metalliche adagiate l'una accanto all'altra e poi rifilate con una fresa a controllo numerico [9].

4.2.9 Drop on demand (DOD)

Il processo impiega due testine a getto movimentate nel piano X-Y: la prima deposita il materiale termoplastico di costruzione e la seconda la cera di supporto. Quando il polimero termoplastico viene depositato si trova allo stato liquido, ma, una volta a contatto con lo strato precedente, solidifica rapidamente. La seconda testina deposita la cera di supporto ove richiesto, in questo modo è possibile realizzare parti a sbalzo.

Terminato uno strato, la fresa di spianatura regola la dimensione lungo l'asse Z eliminando l'eccesso di materiale, in questo modo si ottiene una superficie liscia e uniforme su cui depositare lo strato successivo.

Conclusa la fase di costruzione la cera di supporto può essere eliminata mediante immersione in solvente [4].

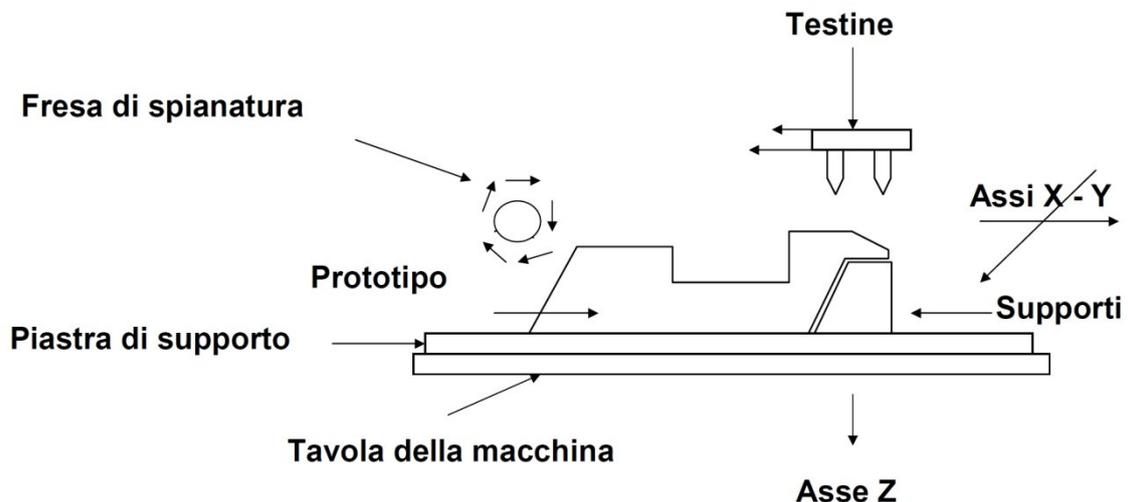


Figura 4.16 - Struttura semplificata delle macchine Drop on demand. Fonte: [4]

4.2.10 Polyjet

La tecnologia Polyjet funziona in modo simile alla stampa a getto d'inchiostro, ma anziché depositare gocce d'inchiostro la testina di stampa deposita un fotopolimero liquido che solidifica grazie all'azione di due lampade ai raggi ultravioletti, si veda la Figura 4.17.

In caso di sporgenze o forme complesse che richiedono un sostegno, le stampanti 3D Polyjet depositano un materiale di supporto rimovibile.

I supporti sono generati automaticamente e costruiti simultaneamente da un secondo gruppo di ugelli in modo che ogni strato sia costituito sia da materiale di supporto sia da materiale di costruzione.

Sono disponibili materiali con diversi colori e con diverse proprietà meccaniche. Inoltre è possibile realizzare parti costituite da due diversi materiali [5].

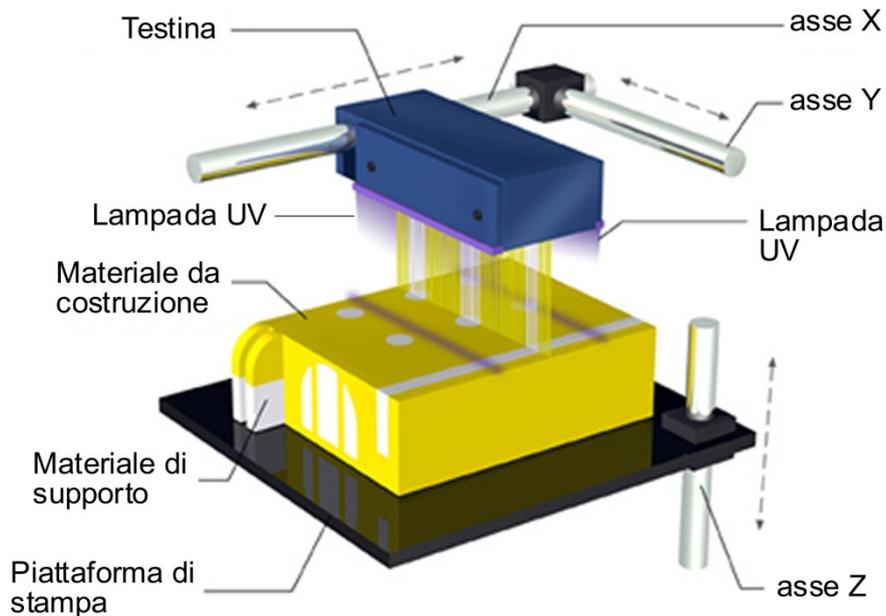


Figura 4.17 - Schema del processo di costruzione Polyjet. Fonte:[5]

4.2.11 Multi Jet Modelling (MJM) o Multi Jet Printing (MJP)

La *multi jet modelling*, anche detta *multi jet printing*, è molto simile alla tecnologia *polyjet*, si differenzia solo per la disposizione delle lampade e per le resine utilizzate.

4.2.12 Digital Light Processing (DLP)

Questa variante del processo di fotopolimerizzazione lavora con un proiettore DLP commerciale come sorgente di luce ultravioletta. Questo proietta una completa sezione

dell'oggetto inducendone la solidificazione simultanea. Quindi la tecnologia DLP si contrappone alla stereolitografia perché solidifica il fotopolimero sezione per sezione mentre la seconda utilizza un raggio laser che solidifica il fotopolimero punto per punto. Il proiettore è montato nella parte bassa della macchina. La resina è contenuta in una vaschetta in vetro posta al di sopra del proiettore. La sezione è proiettata dal basso sulla superficie inferiore della resina. Una piattaforma di costruzione in posizione capovolta scende nella resina dall'alto lasciando uno spazio pari allo spessore di uno strato tra il fondo trasparente e se stessa. Dopo la solidificazione dello strato, la piattaforma viene sollevata di una quantità pari allo spessore di uno strato lasciando spazio al materiale dello strato successivo. A causa della piccola vaschetta il processo è progettato per la stampa di piccole parti. Questa tecnologia richiede l'adozione di supporti. Sono disponibili una gran varietà di fotopolimeri inclusi materiali biocompatibili.

4.2.13 Stereolitografia (SLA)

La stereolitografia (SLA è la sigla per *stereolithographic apparatus*) è stata brevemente descritta all'inizio del capitolo. Si riporta di seguito un approfondimento.

La prima fase del processo è la preparazione del file macchina, si importa nel software per lo slicing il file .STL del modello CAD tridimensionale, si procede al posizionamento del modello nel volume virtuale di lavoro, si creano i supporti per il sostegno del pezzo durante la fase di costruzione e si esegue lo slicing. Si genera quindi un file che guiderà gli organi della macchina nella fase successiva.

Nella fase di costruzione del prototipo il fascio di una sorgente laser a gas o allo stato solido, con potenze di qualche centinaio di mW, viene focalizzato, mediante un sistema ottico sul pelo libero di una vasca contenente il monomero allo stato liquido, si veda Figura 4.18. All'inizio del processo una piastra di acciaio forata, supportata dall'elevatore, si trova appena al di sotto del pelo libero. L'interazione della radiazione laser con il fotopolimero innesca una reazione chimica che ha come effetto la solidificazione di quest'ultimo. Il fascio laser, muovendosi nel piano, descrive la prima sezione dell'oggetto. Il fotopolimero solidificato aderisce alla piastra forata. Terminata la prima sezione l'elevatore si abbassa e si procede con la fase di ricoprimento, a seconda del costruttore la strategia adottata per il ricoprimento può differire. Il processo continua con la costruzione del secondo strato che aderisce stabilmente a quello sottostante. Si sottolinea che alcuni μm dello strato indurito a contatto con l'atmosfera rimangono liquidi poiché l'ossigeno inibisce la reazione chimica e questo comportamento agevola la successiva adesione tra gli strati. Alla fine del processo l'elevatore si alza e fa riemergere il modello dal liquido. Il laser, nel tracciare le successive sezioni, per ragioni di tempo non solidifica l'intera sezione, ma si limita a tracciare il perimetro interno, il perimetro esterno e un certo numero di linee che congiungono i due. Per tale motivo l'oggetto prodotto, denominato *green part* in questa fase, contiene ancora del liquido intrappolato

all'interno e le sue pareti non sono completamente polimerizzate. Il prototipo è debole e deve essere rinforzato con un trattamento agli ultravioletti.

La costruzione del modello è sempre seguita da una fase di post-trattamento che consiste nell'esposizione del particolare ad una lampada agli ultravioletti per completare la fotopolimerizzazione sia delle parti già solidificate dal laser, sia del monomero liquido ancora intrappolato all'interno del pezzo. Al termine del post-trattamento si ottiene la cosiddetta *red part*.

Dopo il post-trattamento si asportano i supporti e si provvede alla finitura superficiale [4].

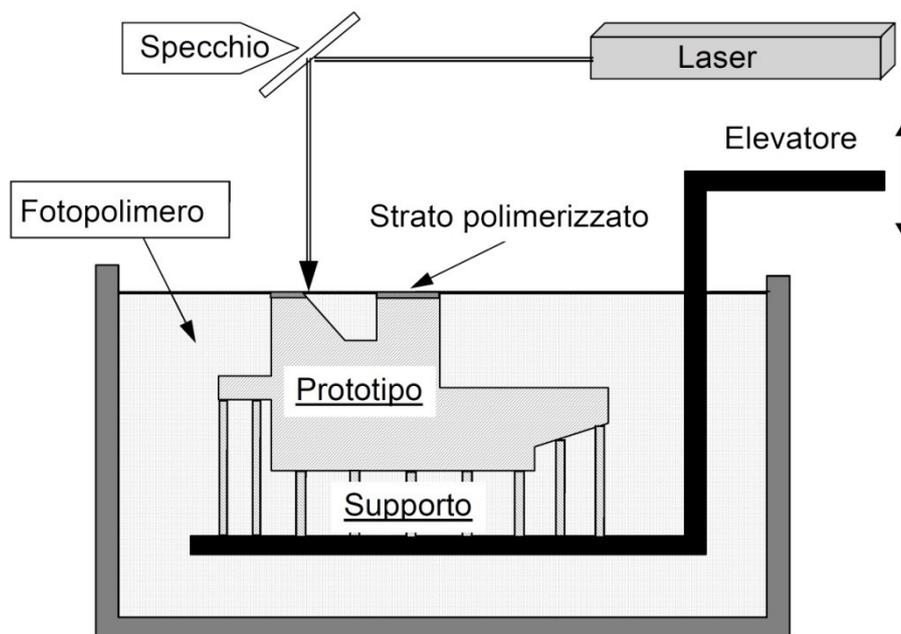


Figura 4.18 - Schema del processo stereolitografico (SLA). Fonte: [4]

5 Prove di costruzione delle pale

Il prototipo funzionale che si intende realizzare è costituito da un rotore i cui componenti principali sono stampati in 3D. Il rotore è composto da 5 pale fisse, un mozzo e un'ogiva.

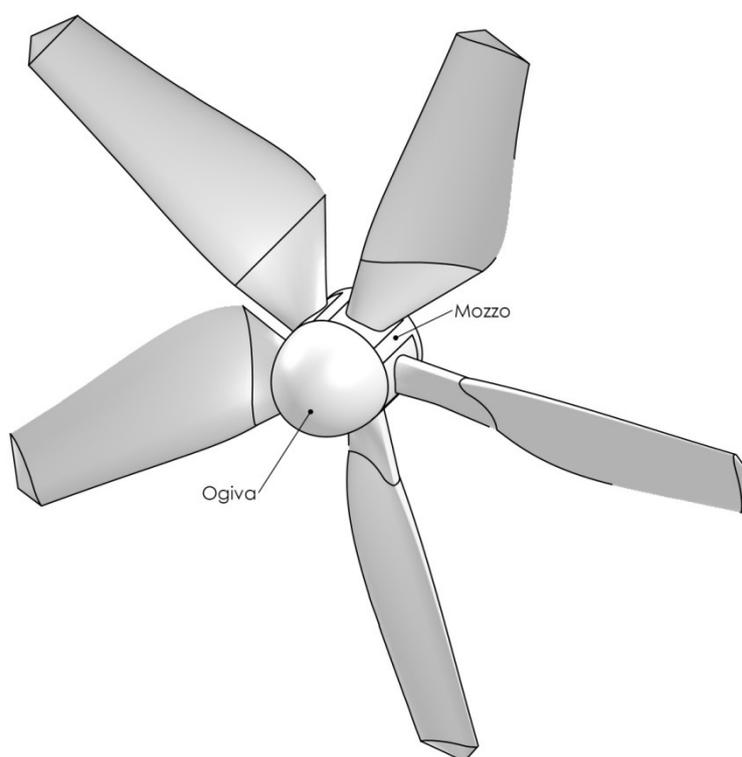


Figura 5.1 - Vista assonometrica del rotore

Le pale sono calettate sul mozzo tramite un apposito incastro, come si può vedere nella vista esplosa, Figura 5.2.

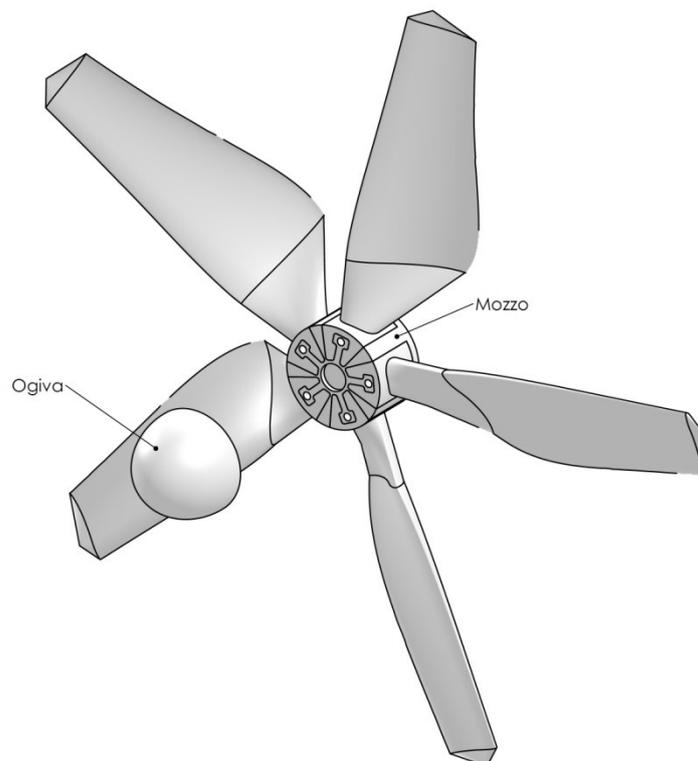


Figura 5.2 - Vista esplosa del rotore

Si ha a disposizione una stampante 3D da scrivania, modello Sharebot Next Generation a doppio estrusore, le cui caratteristiche tecniche sono riportate in Tabella 5.1.



Figura 5.3 - Stampante 3D Sharebot Next Generation. Fonte: [10]

Tabella 5.1 - Caratteristiche tecniche della stampante 3D Sharebot NG. Fonte: [10]

Sharebot Next Generation - Caratteristiche tecniche	
Tecnologia di stampa	Fused Filament Fabrication (FFF)
Volume di stampa (uso mono estrusore)	210 x 200 x 200 mm ± 5 mm
Volume di stampa (uso bi-estrusore)	180 x 200 x 200 mm ± 5 mm
Diametro foro di estrusione	0,4 mm
Diametro filamento da estrarre	1,75 mm
Temperature ottimali di estrusione PLA	200÷230 °C
Temperature ottimali di estrusione ABS	220÷250 °C
Filamenti di stampa testati e supportati	ABS, ABS Plus, PLA, Nylon, Poliuretano Termoplastico (TPU), Polistirene, Cristal Flex, PLA Sand, PLA Flex, PLA Thermosense, PET
Filamenti di stampa consigliati	PLA
Temperatura massima del piatto di stampa	90 °C
Dimensioni esterne	450 x 450 x 500 mm
Massa	14 kg
Consumo	250 W

Il mozzo e l'ogiva possono essere stampati direttamente con questa stampante in un unico pezzo in quanto le loro dimensioni lo consentono. Invece, la lunghezza delle pale è eccessiva per consentirne la stampa per intero.

La stampante viene utilizzata in modalità mono estrusore quindi il volume di stampa che si ha a disposizione è di 210 x 200 x 200 mm.

Come si può vedere in Figura 5.4 e in Figura 5.5 il mozzo ha un diametro di 120 mm e uno spessore di 74 mm mentre l'ogiva ha uguale diametro ma spessore di 86,2 mm.

La pala ha una lunghezza pari a 443,2 mm, si veda Figura 5.6.

Sono state indagate diverse possibili soluzioni per la stampa delle pale, in questo capitolo si presenteranno una ad una.

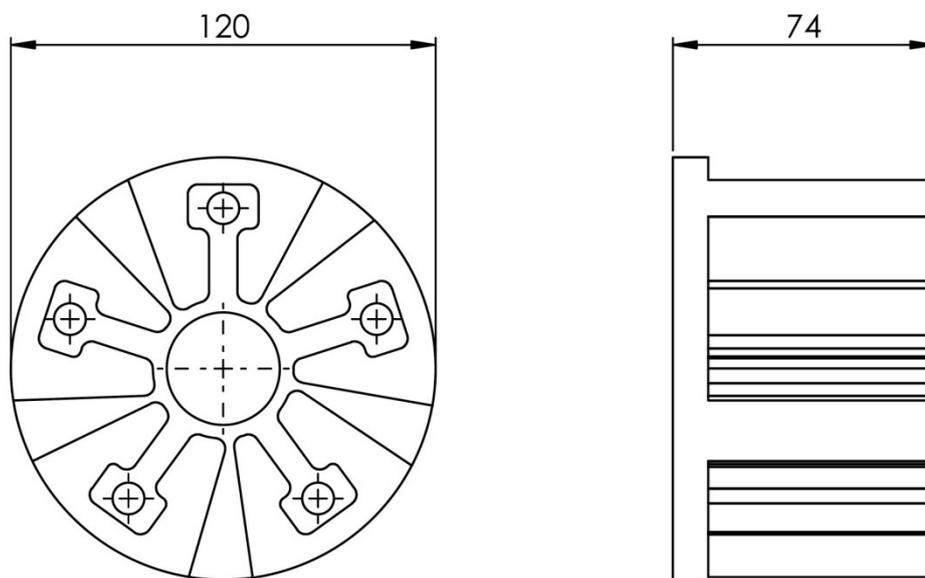


Figura 5.4 - Vista frontale e vista laterale del mozzo, quote in mm.

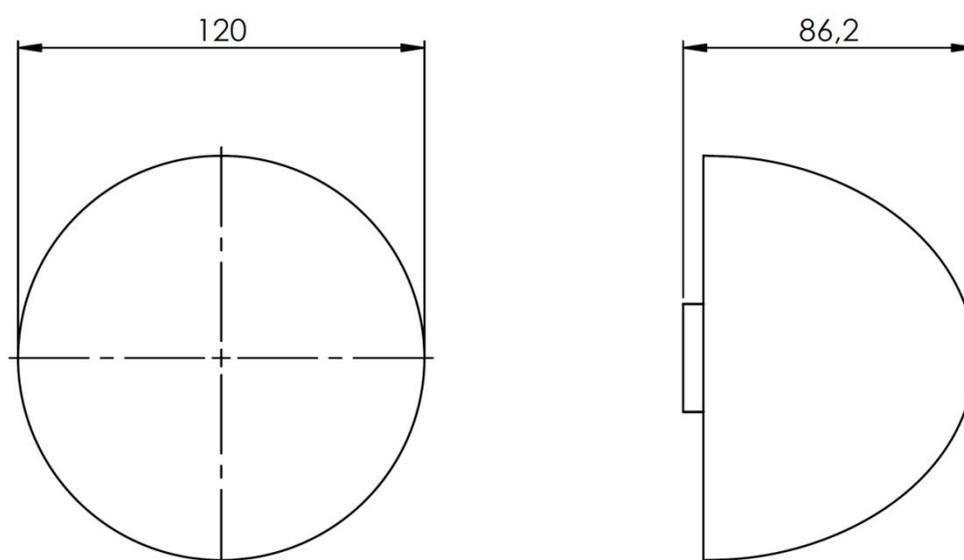


Figura 5.5 - Vista frontale e vista laterale dell'ogiva, quote in mm.

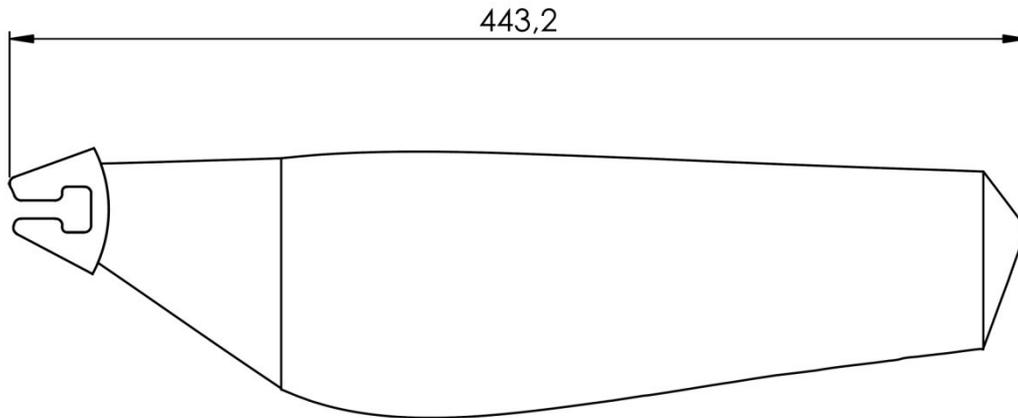


Figura 5.6 - Vista frontale della pala, quote in mm.

5.1 Prima soluzione di stampa

In primo luogo si è indagata la possibilità di stampare la pala con la stampante che si ha a disposizione, la Sharebot Next Generation, di cui sono sopra riportate le caratteristiche tecniche.

La pala verrebbe stampata in posizione verticale, con la base a contatto del piano di stampa. L'altezza limite di stampa è pari a 200 mm. Per riuscire nell'intento la pala dovrebbe essere divisa in tre parti lungo la direzione trasversale, ogni parte avrebbe una lunghezza di 147,7 mm. Le tre parti si potrebbero unire usando delle barre filettate per garantire l'allineamento e un collante specifico per l'unione finale.

L'incollaggio non è un'operazione semplice perché la superficie di contatto è ridotta, soprattutto verso il bordo di uscita della pala, per questo motivo si decide di limitare il numero di parti da incollare passando da tre a due. Questa scelta vincola la massima lunghezza della pala quindi si decide di usare un fattore di scala minore di 2 e pari a 1,7727. La lunghezza della pala si riduce da 443,2 mm a $221,59 \cdot 1,7727 \cong 392,8$ mm. Si ottengono due parti, la base e la punta della pala, con un'altezza di 196,4 mm ciascuna. Queste possono essere stampate in quanto la loro altezza è inferiore a 200 mm.

In Figura 5.7 vengono mostrati i modelli CAD delle due parti della pala e delle barre filettate mentre in Figura 5.8 si illustra il montaggio. I modelli CAD della base e della punta della pala sono dotati degli appositi fori per l'inserimento delle barre filettate, in questo modo si garantisce un perfetto allineamento e un corretto posizionamento delle barre rispetto al piano di separazione delle due parti. Tale piano risulta in corrispondenza del punto medio delle barre.

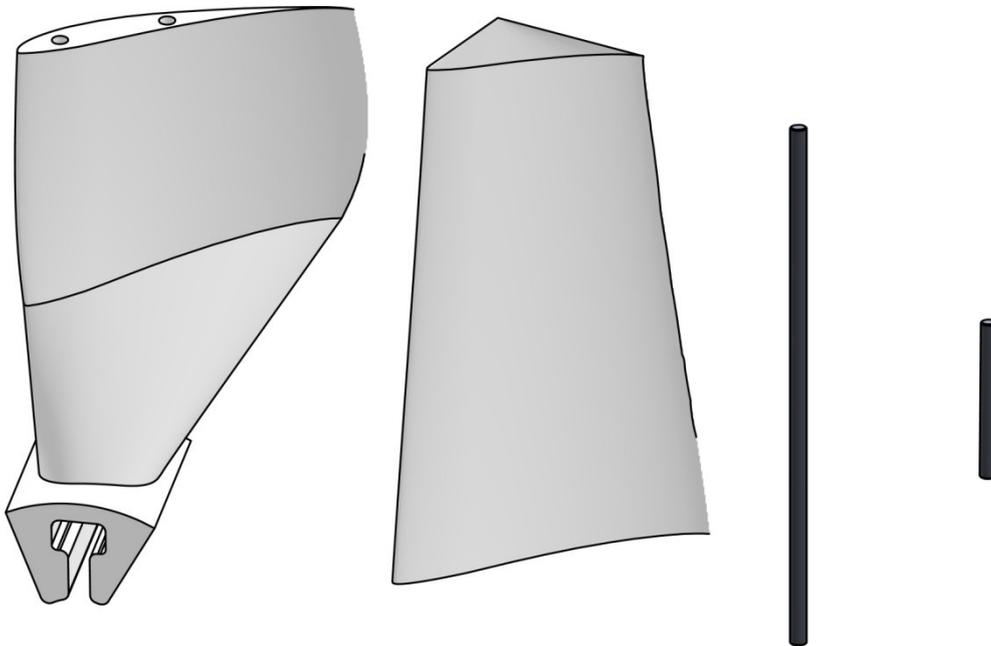


Figura 5.7 - Prima soluzione: stampare la pala in due parti che vengono unite con barre filettate e colla



Figura 5.8 - Montaggio, le barre filettate garantiscono l'allineamento mentre la colla garantisce l'unione delle parti



Figura 5.9 - Fotografia della pala stampata in due parti

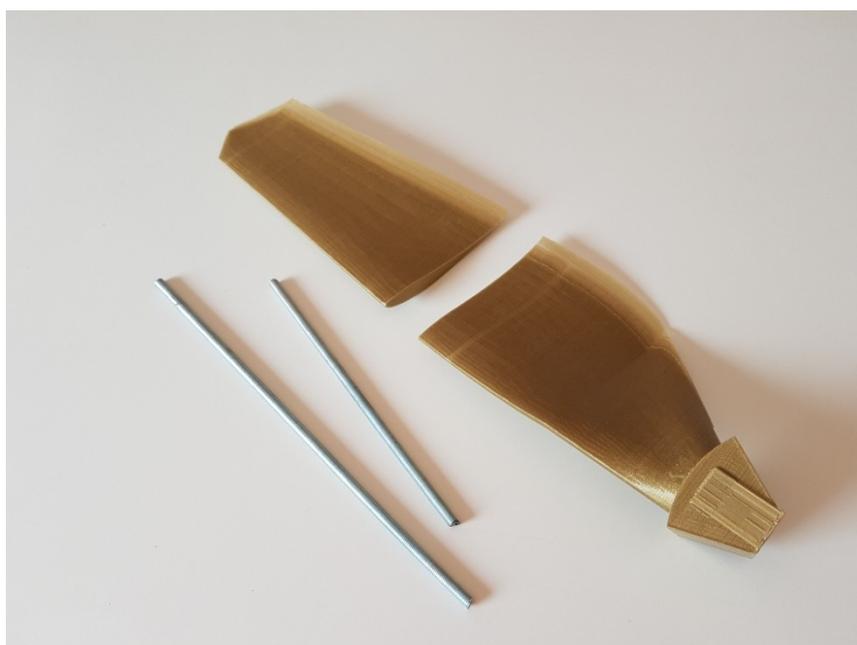


Figura 5.10 - Pala in due parti e barre filettate

Questa prima soluzione non è accettabile in quanto se il modello è stampato con un basso riempimento la densità della pala risulta essere molto più bassa rispetto alla densità delle barre filettate. Durante il funzionamento le barre filettate, soggette a forza centrifuga, potrebbero rompere la pala e staccarsi.

5.2 Seconda soluzione di stampa

L'idea alla base della seconda soluzione vagliata è quella di stampare la pala divisa in due parti lungo la direzione trasversale, ma con un incastro già predisposto da modello CAD tridimensionale. Quindi si avrà una parte della pala con un incastro “maschio” e l'altra parte della pala con un incastro “femmina”, come si vede in Figura 5.11.

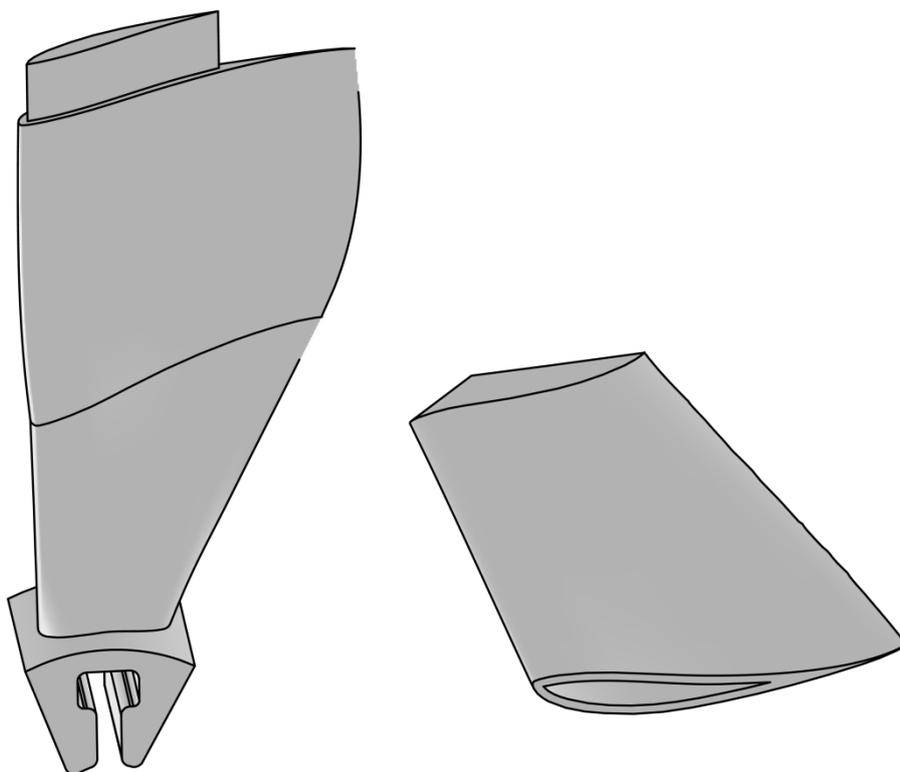


Figura 5.11 - Seconda soluzione: stampare la pala in due parti con apposito incastro

Per fare questo si usa una stampante 3D con un volume di stampa maggiore rispetto a quello della Sharebot Next Generation, si tratta della Stratasys Dimension Elite, si veda Tabella 5.2 per le caratteristiche tecniche e Figura 5.12.

Questa macchina è dotata di un volume di lavoro pari a 203 x 203 x 305 mm e genera i supporti in un materiale diverso rispetto al materiale del modello, un materiale organico che si può disciogliere in una specifica soluzione a base acqua. Con la Sharebot Next Generation la pala viene realizzata in PLA (polylactic acid – acido polilattico), un polimero ricavato dall'amido di mais, invece con la Stratasys Dimension Elite la pala viene stampata in ABS (acrilonitrile-butadiene-stirene).



Figura 5.12 - Stratasys Dimension Elite. Fonte: [11]

Tabella 5.2 - Caratteristiche tecniche della Stratasys Dimension Elite. Fonte: [11]

Stratasys Dimension Elite - Caratteristiche tecniche

Tecnologia di stampa	Fused Deposition Modelling (FDM), anche detta Fused Filament Fabrication (FFF)
Volume di stampa	203 x 203 x 305 mm
Materiale del modello	ABS Plus
Materiale per i supporti	Soluble Support Technology (SST)
Spessore dello strato	0,178 mm o 0,254 mm
Dimensioni esterne	686 x 914 x 1041 mm
Massa	127 kg
Alimentazione	220 – 240 VAC 50/60 Hz, circuito dedica- to da minimo 7A

È stata fatta una prova di stampa del solo incastro per verificare che l'unione delle parti sia solida e precisa.

Dalla prova di stampa dell'incastro emerge che anche la seconda soluzione di stampa vagliata non è accettabile in quanto l'incollaggio delle due parti risulta difficile. In corrispondenza della parte più spessa della pala, verso il bordo d'attacco, l'unione è precisa ma verso il bordo di uscita, dove la pala è più sottile, non c'è coincidenza. Tale problema è dovuto al fatto che la deformazione dei pezzi causata dal ritiro del materiale durante la solidificazione è diversa.

Oltre al problema appena citato bisogna tenere conto del fatto che avere la pala divisa in due parti lungo la direzione trasversale non è consigliabile in quanto la pala è sollecitata a trazione a causa della forza centrifuga, la colla potrebbe non tenere e la pala potrebbe spezzarsi. Un'ulteriore svantaggio consiste nell'elevato costo dell'ABS, circa 330 €/kg, invece il PLA utilizzato dalla Sharebot Next Generation e da tante altre stampanti della stessa categoria è di circa 30 €/kg.

5.3 Terza soluzione di stampa

La terza soluzione prevede l'utilizzo di una stampante con un volume di stampa maggiore e tale da permettere la costruzione della pala in un unico pezzo. Si tratta della Sharebot Next Generation XXL Plus, il volume di stampa è di 705 x 250 x 200 mm.

Le bobine di filamento impiegate da questa stampante sono le stesse impiegate dalla Sharebot Next Generation quindi il costo del materiale è contenuto.

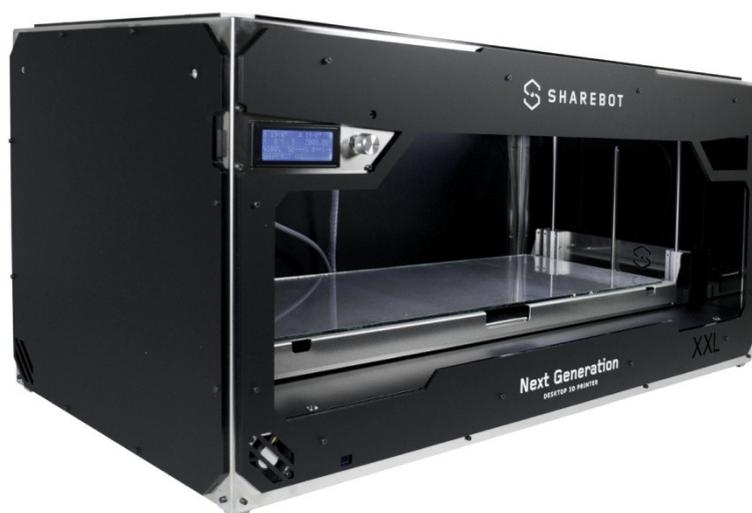


Figura 5.13 - Stampante 3D Sharebot Next Generation XXL Plus. Fonte: [10]

Tabella 5.3 - Caratteristiche tecniche della Sharebot Next Generation XXL Plus. Fonte: [10]

Sharebot Next Generation XXL Plus - Caratteristiche tecniche

Tecnologia di stampa	Fused Filament Fabrication (FFF)
Volume di stampa	705 x 250 x 200 mm ± 10 mm
Diametro foro di estrusione	0,4 mm
Diametro filamento da estrudere	1,75 mm
Temperature ottimali di estrusione PLA	200÷230 °C
Filamenti di stampa testati e supportati	PLA
Temperatura massima del piatto di stampa	90 °C
Dimensioni esterne	955 x 470 x 445 mm
Massa	40 kg
Consumo massimo	500 W

In questo caso la pala viene stampata in posizione orizzontale, appoggiata sul bordo d'attacco, come illustrato in Figura 5.14. I supporti, generati automaticamente dal software per lo slicing, si trovano lungo tutto il bordo d'attacco e in corrispondenza della base della pala.

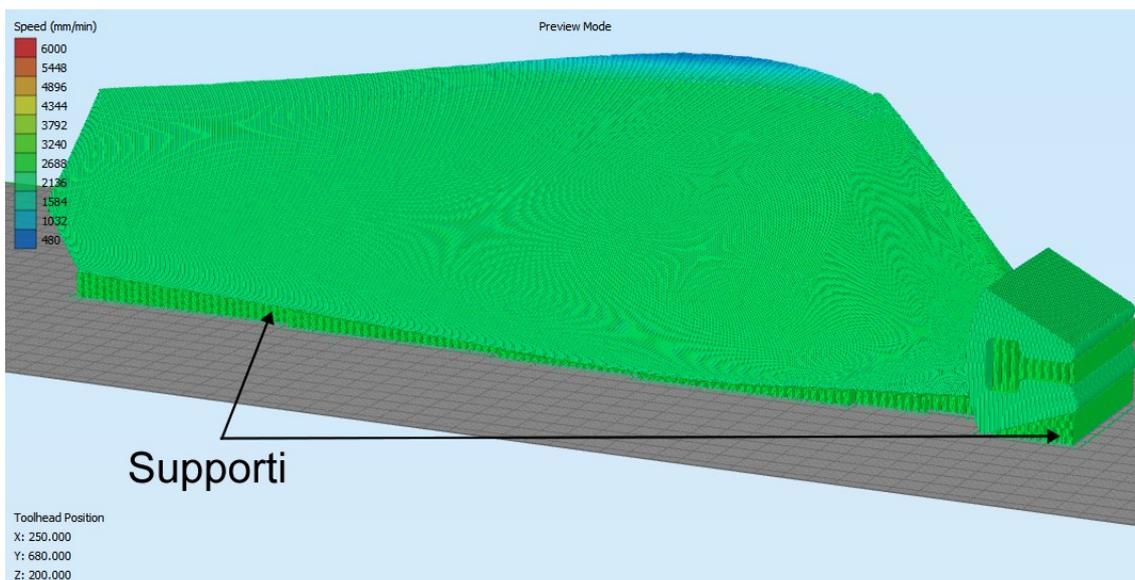


Figura 5.14 - Terza soluzione: stampare la pala in un unico pezzo

Il risultato ottenuto è soddisfacente, come si può notare dalla Figura 5.15.

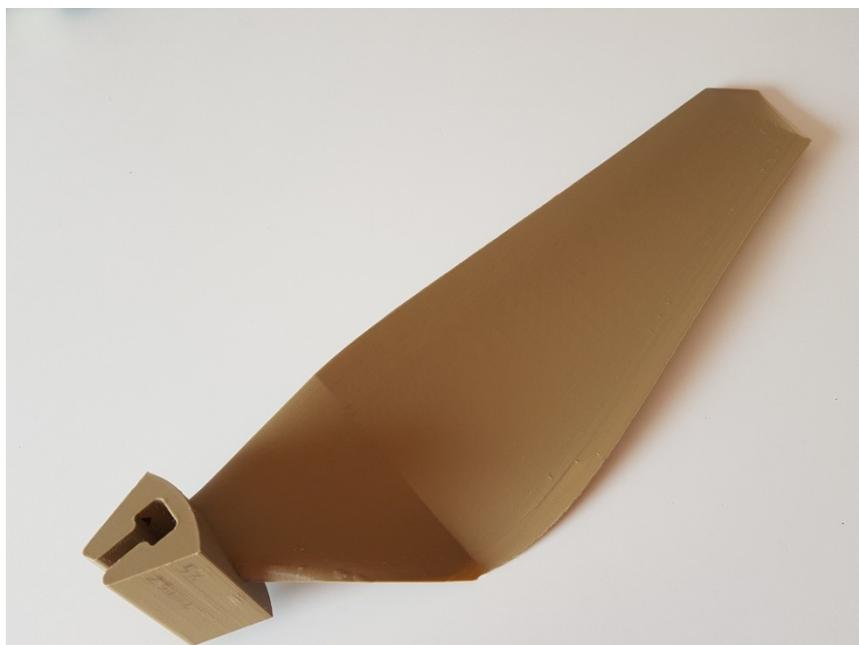


Figura 5.15 - Fotografia della pala stampata in un unico pezzo

5.4 Quarta soluzione di stampa

L'ultima soluzione vagliata consiste nella stampa della pala divisa in due parti lungo la direzione longitudinale, in Figura 5.17 si mostra la posizione del piano di separazione mentre in Figura 5.16 si riporta l'anteprima di stampa tratta dal software per lo slicing.

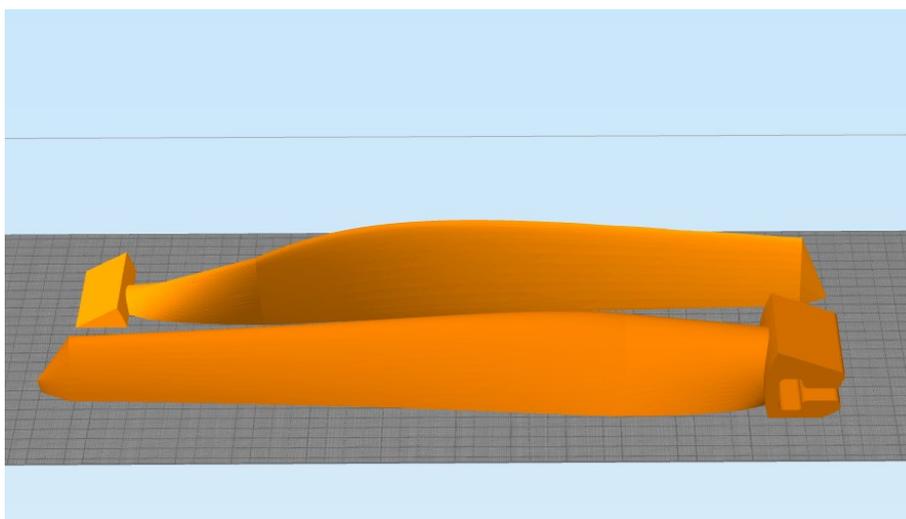


Figura 5.16 - Quarta soluzione: stampare la pala divisa in due parti longitudinalmente. Anteprima di stampa tratta dal software per lo slicing.

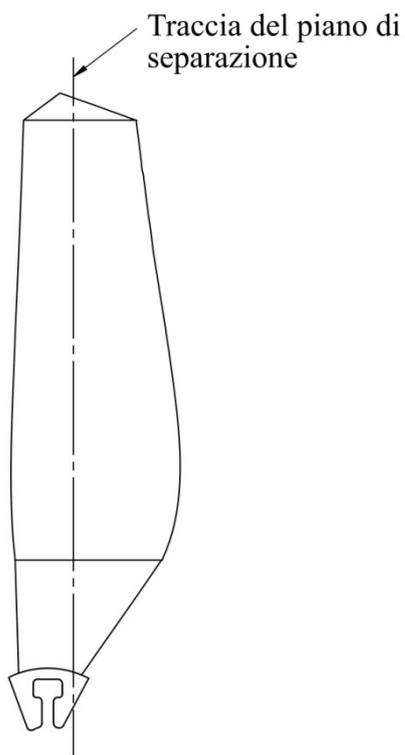


Figura 5.17 - Posizione del piano di separazione



Figura 5.18 - Pala stampata in due parti, divisa lungo la direzione longitudinale

La stampante utilizzata è la Sharebot Next Generation XXL Plus. Questa soluzione presenta il vantaggio di non avere supporti lungo il bordo d'attacco, il che garantisce una

migliore qualità superficiale di quest'ultimo. In Figura 5.19 si mostra il bordo d'attacco di una pala stampata in un unico pezzo, mentre in Figura 5.20 si riporta una fotografia del bordo d'attacco di una pala stampata in due parti.

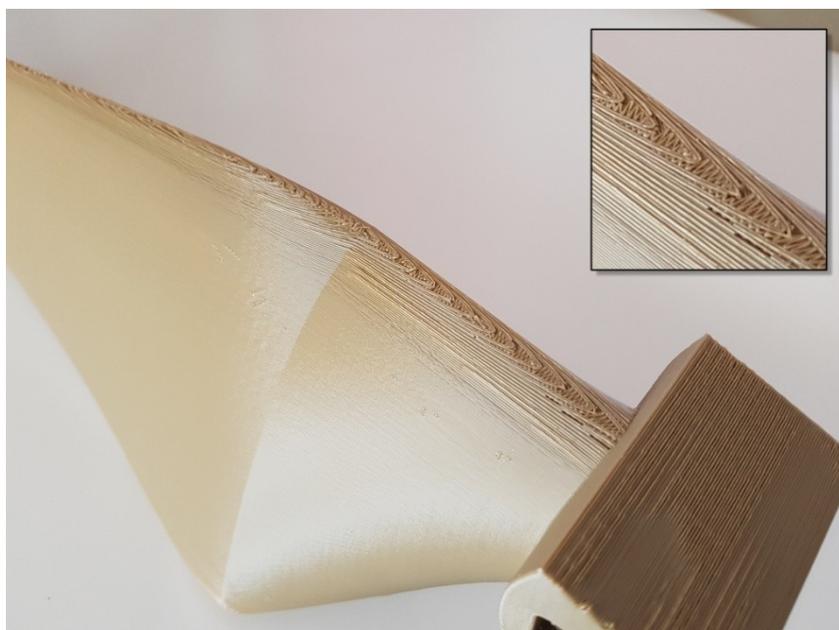


Figura 5.19 - Particolare del bordo d'attacco di una pala stampata in un unico pezzo

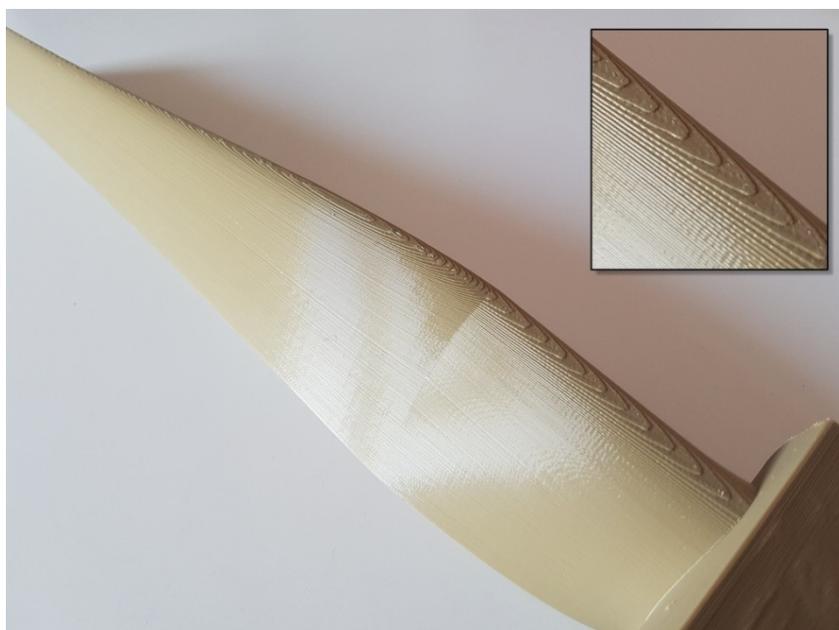


Figura 5.20 - Particolare del bordo d'attacco della pala stampata in due parti

L'incollaggio delle due parti non può essere preciso perché le superfici che dovrebbero andare a contatto non sono piane a causa delle deformazioni che si verificano durante la

stampa. La deformazione più evidente è causata dal ritiro del materiale durante la solidificazione, la superficie che è a contatto del piano di stampa anziché essere piana tende a diventare convessa. Se si fanno combaciare le parti in corrispondenza della base della pala, verso la punta le superfici non combaciano, come si vede in Figura 5.21. Il problema si risolve dopo aver applicato la colla, si veda Figura 5.22.



Figura 5.21 - Mancata coincidenza delle superfici che dovrebbero andare a contatto

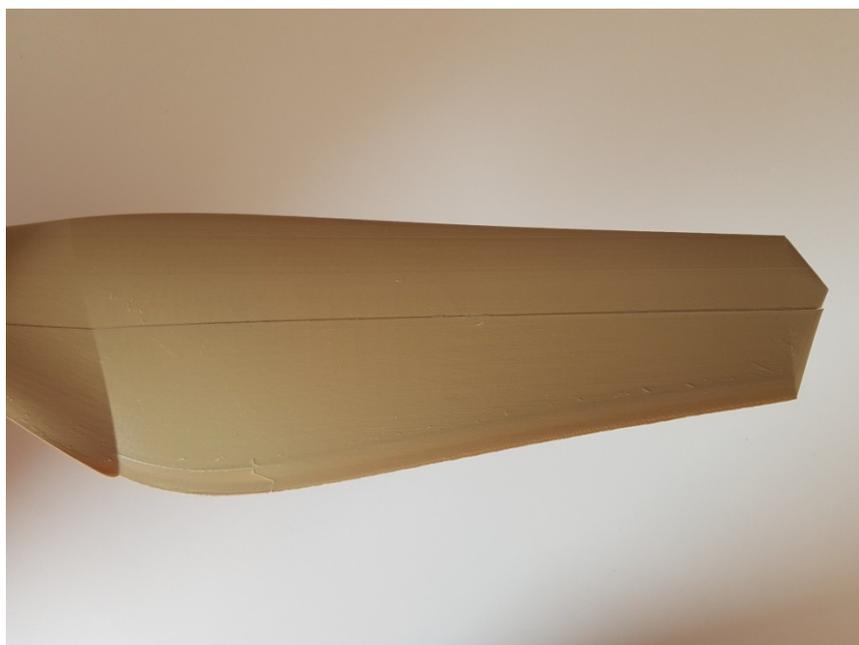


Figura 5.22 - Pala dopo l'incollaggio, le superfici sono a contatto

Questa quarta soluzione considerata non è accettabile perché la mancata coincidenza delle superfici a contatto genera uno scalino che causerebbe il distacco del filetto fluido e la formazione di un moto turbolento verso il bordo di uscita della pala.

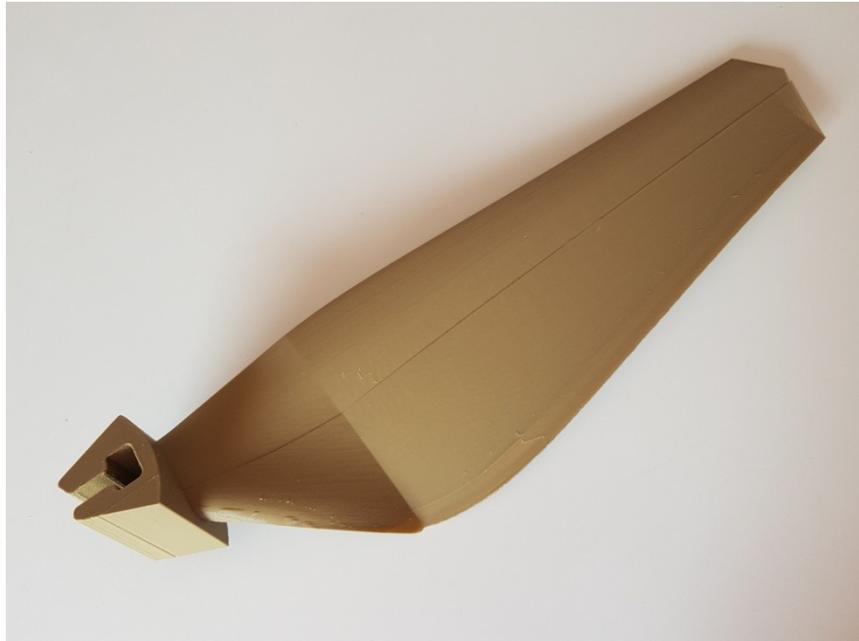


Figura 5.23 - Pala stampata in due parti dopo l'applicazione della colla

In conclusione la migliore soluzione è la terza, la stampa in un unico pezzo con la pala appoggiata sul bordo di attacco.

5.5 Verniciatura

Si vuole verificare se con la verniciatura è possibile ridurre la rugosità superficiale dovuta allo slicing e alla presenza dei supporti. Si rivolge particolare attenzione al bordo di attacco che, come detto prima e come mostrato in Figura 5.19, essendo a contatto con i supporti, risulta molto rugoso.

Le fasi del processo di verniciatura sono le seguenti:

- carteggiatura con carta abrasiva grana 120, successivamente 240 e rifinitura con grana 320. Il risultato di tale fase di preparazione è illustrato in Figura 5.25;

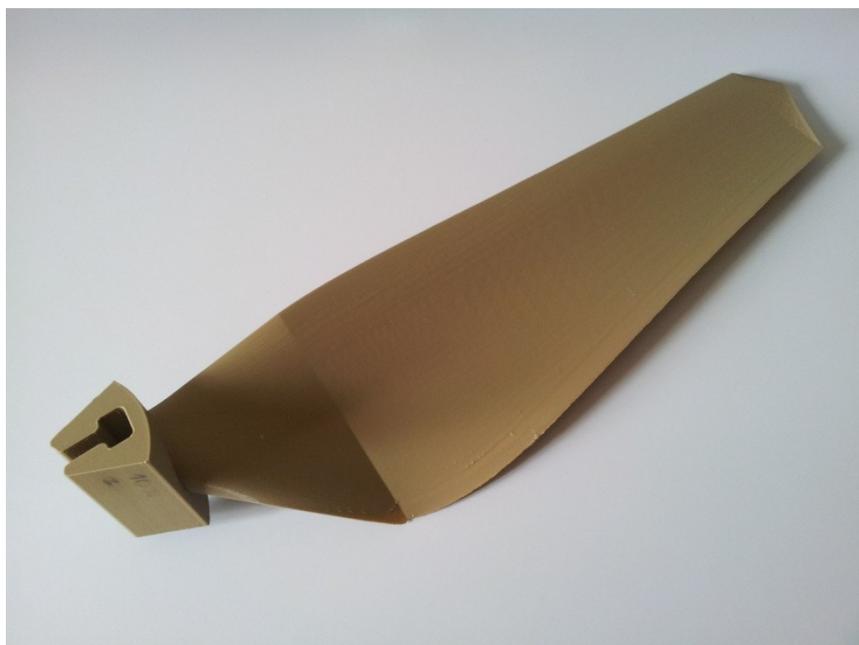


Figura 5.24 - Fotografia della pala prima della verniciatura

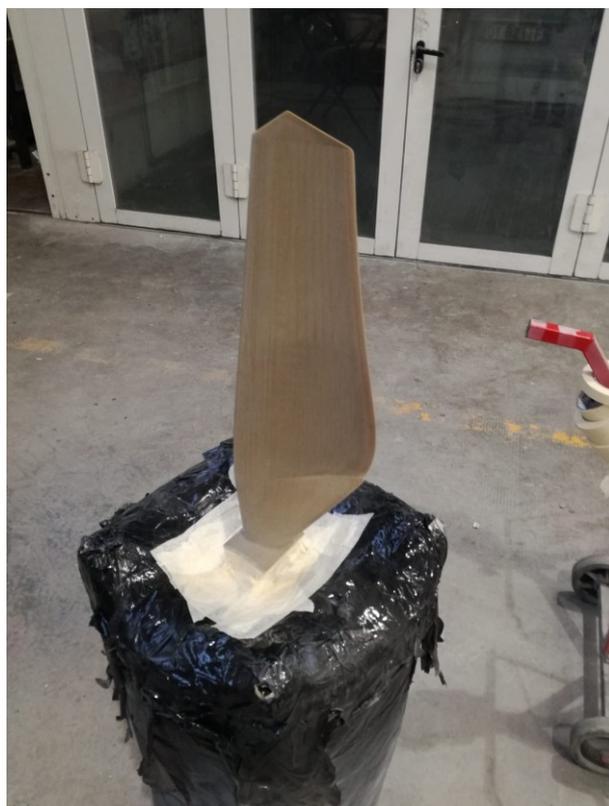


Figura 5.25 - Pala alla fine della fase di carteggiatura

- sgrassatura con antisilicone;
- applicazione dell'aggrappante per le plastiche;
- applicazione del fondo catalizzato, Figura 5.26;



Figura 5.26 - Fotografia della pala dopo l'applicazione del fondo catalizzato

- seppiatura con carta abrasiva 400, Figura 5.27;
- sgrassatura con antisilicone;
- applicazione del fondo catalizzato;
- seppiatura con carta abrasiva 400 e rifinitura con grana 500, Figura 5.28;
- sgrassatura con antisilicone;
- applicazione di due mani di vernice lucido diretto;
- essiccazione della vernice in una cabina forno con pannelli endotermici:
 - 20 minuti di appassimento a 40°;
 - 40 minuti di essiccazione a 75°;
 - 5 minuti di raffreddamento a 20°.



Figura 5.27 - Pala dopo l'applicazione del fondo catalizzato e la seppiatura con carta abrasiva 400



Figura 5.28 - Pala dopo l'applicazione della seconda mano di fondo catalizzato e la seppiatura



Figura 5.29 - Fotografia della pala dopo la verniciatura e l'essiccazione

Il risultato della verniciatura è ottimo, la rugosità superficiale dovuta allo slicing non è più visibile e il bordo di attacco è perfettamente liscio.

La massa della pala prima della verniciatura era pari a 166 g mentre al termine del processo di verniciatura sale a 210 g, quindi l'apporto di materiale è pari a 44 g.

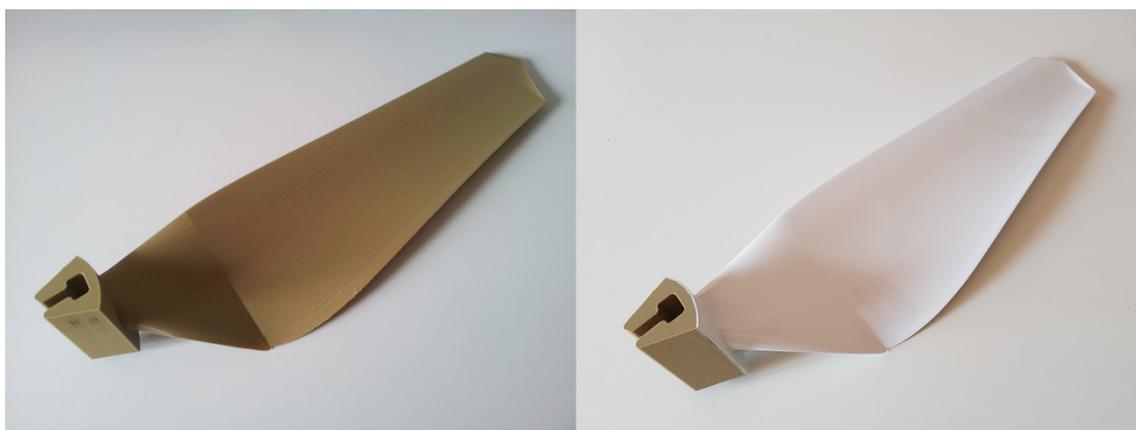


Figura 5.30 - La pala prima e dopo la verniciatura

Si fa notare che la verniciatura è un procedimento manuale che non è ripetibile con precisione, quindi, se si facessero verniciare le 5 pale di un rotore si potrebbero avere diffe-

renti valori della massa delle pale al termine del processo con conseguente sbilanciamento del rotore. Quindi il rotore sarebbe da equilibrare.

La verniciatura è stata eseguita a titolo gratuito, tuttavia, se il lavoro fosse stato fatto a pagamento i costi sarebbero stati i seguenti. In Tabella 5.4 si riporta il costo per la verniciatura di una pala, in Tabella 5.5 quello per la verniciatura di un intero rotore.

Tabella 5.4 - Costo per la verniciatura di una pala

materiale	30 €
5 ore di manodopera	100 €
<hr/>	
TOTALE	130 €

Tabella 5.5 - Costo per la verniciatura dell'intero rotore: 5 pale, 1 mozzo e 1 ogiva

materiale	150 €
15 ore di manodopera	250 €
<hr/>	
TOTALE	400 €

Conclusioni

Gli obiettivi di questa tesi sono il dimensionamento del generatore elettrico e la determinazione del metodo migliore per la stampa 3D delle pale.

Per quanto riguarda il dimensionamento del generatore sono state calcolate le prestazioni teoriche del rotore con diametro pari a 92 cm. Per farlo si è partiti dalla curva del coefficiente di potenza in funzione del rapporto di velocità periferica (*tip speed ratio*) calcolata dal tesista che mi ha preceduto, Luca Roberto, per un rotore con diametro pari a 46 cm e stessa forma. Poiché tale curva non dipende dalle dimensioni del rotore ma solo dalla sua forma, a partire da essa, sono stati ricavati i grafici della potenza meccanica e della coppia in funzione della velocità angolare a diverse velocità del vento. Alle velocità del vento considerate il rotore funziona con velocità angolari comprese tra 0 e 1400 giri/min. La potenza meccanica raggiunge un valore massimo pari a 680 W quando la velocità del vento è di 16 m/s e la velocità angolare è pari a 864 giri/min. La coppia massima è pari a 8,8 Nm ad una velocità del vento di 16 m/s ed una velocità angolare di 598 giri/min.

I generatori elettrici più adatti per le turbine microeoliche sono i generatori sincroni a magneti permanenti. Il generatore elettrico deve avere un diametro esterno minore del diametro esterno del mozzo o di poco superiore per non influenzare l'aerodinamica del rotore. L'intervallo di velocità di funzionamento del generatore deve essere confrontabile con l'intervallo di velocità di funzionamento del rotore pentapala. Infine bisogna considerare le curve della coppia in funzione della velocità angolare del rotore pentapala rispetto alla curva della coppia in ingresso limite, propria del generatore elettrico. È stata individuata un'azienda che produce alternatori per turbine eoliche di piccola taglia. I generatori per il settore eolico prodotti da tale azienda vengono forniti non assemblati: il rotore e lo statore sono forniti come due parti separate. L'alternatore che soddisfa tutti i requisiti ha una potenza nominale pari a 1752 W a 1500 giri/min e diametro esterno pari

a 145 mm. Il diametro esterno è di poco superiore al diametro del mozzo del rotore che misura 120 mm.

Per quanto riguarda la determinazione del metodo migliore per la stampa 3D delle pale, sono state prese in considerazione quattro possibili soluzioni di stampa. Tutte prevedono l'impiego di stampanti 3D con tecnologia FDM (Fused Deposition Modelling). La soluzione migliore consiste nella stampa della pala in un unico pezzo con una stampante il cui volume di stampa misura 705 x 250 x 200 mm. La pala, che ha una lunghezza pari a 443,2 mm, viene stampata in posizione orizzontale, appoggiata sul bordo di attacco.

Il risultato della stampa è buono ma a causa dello slicing, ovvero la suddivisione del modello CAD tridimensionale in strati paralleli al piano di stampa, la rugosità superficiale è elevata, in particolare lungo il bordo di attacco dove sono presenti i supporti. Per verificare se la verniciatura è in grado di eliminare tali difetti, un tecnico specializzato ha verniciato una pala. Il risultato è ottimo, infatti la superficie risulta perfettamente liscia, anche in corrispondenza del bordo di attacco.

Appendice A

Potenza meccanica e coppia

Si riportano di seguito le tabelle con i risultati dei calcoli della potenza meccanica e della coppia descritti nel capitolo 3 per diverse velocità del vento.

Tabella 0.1 - Potenza meccanica e coppia ad una velocità del vento di 6 m/s

λ	C_p	ω (rad/s)	ω (giri/min)	P (W)	C (Nm)
0,2	0,0140	2,61	25	1	0,5
0,6	0,0675	7,83	75	6	0,8
1,0	0,1536	13,04	125	14	1,0
1,4	0,2484	18,26	174	22	1,2
1,8	0,3321	23,48	224	29	1,2
2,2	0,3891	28,70	274	34	1,2
2,6	0,4080	33,91	324	36	1,1
3,0	0,3814	39,13	374	34	0,9
3,4	0,3063	44,35	423	27	0,6
3,8	0,1838	49,57	473	16	0,3
4,2	0,0191	54,78	523	2	0,0

Tabella 0.2 - Potenza meccanica e coppia ad una velocità del vento di 8 m/s

λ	C_P	ω (rad/s)	ω (giri/min)	P (W)	C (Nm)
0,2	0,0140	3,48	33	3	0,8
0,6	0,0675	10,43	100	14	1,3
1,0	0,1536	17,39	166	32	1,8
1,4	0,2484	24,35	233	52	2,1
1,8	0,3321	31,30	299	69	2,2
2,2	0,3891	38,26	365	81	2,1
2,6	0,4080	45,22	432	85	1,9
3,0	0,3814	52,17	498	80	1,5
3,4	0,3063	59,13	565	64	1,1
3,8	0,1838	66,09	631	38	0,6
4,2	0,0191	73,04	698	4	0,1

Tabella 0.3 - Potenza meccanica e coppia ad una velocità del vento di 10 m/s

λ	C_P	ω (rad/s)	ω (giri/min)	P (W)	C (Nm)
0,2	0,0140	4,35	42	6	1,3
0,6	0,0675	13,04	125	28	2,1
1,0	0,1536	21,74	208	63	2,9
1,4	0,2484	30,43	291	101	3,3
1,8	0,3321	39,13	374	135	3,5
2,2	0,3891	47,83	457	158	3,3
2,6	0,4080	56,52	540	166	2,9
3,0	0,3814	65,22	623	155	2,4
3,4	0,3063	73,91	706	125	1,7
3,8	0,1838	82,61	789	75	0,9
4,2	0,0191	91,30	872	8	0,1

Tabella 0.4 - Potenza meccanica e coppia ad una velocità del vento di 12 m/s

λ	C_p	ω (rad/s)	ω (giri/min)	P (W)	C (Nm)
0,2	0,0140	5,22	50	10	1,9
0,6	0,0675	15,65	149	48	3,0
1,0	0,1536	26,09	249	108	4,1
1,4	0,2484	36,52	349	175	4,8
1,8	0,3321	46,96	448	234	5,0
2,2	0,3891	57,39	548	274	4,8
2,6	0,4080	67,83	648	287	4,2
3,0	0,3814	78,26	747	268	3,4
3,4	0,3063	88,70	847	216	2,4
3,8	0,1838	99,13	947	129	1,3
4,2	0,0191	109,57	1046	13	0,1

Tabella 0.5 - Potenza meccanica e coppia ad una velocità del vento di 14 m/s

λ	C_p	ω (rad/s)	ω (giri/min)	P (W)	C (Nm)
0,2	0,0140	6,09	58	16	2,6
0,6	0,0675	18,26	174	75	4,1
1,0	0,1536	30,43	291	172	5,6
1,4	0,2484	42,61	407	278	6,5
1,8	0,3321	54,78	523	371	6,8
2,2	0,3891	66,96	639	435	6,5
2,6	0,4080	79,13	756	456	5,8
3,0	0,3814	91,30	872	426	4,7
3,4	0,3063	103,48	988	342	3,3
3,8	0,1838	115,65	1.104	205	1,8
4,2	0,0191	127,83	1.221	21	0,2

Tabella 0.6 - Potenza meccanica e coppia ad una velocità del vento di 16 m/s

λ	C_p	ω (rad/s)	ω (giri/min)	P (W)	C (Nm)
0,2	0,0140	6,96	66	23	3,4
0,6	0,0675	20,87	199	113	5,4
1,0	0,1536	34,78	332	256	7,4
1,4	0,2484	48,70	465	414	8,5
1,8	0,3321	62,61	598	554	8,8
2,2	0,3891	76,52	731	649	8,5
2,6	0,4080	90,43	864	680	7,5
3,0	0,3814	104,35	996	636	6,1
3,4	0,3063	118,26	1129	511	4,3
3,8	0,1838	132,17	1262	307	2,3
4,2	0,0191	146,09	1395	32	0,2

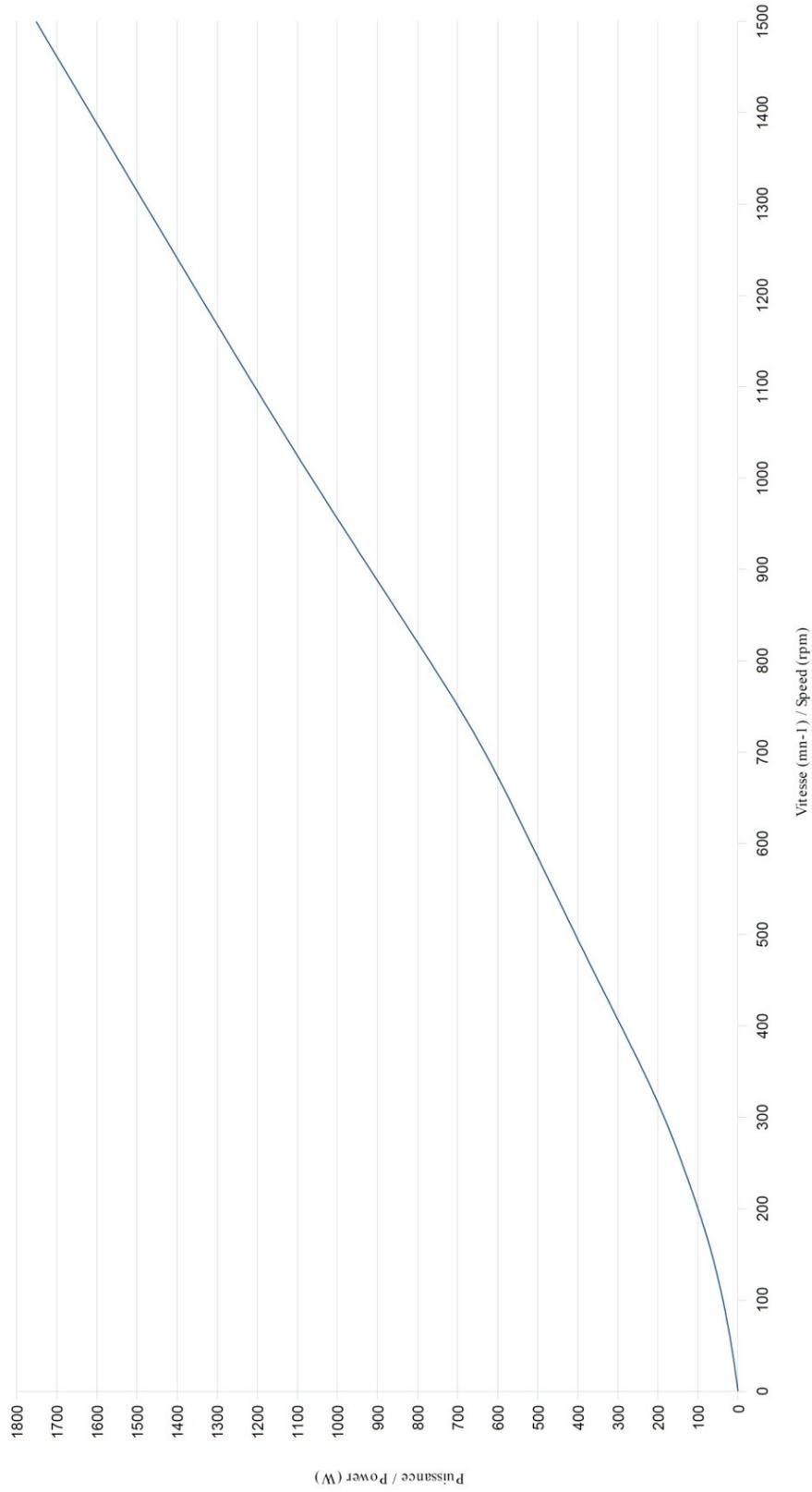
Appendice B

Curve caratteristiche dell'alternatore

Si riportano di seguito le curve caratteristiche dell'alternatore.

Alternateur / Alternator
145STK2M

Puissance nominale Pn / Rated Power Pr

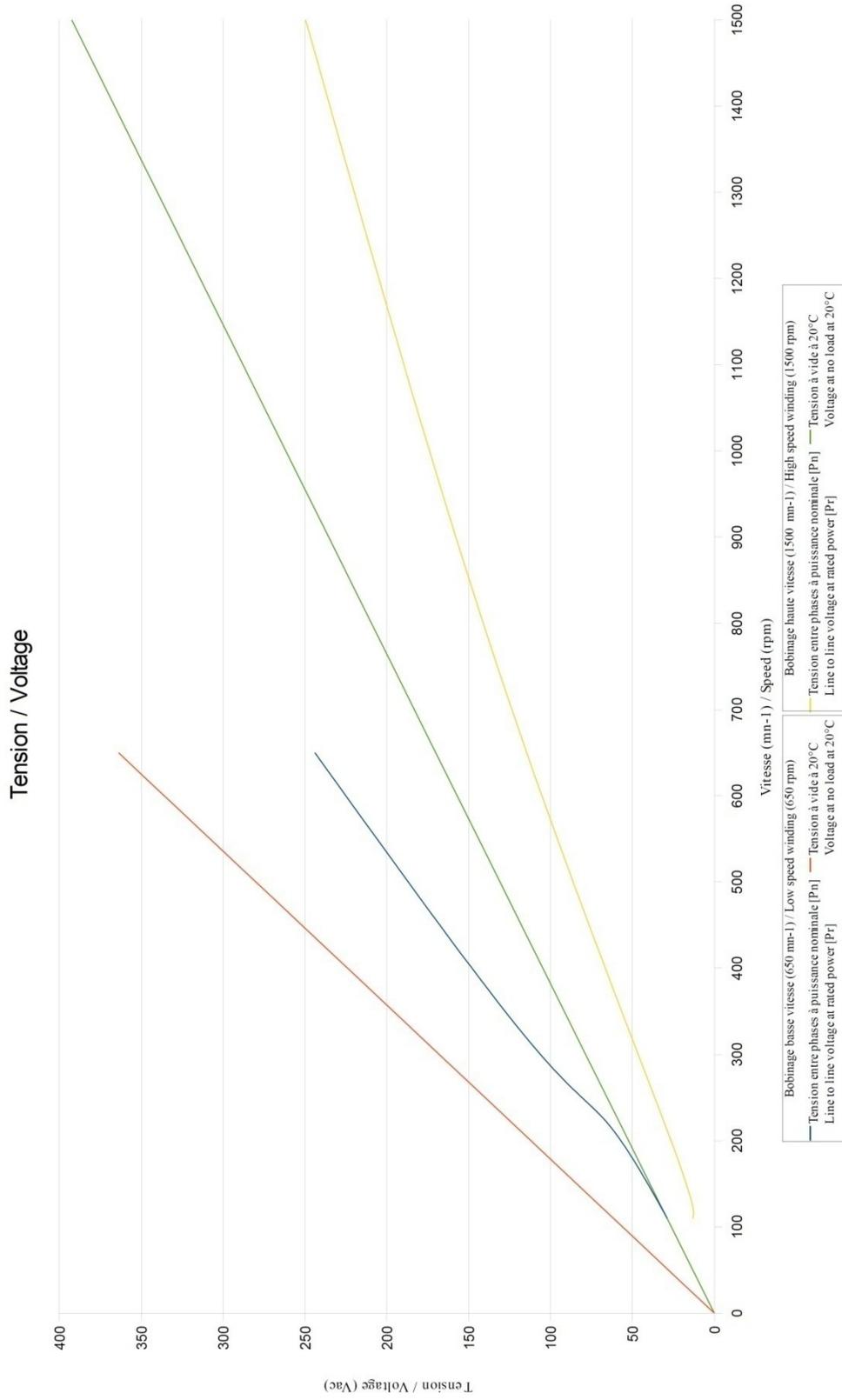


— Puissance nominale [Pn] La puissance nominale [Pn] est la puissance maximale en régime sinusoïdal permanent avec facteur de puissance unitaire, vent de 10m/s refroidissant la carcasse et température ambiante de 40°C.
 Rated power [Pr] Rated power [Pr] is the maximum power delivered in continuous sine wave operation with unity power factor, 10m/s windflow cooling the housing and ambient temperature of 40°C

ALXION se réserve le droit de modifier toutes les données sans préavis. Pour plus d'information consultez notre site. Internet: www.alxion.com, ainsi que notre Note d'application sur les Kits d'Alternateurs STK pour entraînement direct d'éoliennes.
ALXION keeps the right to modify all data without prior notice. For more information, consult our web site: www.alxion.com, and our application note related to ALXION STK permanent magnets frameless alternators for direct drive of wind turbines.

Edition de 02/11/2010

Alternateur / Alternator
145STK2M

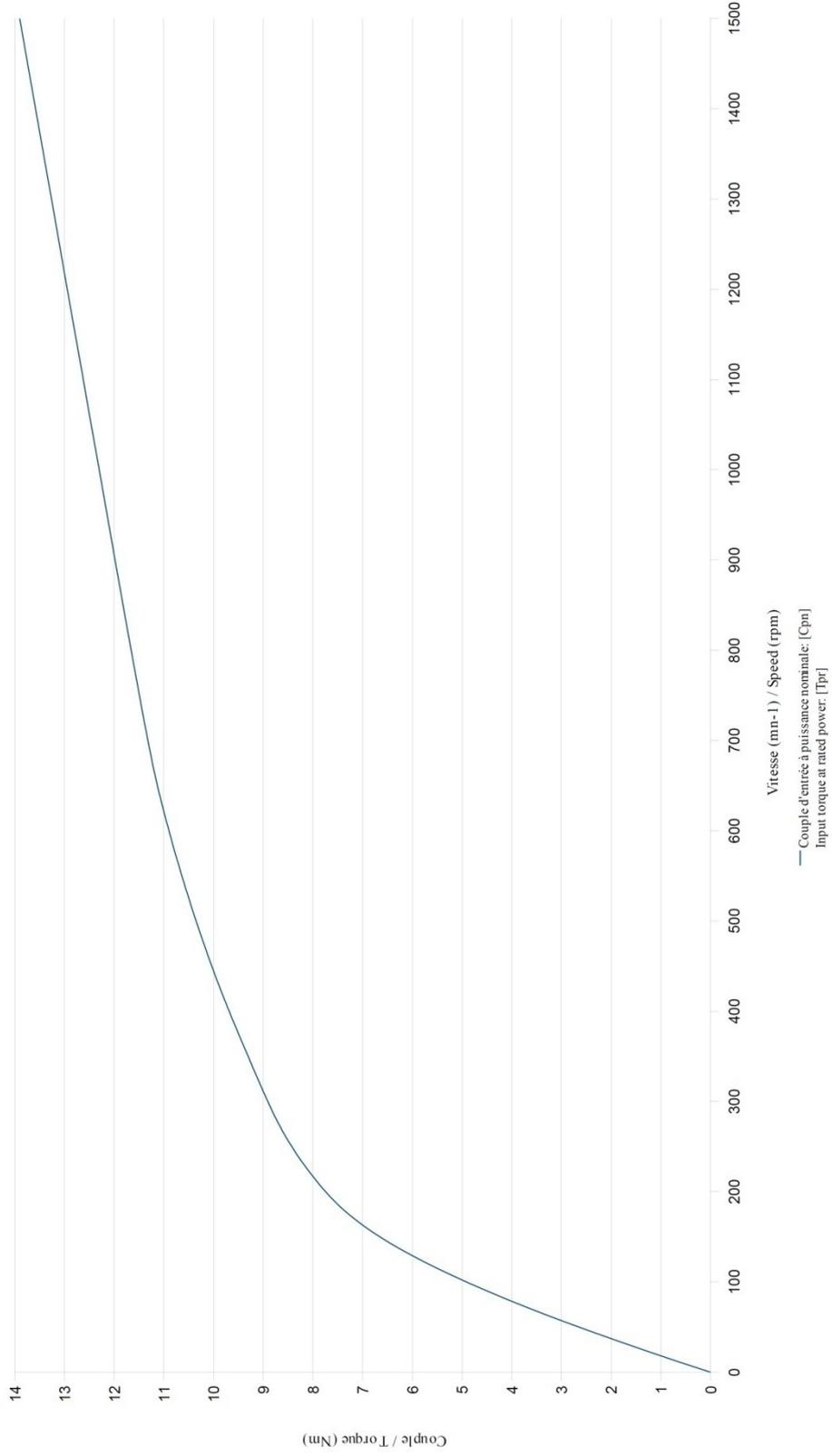


ALXION se réserve le droit de modifier toutes les données sans préavis. Pour plus d'information contacter notre site, internet: www.alxion.com, ainsi que notre Note d'application sur les Kits d'Alternateurs STK pour entraînement direct d'éolennes. ALXION keeps the right to modify all data without prior notice. For more information, consult our web site: www.alxion.com, and our application note related to ALXION STK permanent magnets frameless alternators for direct drive of wind turbines.

Edition de 02/11/2010

Alternateur / Alternator
145STK2M

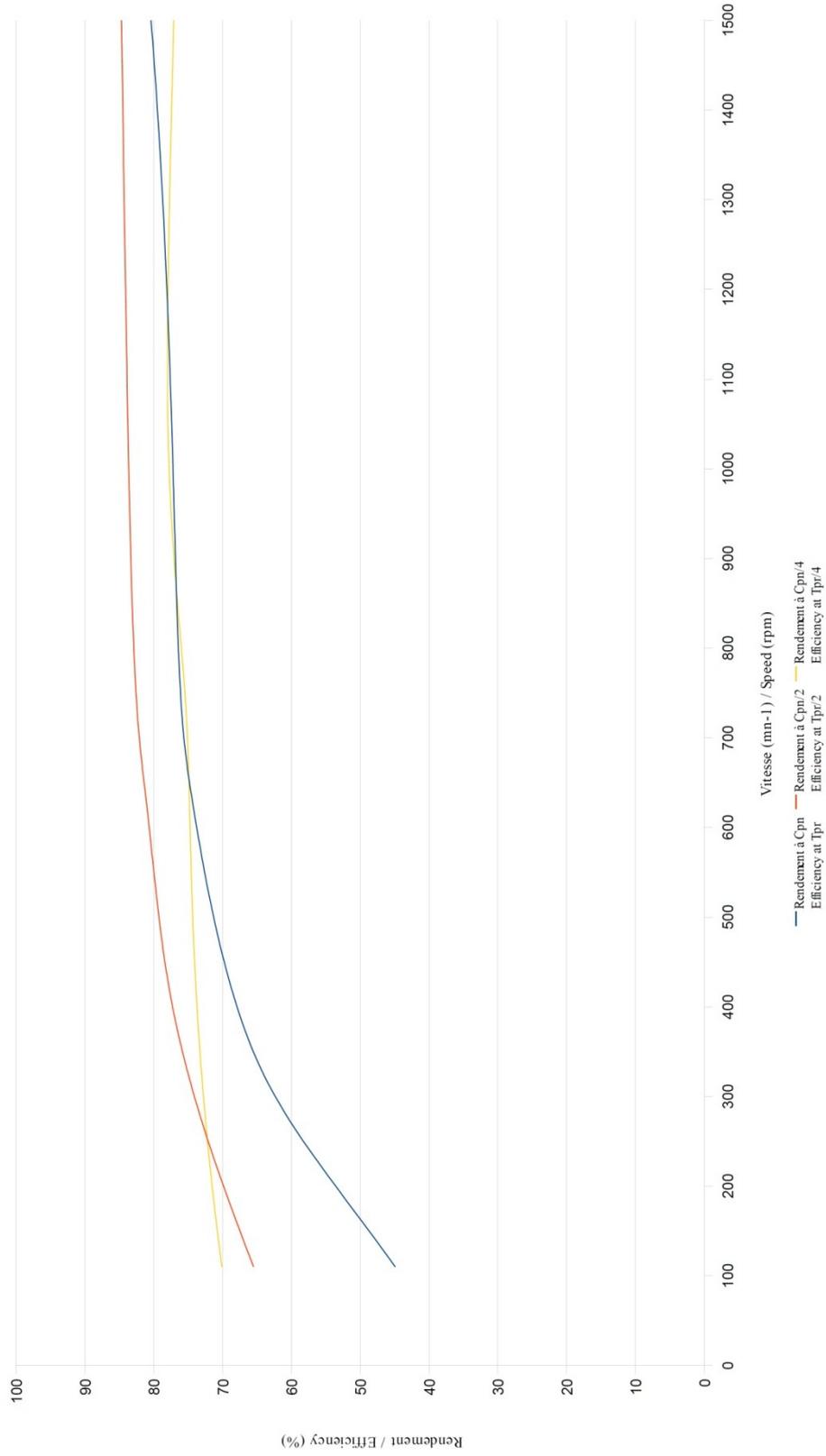
Couple d'entrée Cpn / Input torque Tpr



ALXION se réserve le droit de modifier toutes les données sans préavis. Pour plus d'information consultez notre site internet: www.alxion.com, ainsi que notre Note d'application sur les Kits d'Alternateurs STK pour entraînement direct d'éoliennes. ALXION keeps the right to modify all data without prior notice. For more information, consult our web site: www.alxion.com, and our application note related to ALXION STK permanent magnet framed alternators for direct drive of wind turbines.

Alternateur / Alternator
145STK2M

Rendement / Efficiency



ALXION se réserve le droit de modifier toutes les données sans préavis. Pour plus d'information consulter notre site internet: www.alxion.com, ainsi que notre Note d'application sur les Kits d'Alternateurs STK pour entraînement direct d'éoliennes. ALXION keeps the right to modify all data without prior notice. For more information, consult our web site: www.alxion.com, and our application note related to ALXION STK permanent magnet fransless alternators for direct drive of wind turbines.

Bibliografia

- [1] Pallabazzer R., *Sistemi di conversione eolica: La tecnologia delle moderne macchine del vento*, Milano, Ulrico Hoepli Editore S.p.A., 2011
- [2] Soppelsa M., *Fabbricare con la stampa 3D: Tecnologie, materiali e metodologie per la manifattura additiva*, Milano, Tecniche Nuove, 2015
- [3] <https://patents.google.com/patent/US4575330> visitato in data 9/4/2018
- [4] Gatto A., Iuliano L., *Prototipazione rapida: La tecnologia per la competizione globale*, Milano, Tecniche nuove, 1998
- [5] Gebhardt A., *Understanding Additive Manufacturing: Rapid Prototyping – Rapid Tooling – Rapid Manufacturing*, Munich, Carl Hanser Verlag, 2012
- [6] <http://www.arcam.com> visitato in data 4/5/2018
- [7] <https://www.optomec.com> visitato in data 6/5/2018
- [8] <https://3dprint.com> visitato in data 9/5/2018
- [9] Gibson I., Rosen D., Stucker B., *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping and Direct Digital Manufacturing*, 2 ed., New York, Springer Science+Business Media, 2015
- [10] <https://www.sharebot.it> visitato in data 16/5/2017
- [11] <http://www.stratasys.com> visitato in data 22/5/2018
- [12] http://www.ivanbortolin.it/wp-content/uploads/downloads/2012/08/Guida_a_Slic3r.pdf visitato in data 30/5/2018
- [13] <http://www.alxion.com/products/stk-alternators/> visitato in data 8/6/2018

- [14] Manwell J.F., McGowan J.G., Rogers A.L., *Wind energy explained: theory, design and application*, 2 ed., Chichester, John Wiley & Sons Ltd, 2009
- [15] Burton T., Jenkins N., Sharpe D., Bossanyi E., *Wind Energy Handbook*, 2 ed., Chichester, John Wiley & Sons Ltd, 2011
- [16] Gipe P., *Energia dal vento in piccola scala: tutto quello che è utile sapere sul micro e mini-eolico*; traduzione e cura dell'edizione italiana di Roberto Rizzo, Roma, Orme, 2013
- [17] Hau E., *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*, 3 ed., Berlin, Springer, 2013
- [18] *Renewables 2018 Global Status Report*, Renewable Energy Policy Network for the 21st century
- [19] <http://www.windside.com/products> visitato in data 18/6/2018
- [20] <http://www.etneo.com/turbina-ds700/> visitato in data 21/6/2018
- [21] Mukund R. Patel, *Wind and Solar Power Systems: Design, Analysis and Operation*, 2 ed., Boca Raton, CRC Press, 2006
- [22] <https://www.marlec.co.uk> visitato in data 29/6/2018