



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Edile

**GESTIONE DEL FINE VITA DELLE TURBINE EOLICHE: TECNICHE
DI RECUPERO, RIUTILIZZO E VALORIZZAZIONE DELLE
COMPONENTI**

**END-OF-LIFE MANAGEMENT OF WIND TURBINES: TECHNIQUES
FOR RECOVERY, REUSE AND VALORIZATION OF COMPONENTS**

Relatore: Chiar.mo

Prof. Ing. **MICHELE SERPILLI**

Tesi di Laurea di:

ALESSIA MANCINI

ANNO ACCADEMICO 2025/2026

INDICE

INTRODUZIONE	1
1. L'ENERGIA EOLICA	3
1.1. Il vento	3
1.2. Componenti delle turbine eoliche	5
1.2.1. Parti strutturali	6
1.2.1.1. Le pale	6
1.2.1.2. Il rotore	8
1.2.1.3. L'albero di trasmissione lento	8
1.2.1.4. L'albero di trasmissione veloce	8
1.2.1.5. La navicella o gondola	9
1.2.1.6. La torre	9
1.2.1.7. La fondazione	9
1.2.2. Parti non strutturali	10
1.2.2.1. Il sistema di frenaggio	10
1.2.2.2. Il moltiplicatore di giri	10
1.2.2.3. Il generatore elettrico	11
1.2.2.4. Il controllore elettronico	11
1.2.2.5. L'anemometro	12
1.2.2.6. La banderuola	12
1.2.2.7. Il meccanismo d'imbardata	12
1.2.2.8. Il sistema di raffreddamento	13
1.2.2.9. La connessione alla rete elettrica	13
1.3. Tipologia e classificazione delle turbine eoliche	14
1.3.1. Turbine eoliche onshore	16
1.3.2. Turbine eoliche offshore	17
1.3.2.1. Monopalo	19
1.3.2.2. Struttura a gravità (GBS)	20
1.3.2.3. Struttura a traliccio	21
1.3.2.4. Tripode	21

1.3.2.5.	Galleggianti	23
1.3.3.	Turbine eoliche ad asse orizzontale	26
1.3.4.	Turbine eoliche ad asse verticale	27
1.3.5.	Taglie delle turbine eoliche.....	27
2.	ANALISI DEI MATERIALI IMPIEGATI NELLE TURBINE EOLICHE	32
2.1.	Le pale.....	32
2.1.1.	Polimeri rinforzati con fibre	33
2.1.2.	Fibre di rinforzo	34
2.1.3.	Matrici polimeriche.....	36
2.1.4.	Struttura a sandwich.....	38
2.2.	La torre	40
3.	RECUPERO E RIUTILIZZO DELLE COMPONENTI E DEI MATERIALI.....	42
3.1.	Tecnologie di riciclaggio.....	44
3.1.1.	Metodi meccanici.....	45
3.1.2.	Metodi termici.....	47
3.1.2.1.	Processo di pirolisi	47
3.1.2.2.	Processo a letto fluidizzato	48
3.1.2.3.	Processo di pirolisi a microonde.....	49
3.1.3.	Metodi chimici.....	50
3.1.3.1.	Metodo del fluido supercritico	50
3.1.3.2.	Metodo di dissoluzione del solvente	51
3.1.3.3.	Metodo di liquefazione idrotermale (HTL).....	52
3.1.4.	Metodi alternativi.....	53
3.1.4.1.	Frammentazione mediante impulsi ad alta tensione (HVF)	53
3.1.4.2.	Processi elettrochimici per il recupero delle fibre	54
3.2.	Applicazioni dei materiali riciclati.....	55
3.2.1.	Riutilizzo e valorizzazione delle pale	55
3.2.2.	Estensione della vita utile e riutilizzo delle pale.....	55
3.2.3.	Riconversione delle pale per applicazioni strutturali.....	56
3.2.4.	Impiego dei materiali recuperati nel settore delle costruzioni	57

3.2.5.	Criticità e prospettive future	58
4.	ESEMPI DI RIUTILIZZO DELLE COMPONENTI.....	59
4.1.	Produzione di materiali edili	59
4.1.1.	Produzione di materiali cementizi	59
4.1.2.	Pannelli isolanti.....	61
4.1.3.	Pavimenti drenanti	63
4.2.	Architettura	64
4.2.1.	Parco giochi per bambini	64
4.2.1.1.	Wikado a Rotterdam (Paesi Bassi)	64
4.2.1.2.	Terneuzen (Paesi Bassi)	65
4.2.2.	Tiny House.....	67
4.2.3.	Sedute pubbliche, pensiline per autobus e tettoie	69
4.2.3.1.	Tettoia per biciclette ad Aalborg (Danimarca)	70
4.2.3.2.	Tettoia per la ricarica di macchine elettriche a Dundee (Scozia).....	71
4.2.3.3.	Sedute pubbliche a Rotterdam (Paesi Bassi)	73
4.2.3.4.	Sedute pubbliche ad Avon (Stati Uniti d'America)	75
4.2.3.5.	Sedute pubbliche nel parco eolico di Meenadreen (Irlanda)	76
4.2.4.	Elementi di facciata non strutturali (Svezia).....	78
4.3.	Infrastruttura.....	79
4.3.1.	Ponte pedonale	79
4.3.1.1.	Primo ponte pedonale a Szprotawa (Polonia)	79
4.3.1.2.	Secondo ponte pedonale a Cork (Irlanda)	80
4.3.1.3.	Progetto sperimentale del ponte pedonale Re – Wind (Irlanda).....	81
4.3.2.	Barriera antirumore	82
4.3.3.	Torre panoramica	84
	CONCLUSIONE	86
	BIBLIOGRAFIA	88
	SITOGRAFIA.....	93

INTRODUZIONE

Negli ultimi decenni il settore dell'energia eolica ha assunto un ruolo sempre più centrale nel panorama energetico globale, rappresentando una delle principali tecnologie rinnovabili a supporto della transizione verso sistemi di produzione elettrica a basse emissioni di carbonio. La crescente diffusione degli impianti eolici, sia onshore che offshore, ha contribuito alla riduzione dell'impiego di combustibili fossili e alla mitigazione degli effetti del cambiamento climatico, favorendo lo sviluppo di un sistema energetico più sostenibile.

Tuttavia, il concetto di sostenibilità non può limitarsi esclusivamente alla fase di produzione dell'energia, ma deve estendersi all'intero ciclo di vita delle infrastrutture energetiche. In questo contesto assume un ruolo fondamentale il paradigma dell'economia circolare, un modello che mira a superare il tradizionale approccio lineare basato su produzione, utilizzo e smaltimento, promuovendo invece il mantenimento del valore dei materiali e delle risorse attraverso strategie di riduzione dei rifiuti, recupero, riutilizzo, riciclo e valorizzazione delle componenti a fine vita.

L'applicazione dei principi dell'economia circolare al settore eolico rappresenta oggi una delle principali sfide tecnologiche e ambientali. Le prime turbine eoliche installate stanno raggiungendo progressivamente il termine della loro vita utile, rendendo necessario sviluppare strategie efficaci per la gestione del decommissioning e per il recupero dei materiali che compongono gli aerogeneratori.

Particolare attenzione è rivolta alle pale eoliche, costituite prevalentemente da materiali compositi avanzati che garantiscono elevate prestazioni meccaniche durante l'esercizio ma che presentano notevoli criticità nella fase di smaltimento e recupero. Accanto alle pale, anche altre componenti delle turbine, quali torri, fondazioni e sistemi meccanici, richiedono approcci specifici finalizzati alla massimizzazione del recupero delle risorse e alla riduzione dell'impatto ambientale.

In questo scenario, il recupero e il riutilizzo delle componenti non rappresentano solamente una soluzione alla gestione dei rifiuti, ma costituiscono un'opportunità per generare nuovo valore attraverso applicazioni alternative nei settori dell'edilizia, dell'architettura e delle infrastrutture. Il riutilizzo strutturale delle pale eoliche e il

reinserimento dei materiali recuperati nei processi produttivi si configurano come esempi concreti di implementazione dei principi dell'economia circolare nel settore delle energie rinnovabili.

La presente tesi si propone di analizzare il tema della gestione del fine vita delle turbine eoliche attraverso una valutazione delle principali tecniche di recupero, riutilizzo e valorizzazione delle componenti. In particolare, vengono approfonditi i materiali impiegati nella costruzione delle turbine, le tecnologie di riciclo attualmente disponibili e le possibili applicazioni dei materiali recuperati, evidenziando le opportunità e le criticità connesse all'adozione di modelli circolari.

Il lavoro è articolato in quattro capitoli. Nel primo capitolo vengono introdotti i principi dell'energia eolica, il funzionamento degli aerogeneratori e le principali tipologie di turbine. Il secondo capitolo analizza i materiali impiegati nella loro realizzazione, con particolare riferimento ai compositi utilizzati nelle pale. Il terzo capitolo approfondisce le tecniche di recupero e riciclo delle componenti e i processi di valorizzazione dei materiali. Infine, il quarto capitolo presenta esempi concreti di riutilizzo delle componenti dismesse in ambito architettonico, infrastrutturale e costruttivo.

L'obiettivo dell'elaborato è mostrare come una corretta gestione del fine vita delle turbine eoliche, orientata ai principi dell'economia circolare, possa contribuire a rendere il settore eolico non soltanto una fonte di energia rinnovabile, ma un modello di sviluppo realmente sostenibile lungo l'intero ciclo di vita delle sue infrastrutture.

1. L'ENERGIA EOLICA

L'energia eolica rappresenta una delle principali fonti energetiche rinnovabili impiegate nella transizione verso sistemi di produzione elettrica sostenibili e a basse emissioni di carbonio. Essa sfrutta l'energia cinetica associata al moto delle masse d'aria atmosferiche, convertendola in energia meccanica e successivamente in energia elettrica mediante aerogeneratori.

Le turbine eoliche rivestono un ruolo di primaria importanza nei sistemi di produzione di energia da fonti rinnovabili, in quanto contribuiscono in maniera significativa alla riduzione del consumo di combustibili fossili e alla mitigazione del cambiamento climatico.

1.1. Il vento

Il vento viene definito come una massa d'aria che si forma a causa delle differenze di pressione nell'atmosfera terrestre, principalmente dovute alle differenze di temperatura. Il Sole, infatti, riscalda la superficie terrestre in modo non uniforme, creando zone di alta e bassa pressione.

L'intenso irraggiamento di una determinata area della superficie terrestre determina un significativo riscaldamento del suolo e, conseguentemente, dell'aria sovrastante. Quest'ultima, espandendosi, subirà una diminuzione della densità e, divenendo più leggera, tenderà a sollevarsi, generando una zona di bassa pressione al suolo. Poiché l'aria è libera di muoversi, tale depressione viene compensata dall'afflusso di masse d'aria più fredde provenienti dalle aree circostanti, caratterizzate da pressione più elevata. Il movimento di queste masse d'aria, diretto a ristabilire l'equilibrio pressorio, è all'origine del vento.

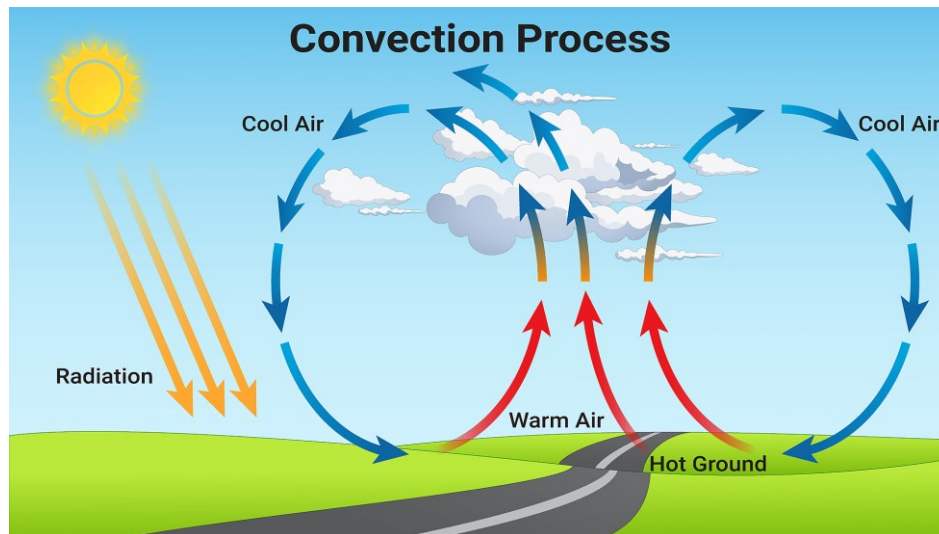


Figura 1.1 Schema sulla formazione del vento

Nel caso in cui la differenza di pressione tra aree a bassa e ad alta pressione sia modesta, i venti risultanti saranno deboli; al contrario, differenze di pressione marcate e repentine possono generare venti intensi, fino a dar luogo a fenomeni estremi come gli uragani.

Tuttavia, lo spostamento dell'aria dalle zone ad alta pressione verso quelle a bassa pressione non avviene lungo traiettorie rettilinee. A causa della rotazione terrestre attorno al proprio asse, tali movimenti assumono una componente rotatoria. Questo fenomeno, noto come effetto Coriolis, è determinato dalla variazione della forza centrifuga associata alla rotazione terrestre alle diverse latitudini.

I venti possono essere:

- Costanti: quando spirano costantemente nella stessa direzione;
- Periodici: quando spirano alternativamente in due sensi opposti;
- Variabili: quando spirano saltuariamente.

1.2. Componenti delle turbine eoliche

L'analisi del funzionamento delle turbine eoliche richiede un approccio ingegneristico basato sulla scomposizione del sistema nei suoi sottosistemi costitutivi e sull'esame delle interazioni tra di essi.

Le componenti possono essere distinte in elementi strutturali, deputati al sostegno e alla resistenza meccanica della struttura, ed elementi non strutturali, responsabili delle funzioni di conversione energetica, controllo, sicurezza e gestione operativa dell'impianto.

Il presente paragrafo è dedicato alla descrizione dei principali componenti del generatore eolico, descrivendone le caratteristiche costruttive, le funzioni operative e le modalità di interazione all'interno del sistema.

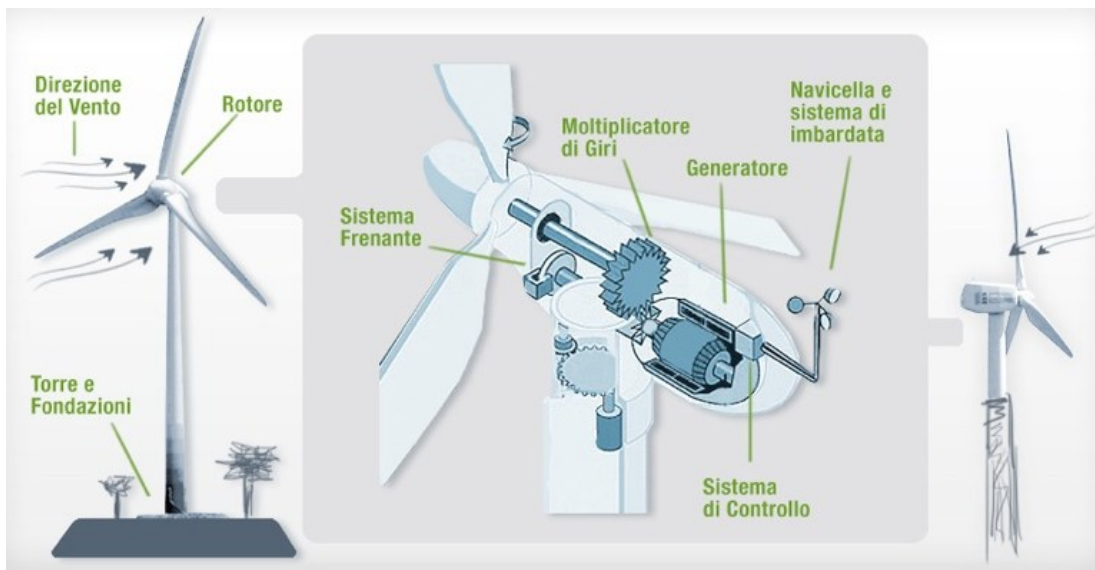


Figura 1.2 Schema delle componenti della turbina eolica

Parti strutturali:

1. Le pale;
2. Il rotore;
3. L'albero di trasmissione lento;

4. L'albero di trasmissione veloce;
5. La navicella o gondola;
6. La torre;
7. La fondazione.

Parti non strutturali:

1. Il sistema di frenaggio;
2. Il moltiplicatore di giri;
3. Il generatore elettrico;
4. Il controllore elettronico;
5. L'anemometro;
6. La banderuola;
7. Il meccanismo di imbardata;
8. Il sistema di raffreddamento;
9. La connessione alla rete elettrica.

Si va ora ad analizzare nel dettaglio le parti appena menzionate.

1.2.1. Parti strutturali

1.2.1.1. Le pale

La progettazione delle pale eoliche riveste un ruolo cruciale ai fini dell'affidabilità e delle prestazioni dell'aerogeneratore, richiedendo in particolare un'adeguata resistenza a fatica. Le pale sono infatti soggette a sollecitazioni cicliche e variabili durante la rotazione, dovute al peso proprio e a eventuali accumuli di ghiaccio, nonché alle fluttuazioni, anche repentine, dell'intensità e della direzione del vento. Un ulteriore contributo alle

sollecitazioni è dato dall'effetto dello strato limite atmosferico, in virtù del quale la velocità del vento aumenta con la quota, determinando carichi aerodinamici differenti tra le porzioni superiori e inferiori del rotore.

Dal punto di vista funzionale, le pale sono progettate secondo criteri aerodinamici con l'obiettivo di massimizzare la conversione dell'energia cinetica del vento in energia meccanica, successivamente trasmessa all'albero del rotore.

Negli ultimi decenni si è osservato un significativo incremento delle dimensioni delle pale: dai circa 10 – 15 m degli anni Ottanta si è giunti a lunghezze dell'ordine di 65 m per turbine onshore e fino a circa 120 m per applicazioni offshore. L'aumento della lunghezza comporta un incremento della velocità periferica e della superficie spazzata, con conseguente maggiore energia intercettata.

Le pale dei moderni aerogeneratori sono realizzate prevalentemente in materiali compositi, quali fibre di vetro o polimeri rinforzati con fibra di carbonio. L'impiego di materiali innovativi, unitamente all'evoluzione delle tecniche di progettazione e simulazione, ha consentito lo sviluppo di pale di dimensioni maggiori con incrementi di massa relativamente contenuti. In particolare, l'utilizzo della fibra di carbonio consente di ottenere strutture più leggere e al contempo più resistenti, risultando particolarmente idonee per siti caratterizzati da forti venti.

Le pale operano generalmente a velocità di rotazione comprese tra i 15 e 40 giri al minuto; tuttavia, in alcune configurazioni, è previsto il funzionamento a velocità variabile, in quanto il regime di rotazione è limitato dalla velocità massima ammissibile alla punta della pala.

Infine, il numero di pale dipende dalla specifica configurazione progettuale; tuttavia, la soluzione più diffusa è quella a tre pale, in quanto rappresenta un compromesso ottimale tra efficienza aerodinamica, stabilità operativa e costi di realizzazione.

1.2.1.2. Il rotore

Il rotore costituisce la parte rotante della turbina eolica ed è composto principalmente da due elementi: le pale e il mozzo.

Le pale, investite dal flusso d'aria, sono soggette a forze aerodinamiche, in particolare all'effetto "lift", che ne determinano la rotazione attorno all'asse del rotore. Tale moto si instaura e si mantiene entro un intervallo operativo di velocità del vento generalmente compreso tra circa 5 m/s (velocità di avviamento) e 25 m/s (velocità di arresto per sicurezza).

Durante il funzionamento, le pale realizzano la conversione dell'energia cinetica del vento in energia meccanica sotto forma di moto rotatorio, trasmettendola al mozzo. Quest'ultimo funge da elemento di collegamento strutturale e di trasmissione verso i componenti successivi della catena cinematica, quali l'albero a bassa velocità, il riduttore, l'albero ad alta velocità e il generatore elettrico.

1.2.1.3. L'albero di trasmissione lento

L'albero principale è il componente che collega il mozzo del rotore al moltiplicatore di giri. Nelle turbine eoliche di potenza pari a circa 1 MW, il rotore presenta una velocità di rotazione relativamente bassa, generalmente compresa tra 20 e 30 giri al minuto (RPM), mentre nelle turbine di maggiore potenza tale valore può raggiungere fino a circa 60 RPM. All'interno dell'albero sono inoltre alloggiati le tubazioni del sistema idraulico, utilizzato per l'azionamento del sistema di frenatura aerodinamica.

1.2.1.4. L'albero di trasmissione veloce

L'albero di trasmissione veloce opera a una velocità di rotazione pari a circa 1500 giri al minuto (RPM) ed è responsabile dell'alimentazione del generatore elettrico. Su tale componente è inoltre installato un disco di frenaggio meccanico di emergenza, utilizzato per l'arresto della macchina in condizioni critiche o di malfunzionamento del sistema.

1.2.1.5. La navicella o gondola

La navicella o gondola, costituisce l'involucro che ospita i principali componenti funzionali dell'aerogeneratore. Essa svolge una duplice funzione: da un lato protegge le apparecchiature interne dagli agenti atmosferici e dalle condizioni ambientali esterne, dall'altro è direttamente collegata al rotore, garantendo il corretto trasferimento delle sollecitazioni meccaniche.

Le dimensioni della navicella possono essere tali da consentire l'accesso al personale tecnico durante le operazioni di manutenzione e riparazione. Essa è installata nella parte sommitale della torre e rappresenta l'elemento di connessione tra il rotore e i principali sistemi di conversione e controllo dell'energia.

1.2.1.6. La torre

La torre sostiene il peso della navicella e del rotore, svolgendo la funzione di struttura portante dell'intero aerogeneratore. In linea generale, un'elevata altezza della torre rappresenta un vantaggio, in quanto la velocità del vento tende ad aumentare con la quota rispetto al suolo. Tuttavia, l'incremento dell'altezza è limitato da considerazioni legate alla stabilità strutturale dell'impianto e ai relativi costi di realizzazione.

Le principali configurazioni di torre impiegate nelle turbine eoliche ad asse orizzontale sono rappresentate dalle torri tubolari, dalle torri reticolari e dalle torri ibride.

1.2.1.7. La fondazione

Le fondazioni delle turbine eoliche risultano più complesse rispetto a quelle di altre strutture, a causa delle significative sollecitazioni aerodinamiche generate dal rotore. In particolare, la spinta del vento tende a esercitare una forza di ribaltamento sulla turbina, che la fondazione deve essere in grado di contrastare indipendentemente dalla direzione del carico, considerando che il sistema di imbardata consente al rotore di ruotare fino a 360° per orientarsi rispetto a qualsiasi direzione del vento.

A seconda delle condizioni del sito, è possibile adottare differenti tipologie di fondazione. Nel caso delle turbine eoliche onshore, la progettazione dipende principalmente dalle caratteristiche geotecniche del terreno o della roccia. Per quanto riguarda le turbine eoliche offshore, la tipologia di fondazione varia in funzione della profondità dell'acqua e della natura del fondale marino.

1.2.2. Parti non strutturali

1.2.2.1. Il sistema di frenaggio

Il sistema di frenatura di una turbina eolica può essere di tipo idraulico, meccanico o elettrico. Il freno idraulico è generalmente installato sull'albero di trasmissione lento ed è impiegato durante il normale funzionamento dell'aerogeneratore. Il freno meccanico, invece, è posizionato sull'albero di trasmissione veloce e interviene principalmente in condizioni di emergenza, ad esempio in caso di guasto del sistema di frenatura idraulico o durante operazioni di manutenzione e riparazione. Il freno elettrico, infine, è adottato in configurazioni più avanzate e complesse di aerogeneratori, dove contribuisce al controllo e alla gestione della velocità di rotazione del sistema.

1.2.2.2. Il moltiplicatore di giri

Il moltiplicatore di giri è un componente meccanico che collega l'albero di trasmissione lento all'albero di trasmissione veloce. La sua funzione consiste nell'incrementare la velocità di rotazione tra i due alberi, mediante un opportuno rapporto di trasmissione, che può raggiungere valori fino a circa 1:75. In tal modo, la velocità di rotazione viene aumentata da un intervallo di circa 20 – 60 giri al minuto (RPM) fino a valori compresi tra 1200 e 1500 RPM, idonei al corretto funzionamento del generatore elettrico.

1.2.2.3. Il generatore elettrico

Il generatore elettrico, detto anche alternatore, è una macchina elettrica che converte l'energia meccanica in corrente elettrica alternata. Nel caso delle turbine eoliche, tale energia meccanica è fornita dalla rotazione del rotore, sebbene in generale possa derivare anche da altre fonti, quali turbine idrauliche, a vapore o a gas, motori a combustione interna o Diesel.

Gli alternatori sono costituiti da due parti fondamentali: una parte fissa, denominata statore, e una parte rotante, denominata rotore. Su entrambe sono disposti avvolgimenti in rame opportunamente isolati. Gli avvolgimenti vengono distinti in induttore e indotto. A seconda della configurazione costruttiva dell'alternatore, l'induttore può essere collocato sul rotore e l'indotto sullo statore, oppure viceversa.

Gli alternatori sincroni sono macchine reversibili, in quanto possono funzionare anche come motori elettrici, ovvero sono in grado di trasformare energia elettrica in energia meccanica. In tali macchine, l'avvolgimento indotto è generalmente collocato sullo statore, mentre l'induttore si trova sul rotore ed è costituito da elettromagneti alimentati in corrente continua (poli di eccitazione).

Negli alternatori a magneti permanenti, i poli di eccitazione sono sostituiti da magneti permanenti, eliminando la necessità di alimentazione in corrente continua per il campo magnetico. Negli alternatori a ferro rotante, invece, sia l'indotto sia l'induttore sono fissi, mentre la generazione di energia elettrica avviene grazie al movimento del rotore, costituito da un cilindro di ferro lamellato con denti periferici che svolgono una funzione analoga a quella dei poli magnetici negli alternatori sincroni.

1.2.2.4. Il controllore elettronico

Il controllore elettronico è un sistema di gestione basato su un computer integrato, il cui compito principale è monitorare lo stato generale dell'aerogeneratore e gestire il sistema di imbardata. Esso consente di verificare continuamente i parametri operativi della turbina e di garantire il corretto orientamento del rotore rispetto alla direzione del vento.

In presenza di anomalie o malfunzionamenti, quali il surriscaldamento del moltiplicatore di giri o del generatore elettrico, il controllore interviene automaticamente arrestando l'aerogeneratore per prevenire danni ai componenti. Contestualmente, il sistema attiva una segnalazione di allarme e comunica l'evento al personale tecnico mediante un collegamento remoto, generalmente realizzato tramite modem o sistemi di trasmissione dati equivalenti.

1.2.2.5. L'anemometro

L'anemometro è lo strumento utilizzato per la misurazione della velocità del vento. Le informazioni acquisite vengono elaborate dal controllore elettronico, il quale le utilizza per la gestione operativa dell'aerogeneratore. In particolare, il sistema autorizza il funzionamento della turbina qualora la velocità del vento rientri nell'intervallo operativo definito come range di set-point, generalmente compreso tra 5 e 25 m/s, mentre ne impedisce l'avviamento o ne determina l'arresto nel caso in cui tali condizioni non siano rispettate.

1.2.2.6. La banderuola

La banderuola è lo strumento utilizzato per la rilevazione della direzione del vento. Le informazioni da essa fornite vengono elaborate dal controllore elettronico, il quale le impiega per orientare l'aerogeneratore sopravento mediante il sistema di imbardata, al fine di ottimizzare l'efficienza di cattura dell'energia eolica.

1.2.2.7. Il meccanismo d'imbardata

Il sistema di imbardata utilizza un motore elettrico per orientare il rotore e la navicella in direzione sopravento. Tale meccanismo è tipico delle turbine eoliche di tipo "upwind", mentre nelle configurazioni "downwind" non risulta necessario, poiché il rotore opera già sottovento.

Il sistema è comandato da un controllore elettronico che riceve ed elabora i dati relativi alla direzione del vento forniti dalla banderuola. Sulla base di tali informazioni, il controllore attiva il motore di orientamento per correggere progressivamente la posizione della navicella. La regolazione dell'angolo avviene generalmente in modo graduale, con variazioni di pochi gradi per volta, al fine di adattarsi alle variazioni della direzione del vento e garantire il funzionamento ottimale dell'aerogeneratore.

1.2.2.8. Il sistema di raffreddamento

Il sistema di raffreddamento è costituito da un ventilatore oppure da un sistema a circolazione d'acqua, finalizzati alla dissipazione del calore prodotto dal generatore elettrico. Esso include inoltre un'unità specifica per il raffreddamento dell'olio presente nel moltiplicatore di giri, al fine di garantirne il corretto funzionamento e prevenire fenomeni di surriscaldamento dei componenti.

1.2.2.9. La connessione alla rete elettrica

La connessione alla rete elettrica può essere di tipo diretto o indiretto. Nel primo caso, il generatore è collegato direttamente a una rete trifase in corrente alternata. Nella configurazione indiretta, invece, l'energia elettrica prodotta dalla turbina attraversa una serie di apparecchiature elettriche, le quali ne consentono l'adattamento ai requisiti della rete di trasmissione esterna.

I generatori asincroni, in particolare, sono in grado di effettuare automaticamente tale adattamento, facilitando l'integrazione dell'energia prodotta nel sistema elettrico.

1.3. Tipologia e classificazione delle turbine eoliche

Il funzionamento di una turbina eolica si basa su una sequenza di processi progettati per convertire l'energia cinetica del vento in energia elettrica. In primo luogo, le pale, opportunamente progettate secondo criteri aerodinamici, intercettano il flusso d'aria, trasformando l'energia cinetica del vento in energia meccanica sotto forma di moto rotatorio. Tale movimento viene trasmesso al rotore, solidale con l'albero principale, il quale costituisce l'elemento centrale del sistema di trasmissione della potenza.

L'energia meccanica prodotta dalla rotazione del rotore viene trasmessa a un sistema di trasmissione, generalmente costituito da un riduttore di velocità. La funzione di tale dispositivo è quella di adeguare la velocità di rotazione alle esigenze del generatore elettrico: il rotore è caratterizzato da una bassa velocità di rotazione, ma è comunque in grado di trasmettere una forza significativa all'asse. Questo avviene perché il vento agisce su pale di grandi dimensioni, generando un momento torcente rilevante anche a velocità contenute. Il generatore elettrico, al contrario, richiede una velocità di rotazione più elevata per funzionare in modo efficiente; per questo motivo si utilizza un riduttore, che consente di trasformare un moto lento, ma con forte azione rotazionale, in un moto più rapido adatto alla produzione di energia elettrica. L'albero, una volta portato alla velocità opportuna, è collegato al generatore elettrico, nel quale l'energia meccanica viene convertita in energia elettrica attraverso l'interazione tra campi magnetici e avvolgimenti conduttori, producendo corrente alternata.

Le turbine eoliche possono essere classificate secondo diversi criteri, tra cui il sito di installazione, le caratteristiche costruttive, la potenza nominale, le dimensioni e la configurazione impiantistica.

Una classificazione può essere effettuata in base al sito di installazione delle turbine eoliche:

- Turbine eoliche onshore: sono in genere situate sulla terraferma;
- Turbine eoliche offshore: sono in genere situate al largo della costa.



Figura 1.3 Confronto tra turbine eoliche onshore e offshore

Un'ulteriore distinzione fondamentale riguarda l'orientamento dell'asse di rotazione del rotore, che consente di individuare due principali tipologie:

- Turbine eoliche ad asse orizzontale: in cui il rotore è disposto parallelamente alla direzione del vento e orientato attivamente o passivamente rispetto ad esso;
- Turbine eoliche ad asse verticale: il cui funzionamento è indipendente dalla direzione di provenienza del vento incidente.

Gli aerogeneratori possono inoltre essere suddivisi in base alla taglia, definita in termini di potenza nominale e diametro del rotore. Si distinguono, in particolare:

- Aerogeneratori di piccola taglia;
- Aerogeneratori di media taglia;
- Aerogeneratori di grande taglia.

L'evoluzione tecnologica del settore eolico è stata caratterizzata da un progressivo incremento delle dimensioni delle turbine. Tale tendenza è motivata sia da esigenze energetiche, legate alla massimizzazione dell'energia producibile, sia da considerazioni economiche connesse alla riduzione dei costi unitari di produzione e installazione.

1.3.1. Turbine eoliche onshore

Le turbine eoliche onshore sono installate sulla terraferma e possono raggiungere altezze superiori ai 100 metri. I principali componenti di tali impianti sono il rotore, la navicella, la torre e la fondazione. Il rotore è generalmente costituito da tre o più pale realizzate con materiali leggeri, quali la fibra di vetro o la fibra di carbonio. La torre, solitamente in acciaio o in calcestruzzo, sostiene il rotore e la navicella, mentre la fondazione ha il compito di ancorare la struttura al suolo, garantendone la stabilità anche in presenza di forti venti.

Le turbine eoliche operano in un intervallo di velocità del vento compreso indicativamente tra 12 e 90 km/h. Quando la velocità del vento supera la cosiddetta velocità di avviamento (cut-in), le pale iniziano a ruotare, consentendo la produzione di energia. Il rotore continua a funzionare fino al raggiungimento della velocità di arresto (cut-out), pari a circa 25 m/s, oltre tale soglia, il sistema viene arrestato per evitare danni strutturali. Analogamente, quando la velocità del vento scende al di sotto della velocità minima operativa, il rotore si arresta.

In ambito terrestre, i venti sono influenzati dalle differenze di pressione atmosferica tra terra e mare. Durante le ore diurne, la terra si riscalda più rapidamente rispetto alla superficie marina, determinando la risalita dell'aria sovrastante e la formazione di una zona di bassa pressione. Tale condizione richiama aria più fredda e densa proveniente dal mare verso la terraferma, generando brezze caratteristiche. Rispetto ai venti di origine marina, quelli che interessano la terraferma tendono a presentare maggiore regolarità e continuità.

Il costo medio dell'energia eolica onshore varia sensibilmente in funzione della localizzazione dell'impianto, delle sue dimensioni e capacità. Negli ultimi anni, tali costi hanno registrato una significativa riduzione, grazie ai progressi tecnologici, alle economie di scala e ai miglioramenti nelle catene di approvvigionamento e nei processi produttivi.

1.3.2. Turbine eoliche offshore

Le pale del rotore sono elementi aerodinamici di forma allungata e curva, fissati al mozzo, e possono raggiungere lunghezze fino a circa 120 metri. L'albero principale è un componente cilindrico di grandi dimensioni che collega il mozzo del rotore al moltiplicatore di giri e al generatore situati nella navicella. Esso è generalmente realizzato in acciaio e può avere una lunghezza fino a circa 30 metri.

Una turbina eolica è costituita da diversi componenti fondamentali, tra cui le pale del rotore, la torre e la fondazione.

Le pale del rotore hanno la funzione di intercettare l'energia cinetica del vento e convertirla in energia meccanica rotazionale. Tale energia viene trasmessa, attraverso il sistema di trasmissione, al generatore, che provvede alla sua conversione in energia elettrica. L'energia prodotta viene successivamente adattata tramite sistemi di conversione elettrica, passando da corrente alternata a corrente continua per esigenze di trasmissione e controllo, e quindi nuovamente convertita in corrente alternata prima dell'immissione nella rete elettrica nazionale tramite una sottostazione.

La torre rappresenta la struttura portante che sostiene la navicella e il rotore, è solitamente realizzata in acciaio o calcestruzzo e può raggiungere altezze prossime ai 100 metri.

Per quanto concerne le fondazioni, la scelta della soluzione progettuale dipende in maniera determinante dalla profondità del sito di installazione. Tali strutture devono essere dimensionate in modo da sopportare efficacemente tutte le azioni e i carichi agenti, garantendo al contempo adeguati livelli di sicurezza e stabilità. L'individuazione della tipologia di fondazione più idonea riveste un ruolo cruciale sia sotto il profilo tecnico sia sotto il profilo economico; tale aspetto ha assunto particolare rilevanza negli ultimi anni, in considerazione della progressiva delocalizzazione dei parchi eolici offshore verso aree sempre più distanti dalla costa. In questo contesto, ogni componente deve essere progettato e ottimizzato con elevato grado di dettaglio, al fine di prevenire criticità prestazionali e contenere gli interventi manutentivi.

Sussistono, tuttavia, diversi fattori limitanti che condizionano l'applicabilità di tali impianti. Tra questi, la profondità del fondale rappresenta un parametro determinante nella definizione dei costi di installazione: all'aumentare della profondità, infatti, si

registra un incremento dei costi dovuto all'impiego di tecnologie più avanzate e specializzate, con conseguenti ripercussioni sull'investimento complessivo e sulla redditività del parco eolico.

Ulteriori criticità sono associate alle condizioni meteomarine. In particolare, aree caratterizzate da elevata altezza d'onda rendono più complesse le operazioni di installazione e manutenzione, richiedendo maggiori risorse operative ed economiche. Inoltre, tali condizioni possono compromettere l'integrità delle fondazioni, favorendo fenomeni quali l'erosione del fondale marino, che determina un progressivo indebolimento strutturale e impone attività di monitoraggio e manutenzione più frequenti.

Dal punto di vista localizzativo, la tendenza progettuale è quella di collocare gli impianti a maggiore distanza dalla linea di costa, al fine di sfruttare regimi di vento più intensi e costanti e di ridurre l'impatto visivo e paesaggistico. Tale scelta consente inoltre l'installazione di turbine di maggiore taglia e potenza nominale. Tuttavia, l'allontanamento dalla costa comporta generalmente un incremento della profondità del fondale, con le criticità sopra descritte. Ne consegue che la configurazione ottimale di un parco eolico offshore è rappresentata da un compromesso tra distanza dalla costa e contenuta profondità del sito.

Particolare attenzione deve essere inoltre rivolta alle caratteristiche geotecniche del sito, incluse la composizione del terreno e le interazioni suolo-fondazione, aspetti che assumono maggiore rilevanza in aree soggette a fenomeni naturali quali eventi sismici, tsunami o condizioni meteorologiche estreme. Ulteriori elementi di valutazione riguardano la stratigrafia del fondale marino e le possibili interferenze con le rotte di navigazione.

In funzione della profondità del fondale, delle condizioni ambientali e delle condizioni ambientali marine, sono state pertanto sviluppate e adottate nel tempo diverse soluzioni progettuali per le fondazioni delle turbine eoliche offshore.

1.3.2.1. Monopalo

L'installazione delle fondazioni monopalo (monopile) prevede l'infissione nel fondale marino di monopali in acciaio mediante tecniche idrauliche. Tali elementi presentano generalmente un peso compreso tra 500 e 800 tonnellate, un diametro dell'ordine di 5 – 6 metri e una lunghezza variabile tra 50 e 60 metri. Questa tipologia di fondazione risulta particolarmente idonea per siti caratterizzati da profondità d'acqua comprese tra 0 e 30 metri.

Nonostante la relativa semplicità strutturale, è necessario considerare con attenzione le problematiche connesse al trasporto dei monopali dal sito di produzione fino alla costa, dove vengono successivamente imbarcati e trasferiti via mare verso l'area di installazione. In particolare, il notevole diametro degli elementi richiede la pianificazione di percorsi specifici nel caso di trasporto su gomma, costituendo potenzialmente un fattore limitante per le dimensioni stesse del palo. Il trasporto offshore, invece, avviene generalmente mediante stivaggio dei monopali su chiatte e non presenta criticità rilevanti.

Le operazioni di installazione sono eseguite mediante attrezzature installate su navi di supporto o su piattaforme a sollevamento idraulico, dotate di gru con adeguata capacità di sollevamento, necessaria per la movimentazione sia del monopalo sia del martello di infissione. L'infissione per battitura può risultare condizionata dalla presenza di ostacoli nel fondale, quali massi, che ne compromettono l'efficacia; inoltre, in presenza di substrati particolarmente compatti, può rendersi necessario un carotaggio preliminare del foro destinato ad accogliere il palo.

A differenza di altre fondazioni, i monopali non richiedono una preparazione significativa del fondale. Tuttavia, essi sono soggetti a fenomeni di erosione locale indotti da onde e correnti, che possono compromettere la stabilità della struttura; per tale motivo, si adottano misure di mitigazione quali sistemi di protezione del fondale o una maggiore profondità di infissione.

Dal punto di vista della risposta dinamica, la fondazione a monopalo non si comporta come un vincolo perfettamente rigido, risultando in grado di attenuare efficacemente le sollecitazioni aerodinamiche trasmesse dal rotore.

Questa tipologia di fondazione rappresenta attualmente la soluzione più diffusa nei parchi eolici offshore, in particolare nel contesto europeo. Ciò è dovuto principalmente a due fattori: da un lato, le caratteristiche geotecniche dei fondali del Mare del Nord, che consentono una più agevole infissione dei pali, dall'altro la localizzazione prevalente degli impianti in aree caratterizzate da basse profondità, generalmente inferiori ai 30 metri.

1.3.2.2. Struttura a gravità (GBS)

Le fondazioni a gravità (Gravity Base Structures, GBS) sfruttano il proprio peso per garantire la stabilità della struttura. Esse vengono generalmente realizzate in cantiere in condizioni asciutte, preferibilmente in prossimità del sito di installazione, e successivamente trasportate in loco. I cassoni in calcestruzzo armato possono essere inizialmente realizzati cavi, al fine di facilitarne il trasporto. Una volta posizionati, vengono zavorrati mediante materiali quali sabbia, roccia, minerale di ferro o calcestruzzo.

Questa tipologia di fondazione richiede un'adeguata preparazione del fondale marino, che deve essere preventivamente livellato e successivamente ricoperto con uno strato di ghiaia grossolana, al fine di garantire un corretto appoggio e una distribuzione uniforme dei carichi. Dal punto di vista strutturale, le fondazioni a gravità forniscono un supporto particolarmente rigido alla turbina eolica, determinando una limitata capacità di smorzamento delle sollecitazioni aerodinamiche trasmesse dal rotore. Le GBS risultano generalmente adatte per installazioni in acque con profondità superiori ai 20 metri.

Le fondazioni a gravità rappresentano una valida alternativa ad altre tipologie di supporto, soprattutto nel contesto dello sviluppo di parchi eolici offshore di grande scala in acque più profonde. Tale soluzione è stata ampiamente adottata, ad esempio, in numerosi parchi eolici costieri danesi, dove le ridotte profondità ne hanno favorito l'impiego. Il parco eolico offshore più profondo realizzato con fondazioni a gravità è quello di Blyth, nel Regno Unito, caratterizzato da una profondità media di circa 35,5 metri. Inoltre, una quota significativa, pari a circa il 70%, delle fondazioni dei parchi eolici operativi in Asia, come quelli di Rudong (Hydropower Rudong I e II), utilizza questa tecnologia, grazie alla

maggiore maturità dei processi costruttivi e delle procedure di installazione, che consente di ridurre i rischi associati.

1.3.2.3. Struttura a traliccio

Le strutture di supporto a traliccio (jacket structures) sono generalmente costituite da configurazioni reticolari a quattro gambe, irrigidite mediante sistemi di controventatura interconnessi. I pali principali presentano tipicamente un diametro di circa 2 metri e vengono infissi nel fondale marino fino alla profondità richiesta mediante l'impiego di appositi manicotti di collegamento.

Questa tipologia di fondazione offshore risulta particolarmente adatta per installazioni in aree caratterizzate da profondità d'acqua comprese tra 25 e 50 metri, offrendo un buon compromesso tra stabilità strutturale, riduzione delle masse e adattabilità a fondali profondi.

Attualmente, numerose turbine eoliche offshore sono supportate da strutture a traliccio, a conferma della crescente diffusione di tale tecnologia. In particolare, la penisola coreana rappresenta uno dei principali contesti di applicazione di queste fondazioni, con un'ampia quota di installazioni realizzate nelle proprie acque territoriali, soprattutto in relazione alle elevate profondità marine e alle specifiche condizioni ambientali e meteorologiche dell'area.

1.3.2.4. Tripode

La necessità di incrementare la produttività degli impianti eolici offshore e, al contempo, di ridurre l'impatto visivo ha favorito la realizzazione di installazioni a distanze sempre maggiori dalla costa, in aree caratterizzate da fondali più profondi. Per profondità comprese tra 30 e 50 metri, una delle soluzioni maggiormente adottate è rappresentata dalle fondazioni a tripode (tripod).

Questa configurazione strutturale è costituita da un elemento centrale portante, al quale viene collegata la torre dell'aerogeneratore, sostenuto da tre pali di diametro inferiore

infissi nel fondale marino fino a profondità dell'ordine di circa 20 metri. La struttura in acciaio del tripode ha la funzione di trasferire le sollecitazioni di trazione, compressione e flessione provenienti dalla torre verso i tre pali di fondazione, garantendo un'efficace ripartizione dei carichi.

Le fondazioni a tripode risultano particolarmente adatte per installazioni in acque profonde, sia per motivazioni di carattere economico sia per la riduzione del rischio di collisione tra la struttura di supporto e le imbarcazioni di servizio. Inoltre, tale tipologia non richiede particolari interventi di preparazione del fondale marino.

Dal punto di vista dinamico, il comportamento della struttura deve essere attentamente analizzato, poiché il tripode presenta una configurazione relativamente leggera e rigida, con conseguente limitata capacità di smorzamento delle vibrazioni aerodinamiche indotte dal rotore.

Questa soluzione è stata adottata in diversi progetti offshore europei, tra cui Global Tech I, BARD Offshore 1 e Trianel Windpark Borkum, situati in aree di profondità intermedia. L'impiego delle fondazioni a tripode si è sviluppato prevalentemente nel contesto europeo, in relazione alle caratteristiche dei fondali e delle condizioni ambientali marine.

Inoltre, rispetto alle fondazioni monopalo, la configurazione a tripode può offrire prestazioni migliori in presenza di condizioni ambientali estreme, quali uragani o tifoni, per le quali le strutture monopalo richiederebbero l'impiego di pali di maggiore lunghezza o sistemi di fondazione più massivi.



Figura 1.4 Fondazioni fisse per turbine eoliche offshore

1.3.2.5. Galleggianti

Le turbine eoliche offshore galleggianti (Floating Offshore Wind Turbines, FOWT) rappresentano una soluzione tecnologica avanzata che consente lo sfruttamento del potenziale eolico in acque profonde, dove le fondazioni fisse risultano tecnicamente ed economicamente impraticabili. Questo approccio permette l'installazione di parchi eolici in aree marine più estese, caratterizzate da venti generalmente più intensi e costanti.

Il sistema di supporto galleggiante è costituito essenzialmente da due elementi principali: la piattaforma galleggiante, completa del relativo sistema di ormeggio e ancoraggio al fondale, e la turbina eolica rigidamente installata su di essa mediante un elemento di transizione che consente il collegamento con la torre. Le piattaforme galleggianti possono essere realizzate secondo differenti configurazioni progettuali, tra cui le soluzioni tipo spar, le piattaforme semisommersibili (Semi-submersible) e le piattaforme a tiranti tesi (Tension Leg Platform, TLP).

In generale, le strutture galleggianti di supporto possono essere classificate in base al principio fisico adottato per la stabilizzazione. Le principali categorie sono:

- Stabilizzazione mediante contrappeso: la stabilità è garantita dalla presenza di una massa di zavorra posizionata nella parte inferiore della struttura, che può avere geometria allungata e che viene mantenuta in posizione tramite linee di ormeggio a catenaria ancorate al fondale marino;
- Stabilizzazione mediante linee di ormeggio: il sistema di equilibrio è assicurato da tiranti, anche verticali, disposti ai vertici o ai punti strategici della piattaforma, che contrastano le azioni del vento e del moto ondoso;
- Stabilizzazione per forma: la stabilità deriva principalmente dall'elevata superficie e dal volume della struttura galleggiante, generalmente una chiatta di grandi dimensioni, ancorata al fondale mediante linee di ormeggio a catenaria. Tale configurazione è concettualmente assimilabile alla soluzione a zavorra, ma si distingue per il maggiore sviluppo planimetrico della piattaforma.

Le fondazioni galleggianti in calcestruzzo armato, componenti critici di queste strutture, sono generalmente progettate con una vita utile superiore a quella della sovrastruttura eolica. Tuttavia, la loro durabilità può essere significativamente influenzata dalla combinazione di fenomeni di corrosione e fatica, tipici degli ambienti marini particolarmente aggressivi.

Dal punto di vista prestazionale, una struttura galleggiante deve soddisfare requisiti fondamentali, tra cui la stabilità globale, la capacità di mantenere la posizione operativa anche in presenza di ampi spostamenti, il contenimento delle inclinazioni durante il funzionamento della turbina eolica, nonché la corretta orientabilità rispetto alla direzione del vento per garantire elevata efficienza energetica. A questi aspetti si aggiunge la necessità di contenere i costi complessivi di costruzione, installazione e manutenzione.

Queste strutture risultano tipicamente idonee per applicazioni in acque con profondità comprese tra circa 60 e 200 – 300 metri e devono inoltre essere progettate per adattarsi a differenti condizioni geotecniche del fondale, mediante sistemi di ormeggio configurabili in funzione della natura del substrato marino.

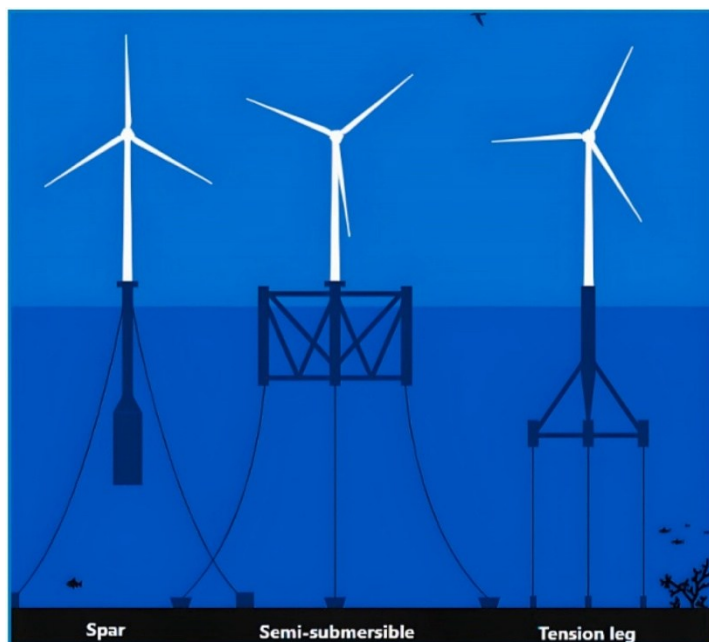


Figura 1.5 Differenti tipologie di fondazioni galleggianti per turbine eoliche offshore

Tabella 1.1 Scelta della tipologia di fondazione da utilizzare in base alla profondità del sito marino

PROFONDITÀ	MONOPALO	GBS	STRUTTURA A TRALICCIO	TRIPODE	GALLEGGIANTI
BASSA 0 – 20 m	X				
MEDIA 20 – 40 m	X	X	X	X	
ALTA > 50 m					X

Dal punto di vista economico, l'energia eolica offshore presenta costi mediamente superiori rispetto a quella onshore. Ciò è dovuto dalla necessità di impiegare imbarcazioni specializzate, attrezzature dedicate e complesse strutture di fondazione per l'installazione e la manutenzione delle turbine in ambiente acquatico.

1.3.3. Turbine eoliche ad asse orizzontale

Le turbine eoliche ad asse orizzontale rappresentano la configurazione più diffusa. Esse sono costituite da una torre, generalmente in acciaio, con altezze comprese tra 60 e 100 metri, alla cui sommità è collocata la navicella (gondola), contenente i principali componenti della macchina. Tra questi si annoverano le pale, di lunghezza variabile tra 20 e 60 metri, il rotore, il sistema di trasmissione (eventualmente comprensivo di riduttore) e il generatore elettrico. Le pale sono realizzate in legno, poliestere o resina epossidica rinforzata con fibra di vetro al fine di garantire elevate prestazioni meccaniche e ridotto peso.



Figura 1.6 Turbina eolica ad asse orizzontale

1.3.4. Turbine eoliche ad asse verticale

Le turbine ad asse verticale si distinguono per una struttura caratterizzata da un numero ridotto di componenti mobili, il che conferisce loro una maggiore robustezza e la capacità di operare indipendentemente dalla direzione del vento, senza necessità di sistemi di orientamento. Tali macchine risultano particolarmente versatili e possono essere impiegate sia in ambito domestico sia in applicazioni per la produzione centralizzata di energia elettrica. Tuttavia, rispetto alle turbine ad asse orizzontale, esse sono soggette a una marcata variazione delle sollecitazioni meccaniche durante la rotazione.



Figura 1.7 Turbina eolica ad asse verticale

1.3.5. Taglie delle turbine eoliche

L'incremento delle dimensioni delle turbine eoliche rappresenta uno degli aspetti più significativi dell'evoluzione tecnologica del settore eolico, in particolare nell'ambito offshore. Negli ultimi decenni, l'aumento della potenza nominale, del diametro del rotore e dell'altezza del mozzo ha consentito di migliorare significativamente le prestazioni energetiche degli impianti, contribuendo alla riduzione del costo livellato dell'energia (Levelized Cost of Energy, LCOE) e favorendo la competitività dell'energia eolica rispetto alle fonti convenzionali.

La taglia di una turbina eolica viene generalmente definita attraverso la sua potenza nominale, espressa in megawatt (MW), e risulta strettamente correlata ad altri parametri geometrici e strutturali quali il diametro del rotore, l'altezza del mozzo, la massa della

navicella e la configurazione del sistema di trasmissione. L'evoluzione tecnologica ha portato ad un progressivo aumento delle dimensioni delle macchine: mentre nei primi anni 2000 le turbine offshore presentavano potenze nominali comprese tra 2 e 5 MW, attualmente sono diffuse unità commerciali da 10 – 15 MW, con prototipi che superano i 20 MW.

L'aumento della taglia delle turbine è stato favorito dai progressi nei materiali compositi impiegati per le pale, nello sviluppo di generatori ad elevata efficienza, nell'ottimizzazione aerodinamica e nell'introduzione di sistemi di trasmissione diretta. Le moderne turbine offshore possono raggiungere diametri del rotore pari a 280 m e produzioni annuali di energia superiori a 80 GWh.

Dal punto di vista economico, l'incremento della potenza unitaria consente di ridurre il numero di turbine necessarie per raggiungere una determinata capacità installata. Ciò comporta una diminuzione del numero di fondazioni, dei collegamenti elettrici inter-array e delle operazioni di installazione e manutenzione. Di conseguenza, il costo complessivo dell'impianto e il relativo LCOE risultano significativamente ridotti.

L'evoluzione delle taglie delle turbine offshore può essere suddivisa in tre principali fasi tecnologiche:

- Aerogeneratori di piccola taglia: sviluppatasi tra il 2000 e il 2009, è caratterizzata dall'impiego di turbine derivate da modelli onshore, con potenze comprese tra 2 e 6 MW e diametri del rotore inferiori a 180 m;
- Aerogeneratori di media taglia: sviluppatasi compresa tra il 2010 e il 2015, coincide con l'industrializzazione dell'eolico offshore e vede la diffusione di turbine specificamente progettate per l'ambiente marino, con potenze comprese tra 7 e 9 MW e rotori superiori a 200 m di diametro;
- Aerogeneratori di grande taglia: sviluppatasi nel 2015 e tuttora in corso, è contraddistinta dalla diffusione di turbine di grande taglia, con potenze comprese tra 9 e 15 MW, diametri del rotore superiori a 220 m e crescente integrazione con fondazioni galleggianti per installazioni in acque profonde.

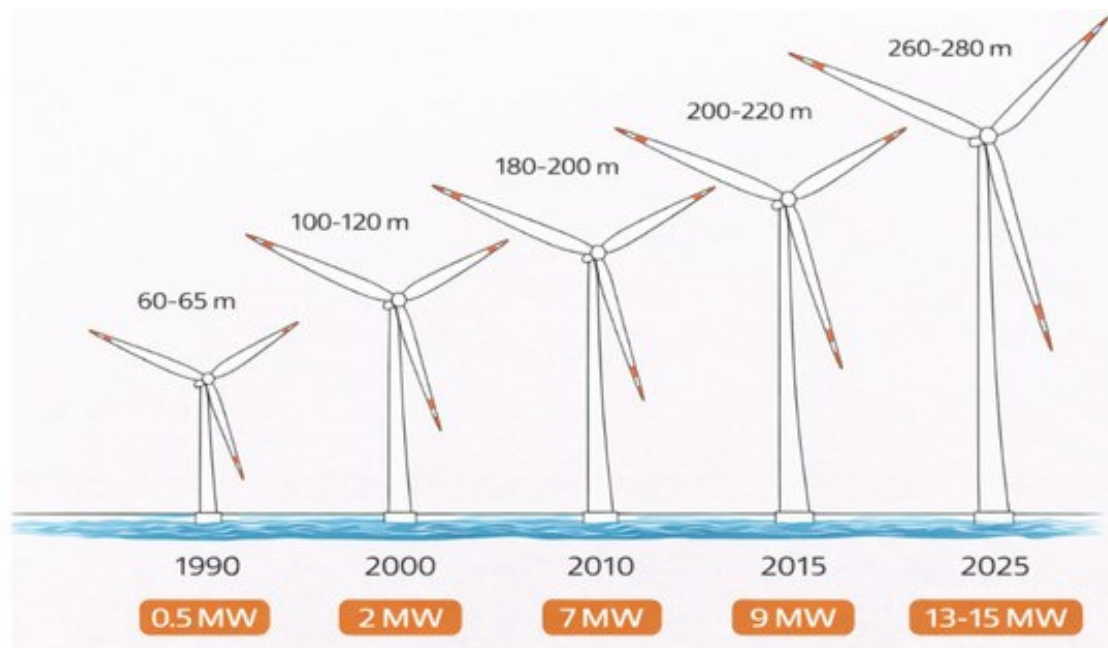


Figura 1.8 Confronto delle dimensioni e della potenza delle turbine eoliche

L'analisi delle installazioni globali evidenzia una rapida crescita delle dimensioni delle turbine nel periodo 2020 – 2024. Se fino al 2021 la maggior parte delle nuove installazioni era costituita da turbine con potenza inferiore a 9 MW, negli anni successivi si è assistito ad una progressiva affermazione delle macchine comprese tra 10 e 12 MW. Parallelamente, stanno emergendo le prime installazioni di turbine superiori a 15 MW, principalmente nei mercati asiatici ed europei.

L'aumento delle dimensioni delle turbine consente inoltre di incrementare la produzione energetica grazie all'impiego di mozzi più elevati e rotor di maggiore diametro. Un'altezza del mozzo superiore permette infatti di intercettare venti più intensi e meno turbolenti, mentre l'incremento dell'area spazzata dal rotore determina un aumento della quantità di energia cinetica convertibile in energia elettrica. Le future turbine offshore, con potenze comprese tra 20 e 25 MW, altezze del mozzo superiori a 180 m e diametri del rotore oltre i 260 m, potrebbero raggiungere fattori di capacità prossimi al 65%, avvicinandosi alle prestazioni tipiche degli impianti di generazione continua.

Nonostante i numerosi vantaggi, l'ulteriore incremento della taglia delle turbine presenta importanti sfide progettuali. L'aumento del diametro del rotore e dell'altezza della torre comporta infatti un incremento non lineare dei carichi aerodinamici e strutturali, delle

deformazioni delle pale e delle sollecitazioni trasmesse alla fondazione. Tali problematiche risultano particolarmente rilevanti nel caso delle turbine offshore galleggianti, dove l'interazione tra vento, onde e movimento della piattaforma richiede avanzati sistemi di controllo e modellazione aero-idro-elastica.

Pertanto, sebbene la tendenza verso turbine di sempre maggiore potenza rappresenti una strategia fondamentale per ridurre i costi dell'energia e aumentare la produzione elettrica da fonte rinnovabile, il dimensionamento futuro delle macchine dovrà necessariamente considerare il compromesso tra benefici economici, limiti tecnologici, capacità produttive della filiera industriale e vincoli infrastrutturali legati al trasporto, all'installazione e alla manutenzione delle componenti di grandi dimensioni.

Tabella 1.2 Confronto tra i parametri di una turbina eolica onshore e una turbina eolica offshore

PARAMETRO	TURBINA EOLICA ONSHORE	TURBINA EOLICA OFFSHORE
LOCALIZZAZIONE DELL'IMPIANTO	Terra ferma	Mare territoriale o acque profonde
VITA UTILE DELL'IMPIANTO	20 – 25 anni	20 – 25 anni
REGIME DEL VENTO	Vento meno intenso e maggiore turbolenza	Vento più intenso, costante e con minore turbolenza
POTENZA NOMINALE	2 – 6 MW	Fino a 15 MW
DIAMETRO DEL ROTORE	Dimensioni contenute	Dimensioni maggiori per incrementare la produzione di energia
TAGLIA	Medio – piccola	Grande
ALTEZZA DELLA TORRE	Inferiore rispetto alle installazioni offshore	Maggiore per sfruttare venti più stabili
LUNGHEZZA DELLE PALE	40 – 80 m	> 80 – 120 m

TIPOLOGIA DI FONDAZIONE	Fondazioni fisse in calcestruzzo armato	Fondazioni fisse o piattaforme galleggianti
PRODUZIONE ENERGETICA ANNUA	Inferiore	Superiore grazie alla maggiore disponibilità della risorsa eolica
COSTI DI INSTALLAZIONE	Relativamente contenuti	Elevati a causa della complessità costruttiva e logistica
COSTI OPERATIVI E DI MANUTENZIONE	Inferiori e più facilmente gestibili	Superiori per difficoltà di accesso e condizioni marine
ACCESSIBILITÀ AGLI IMPIANTI	Semplice mediante infrastrutture terrestri	Complessa e dipendente dalle condizioni marine
TEMPI DI INSTALLAZIONE	Generalmente ridotti	Maggiori per via delle operazioni offshore
IMPATTO PAESAGGISTICO	Elevato nelle aree abitate o di pregio naturalistico	Ridotto perché si trovano nel mare
IMPATTO ACUSTICO	Potenzialmente percepibile dalla popolazione locale	Generalmente limitato
IMPATTO AMBIENTALE	Occupazione del suolo e alterazione del paesaggio	Possibili interferenze con ecosistemi marini
PRINCIPALI VANTAGGI	Costi inferiori, facilità di accesso e manutenzione	Maggiore produzione energetica e rendimento
PRINCIPALI SVANTAGGI	Minore produttività e maggiore impatto visivo	Costi elevati e maggiore complessità operativa
PROSPETTIVE FUTURE	Incremento limitato dalla disponibilità di aree idonee	Prevista una forte crescita

2. ANALISI DEI MATERIALI IMPIEGATI NELLE TURBINE EOLICHE

I materiali impiegati nella realizzazione delle turbine eoliche rivestono un ruolo fondamentale sia dal punto di vista strutturale sia sotto il profilo delle prestazioni energetiche e della durabilità dell'impianto. Una turbina eolica è infatti costituita da numerosi componenti ciascuno dei quali richiede materiali specifici in funzione delle sollecitazioni meccaniche, delle condizioni ambientali e delle esigenze operative a cui è sottoposto.

La scelta dei materiali dipende da diversi fattori: resistenza meccanica, leggerezza, rigidità, resistenza alla corrosione, affidabilità nel lungo periodo e costi di produzione. Per questo motivo, nella costruzione delle turbine eoliche vengono impiegati sia materiali tradizionali, come acciaio e calcestruzzo, sia materiali avanzati.

2.1. Le pale

La scelta dei materiali impiegati nella realizzazione delle pale eoliche rappresenta un aspetto di fondamentale importanza nella progettazione delle turbine, poiché influenza direttamente le prestazioni aerodinamiche, la resistenza meccanica, la durata operativa e la sostenibilità dell'intero sistema. Le pale sono infatti sottoposte a sollecitazioni continue di natura dinamica, dovute all'azione del vento, alle variazioni climatiche e ai carichi ciclici durante il funzionamento. Per tale motivo, i materiali utilizzati devono garantire elevata resistenza meccanica, leggerezza, rigidità strutturale e resistenza ai fenomeni di fatica e corrosione.

Nel corso degli anni, l'evoluzione tecnologica del settore eolico ha portato all'impiego sempre più diffuso di materiali compositi avanzati, in particolare fibre di vetro e fibre di carbonio associate a matrici polimeriche, capaci di assicurare un elevato rapporto resistenza/peso.

2.1.1. Polimeri rinforzati con fibre

I materiali compositi impiegati nelle pale delle turbine eoliche sono generalmente polimeri rinforzati con fibre continue. Tali compositi possono essere realizzati utilizzando fibre preimpregnate con una matrice parzialmente polimerizzata (pre-preg) oppure tramite laminazione di fibre secche successivamente impregnate con la matrice resinosa.

Le proprietà meccaniche del composito dipendono principalmente dalle caratteristiche delle fibre: l'impiego di fibre con prestazioni superiori comporta infatti un significativo miglioramento delle proprietà del materiale finale. La matrice, invece, viene scelta soprattutto in funzione della resistenza al taglio, della rigidità e di parametri legati al processo produttivo, quali viscosità e capacità di impregnazione delle fibre.

Prestazioni meccaniche più elevate possono essere ottenute aumentando la frazione volumetrica delle fibre all'interno del composito. Tuttavia, esiste un limite massimo pratico determinato dalla capacità della matrice di impregnare efficacemente tutte le fibre; oltre una determinata soglia possono infatti formarsi zone con insufficiente contenuto di matrice, che rappresentano punti critici per fenomeni di cedimento statico e a fatica. Per questo motivo, le proprietà meccaniche del composito, in particolare la resistenza, presentano generalmente un valore ottimale in corrispondenza di specifiche frazioni volumetriche ed è compreso tra il 50% e il 60%.

I compositi rinforzati con fibre presentano inoltre un comportamento fortemente anisotropo, poiché mostrano prestazioni migliori lungo la direzione delle fibre. Di conseguenza, la progettazione dei laminati compositi richiede un'attenta definizione dell'orientamento dei singoli strati e della relativa sequenza di impilamento, al fine di ottimizzare il comportamento strutturale del componente.

2.1.2. Fibre di rinforzo

Le fibre di vetro rappresentano il materiale di rinforzo maggiormente utilizzato nei compositi impiegati nelle pale delle turbine eoliche, grazie al buon compromesso tra proprietà meccaniche, resistenza alla corrosione e costi relativamente contenuti. La rigidità dei compositi dipende principalmente dalla rigidità delle fibre e dalla loro frazione volumetrica all'interno del materiale. In particolare, le fibre di vetro E ("Electrical"), costituite da vetro borosilicato ad elevata resistenza elettrica, sono oggi il rinforzo più diffuso, soprattutto per la realizzazione dei gusci delle pale. All'aumentare del contenuto volumetrico di fibre nei compositi unidirezionali (UD), aumentano proporzionalmente la rigidità, la resistenza a trazione e la resistenza a compressione. Tuttavia, per contenuti di fibre superiori a circa il 65%, possono formarsi zone prive di resina tra le fibre, con conseguente riduzione della resistenza a fatica del composito. Nei compositi vetro/epossidici utilizzati per le pale eoliche, il contenuto di vetro può raggiungere fino al 75% in peso.

Esistono differenti tipologie di fibre di vetro che, pur presentando valori di rigidità simili, si distinguono per la diversa resistenza meccanica e ambientale, aspetto particolarmente rilevante nelle applicazioni offshore. Tra queste si trovano il vetro S ("Strength") e il vetro R ("Reinforcement"), caratterizzati da una composizione chimica modificata in grado di incrementarne le prestazioni. In particolare, il vetro S, sviluppato negli anni Sessanta, presenta una resistenza a trazione e a flessione superiore di circa il 40% rispetto al vetro E, oltre a un incremento della resistenza a compressione e del modulo flessionale compreso tra il 10% e il 20%.

Negli ultimi decenni, le fibre di carbonio hanno acquisito crescente importanza come possibile alternativa alle fibre di vetro. Esse offrono valori di rigidità e resistenza meccanica significativamente superiori, associati a una densità inferiore, consentendo la realizzazione di pale più leggere, sottili e rigide. Inoltre, tali fibre garantiscono elevate prestazioni a fatica, caratteristica particolarmente vantaggiosa per componenti soggetti a carichi ciclici prolungati. Tuttavia, i compositi in fibra di carbonio presentano una minore tolleranza al danno, una ridotta deformazione ultima e un comportamento maggiormente fragile rispetto ai compositi in fibra di vetro. Essi risultano inoltre molto sensibili al disallineamento e all'ondulazione delle fibre: anche piccole imperfezioni possono causare

significative riduzioni della resistenza a compressione e a fatica. A ciò si aggiunge l'elevato costo delle fibre di carbonio, che ne ha storicamente limitato l'impiego ai longheroni delle pale, ossia alle regioni strutturalmente più sollecitate.

Oltre alle fibre di vetro e di carbonio, la ricerca scientifica ha preso in considerazione ulteriori materiali ad alte prestazioni, come le fibre aramidiche e le fibre di basalto. Le fibre aramidiche, costituite da poliammidi aromatiche, presentano elevata resistenza meccanica, buona tenacità e tolleranza al danno; tuttavia, mostrano una ridotta resistenza a compressione, una limitata adesione alle matrici polimeriche, elevato assorbimento di umidità e sensibilità al degrado dovuto alle radiazioni ultraviolette. Le fibre di basalto, invece, mostrano proprietà particolarmente promettenti: risultano circa il 30% più resistenti, il 15–20% più rigide e l'8–10% più leggere rispetto al vetro E, oltre ad avere costi inferiori rispetto alle fibre di carbonio. Applicazioni sperimentali nelle piccole turbine eoliche hanno evidenziato risultati incoraggianti, specialmente nei compositi ibridi basalto/carbonio.

Un'ulteriore alternativa è rappresentata dalle fibre naturali, quali sisal, lino, canapa e iuta, che offrono vantaggi legati ai bassi costi, all'ampia disponibilità e alla sostenibilità ambientale. Tuttavia, tali fibre presentano anche alcuni limiti, tra cui variabilità qualitativa, elevato assorbimento di umidità e ridotta stabilità termica. Studi sperimentali hanno inoltre dimostrato il potenziale del bambù come materiale per applicazioni eoliche: Holmes et al. hanno sviluppato un laminato epossidico bambù-pioppo caratterizzato da elevata resistenza e rigidità, suggerendone l'impiego come possibile alternativa ai compositi tradizionali. La rapida crescita, l'ampia disponibilità e le buone proprietà meccaniche del bambù lo rendono infatti un materiale promettente per il settore dell'energia eolica.

Più recentemente, la ricerca scientifica si è concentrata sullo sviluppo di compositi ibridi, quali vetro/carbonio o vetro/aramide, con l'obiettivo di combinare i vantaggi delle diverse tipologie di fibre e migliorare il rapporto tra prestazioni strutturali e costi. Studi condotti da Ong e Tsai hanno evidenziato che una sostituzione completa del vetro con fibre di carbonio potrebbe determinare un risparmio di peso dell'80%, ma anche un incremento dei costi del 150%; al contrario, una sostituzione parziale del 30% comporterebbe una riduzione del peso del 50% a fronte di un aumento dei costi del 90% per una turbina di

piccole dimensioni. Numerosi studi hanno inoltre analizzato i meccanismi di danneggiamento dei compositi ibridi, mostrando che l'inserimento di fibre di vetro nei compositi rinforzati con fibre di carbonio può migliorare le proprietà di impatto e aumentare la deformazione a rottura delle fibre di carbonio. In particolare, Manders e Bader hanno osservato che la combinazione delle fibre di carbonio con fibre di vetro meno rigide e più duttili consente un miglioramento del comportamento deformativo del composito.

Tuttavia, alcune analisi teoriche hanno evidenziato che la resistenza dei compositi ibridi non cresce sempre in modo lineare con il contenuto di fibre di carbonio. In determinate configurazioni, la resistenza del composito può risultare inferiore sia a quella dei compositi in puro vetro sia a quella dei compositi in puro carbonio, mostrando un andamento a "V" in funzione del rapporto vetro/carbonio, con un minimo intorno al 60% di contenuto di carbonio. Pertanto, sebbene i compositi ibridi rappresentino una soluzione molto promettente per il settore eolico, risultano ancora necessarie ulteriori ricerche per definire la composizione ottimale dei materiali e garantire il miglior compromesso tra prestazioni meccaniche, peso, costi e riciclabilità al termine della vita utile delle turbine.

2.1.3. Matrici polimeriche

Le matrici polimeriche impiegate nei materiali compositi per la realizzazione delle pale eoliche possono essere suddivise in due principali categorie: matrici termoindurenti e matrici termoplastiche. Attualmente, i materiali termoindurenti rappresentano la soluzione maggiormente utilizzata nel settore eolico, costituendo circa l'80% del mercato dei polimeri rinforzati, mentre i termoplastici hanno iniziato ad attirare crescente interesse solo negli ultimi anni, soprattutto grazie alle loro potenzialità in termini di riciclabilità e gestione del fine vita.

Le matrici termoindurenti comprendono principalmente resine epossidiche, poliesteri ed esteri vinilici. Tali materiali offrono numerosi vantaggi applicativi nella produzione delle pale eoliche, tra cui elevata rigidità strutturale, buona resistenza meccanica e ottime prestazioni a fatica, caratteristiche fondamentali per componenti soggetti a carichi dinamici continui. Inoltre, queste resine possono essere polimerizzate a temperatura

ambiente o a temperature relativamente basse e presentano una viscosità significativamente inferiore rispetto ai polimeri termoplastici, facilitando così l'impregnazione delle fibre e consentendo velocità produttive elevate. In particolare, la viscosità delle matrici termoidurenti è generalmente compresa tra 0,1 e 10 Pa·s, valore molto inferiore rispetto a quello dei termoplastici.

Inizialmente, nella produzione delle pale composite venivano utilizzate prevalentemente resine poliestere. Tuttavia, con l'aumento delle dimensioni delle turbine eoliche, le resine epossidiche hanno progressivamente sostituito i poliesteri grazie alle superiori proprietà meccaniche e adesive, diventando oggi la soluzione più diffusa. Nonostante ciò, studi recenti hanno evidenziato un rinnovato interesse verso i poliesteri insaturi di nuova generazione, che garantirebbero tempi di ciclo più rapidi, maggiore efficienza energetica nella produzione e proprietà meccaniche adeguate anche per pale di grandi dimensioni. Parallelamente, un'importante area di ricerca riguarda lo sviluppo di matrici termoidurenti in grado di polimerizzare più rapidamente e a temperature sempre più basse, con l'obiettivo di ridurre i consumi energetici e aumentare l'efficienza produttiva.

I materiali termoplastici rappresentano invece un'interessante alternativa alle matrici termoidurenti, soprattutto in ottica di sostenibilità ambientale. A differenza dei termoidurenti, i termoplastici possiedono temperature di fusione inferiori alle temperature di decomposizione, caratteristica che consente di rifondere e rimodellare il materiale dopo l'utilizzo, facilitandone così il riciclo. Inoltre, tali materiali presentano maggiore tenacità alla frattura, elevato allungamento a rottura, possibilità di lavorazione automatizzata e durata teoricamente illimitata delle materie prime. Tuttavia, i termoplastici mostrano anche diversi limiti applicativi: richiedono elevate temperature di lavorazione, con conseguente aumento dei consumi energetici, e possiedono viscosità di fusione molto elevate, generalmente comprese tra 10^2 e 10^3 Pa·s, che rendono più complessa l'impregnazione delle fibre e la realizzazione di componenti di grandi dimensioni e forte spessore. Inoltre, il loro comportamento a fatica risulta generalmente inferiore rispetto a quello dei termoidurenti, sia nei compositi rinforzati con fibre di vetro sia in quelli con fibre di carbonio.

Negli ultimi anni, la ricerca scientifica ha inoltre approfondito lo sviluppo di matrici polimeriche nanomodificate, ottenute mediante l'aggiunta di nanorinforzi come nanotubi

di carbonio, nanoargille o grafene. Anche piccole quantità di tali additivi, generalmente inferiori all'1% in peso, possono determinare incrementi significativi delle proprietà meccaniche dei compositi, migliorando la resistenza a fatica, la resistenza a taglio e compressione e la tenacità alla frattura, con aumenti prestazionali compresi tra il 30% e l'80%. In particolare, studi sperimentali sul grafene come rinforzo secondario hanno evidenziato risultati promettenti nello sviluppo di pale eoliche più resistenti e durevoli. Tuttavia, l'utilizzo di matrici nanomodificate può comportare anche alcuni svantaggi, poiché il miglioramento di determinate proprietà meccaniche può essere accompagnato da una riduzione di altre caratteristiche, come la temperatura di transizione vetrosa, limitando talvolta la processabilità e l'applicabilità industriale di tali materiali.

2.1.4. Struttura a sandwich

Le strutture sandwich sono ampiamente impiegate nella realizzazione delle pale eoliche e sono costituite da due pelli sottili e resistenti, generalmente in materiale composito, separate da un'anima leggera. Questa configurazione consente di ottenere un'elevata efficienza strutturale, in particolare nei confronti dei carichi di flessione: gli strati rigidi e resistenti essendo posizionate a una certa distanza dall'asse neutro, contribuiscono in modo significativo alla resistenza globale del componente. L'anima, invece, svolge principalmente la funzione di mantenere la distanza tra gli strati rigidi e di resistere ai carichi di instabilità, schiacciamento e taglio, contribuendo così alla stabilità complessiva della struttura. I materiali utilizzati per l'anima sono generalmente caratterizzati da bassa densità e buone proprietà meccaniche, e includono strutture a nido d'ape e schiume polimeriche.

Tra i materiali più comunemente utilizzati nelle pale eoliche si annoverano il legno di balsa, le schiume di stirene-acrilonitrile (SAN), di cloruro di polivinile (PVC) e di polietilene tereftalato (PET). Il legno di balsa rappresenta una soluzione particolarmente interessante dal punto di vista della sostenibilità, grazie alla rapida crescita dell'albero da cui deriva. Esso presenta inoltre buone proprietà meccaniche e un costo relativamente contenuto, sebbene la densità sia superiore rispetto alle schiume polimeriche. Per questo motivo, la balsa viene impiegata soprattutto nelle zone prossime alla radice della pala,

dove i carichi strutturali sono più elevati, mentre un suo utilizzo esteso lungo tutta la pala risulterebbe penalizzante in termini di peso complessivo. Un ulteriore svantaggio è rappresentato dalla tendenza ad assorbire resina durante i processi di infusione, a causa della sua microstruttura cellulare.

Le schiume SAN e PVC, rispetto alla balsa, sono caratterizzate da una densità inferiore e quindi da un migliore rapporto peso/prestazioni, ma presentano costi più elevati e proprietà meccaniche generalmente inferiori in termini di resistenza e rigidità. Tali materiali trovano impiego soprattutto nelle porzioni intermedie della pala, dove la riduzione del peso diventa un fattore progettuale prioritario rispetto alla massima resistenza strutturale.

Il PET, infine, rappresenta una soluzione particolarmente promettente grazie alla sua termoformabilità e alla facilità di lavorazione, che gli consente di adattarsi efficacemente alle geometrie complesse degli stampi delle pale eoliche. Un ulteriore vantaggio rilevante è la sua riciclabilità, in linea con le attuali esigenze di sostenibilità del settore. Tuttavia, le sue proprietà meccaniche e la sua leggerezza risultano generalmente inferiori rispetto ad altri materiali utilizzati per i core sandwich. Per questo motivo, le schiume in PET sono impiegate principalmente nelle sezioni terminali della pala, in prossimità della punta, dove i carichi sono minori. Negli ultimi anni, la possibilità di utilizzare PET riciclato per applicazioni strutturali è stata oggetto di diversi studi, sia sotto forma di schiume sia come strutture a nido d'ape. Tali ricerche ne hanno evidenziato la fattibilità tecnica generale, pur rimanendo ancora in una fase prevalentemente sperimentale e non pienamente consolidata a livello industriale nelle pale eoliche. In particolare, risultano ancora necessari approfondimenti su due aspetti fondamentali: da un lato il confronto sistematico delle proprietà meccaniche rispetto al materiale vergine, con particolare attenzione alla resistenza a fatica; dall'altro una valutazione completa del ciclo di vita (LCA), finalizzata a quantificare il reale beneficio ambientale derivante dall'impiego di materiali riciclati rispetto alle soluzioni tradizionali.

2.2. La torre

Tra le principali configurazioni strutturali impiegate per il sostegno delle turbine eoliche si distinguono la torre tubolare in acciaio e la torre reticolare. Tali soluzioni rappresentano le tipologie maggiormente utilizzate negli impianti eolici terrestri e si differenziano per caratteristiche costruttive, comportamento strutturale e aspetti economici.

Le torri per aerogeneratori sono generalmente realizzate in acciaio, sebbene in alcune applicazioni possano essere impiegati anche il calcestruzzo armato o soluzioni ibride. L'acciaio costituisce il materiale più diffuso grazie alle sue elevate prestazioni meccaniche, alla notevole rigidezza strutturale, alla resistenza ai carichi statici e dinamici e al costo relativamente contenuto. Per garantire una maggiore durabilità, soprattutto negli impianti offshore caratterizzati da ambienti fortemente aggressivi, gli elementi metallici vengono sottoposti a processi di zincatura oppure protetti mediante specifici sistemi di verniciatura anticorrosiva.

La configurazione più comune nelle moderne turbine eoliche è la torre tubolare in acciaio a sezione circolare rastremata. Questa tipologia è costituita da tronchi conici ottenuti mediante laminazione di lamiere d'acciaio di elevato spessore, successivamente assemblati attraverso giunzioni saldate. Il processo produttivo richiede un elevato livello di precisione, poiché la curvatura delle lamiere deve essere realizzata controllando accuratamente la pressione esercitata dai rulli lungo l'intera superficie del pannello al fine di ottenere la geometria progettata.

Le diverse sezioni della torre vengono prefabbricate in stabilimento e successivamente trasportate in cantiere per il montaggio. Le dimensioni dei singoli elementi sono generalmente limitate dalle possibilità di trasporto stradale e ferroviario, con lunghezze tipiche comprese tra 20 e 30 m. L'aumento dell'altezza delle torri e della potenza delle turbine ha comportato un progressivo incremento degli spessori delle lamiere, con conseguenti difficoltà sia nelle operazioni di lavorazione e saldatura sia nella movimentazione e nel trasporto degli elementi strutturali.

Per superare tali limitazioni sono state sviluppate diverse soluzioni alternative. Tra queste si annoverano le torri reticolari in acciaio, caratterizzate da un ridotto impiego di materiale e da una maggiore facilità di trasporto e assemblaggio, nonché torri realizzate con

materiali compositi rinforzati con fibre di vetro, generalmente destinate ad aerogeneratori di piccola taglia. Un interesse crescente è inoltre rivolto alle torri in calcestruzzo armato e precompresso, che consentono di raggiungere elevate altezze senza le limitazioni dimensionali imposte dal trasporto delle sezioni metalliche.

Particolare attenzione è rivolta anche alle configurazioni ibride, nelle quali vengono combinati acciaio e calcestruzzo per sfruttare i vantaggi offerti da entrambi i materiali. In tali sistemi, la porzione inferiore della torre è generalmente realizzata in calcestruzzo, mentre la parte superiore è costituita da elementi tubolari in acciaio. Questa soluzione permette di migliorare il comportamento strutturale complessivo e di ridurre le problematiche logistiche associate alla realizzazione di torri di grande altezza.

3. RECUPERO E RIUTILIZZO DELLE COMPONENTI E DEI MATERIALI

Le pale delle turbine eoliche rappresentano uno degli elementi più importanti e tecnologicamente avanzati dell'intero sistema di conversione dell'energia eolica. Esse sono strutture cave progettate per garantire elevata efficienza aerodinamica e resistenza meccanica, pur mantenendo un peso contenuto. La loro composizione è generalmente basata su materiali compositi costituiti da fibre di vetro, fibre di carbonio, resine polimeriche, adesivi strutturali e materiali di anima, come il legno di balsa o schiume polimeriche. Le fibre svolgono una funzione essenziale nell'assorbimento e nella trasmissione dei carichi, mentre la matrice polimerica garantisce la coesione del materiale e la protezione delle fibre dagli agenti esterni.

Tra le matrici più utilizzate nella produzione delle pale vi sono le resine termoindurenti, in particolare quelle epossidiche e poliesteri, apprezzate per le elevate proprietà meccaniche, la stabilità strutturale e l'ottima resistenza alla corrosione. Negli ultimi anni è cresciuto l'interesse verso l'impiego di resine poliuretatiche e, soprattutto, di matrici termoplastiche, considerate una possibile soluzione per migliorare la riciclabilità delle future generazioni di pale. Le resine termoindurenti, infatti, una volta polimerizzate formano una struttura reticolata permanente che impedisce la rifusione e il rimodellamento del materiale, rendendo particolarmente complessa la gestione del fine vita.

Sebbene le turbine eoliche siano generalmente considerate una tecnologia sostenibile e fondamentale per la transizione energetica, la gestione delle pale a fine vita rappresenta una delle principali criticità ambientali del settore. La vita utile di una turbina eolica è generalmente compresa tra 20 e 25 anni, al termine di tale periodo, la maggior parte dei componenti metallici, quali torre, generatore, riduttore e altre parti strutturali, può essere recuperata e riciclata attraverso processi consolidati. Complessivamente, le moderne turbine eoliche raggiungono tassi di riciclabilità prossimi all'86%, grazie soprattutto all'elevata presenza di acciaio e altri metalli facilmente recuperabili. Tuttavia, la gestione delle pale rimane problematica a causa della natura eterogenea e fortemente integrata dei materiali compositi che le costituiscono.

Una pala standard è costituita per circa il 90 – 93% in peso da materiali compositi, mentre la restante quota comprende legno di balsa, metalli, vernici, sigillanti e altri materiali ausiliari. Dal punto di vista strutturale, la configurazione più diffusa prevede due gusci aerodinamici, corrispondenti ai lati in compressione e in trazione, uniti tra loro e irrigiditi mediante una o più anime interne o travi scatolari. La crescente diffusione di turbine di grande taglia ha inoltre favorito l'introduzione di fibre di carbonio e configurazioni ibride vetro – carbonio allo scopo di aumentare la rigidità strutturale e ridurre il peso complessivo delle pale.

La complessità della composizione dei materiali rende estremamente difficile la separazione delle diverse componenti al termine del ciclo di vita. Durante il processo di fabbricazione, infatti, le fibre e la matrice polimerica vengono unite mediante processi di polimerizzazione che generano legami permanenti tra i costituenti. Di conseguenza, il recupero delle singole frazioni risulta tecnicamente complesso, energeticamente oneroso e spesso economicamente poco conveniente. Inoltre, le fibre di vetro, che rappresentano la componente predominante nelle pale attualmente installate, sono considerate materiali a basso valore economico, riducendo ulteriormente gli incentivi al loro recupero.

Per molti anni le pale dismesse sono state prevalentemente destinate allo smaltimento in discarica o all'incenerimento. Tuttavia, entrambe le soluzioni presentano significative criticità ambientali. Lo smaltimento in discarica comporta l'occupazione di suolo e il rischio di rilascio di microplastiche nell'ambiente, con possibili effetti negativi sugli ecosistemi terrestri e marini. L'incenerimento, invece, determina l'emissione di gas serra e di sostanze potenzialmente nocive, tra cui monossido di carbonio e anidride carbonica, contribuendo ai fenomeni di cambiamento climatico.

Per ridurre tali impatti sono state sviluppate diverse strategie di recupero e valorizzazione delle pale a fine vita. Tra le principali tecnologie attualmente studiate o applicate si annoverano il riciclo meccanico mediante frantumazione, il trattamento termico attraverso processi di pirolisi e il recupero chimico mediante solvolisi. Ciascuna di queste soluzioni presenta vantaggi e limitazioni in termini di consumo energetico, costi operativi, qualità dei materiali recuperati ed efficienza complessiva del processo. Ad oggi, non esiste ancora una tecnologia universalmente riconosciuta come soluzione ottimale, poiché molti processi comportano una significativa riduzione delle prestazioni residue

delle fibre recuperate e limitano le possibilità di riutilizzo in applicazioni ad alto valore aggiunto.

La crescente diffusione dell'energia eolica e il progressivo raggiungimento del fine vita da parte delle installazioni realizzate negli ultimi decenni stanno determinando un aumento significativo dei volumi di rifiuti composti da gestire. Tali rifiuti comprendono non solo le pale dismesse, ma anche gli scarti derivanti dai processi produttivi, le pale difettose e i materiali provenienti dalle operazioni di manutenzione, riparazione e ammodernamento. Di conseguenza, la definizione di strategie efficaci per il recupero e la valorizzazione delle pale rappresenta una delle principali sfide tecnologiche e ambientali del settore eolico.

3.1. Tecnologie di riciclaggio

Il riciclo delle pale delle turbine eoliche rappresenta una delle strategie più rilevanti nell'ambito della gestione sostenibile del fine vita degli impianti eolici e costituisce un elemento centrale per l'attuazione dei principi dell'economia circolare. Oltre a ridurre il conferimento in discarica dei rifiuti composti, il riciclo consente di recuperare materiali e risorse, contribuendo alla riduzione del consumo di materie prime vergini e al miglioramento della sostenibilità complessiva del settore energetico.

Per riciclo si intende il processo mediante il quale un materiale, dopo essere stato sottoposto a trattamenti meccanici, termici, chimici o a combinazioni di essi, viene trasformato in una nuova risorsa utilizzabile in ulteriori cicli produttivi. Nel caso delle pale delle turbine eoliche, il riutilizzo diretto dell'intero componente risulta generalmente impraticabile a causa delle dimensioni elevate, della complessità geometrica e delle specifiche prestazioni strutturali richieste durante il funzionamento. Tuttavia, i materiali derivanti dalle pale dismesse possono essere recuperati e valorizzati mediante riduzione dimensionale, separazione dei costituenti e trasformazione in nuove materie seconde.

Attualmente, il riciclo delle pale si basa principalmente su tre categorie di processi: riciclo meccanico, riciclo termico e riciclo chimico. La scelta della tecnologia influenza in modo

significativo la qualità del materiale recuperato, il consumo energetico del processo, i costi operativi e le possibili applicazioni finali dei materiali ottenuti.

Dal punto di vista dello sviluppo industriale, i processi di riciclo delle pale presentano differenti livelli di maturità tecnologica. Solo un numero limitato di tecnologie ha raggiunto una scala industriale consolidata, mentre molte soluzioni risultano ancora in fase di ricerca e dimostrazione.

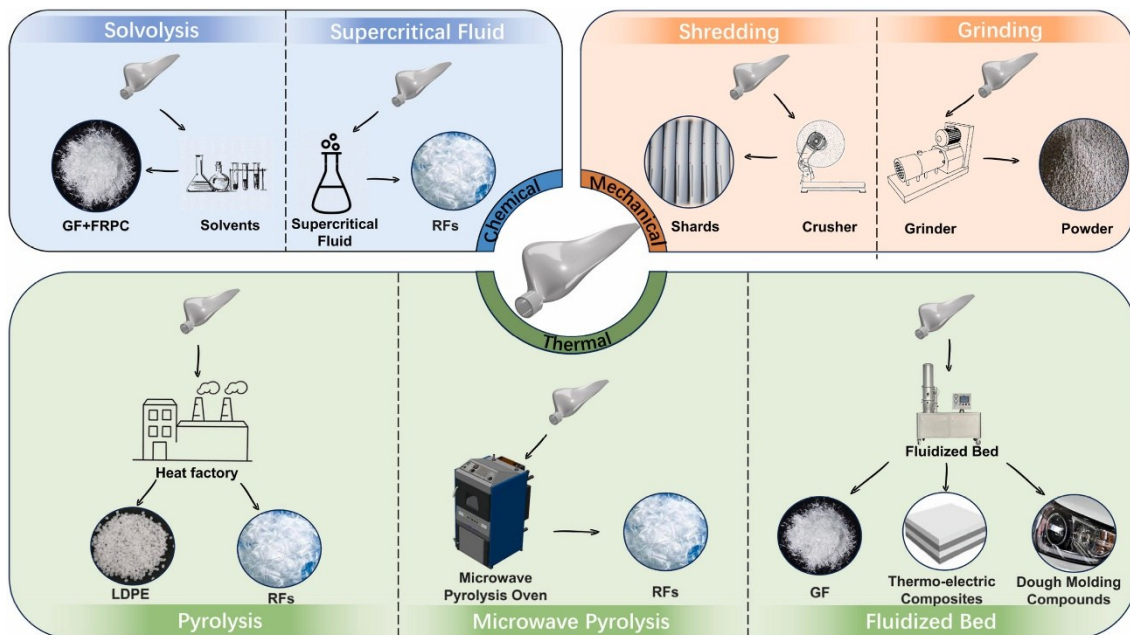


Figura 3.1 Principali metodi di riciclaggio dei rifiuti delle turbine eoliche

3.1.1. Metodi meccanici

Il riciclo meccanico rappresenta una delle tecnologie più consolidate e maggiormente impiegate per la gestione del fine vita delle pale delle turbine eoliche. Tale approccio si basa sulla riduzione dimensionale dei materiali compositi mediante operazioni fisiche, senza ricorrere all'impiego di solventi chimici o a trattamenti termici ad alta temperatura. Grazie alla relativa semplicità operativa, ai costi contenuti e al limitato fabbisogno energetico, il riciclo meccanico è attualmente considerato una delle soluzioni più accessibili per il trattamento dei rifiuti derivanti dalle pale eoliche dismesse.

Il processo viene applicato principalmente ai compositi polimerici rinforzati con fibre, in particolare ai materiali in fibra di vetro, che costituiscono la componente predominante

delle pale eoliche moderne. Sebbene il metodo possa essere utilizzato anche per i compositi in fibra di carbonio, il suo impiego risulta generalmente più vantaggioso per i materiali in fibra di vetro, in quanto il valore economico delle fibre recuperate è inferiore e il degrado delle proprietà meccaniche risulta più accettabile rispetto alle fibre di carbonio.

Il processo di riciclo meccanico comprende generalmente una sequenza di operazioni che include il pre – taglio delle pale, la triturazione, la frantumazione, la macinazione e le successive fasi di separazione e classificazione. Le pale, caratterizzate da grandi dimensioni e geometrie complesse, vengono inizialmente suddivise in elementi più piccoli per facilitarne il trasporto e il trattamento. Successivamente il materiale viene ridotto progressivamente fino a ottenere particelle di dimensioni variabili, generalmente comprese tra pochi micrometri e alcuni millimetri. Mediante sistemi di setacciatura, classificazione ad aria e separazione meccanica vengono quindi ottenute due principali frazioni: una frazione ricca di fibre e una frazione fine ricca di resina.

Uno dei principali vantaggi del riciclo meccanico consiste nella capacità di trattare materiali eterogenei senza la necessità di conoscere preventivamente la composizione del composito originale.

Tuttavia, il riciclo meccanico presenta alcune limitazioni significative. La riduzione dimensionale comporta inevitabilmente la perdita della continuità delle fibre e una diminuzione delle proprietà meccaniche originarie del materiale. Le fibre recuperate risultano generalmente corte, distribuite in modo casuale e ancora parzialmente inglobate nella matrice polimerica residua, limitandone l'impiego in applicazioni strutturali ad alte prestazioni. Inoltre, le operazioni di frantumazione e macinazione producono elevate quantità di polveri che richiedono adeguati sistemi di controllo per ridurre i rischi per la salute e l'ambiente.

3.1.2. Metodi termici

Il riciclo termico rappresenta una delle principali tecnologie sviluppate per la gestione del fine vita delle pale delle turbine eoliche e per il recupero dei materiali compositi che le costituiscono. Questa famiglia di processi si basa sull'applicazione di energia termica per degradare la matrice polimerica che lega le fibre di rinforzo, consentendo il recupero delle componenti strutturali e, in alcuni casi, anche la valorizzazione energetica dei prodotti derivanti dalla decomposizione.

Il riciclo termico consente di superare parzialmente questa limitazione attraverso la decomposizione controllata della matrice organica mediante il calore. Durante il processo è possibile recuperare le fibre di rinforzo, ottenere frazioni liquide derivanti dalla degradazione della resina e generare gas che possono essere utilizzati come fonte energetica. Tuttavia, la qualità dei materiali recuperati dipende fortemente dalle condizioni operative adottate e, in particolare, dalla temperatura di trattamento.

3.1.2.1. Processo di pirolisi

La pirolisi costituisce una delle tecnologie di riciclo termico maggiormente consolidate per il trattamento delle pale eoliche dismesse. Il processo consiste nel riscaldamento del materiale composito in assenza di ossigeno, generalmente in atmosfera inerte di azoto, allo scopo di decomporre la matrice polimerica mantenendo il più possibile integre le fibre di rinforzo.

Le temperature operative sono generalmente comprese tra 450 °C e 700 °C, anche se il valore ottimale dipende dalla tipologia di resina utilizzata. Le resine poliestere tendono a degradarsi a temperature inferiori rispetto alle resine epossidiche, che richiedono generalmente temperature comprese tra 500 °C e 550 °C per una decomposizione efficace.

Durante il processo vengono prodotti gas di pirolisi, frazioni oleose e residui carboniosi. I prodotti gassosi e liquidi possono essere recuperati e riutilizzati come combustibili per alimentare il processo stesso o altre applicazioni energetiche. Le fibre ottenute risultano

tuttavia ricoperte da residui carboniosi che spesso richiedono trattamenti aggiuntivi di pulizia.

La pirolisi risulta particolarmente efficace per il recupero delle fibre di carbonio, che mantengono elevate proprietà meccaniche anche dopo il trattamento. Al contrario, le fibre di vetro mostrano una maggiore sensibilità alle alte temperature e possono subire perdite significative di resistenza meccanica, limitandone il riutilizzo in applicazioni strutturali.

3.1.2.2. Processo a letto fluidizzato

Il riciclo a letto fluidizzato rappresenta un ulteriore approccio di tipo termico utilizzato per il recupero dei materiali compositi. In questo processo il materiale viene preventivamente ridotto dimensionalmente e successivamente introdotto all'interno di un reattore contenente un letto di particelle solide, generalmente sabbia silicea, mantenute in sospensione mediante un flusso continuo di aria calda.

L'esposizione del materiale alle elevate temperature provoca la degradazione della matrice polimerica e il rilascio delle fibre di rinforzo, che vengono successivamente separate mediante sistemi di raccolta e filtrazione.

Uno dei principali vantaggi di questa tecnologia è la capacità di trattare materiali eterogenei e contaminati e di recuperare simultaneamente differenti tipologie di fibre composite. Inoltre, il processo risulta relativamente semplice dal punto di vista operativo.

Tuttavia, il trattamento a letto fluidizzato presenta importanti limitazioni legate alla qualità del materiale recuperato. Le fibre ottenute risultano generalmente corte e caratterizzate da una significativa riduzione delle proprietà meccaniche rispetto alle fibre vergini. Tale fenomeno è particolarmente evidente per le fibre di vetro, la cui resistenza a trazione diminuisce sensibilmente all'aumentare della temperatura di processo.

3.1.2.3. Processo di pirolisi a microonde

La pirolisi assistita da microonde rappresenta una tecnologia più recente e innovativa rispetto ai processi termici convenzionali. Il principio di funzionamento si basa sull'impiego di radiazioni elettromagnetiche che trasferiscono energia direttamente all'interno del materiale, generando un riscaldamento più rapido e uniforme rispetto ai metodi tradizionali.

Il trattamento avviene generalmente in atmosfera inerte e consente la decomposizione della matrice polimerica con una minore esposizione delle fibre alle alte temperature. Questo permette di limitare il degrado termico e di ottenere materiali recuperati con proprietà meccaniche migliori rispetto alla pirolisi convenzionale.

Tra i principali vantaggi di questa tecnologia rientrano la riduzione dei tempi di processo, il minor consumo energetico e il miglior recupero delle prestazioni delle fibre, soprattutto nel caso dei compositi rinforzati con fibra di carbonio. Studi sperimentali hanno evidenziato che le fibre recuperate mediante pirolisi a microonde possono mantenere caratteristiche meccaniche molto vicine a quelle del materiale vergine.

Nonostante il notevole potenziale, questa tecnologia presenta ancora alcune criticità che ne limitano la diffusione industriale, tra cui la difficoltà di controllo della temperatura, la necessità di materiali assorbitori per migliorare il riscaldamento e il limitato numero di impianti attualmente operativi su scala commerciale.

Nel complesso, il riciclo termico costituisce una soluzione promettente per il recupero dei materiali compositi delle pale eoliche, in quanto consente di ridurre il conferimento in discarica e favorire il recupero di risorse. Tuttavia, il miglioramento della qualità delle fibre recuperate, la riduzione del consumo energetico e lo sviluppo di applicazioni economicamente sostenibili rappresentano ancora le principali sfide per l'industrializzazione su larga scala di queste tecnologie.

3.1.3. Metodi chimici

Il riciclo chimico rappresenta una delle tecnologie più avanzate per il recupero dei materiali compositi provenienti dalle pale delle turbine eoliche a fine vita. Questo approccio si basa sulla degradazione controllata della matrice polimerica attraverso l'impiego combinato di solventi chimici, temperatura e pressione, con l'obiettivo di separare le fibre di rinforzo e recuperare, ove possibile, anche parte dei prodotti derivanti dalla decomposizione della resina.

Le pale eoliche moderne sono costituite principalmente da materiali compositi a matrice termoindurente rinforzata con fibre di vetro o fibre di carbonio. Sebbene tali materiali garantiscano elevate prestazioni meccaniche durante l'esercizio, la loro struttura reticolata rende particolarmente difficile il recupero dei componenti a fine vita. Il riciclo chimico si propone di superare questa criticità mediante processi di depolimerizzazione, generalmente riconducibili alla solvolisi, che consentono di rompere i legami chimici della matrice senza degradare completamente le fibre.

Rispetto ai processi termici, il riciclo chimico opera generalmente a temperature inferiori e consente di limitare la formazione di residui carboniosi sulle superfici delle fibre recuperate. Tuttavia, l'impiego di solventi, catalizzatori e condizioni operative severe comporta elevati costi energetici e complessità impiantistiche che ne limitano attualmente la diffusione su scala industriale.

3.1.3.1. Metodo del fluido supercritico

Il metodo a fluidi supercritici costituisce una delle tecnologie più promettenti del riciclo chimico dei compositi termoindurenti. Il processo prevede l'immersione del materiale composito in un fluido mantenuto al di sopra del proprio punto critico di temperatura e pressione, in condizioni tali da combinare le proprietà dei liquidi e dei gas.

Tra i fluidi più studiati rientrano acqua supercritica, metanolo, etanolo, propanolo, acetone, glicole etilenico e miscele solvente – acqua. In presenza di catalizzatori, generalmente alcalini, tali fluidi penetrano nella struttura del composito e favoriscono la decomposizione della matrice polimerica, consentendo il recupero delle fibre.

Uno dei principali vantaggi di questa tecnologia consiste nella possibilità di ottenere fibre relativamente pulite e caratterizzate da proprietà meccaniche superiori rispetto ai materiali recuperati mediante processi termici. Inoltre, l'utilizzo di miscele solvente – acqua ha mostrato benefici ambientali significativi, riducendo il consumo energetico, i costi operativi e il potenziale impatto ambientale rispetto all'impiego di solventi puri.

Nonostante tali vantaggi, il metodo a fluidi supercritici presenta ancora numerose criticità. Le condizioni operative richiedono elevate temperature e pressioni, rendendo necessarie apparecchiature specializzate e aumentando significativamente i costi di investimento e gestione. Inoltre, il processo non risulta ancora pienamente industrializzato e la maggior parte delle applicazioni rimane confinata alla scala sperimentale.

3.1.3.2. Metodo di dissoluzione del solvente

La dissoluzione con solvente, comunemente indicata come solvolisi, rappresenta il metodo più diffuso nel riciclo chimico dei materiali compositi. Il processo si basa sull'utilizzo di solventi, spesso combinati con catalizzatori e additivi, per rompere i legami chimici della matrice termoindurente e trasformarla in prodotti solubili.

I solventi maggiormente impiegati includono acqua, alcoli, glicoli, chetoni e soluzioni acide. Il meccanismo di reazione comporta la depolimerizzazione della struttura reticolata della resina e la successiva separazione delle fibre di rinforzo.

Dal punto di vista operativo, la solvolisi può essere distinta in:

- processi a bassa temperatura e pressione (LTP), generalmente inferiori a 200 °C;
- processi ad alta temperatura e pressione (HTP), superiori a 200 °C.

I processi LTP consentono una migliore conservazione delle proprietà meccaniche delle fibre recuperate, mentre i processi HTP mostrano generalmente una maggiore efficienza nella degradazione della matrice.

Numerose ricerche hanno dimostrato elevate percentuali di decomposizione della resina e il recupero di fibre con caratteristiche meccaniche relativamente vicine al materiale

originario. In alcuni casi è stato inoltre possibile recuperare oligomeri e frazioni della resina riutilizzabili per la produzione di nuovi materiali compositi.

Nonostante le elevate prestazioni, la solvolisi presenta importanti limitazioni legate al costo dei solventi, alla gestione dei residui chimici e alla necessità di pretrattamenti meccanici delle pale per ridurne le dimensioni prima del processo.

3.1.3.3. Metodo di liquefazione idrotermale (HTL)

La liquefazione idrotermale (Hydrothermal Liquefaction, HTL) rappresenta un'ulteriore tecnologia di riciclo chimico sviluppata per il trattamento dei materiali compositi termoindurenti. Il processo utilizza principalmente acqua in condizioni subcritiche o supercritiche come mezzo di reazione per promuovere la decomposizione della matrice polimerica.

Generalmente il processo opera in un intervallo di temperatura compreso tra 200 e 350 °C e a pressioni comprese tra 5 e 25 MPa. In tali condizioni l'acqua modifica le proprie proprietà fisico – chimiche e acquisisce una maggiore capacità solvente, facilitando la rottura dei legami della matrice.

Durante il trattamento vengono generati diversi prodotti, tra cui fibre recuperate, bio – oli, fasi acquose contenenti composti organici, gas e residui solidi. L'aggiunta di catalizzatori e additivi può migliorare ulteriormente l'efficienza di decomposizione e il recupero delle fibre.

Uno dei principali vantaggi di questa tecnologia consiste nella possibilità di operare senza l'impiego di solventi particolarmente tossici e nella capacità di trattare efficacemente materiali termoindurenti complessi. Tuttavia, il processo richiede elevate quantità di energia e apparecchiature progettate per resistere a condizioni operative severe.

Attualmente la liquefazione idrotermale non risulta ancora pienamente commercializzata per il trattamento delle pale eoliche dismesse e la maggior parte delle applicazioni è limitata alla ricerca di laboratorio e agli impianti pilota.

Nel complesso, il riciclo chimico rappresenta una delle strategie più promettenti per il recupero dei materiali compositi provenienti dalle pale eoliche. La possibilità di recuperare fibre di elevata qualità e, in alcuni casi, anche componenti della matrice polimerica rende questo approccio particolarmente interessante in un'ottica di economia circolare. Tuttavia, l'elevate richieste energetiche, i costi dei solventi e la limitata maturità industriale costituiscono ancora ostacoli significativi alla sua diffusione su larga scala.

3.1.4. Metodi alternativi

Oltre ai metodi convenzionali di riciclo meccanico, termico e chimico, negli ultimi anni la ricerca scientifica ha sviluppato approcci alternativi per migliorare il recupero dei materiali compositi provenienti dalle pale delle turbine eoliche a fine vita. L'obiettivo principale di queste tecnologie è aumentare la qualità delle fibre recuperate, ridurre il degrado delle proprietà meccaniche e limitare il consumo energetico e l'impatto ambientale dei processi di trattamento.

Le tecnologie emergenti attualmente oggetto di studio comprendono la frammentazione mediante impulsi ad alta tensione, i processi elettrochimici e i sistemi ibridi che combinano il recupero chimico con il riscaldamento assistito da microonde. Sebbene tali soluzioni mostrino risultati promettenti in ambito sperimentale, la loro applicazione industriale risulta ancora limitata.

3.1.4.1. Frammentazione mediante impulsi ad alta tensione (HVF)

La frammentazione mediante impulsi ad alta tensione (High Voltage Fragmentation – HVF) rappresenta una tecnologia innovativa basata sull'utilizzo di scariche elettriche pulsate per disgregare selettivamente i materiali compositi. Il processo avviene immergendo il composito in un liquido dielettrico, generalmente acqua, e applicando impulsi elettrici tra due elettrodi.

La scarica genera un canale di scintilla che produce un'onda d'urto ad elevata intensità, inducendo tensioni interne superiori alla resistenza meccanica del composito e provocandone la separazione.

Diversi studi hanno evidenziato come questa tecnologia consenta di ottenere fibre recuperate con un contenuto residuo di resina inferiore rispetto ai processi meccanici convenzionali. Inoltre, la distribuzione delle lunghezze delle fibre risulta generalmente più ampia, aumentando le possibilità di riutilizzo del materiale.

Tuttavia, il principale limite della frammentazione ad alta tensione è rappresentato dall'elevato consumo energetico. I costi di investimento e l'elevate richieste energetiche costituiscono attualmente i principali ostacoli alla diffusione industriale del processo oltre la scala di laboratorio.

3.1.4.2. Processi elettrochimici per il recupero delle fibre

Un ulteriore approccio innovativo è costituito dai processi elettrochimici, sviluppati principalmente per il recupero delle fibre di carbonio dai materiali compositi.

In questi sistemi il materiale composito viene inserito in una cella elettrochimica e utilizzato come elettrodo attivo. L'applicazione di una differenza di potenziale induce fenomeni di ossidazione e separazione della matrice polimerica, favorendo il distacco delle fibre.

Studi sperimentali hanno mostrato che il trattamento elettrico consente di ottenere un'elevata rimozione della resina attraverso la formazione di gas all'interfaccia del materiale. Tuttavia, tempi di esposizione eccessivamente lunghi possono causare fenomeni di degradazione delle fibre.

Ulteriori sviluppi hanno introdotto sistemi combinati di rigonfiamento chimico e ossidazione elettrochimica utilizzando soluzioni elettrolitiche per migliorare la conducibilità del processo. I risultati ottenuti hanno evidenziato il recupero di fibre pulite e con lunghezza sostanzialmente inalterata rispetto al materiale originario, mantenendo livelli elevati di resistenza meccanica.

Questi risultati suggeriscono il potenziale dei processi elettrochimici come alternativa ai metodi convenzionali per il recupero di fibre ad alto valore aggiunto.

3.2. Applicazioni dei materiali riciclati

3.2.1. Riutilizzo e valorizzazione delle pale

La crescente diffusione dell'energia eolica negli ultimi decenni ha determinato un significativo incremento del numero di turbine installate a livello mondiale. Di conseguenza, un numero sempre maggiore di impianti sta progressivamente raggiungendo la fine della propria vita utile, generalmente compresa tra 20 e 25 anni. Sebbene gran parte dei componenti metallici delle turbine possa essere recuperata attraverso filiere di riciclo consolidate, la gestione delle pale eoliche rappresenta ancora una delle principali criticità ambientali del settore

In tale contesto, il riutilizzo e la valorizzazione delle pale dismesse stanno assumendo un ruolo sempre più importante nell'ambito dell'economia circolare. A differenza delle strategie di riciclo, che prevedono la trasformazione dei materiali attraverso processi meccanici, termici o chimici, il riutilizzo consente di preservare gran parte del valore strutturale ed energetico incorporato nel manufatto, riducendo il consumo di risorse e l'impatto ambientale associato alla produzione di nuovi materiali.

3.2.2. Estensione della vita utile e riutilizzo delle pale

Una delle strategie più sostenibili consiste nel prolungamento della vita operativa delle turbine eoliche attraverso interventi di manutenzione, riparazione e aggiornamento tecnologico. Prima della dismissione definitiva, le pale vengono sottoposte a ispezioni approfondite volte a valutarne lo stato di conservazione e la presenza di eventuali fenomeni di degrado, quali delaminazioni, cricche, erosione superficiale o danni da fatica.

Le tecniche di monitoraggio impiegate includono controlli visivi, analisi ultrasoniche, termografia a infrarossi, emissioni acustiche e prove dinamiche. Qualora le condizioni strutturali risultino adeguate, le pale possono essere sottoposte a interventi di ricondizionamento e successivamente reinstallate nello stesso impianto o in siti caratterizzati da minori requisiti prestazionali.

L'estensione della vita utile rappresenta una soluzione particolarmente vantaggiosa poiché consente di ritardare la produzione di rifiuti, ridurre il consumo di nuove materie prime e migliorare la sostenibilità complessiva dell'impianto. Tuttavia, questa strategia presenta alcune limitazioni legate all'invecchiamento dei materiali, all'obsolescenza tecnologica e ai costi di manutenzione, che possono rendere economicamente più conveniente la sostituzione completa della turbina.

3.2.3. Riconversione delle pale per applicazioni strutturali

Quando il riutilizzo diretto non è più possibile, una soluzione particolarmente promettente consiste nella riconversione delle pale per impieghi alternativi. Questo approccio prevede il recupero dell'intera pala o di sue porzioni significative per realizzare nuove strutture senza procedere alla separazione dei materiali costitutivi.

Le pale eoliche possiedono infatti caratteristiche particolarmente interessanti dal punto di vista ingegneristico: elevata rigidezza, buona resistenza a trazione e a flessione, ridotto peso proprio e notevole durabilità nei confronti degli agenti atmosferici. Tali proprietà consentono di riutilizzare i componenti in numerose applicazioni civili e infrastrutturali.

Negli ultimi anni sono stati sviluppati diversi progetti sperimentali che hanno dimostrato la fattibilità di questo approccio. Tra le applicazioni più significative si possono citare:

- ponti pedonali e ciclabili;
- coperture leggere e pensiline;
- barriere antirumore;
- rifugi e strutture temporanee;
- elementi di arredo urbano;
- torri panoramiche;
- parchi giochi;
- strutture per il ricovero di biciclette;

- componenti modulari per edifici.

Particolarmente rilevante è il caso dei ponti realizzati mediante sezioni di pale eoliche dismesse. In tali applicazioni, le verifiche strutturali hanno evidenziato un comportamento soddisfacente sia in termini di resistenza sia di deformabilità, confermando il potenziale utilizzo delle pale come elementi portanti. Inoltre, il mantenimento della geometria originale consente di ridurre drasticamente l'energia necessaria rispetto ai processi di riciclo tradizionali.

Nonostante questi risultati promettenti, l'adozione su larga scala di tali soluzioni richiede ancora lo sviluppo di normative specifiche, procedure standardizzate per la caratterizzazione meccanica dei materiali recuperati e metodologie affidabili per la valutazione della vita residua delle strutture.

3.2.4. Impiego dei materiali recuperati nel settore delle costruzioni

Oltre al riutilizzo diretto delle pale, i materiali ottenuti dai processi di riciclo possono essere impiegati in numerosi settori industriali, con particolare riferimento all'ingegneria civile ed edile.

Le fibre di vetro recuperate e le particelle composite derivanti dalla macinazione delle pale possono essere utilizzate come rinforzo secondario in conglomerati cementizi, malte e materiali compositi per l'edilizia. Diversi studi sperimentali hanno evidenziato che l'introduzione di tali materiali può migliorare alcune proprietà del calcestruzzo, tra cui la resistenza alla propagazione delle fessure, la tenacità e la capacità di assorbimento dell'energia.

I materiali riciclati trovano inoltre applicazione nella produzione di:

- produzione di materiali cementizi;
- pannelli isolanti;
- elementi prefabbricati;
- materiali da riempimento;

- pavimentazioni drenanti;
- traversine ferroviarie;
- manufatti compositi;
- componenti per infrastrutture stradali.

L'utilizzo di materiali derivanti da pale eoliche dismesse contribuisce alla riduzione del consumo di aggregati naturali e di materie prime vergini, favorendo al contempo la diminuzione delle emissioni associate ai processi estrattivi e produttivi.

3.2.5. Criticità e prospettive future

Nonostante i notevoli progressi registrati negli ultimi anni, il riutilizzo delle pale eoliche a fine vita presenta ancora diverse criticità. Le principali riguardano la complessità logistica delle operazioni di trasporto e movimentazione, le dimensioni sempre maggiori delle pale moderne, l'assenza di standard tecnici condivisi e la difficoltà di certificare le prestazioni meccaniche residue dei materiali.

Un ulteriore ostacolo è rappresentato dalla variabilità dei materiali impiegati dai diversi produttori, che rende complessa la definizione di procedure unificate di recupero e riutilizzo.

Tuttavia, il crescente interesse verso i principi dell'economia circolare e l'aumento previsto dei volumi di pale dismesse nei prossimi decenni stanno stimolando lo sviluppo di nuove strategie di valorizzazione. In particolare, il riutilizzo strutturale delle pale e l'impiego dei materiali recuperati nel settore delle costruzioni appaiono tra le soluzioni più promettenti per ridurre l'impatto ambientale dell'energia eolica e favorire una gestione più sostenibile delle risorse.

In prospettiva, l'integrazione tra progettazione per il riciclo, lo sviluppo di materiali più facilmente recuperabili e l'implementazione di filiere industriali dedicate potrebbe consentire di trasformare le pale eoliche dismesse da problema ambientale a preziosa risorsa per l'economia circolare.

4. ESEMPI DI RIUTILIZZO DELLE COMPONENTI

4.1. Produzione di materiali edili

4.1.1. Produzione di materiali cementizi

Un campo di ricerca sempre più rilevante nella gestione delle pale di turbine eoliche a fine vita riguarda il loro riutilizzo in ambito edilizio, in particolare come materiale secondario all'interno di miscele cementizie. Poiché un numero crescente di pale eoliche si sta avvicinando alla fase di dismissione, la comunità scientifica ha evidenziato la necessità di sviluppare sistemi di valorizzazione efficienti, capaci di ridurre il ricorso allo smaltimento e promuovere il recupero dei materiali compositi, come il polimero rinforzato con fibre di vetro.

Diversi studi hanno analizzato la possibilità di impiegare materiali derivati dalla frantumazione delle pale come sostituti parziali degli aggregati naturali nel calcestruzzo. In particolare, sono state sviluppate miscele cementizie con percentuali crescenti di sostituzione dell'aggregato fine mediante scarti di polimero rinforzato con fibre di vetro, generalmente comprese tra lo 0% e il 20%. I risultati sperimentali indicano che tali materiali possono essere utilizzati con buone prestazioni solo a basse percentuali di sostituzione, mantenendo ancora adeguate proprietà meccaniche. In alcuni casi, è stato osservato che l'impiego di pale eoliche riciclate consente la sostituzione fino al 10% del volume degli aggregati nel calcestruzzo fibrorinforzato, con resistenze a compressione ancora superiori a 40 MPa e un comportamento meccanico complessivamente accettabile.



Figura 4.1 Sostituzione dell'aggregato fine naturale con materiale riciclato da pale eoliche

Le indagini hanno inoltre evidenziato che l'aggiunta di polimero rinforzato con fibre di vetro influenza in modo significativo le proprietà meccaniche del materiale cementizio. Ad esempio, l'aumento del contenuto di materiale derivante dalle pale eoliche riciclate può determinare un incremento della resistenza a trazione per spaccatura, mentre il modulo elastico tende a diminuire progressivamente. La resistenza a flessione, invece, risulta generalmente stabile. Tuttavia, questi benefici sono accompagnati da una riduzione della lavorabilità e da possibili criticità legate alla durabilità a lungo termine, motivo per cui la ricerca è ancora in corso per ottimizzare le formulazioni.

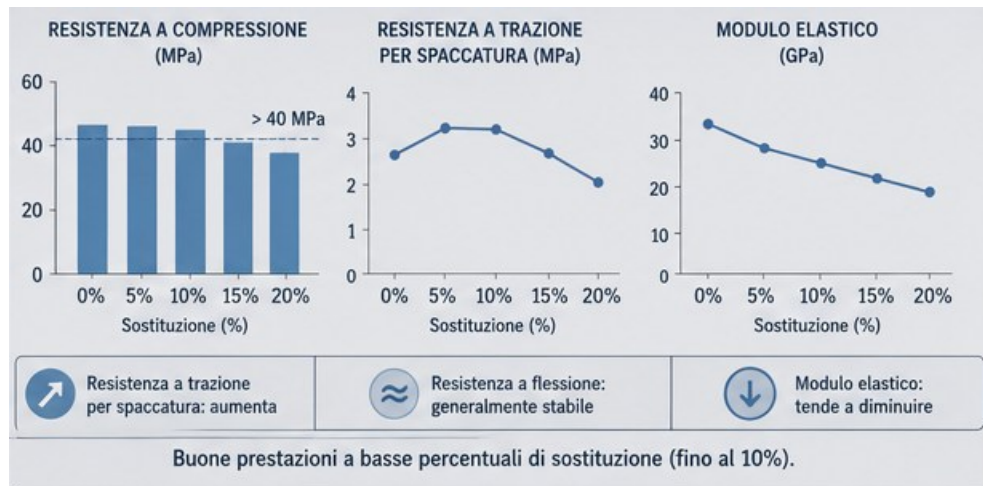


Figura 4.2 Effetti sulle proprietà meccaniche

Un ulteriore approccio consiste nella trasformazione del polimero rinforzato con fibre di vetro in differenti forme: polveri, aggregati o fibre, da reimpiegare nel calcestruzzo. La polvere di polimero rinforzato con fibre di vetro può influenzare i tempi di presa e ridurre alcune resistenze meccaniche, mentre l'impiego di fibre di polimero rinforzato con fibre di vetro mostra effetti più favorevoli, come l'aumento della resistenza a flessione fino a circa il 15% e un miglioramento della capacità di assorbimento energetico del materiale. Anche nel caso del calcestruzzo stampato in 3D, l'inserimento di fibre derivanti da pale eoliche riciclate ha mostrato benefici significativi, migliorando la resistenza a compressione e la tenacità, sebbene con limiti legati alla stampabilità quando il contenuto di fibre risulta elevato.

Nel complesso, il comportamento meccanico dei materiali cementizi modificati con polimero rinforzato con fibre di vetro dipende fortemente dalla forma, dalla granulometria

e dalla percentuale di sostituzione del materiale riciclato. Studi su malte cementizie hanno dimostrato che la sostituzione parziale della sabbia (fino al 15%) con polveri derivate da polimero rinforzato con fibre di vetro può risultare tecnicamente conforme agli standard, pur con una riduzione della densità e alcune variazioni nelle prestazioni. Il miglioramento delle proprietà a trazione è generalmente attribuito all'effetto di "ponte" esercitato dalle fibre, che limita la propagazione delle fessure e aumenta la tenacità del materiale. Tuttavia, l'inserimento di polimero rinforzato con fibre di vetro può anche introdurre microdifetti e aumentare la porosità della matrice cementizia, con conseguenti effetti negativi sulla resistenza a compressione oltre determinati livelli di dosaggio.

In sintesi, le evidenze scientifiche indicano che l'utilizzo del polimero rinforzato con fibre di vetro proveniente dalle pale eoliche dismesse nei materiali cementizi è tecnicamente fattibile e potenzialmente vantaggioso, ma ancora limitato da criticità legate alla durabilità, alla variabilità del materiale e alla necessità di individuare percentuali ottimali di impiego.

4.1.2. Pannelli isolanti

Tra le applicazioni più innovative per il recupero delle pale eoliche a fine vita rientra lo sviluppo di materiali compositi destinati all'isolamento termico e, potenzialmente, anche acustico in ambito edilizio.

Uno studio recentemente pubblicato da Yu et al. (2026) ha sviluppato un composito isolante flessibile utilizzando particelle ricavate da pale eoliche a fine vita, incorporate in una matrice polimerica a base di alginato e altri polimeri sintetici. La struttura tridimensionale altamente porosa del materiale limita la propagazione del calore e conferisce al composito una buona resistenza alla compressione e un'elevata capacità di recupero elastico dopo deformazione. I risultati sperimentali hanno evidenziato una conducibilità termica pari a circa $0,068 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, valore compatibile con applicazioni di isolamento termico, oltre a una ridotta densità e a un migliorato comportamento nei confronti della propagazione della fiamma rispetto ad altri materiali porosi convenzionali.

Parallelamente, altri studi hanno dimostrato che il materiale ottenuto dalla frantumazione delle pale eoliche può essere impiegato per la produzione di pannelli compositi e componenti edilizi non strutturali. In particolare, le fibre residue contribuiscono ad aumentare la stabilità dimensionale e le prestazioni meccaniche dei pannelli, migliorandone la resistenza alla compressione e la durabilità, mentre la presenza di una microstruttura eterogenea favorisce la riduzione della trasmissione del calore. Tali materiali risultano quindi idonei per applicazioni quali contropareti, sistemi di tamponamento leggero e pannelli isolanti sperimentali.

Nel complesso, il recupero delle pale eoliche per la produzione di materiali isolanti rappresenta una soluzione promettente per affrontare contemporaneamente la crescente disponibilità di rifiuti compositi derivanti dal settore eolico e la necessità di sviluppare materiali da costruzione a ridotto impatto ambientale. Sebbene tali applicazioni siano ancora prevalentemente in fase di ricerca e sviluppo e non abbiano raggiunto una diffusione commerciale su larga scala, esse dimostrano il notevole potenziale del riutilizzo dei compositi nell'ambito dell'edilizia sostenibile e dell'economia circolare.

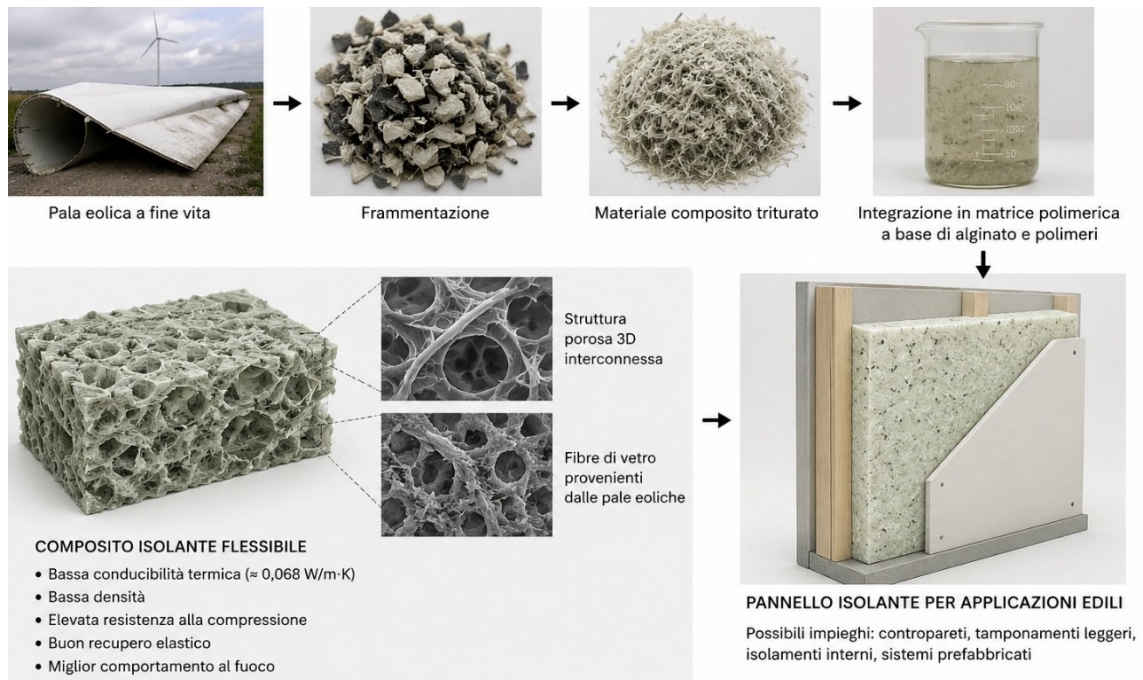


Figura 4.3 Processo di creazione del pannello isolante

4.1.3. Pavimenti drenanti

Un ulteriore ambito di applicazione del riutilizzo delle pale eoliche a fine vita riguarda lo sviluppo di pavimentazioni drenanti e permeabili per infrastrutture urbane e spazi pubblici. In questo contesto, il materiale composito derivante dalle pale, costituito principalmente da fibre di vetro e matrice polimerica termoindurente, viene sottoposto a processi di frantumazione e successiva integrazione all'interno di matrici leganti alternative, come conglomerati cementizi porosi o miscele bituminose modificate.

L'impiego di frammenti di pale eoliche come aggregato secondario consente di ottenere una microstruttura caratterizzata da vuoti interconnessi, che favoriscono il passaggio dell'acqua e contribuiscono alla riduzione del deflusso superficiale. Tale comportamento risulta particolarmente utile nelle aree urbane soggette a fenomeni di impermeabilizzazione del suolo e rischio di allagamenti, in quanto permette di migliorare la gestione delle acque meteoriche e di ridurre il carico sulle reti di drenaggio.

Dal punto di vista funzionale, le pavimentazioni ottenute presentano un equilibrio tra permeabilità idraulica e resistenza meccanica, grazie alla presenza delle fibre residue che contribuiscono a limitare la propagazione delle fessure e a migliorare la durabilità del materiale. Alcuni studi evidenziano inoltre che l'aggiunta di particolato proveniente da compositi eolici può influenzare positivamente la resistenza alla deformazione permanente, rendendo tali soluzioni potenzialmente adatte anche a superfici pedonali o a traffico leggero.

Queste applicazioni si inseriscono nel più ampio quadro della sostenibilità urbana e dell'economia circolare applicata alle infrastrutture, in cui materiali complessi e difficilmente riciclabili vengono reintrodotti nei cicli produttivi sotto forma di componenti per l'edilizia e le opere civili. Tuttavia, come per altre applicazioni innovative del settore, la diffusione su scala industriale è ancora limitata e richiede ulteriori verifiche in termini di standard prestazionali, durabilità a lungo termine e compatibilità normativa.



Figura 4.4 Processo di creazione di un pavimento drenante

4.2. Architettura

4.2.1. Parco giochi per bambini

4.2.1.1. Wikado a Rotterdam (Paesi Bassi)

Un esempio particolarmente significativo di riutilizzo delle pale delle turbine eoliche a fine vita è rappresentato dal parco giochi Wikado, situato a Rotterdam nei Paesi Bassi. Questo progetto mostra come componenti di grandi dimensioni provenienti da turbine eoliche dismesse possano essere riadattate per una nuova funzione, evitando il loro immediato conferimento a smaltimento o il trattamento tramite processi di riciclo.

Il parco, esteso su una superficie di circa 1200 m², è stato realizzato recuperando cinque pale di rotore dismesse, ciascuna lunga circa 30 m. Le pale non sono state utilizzate nella loro configurazione originaria, ma sono state tagliate, lavorate e riconfigurate per diventare elementi architettonici e ludici. In particolare, le sezioni delle pale sono state impiegate per costruire torri, tunnel, rampe, ponti, percorsi di arrampicata e scivoli, creando uno spazio di gioco articolato e innovativo.

Dal punto di vista progettuale, le pale sono state disposte attorno a una struttura circolare già esistente e utilizzate per generare un ambiente con caratteristiche labirintiche e differenti livelli di percorrenza. Le porzioni basali delle pale, caratterizzate da maggiore sezione e resistenza strutturale, sono state trasformate in torri di gioco, mentre le parti tagliate sono state impiegate come collegamenti tra le diverse aree del parco. Oltre alle pale, il progetto ha previsto anche il recupero di ulteriori materiali, tra cui elementi di pavimentazione e componenti provenienti da altri contesti di riuso.

Tuttavia, per garantire la sicurezza dell'opera, è stato necessario adottare specifici accorgimenti tecnici, tra cui trattamenti superficiali per evitare l'esposizione alle fibre di vetro, protezioni contro il degrado dovuto ai raggi ultravioletti e all'umidità.



Figura 4.5 Parco giochi Wikado Rotterdam (Paesi Bassi)

4.2.1.2. Terneuzen (Paesi Bassi)

Un altro parco giochi realizzato con il riciclo delle pale eoliche è situato a Terneuzen, nei Paesi Bassi, un progetto sviluppato dallo studio di progettazione Superuse Studios nell'ambito dell'iniziativa Blade – Made. L'intervento nasce dalla volontà del comune di creare un'area ludica iconica su una piccola spiaggia situata nei pressi del porto. La particolare posizione del sito, soggetta a periodici allagamenti dovuti alle maree e agli eventi atmosferici, conferisce all'area un caratteristico ambiente paludoso attraversato da un antico canale.

Per la realizzazione del parco sono state impiegate due pale eoliche dismesse, tagliate e riadattate per costituire la struttura principale dell'installazione. Le sezioni delle pale sono state integrate con reti da arrampicata, corde, scale, passerelle e uno scivolo in acciaio, dando vita a un percorso ludico articolato e multifunzionale. La configurazione complessiva richiama la forma di un sottomarino arenato, un riferimento enfatizzato dall'utilizzo di una palette cromatica ispirata al mondo marittimo, con tonalità di bianco e blu.

Oltre al valore estetico e funzionale, il progetto dimostra come il riuso creativo delle pale eoliche possa offrire nuove opportunità progettuali. Le forme organiche e astratte delle pale, infatti, non impongono una modalità di gioco predefinita, ma stimolano l'immaginazione dei bambini, che possono interpretare la struttura come una nave pirata, un castello, una tana o qualsiasi altro scenario suggerito dalla fantasia. Questo approccio favorisce un'esperienza ludica aperta e creativa, valorizzando al contempo le peculiari caratteristiche geometriche del materiale recuperato.

Dal punto di vista ambientale, il progetto rappresenta un esempio concreto di economia circolare applicata alle infrastrutture eoliche. Il riutilizzo delle pale consente infatti di evitare i processi di smaltimento e la produzione di nuovi materiali, con una riduzione delle emissioni di CO₂ stimata fino al 90% rispetto alla costruzione di un parco giochi realizzato con materiali convenzionali.



Figura 4.6 Parco giochi Terneuzen (Paesi Bassi)

4.2.2. Tiny House

Un esempio significativo di riutilizzo strutturale delle componenti di turbine eoliche a fine vita è rappresentato dalla trasformazione della navicella in una mini – casa, sviluppata dall’azienda energetica Vattenfall in collaborazione con lo studio di design Superuse e il progetto Blade – Made. L’intervento si inserisce nel più ampio ambito delle sperimentazioni di micro – architettura e delle cosiddette “blade house”, nelle quali elementi provenienti da impianti eolici dismessi vengono reimpiegati direttamente come componenti edilizi, senza passare attraverso processi di riciclo dei materiali compositi.

La navicella utilizzata per il progetto proviene da una turbina V80 da 2 MW installata nel parco eolico di Gols, in Austria, nel 2005. Dopo circa vent’anni di esercizio, il componente è stato recuperato per essere trasformato in una Tiny House. Questa navicella dalle dimensioni di circa 4 metri di larghezza, 10 metri di lunghezza e 3 metri di altezza, era originariamente posizionata a circa 100 metri di altezza dal terreno

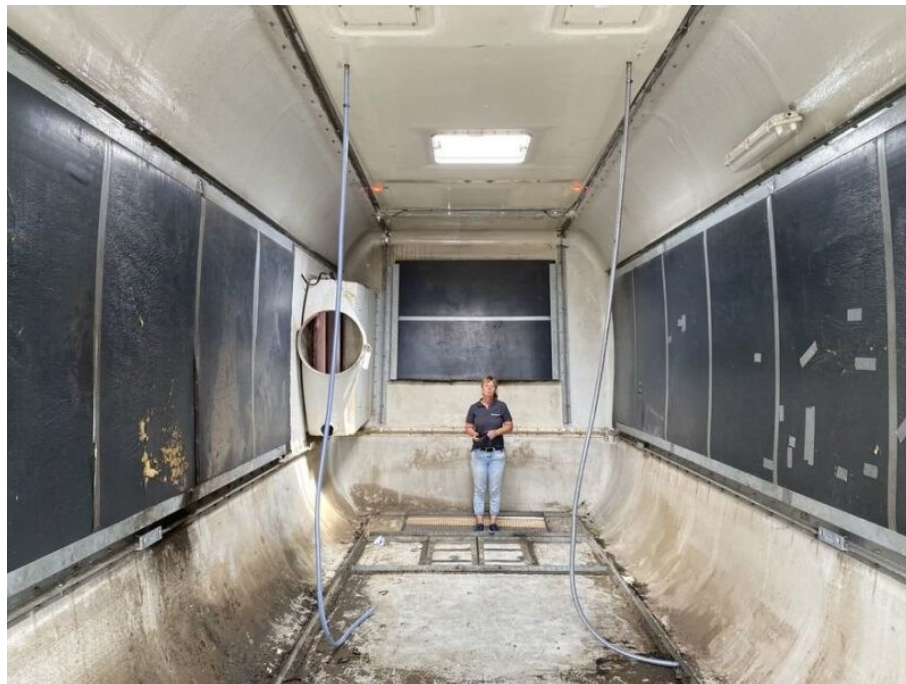


Figura 4.7 Interno di una navicella

Il progetto è stato presentato al pubblico in occasione della Dutch Design Week, con l’obiettivo di dimostrare il potenziale di riuso innovativo dei componenti eolici dismessi.

Dal punto di vista costruttivo, la riconversione della navicella ha richiesto l'integrazione di una struttura secondaria in legno e acciaio, necessaria a garantire la stabilità complessiva e le connessioni tra gli elementi. Successivamente sono state realizzate le aperture per infissi e installati gli impianti elettrici, idrici e termici, con il contributo di aziende partner come Feenstra. L'allestimento interno è stato completato grazie alla collaborazione con Reliving, utilizzando arredi sostenibili e di seconda mano, tra cui un tavolo circolare contenente materiale riciclato da pale eoliche dismesse.

Dal punto di vista ambientale, questo approccio rientra nelle strategie di riutilizzo diretto e di "upcycling strutturale", poiché consente di mantenere il valore funzionale del materiale composito senza ricorrere alla sua scomposizione chimica o meccanica. Tale soluzione contribuisce alla riduzione dei rifiuti compositi, una delle principali criticità legate allo smaltimento delle turbine eoliche a fine vita.

Tuttavia, nonostante il suo forte valore dimostrativo, l'applicabilità su larga scala di questo tipo di interventi rimane ancora limitata. Le principali criticità riguardano la variabilità geometrica dei componenti, le difficoltà logistiche di trasporto e la necessità di adeguate certificazioni strutturali per l'impiego in ambito edilizio, rendendo queste soluzioni ad oggi prevalentemente sperimentali e legate a progetti pilota.

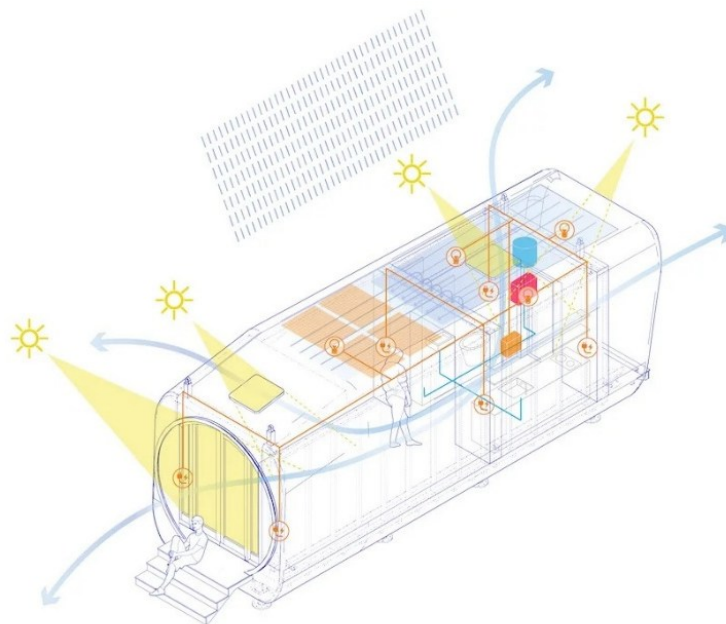


Figura 4.8 Progetto della Tiny House



Figura 4.9 Tiny House

4.2.3. Sedute pubbliche, pensiline per autobus e tettoie

Un ulteriore esempio di riutilizzo diretto delle pale di turbine eoliche a fine vita riguarda il loro impiego nella realizzazione di elementi di arredo urbano, come sedute pubbliche, pensiline per autobus, rastrelliere e tettoie per biciclette o per la ricarica di macchine elettriche. Questa soluzione si basa sul principio della valorizzazione delle caratteristiche geometriche e strutturali delle pale dismesse, trasformandole in componenti destinati a nuove funzioni all'interno dello spazio urbano e riducendo il consumo di materiali vergini.

Le pale vengono inizialmente sezionate direttamente nel sito di dismissione in tre parti principali: una sezione basale, una sezione centrale lunga circa 12 m e una sezione terminale di circa 9 m, successivamente trasportate presso il sito di lavorazione.

La sezione basale, caratterizzata da una geometria più ampia e da una maggiore robustezza strutturale, viene riutilizzata per la realizzazione di fioriere circolari, consentendo di ridurre l'impiego di calcestruzzo normalmente necessario per questo tipo di elemento urbano.

La sezione centrale della pala viene invece suddivisa in due elementi da circa 6 m ciascuno e destinata alla costruzione della copertura di pensiline per autobus o tettoie per biciclette. In questo caso, la pala sostituisce parzialmente materiali tradizionalmente

utilizzati per tali strutture, come il polycarbonato, mantenendo la funzione protettiva e introducendo una soluzione di riuso ad elevato valore aggiunto.

Infine, la sezione terminale viene ulteriormente suddivisa in componenti di dimensioni minori per realizzare differenti elementi di arredo urbano. Una parte viene trasformata in fioriere ovali, in sostituzione di elementi normalmente prodotti in calcestruzzo, mentre la porzione finale viene riadattata per la produzione di pali o dissuasori urbani, riducendo il fabbisogno di nuovi materiali compositi a base di polimeri rinforzati con fibre di vetro.

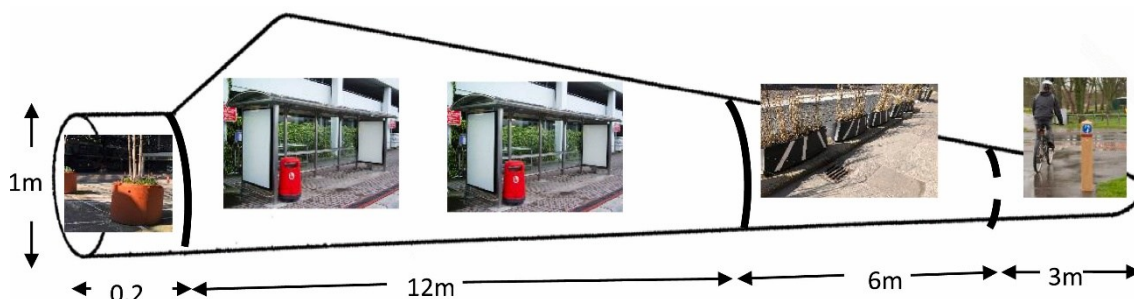


Figura 4.10 Suddivisione della pala eolica per la creazione di elementi di arredo urbano

4.2.3.1. Tettoia per biciclette ad Aalborg (Danimarca)

Nel parcheggio principale del porto di Aalborg, in Danimarca, è stata realizzata una copertura per biciclette, caratterizzata da una configurazione curva e dinamica. La struttura, dotata di una tettoia protettiva, è pensata per offrire riparo a biciclette e ciclisti dagli agenti atmosferici, in particolare pioggia e vento. Il coordinatore ambientale del porto, Brian Dalby Rasmussen, ha spiegato che l'intervento nasce con l'intento di proporre un'alternativa ai tradizionali e spesso considerati "noiosi" ricoveri per biciclette, con l'obiettivo di incentivare l'uso della bicicletta tra i lavoratori dell'area portuale.

L'idea progettuale si inserisce nel più ampio contesto del porto di Aalborg, importante nodo dell'industria eolica danese, e ha coinvolto anche un vicino stabilimento Siemens Gamesa, che ha contribuito fornendo una porzione di pala eolica dismessa destinata al riutilizzo.

La fase esecutiva si è tuttavia rivelata complessa: in assenza di documentazione tecnica dettagliata relativa alla pala, le attività di progettazione e calcolo strutturale hanno presentato diverse criticità. Lo stesso Rasmussen, ingegnere civile, ha quindi sviluppato

un modello preliminare in scala realizzato con legno e cartone presso la propria abitazione, al fine di verificare proporzioni e fattibilità. La costruzione definitiva ha richiesto numerose prove e aggiustamenti in cantiere, soprattutto nella gestione di un elemento in fibra di vetro dal peso di circa tre tonnellate, comportando difficoltà operative per ingegneri, fabbri e tutti i costruttori coinvolti.

La struttura è stata inaugurata alla fine del 2019.



Figura 4.11 Tettoia per biciclette (Danimarca)

4.2.3.2. Tettoia per la ricarica di macchine elettriche a Dundee (Scozia)

Nel Regno Unito è stato sviluppato un progetto per la creazione di una tettoia per la ricarica delle macchine elettriche con il riutilizzo di turbine eoliche a fine vita. Il tutto grazie alla collaborazione tra EDF Power Solutions UK, Dalmore Capital, Foresight, ReBlade e Scottish Enterprise.

Una delle prime applicazioni concrete del progetto ha riguardato la realizzazione di pensiline per una stazione di ricarica di veicoli elettrici a Dundee. In questo caso, EDF Power Solutions UK ha fornito a ReBlade alcune pale eoliche dismesse, successivamente adattate e trasformate in elementi strutturali per coprire le aree di ricarica.

L'iniziativa si inserisce nel più ampio programma di sviluppo delle infrastrutture di ricarica promosso da SSE Energy Solutions, che prevede la realizzazione, entro il 2030,

di circa 500 stazioni di ricarica ultraveloci nel Regno Unito e in Irlanda, alimentate esclusivamente da energia rinnovabile certificata. In tale contesto, l'adozione di pensiline ottenute dal recupero delle pale eoliche rappresenta un'ulteriore misura volta a ridurre l'impronta ambientale delle nuove infrastrutture, favorendo il riutilizzo di materiali compositi difficilmente riciclabili con le tecnologie convenzionali.

Parallelamente al riutilizzo diretto, il progetto ha sviluppato anche un processo di riciclo meccanico delle pale. Le strutture in materiale composito vengono infatti triturate e miscelate con altri materiali di recupero aventi caratteristiche analoghe, ottenendo un nuovo composito impiegato per la produzione di elementi modulari, come assi e profili.



Figura 4.12 Progetto tettoia per la ricarica di macchine elettriche (Regno Unito)



Figura 4.13 Realizzazione tettoia per la ricarica di macchine elettriche (Regno Unito)

4.2.3.3. Sedute pubbliche a Rotterdam (Paesi Bassi)

Nel 2012, per Willemsplein, la piazza ai piedi del Ponte Erasmus a Rotterdam, lo studio Superuse ha progettato un intervento di arredo urbano per rispondere alla necessità di creare uno spazio di sosta per i visitatori, in particolare per i passeggeri del servizio del battello turistico “Spido”, mantenendo al contempo la possibilità di rimuovere temporaneamente gli elementi in caso di eventi pubblici.

Per l'intervento sono state selezionate nove pale eoliche lunghe circa 6 metri. Per consentirne l'utilizzo come elementi di seduta, sono stati realizzati blocchi di fondazione in calcestruzzo sufficientemente pesanti da garantirne la stabilità, utilizzando come aggregato esclusivamente detriti di cemento riciclato provenienti da Rotterdam. La sommità dei blocchi è stata smussata per conferire alle pale una leggera inclinazione, distinguendole così dagli altri elementi verticali presenti nella piazza, come alberi e lampioni. Le pale sono state inoltre verniciate di rosso acceso, in contrasto con il contesto grigio e minerale di Willemsplein. La disposizione accurata degli elementi ha permesso di ottenere diverse modalità di seduta, da configurazioni simili a una sedia fino a vere e proprie sedute più profonde e avvolgenti.



Figura 4.14 Panchine situate nella piazza di Willemsplein a Rotterdam (Paesi Bassi)



Figura 4.15 Particolare costruttivo dei blocchi di fondazione in calcestruzzo riciclato

Nel 2020, lo stesso spazio è stato oggetto di una nuova reinterpretazione. Nell'ambito di un'iniziativa promossa da cittadini, il sito è stato individuato come luogo adatto per la realizzazione di un monumento dedicato alla diversità sessuale e di genere, in collaborazione con il Comune di Rotterdam e BKOR (Beeldende Kunst & Openbare Ruimte). L'obiettivo era quello di creare un punto di incontro sicuro e inclusivo per la comunità LGBTQI+, destinato a ospitare momenti di celebrazione e commemorazione. In attesa di una riqualificazione definitiva dell'area, Superuse è stata incaricata di ripensare temporaneamente l'installazione REwind come monumento LGBTQI+. È stato quindi indetto un concorso artistico per la nuova colorazione delle pale eoliche, vinto dall'artista e grafico olandese June, che ha reinterpretato la superficie delle pale con una grafica ispirata alla bandiera arcobaleno. Il risultato è un intervento temporaneo che trasforma l'installazione in un simbolo visibile e dinamico di inclusione e celebrazione della comunità LGBTQI+.



Figura 4.16 Riqualifica delle panchine situate nella piazza di Willemsplein a Rotterdam (Paesi Bassi)

4.2.3.4. Sedute pubbliche ad Avon (Stati Uniti d'America)

Nel parco giochi Every Child's Playground ad Avon, in Ohio, si distinguono alcune sedute dal design raffinato, caratterizzate da forme organiche e realizzate attraverso il riutilizzo di pale eoliche dismesse. Questi elementi di arredo urbano sono prodotti dall'azienda Canvus, con sede in Ohio, che trasforma componenti di turbine eoliche a fine vita in panchine e installazioni artistiche decorate da artisti locali.

L'azienda propone una linea di prodotti di grande formato ottenuti dal riuso delle pale, comprendente diverse tipologie funzionali. Tra queste, la panchina "Deborah" integra elementi di ombreggiamento e una struttura altalena, mentre il modello "Beacon" è concepito come elemento multifunzionale che può essere utilizzato come seduta, fioriera o fontana.

Secondo Parker Kowalski, cofondatore di Canvus, l'attività dell'azienda ha permesso finora di recuperare e valorizzare diverse centinaia di pale eoliche.



Figura 4.17 Esempio di panchina dell'azienda Canvas

4.2.3.5. Sedute pubbliche nel parco eolico di Meenadreen (Irlanda)

Un ulteriore esempio di riutilizzo delle pale eoliche a fine vita è rappresentato dal progetto sviluppato da Energia Renewables, con sedi a Dublino e Belfast, in collaborazione con la startup irlandese BladeBridge. L'iniziativa ha riguardato una pala dismessa del parco eolico di Meenadreen, sostituita nel 2020, che è stata riconvertita in un'infrastruttura destinata alla fruizione pubblica lungo il sentiero escursionistico Leghowney Loop, attraversante il parco eolico.

L'intervento costituisce il primo progetto di BladeBridge dedicato alla riqualificazione di un parco eolico attraverso il riutilizzo diretto di una pala dismessa, reimpiegata nello stesso sito di provenienza con una nuova funzione. L'obiettivo dell'iniziativa è quello di valorizzare l'area destinata ai visitatori, promuovendo al contempo i principi dell'economia circolare.

La struttura realizzata comprende una tettoia, un tavolo da picnic e diverse panchine, tutti ottenuti mediante il riutilizzo della pala eolica. Secondo Simon Dennehy, direttore creativo di BladeBridge e fondatore di Perch Design, il progetto è stato concepito con l'intento di preservare le caratteristiche morfologiche e strutturali originali della pala. L'approccio progettuale mira, infatti, a mantenere riconoscibili le forme organiche,

ondulate e asimmetriche del componente, consentendo ai visitatori di comprendere immediatamente l'origine dell'elemento riutilizzato e dimostrando come un componente destinato allo smaltimento possa essere trasformato in un'infrastruttura durevole e funzionale, prolungandone significativamente il ciclo di vita.



Figura 4.18 Pala eolica utilizzata per realizzare panchine e tavolo per picnic situate all'interno del parco eolico di Meenadreen (Irlanda)



Figura 4.19 Pala eolica utilizzata per realizzare una tettoia situata all'interno del parco eolico di Meenadreen (Irlanda)

4.2.4. Elementi di facciata non strutturali (Svezia)

Il Niels Bohr Car Park è situato a Lund, in Svezia. L'idea progettuale è stata sviluppata dall'architetto Jonas Lloyd, ispirato da un articolo dedicato all'industria eolica statunitense e alle criticità associate alla gestione delle pale delle turbine a fine vita. Da questa riflessione è nato un processo costruttivo innovativo che prevede il riutilizzo delle pale dismesse come elementi di facciata non strutturali. Nel progetto sono state impiegate 57 pale provenienti dal parco eolico dismesso di Norre Okse So, in Danimarca, di proprietà di Vattenfall, successivamente sezionate e adattate per la realizzazione delle facciate continue dell'edificio. La copertura dell'edificio è inoltre dotata di un impianto fotovoltaico collegato a un sistema di accumulo energetico, che consente di immagazzinare l'energia prodotta durante il giorno e di utilizzarla nelle ore notturne per alimentare le stazioni di ricarica dei veicoli elettrici. Il parcheggio dispone complessivamente di 40 punti di ricarica.

Dal punto di vista progettuale, l'impiego delle pale eoliche risulta particolarmente adatto alla realizzazione di parcheggi multipiano, poiché tali strutture richiedono pareti aperte o parzialmente aperte per garantire un'adeguata ventilazione e ridurre i rischi connessi a incendi o esplosioni. Secondo Lloyd, questa soluzione offre un duplice beneficio ambientale: da un lato consente di valorizzare componenti di grandi dimensioni, nel caso specifico pale lunghe circa 23,5 metri, evitando il loro smaltimento; dall'altro riduce il fabbisogno di materiali da costruzione tradizionali, quali calcestruzzo e acciaio, la cui produzione è caratterizzata da elevate emissioni di gas serra.

La realizzazione del progetto è stata resa possibile grazie alla collaborazione con Vattenfall, una delle principali aziende europee operanti nel settore dell'energia eolica, che gestisce oltre 1.400 turbine in diversi Paesi. Nell'ambito della propria strategia di sostenibilità, l'azienda considera prioritario lo sviluppo di soluzioni per il riutilizzo, la rifunzionalizzazione e il riciclo delle pale eoliche dismesse.



Figura 4.20 Parcheggio multipiano con elementi di facciata non strutturali ricavati dal riciclo delle pale eoliche (Svezia)

4.3. Infrastruttura

4.3.1. Ponte pedonale

Tra le applicazioni infrastrutturali più promettenti per il riutilizzo delle pale di turbine eoliche a fine vita è rappresentato dal loro impiego nella realizzazione di ponti pedonali e ciclabili. Questa applicazione sfrutta le caratteristiche strutturali delle pale per sostituire elementi tradizionalmente realizzati in acciaio o calcestruzzo, estendendo il ciclo di vita di componenti altrimenti destinate alla dismissione.

4.3.1.1. Primo ponte pedonale a Szprotawa (Polonia)

Tra i casi più significativi rientra il primo ponte pedonale e ciclabile realizzato utilizzando travi ottenute da pale di turbine eoliche riciclate, installato sul fiume Szprotawa il 21 ottobre 2021.



Figura 4.21 Primo ponte pedonale costruito da pale eoliche (Polonia)

Parallelamente, il progetto di ricerca Re – Wind ha sviluppato ulteriori applicazioni infrastrutturali basate sul riutilizzo delle pale, proponendo ponti nei quali le pale eoliche vengono impiegate come travi portanti principali.



Figura 4.22 Pala eolica che verrà utilizzata come trave portante principale

4.3.1.2. Secondo ponte pedonale a Cork (Irlanda)

Installato nel gennaio 2022, il BladeBridge rappresenta il primo esempio di ponte pedonale costruito con pale eoliche dismesse nei pressi di Cork, in Irlanda, e il secondo a livello mondiale.

Il ponte pedonale è lungo 5,50 metri e la struttura è stata progettata impiegando due pale di turbina eolica dismesse, ciascuna lunga 12,80 metri, riutilizzate come travi laterali

portanti, mentre ulteriori componenti strutturali sono stati realizzati con un impiego di acciaio notevolmente inferiore rispetto alle soluzioni tradizionali.

L'opera è stata commissionata dall'amministrazione locale della contea di Cork nell'ambito dello sviluppo di una nuova pista ciclopedonale, inserita nel più ampio programma nazionale di potenziamento della mobilità sostenibile. Secondo le valutazioni di BladeBridge, considerando un ciclo di vita previsto di circa 60 anni, il ponte consente una riduzione delle emissioni di gas serra pari a circa il 17% rispetto a un ponte pedonale convenzionale, principalmente grazie alla diminuzione della quantità di acciaio necessaria. Sulla base dei risultati ottenuti, l'azienda ha inoltre avviato la realizzazione di ulteriori ponti analoghi lungo percorsi escursionistici particolarmente frequentati, confermando il potenziale delle pale eoliche dismesse come elementi strutturali per infrastrutture leggere e a basso impatto ambientale.



Figura 4.23 Secondo ponte pedonale costruito da pale eoliche (Irlanda)

4.3.1.3. Progetto sperimentale del ponte pedonale Re – Wind (Irlanda)

Uno dei progetti più rappresentativi sviluppati nell'ambito di Re – Wind riguarda un ponte, presentato nel 2022 ad Aalborg in Danimarca, progettato per collegare la penisola di Loop Head all'Illaunnagall, sulla costa occidentale dell'Irlanda. Durante la fase di sviluppo sono state valutate differenti configurazioni strutturali; tuttavia, le analisi hanno evidenziato che il mantenimento della geometria originaria della pala rappresentava la soluzione più efficiente dal punto di vista della resistenza strutturale. Il progetto finale

prevede l'impiego di due pale affiancate, orientate con le basi in direzioni opposte, creando una struttura autoportante che sfrutta la conformazione aerodinamica originaria del componente. Le estremità aperte delle pale sono state inoltre pensate per integrare sistemi di illuminazione e spazi accessori.

Un aspetto fondamentale emerso durante lo sviluppo del progetto riguarda la necessità di sottoporre le pale recuperate a verifiche strutturali e prove di resistenza, requisito indispensabile per il loro utilizzo in infrastrutture pubbliche. Questo elemento rappresenta uno dei principali fattori che influenzano la fattibilità tecnica ed economica del riutilizzo, rendendo necessaria la definizione di procedure standardizzate, criteri progettuali e normative specifiche per favorire la diffusione di tali applicazioni. Questo progetto però non è mai stato realizzato.

Questi esempi evidenziano come il riutilizzo delle pale possa estendersi oltre le applicazioni architettoniche e di arredo urbano, trovando impiego anche nella progettazione strutturale e contribuendo alla riduzione del consumo di materiali e alla promozione di modelli di economia circolare nel settore delle costruzioni.

4.3.2. Barriera antirumore

Un'altra soluzione per il riutilizzo delle pale di turbine eoliche a fine vita rientrano le barriere antirumore, soluzione che consente di valorizzare le elevate proprietà meccaniche dei materiali compositi limitando al minimo le operazioni di lavorazione. In questo ambito, l'azienda olandese Blade – Made ha sviluppato il progetto Blade Barrier, una barriera acustica realizzata mediante il riutilizzo diretto di pale eoliche dismesse.

L'idea progettuale si basa sull'impiego delle pale quasi nella loro interezza, evitando processi di frantumazione o riciclo meccanico del materiale composito. Questo approccio permette di preservare le elevate caratteristiche di resistenza e durabilità del laminato in fibra di vetro e resina, riducendo contemporaneamente il consumo energetico e le emissioni associate alla produzione di nuovi materiali. Secondo Blade – Made, le barriere acustiche rappresentano una delle applicazioni più efficienti su larga scala, poiché

consentono di riutilizzare un elevato numero di pale: una configurazione con elementi disposti orizzontalmente richiede circa 45 pale per chilometro, mentre una configurazione verticale può arrivare a impiegarne fino a 200 pale per chilometro, a seconda dell'altezza della barriera e delle prestazioni acustiche richieste.

Per verificare la fattibilità tecnica e commerciale della soluzione, è stata realizzata un'installazione sperimentale lunga 60 metri presso l'area di sperimentazione di Rijkswaterstaat situata lungo l'autostrada A58, nei pressi di Oirschot (Paesi Bassi).

L'installazione pilota è stata concepita per valutare diversi aspetti fondamentali ai fini di una futura diffusione su larga scala. In particolare, le attività di monitoraggio riguardano la producibilità del sistema costruttivo, le prestazioni acustiche e la capacità di riduzione del rumore, la sostenibilità ambientale attraverso un'analisi del ciclo di vita, la fattibilità economica dell'intervento, nonché gli aspetti legati alla manutenzione, alla durabilità e alla sicurezza strutturale. I risultati di tali valutazioni consentiranno di verificare la possibilità di certificare questa soluzione per l'impiego nelle infrastrutture stradali.



Figura 4.24 Installazione sperimentale della barriera antirumore presso il sito InnovA58, Oirschot (Paesi Bassi)



Figura 4.25 Installazione definitiva della barriera antirumore presso il sito InnovA58, Oirschot (Paesi Bassi)

4.3.3. Torre panoramica

Nel caso delle torri panoramiche, le pale eoliche dismesse possono essere reimpiegate come elementi strutturali verticali portanti, componenti di irrigidimento o, in alcune configurazioni, come involucro esterno dell'edificio. La loro elevata efficienza strutturale, dovuta all'alto rapporto resistenza/peso tipico dei materiali compositi, consente la realizzazione di sistemi leggeri che riducono significativamente il consumo di acciaio e calcestruzzo, con conseguente abbattimento delle emissioni associate alla produzione di nuovi materiali.

Dal punto di vista della sostenibilità ambientale, la letteratura recente evidenzia come il riutilizzo delle pale eoliche a fine vita rappresenti una strategia coerente con i principi dell'economia circolare, privilegiando il riuso diretto rispetto al riciclo energeticamente intensivo dei compositi in fibra di vetro e resina. Sebbene tali applicazioni siano ancora in fase sperimentale e limitate a prototipi o installazioni dimostrative, le torri panoramiche emergono come un caso studio significativo di integrazione tra progettazione architettonica sostenibile e valorizzazione delle infrastrutture energetiche dismesse.

Un esempio emblematico è rappresentato dai progetti sviluppati nell'ambito del filone di ricerca Blade – Made, che esplora l'impiego architettonico e strutturale delle pale eoliche dismesse. In questi concept, le turbine vengono reinterpretate come elementi costruttivi per nuove funzioni civili e paesaggistiche.

Nel caso delle torri panoramiche, le pale sono disposte verticalmente o assemblate in configurazioni spaziali modulari in grado di sostenere piattaforme di osservazione sopraelevate. In questo modo, il componente mantiene gran parte della sua geometria originale e delle proprietà meccaniche residue, evitando processi di frantumazione o smaltimento ad alta intensità energetica.

Dal punto di vista costruttivo, le pale possono assumere una duplice funzione: elemento strutturale primario e componente architettonico espressivo.



Figura 4.26 Progetto torre panoramica

CONCLUSIONE

Il percorso di sviluppo dell'energia eolica ha dimostrato come questa tecnologia rappresenti oggi uno dei pilastri fondamentali della transizione energetica verso sistemi di produzione elettrica più sostenibili e a ridotte emissioni di carbonio. L'evoluzione delle turbine eoliche, caratterizzata dall'incremento delle dimensioni, dal miglioramento delle prestazioni e dalla diffusione degli impianti offshore, ha consentito un significativo aumento della produzione di energia rinnovabile e una progressiva riduzione della dipendenza dalle fonti fossili.

Tuttavia, la sostenibilità del settore eolico non può essere valutata esclusivamente sulla base dell'energia prodotta durante la fase operativa degli impianti, ma deve necessariamente considerare l'intero ciclo di vita delle infrastrutture e dei materiali impiegati. In questo contesto, il progressivo raggiungimento del fine vita delle prime generazioni di turbine eoliche pone nuove sfide di natura ambientale, tecnica ed economica, rendendo indispensabile l'adozione di strategie orientate alla gestione sostenibile delle componenti dismesse.

Dall'analisi sviluppata in questo elaborato è emerso come la composizione eterogenea delle turbine eoliche renda differenziato il livello di recuperabilità dei materiali. Componenti quali acciaio, rame e altri metalli risultano oggi ampiamente recuperabili attraverso filiere consolidate, mentre le pale eoliche rappresentano tuttora uno degli elementi più critici per effetto dell'impiego di materiali compositi rinforzati con fibre e matrici termoindurenti, progettati per garantire elevate prestazioni ma difficilmente separabili e riciclabili.

Sono stati approfonditi i principali processi di recupero attualmente disponibili, evidenziando come le tecnologie meccaniche, termiche e chimiche offrano differenti livelli di efficienza, qualità del materiale recuperato e sostenibilità economica. Accanto alle tecniche di riciclo, il riutilizzo diretto delle componenti emerge come una delle strategie maggiormente promettenti, in quanto consente di preservare il valore strutturale dei materiali e ridurre il consumo di nuove risorse.

Particolare interesse è stato riscontrato nelle applicazioni di riuso delle pale eoliche in ambito edilizio, infrastrutturale e architettonico, attraverso la realizzazione di elementi

strutturali, elementi edilizi, ponti pedonali, pensiline, arredi urbani, barriere antirumore, spazi ricreativi e soluzioni abitative sperimentali. Tali esempi dimostrano come materiali originariamente progettati per la produzione energetica possano essere reintegrati in nuovi cicli di utilizzo, estendendone la vita utile e riducendo la quantità di rifiuti destinati allo smaltimento.

In tale prospettiva, il paradigma dell'economia circolare assume un ruolo centrale per il futuro del settore eolico. L'applicazione dei principi di riduzione, riuso, recupero e riciclo permette infatti di superare il modello lineare tradizionale e di orientare la progettazione verso approcci più sostenibili, basati sulla conservazione del valore dei materiali nel tempo. Ciò implica non soltanto lo sviluppo di tecnologie di trattamento più efficienti, ma anche una progressiva evoluzione nella progettazione delle turbine, favorendo l'impiego di materiali maggiormente riciclabili e strategie di progettazione orientate al fine vita.

In conclusione, il raggiungimento di una reale sostenibilità dell'energia eolica richiede una visione integrata che consideri non solo la produzione di energia rinnovabile, ma anche la gestione responsabile delle risorse lungo tutto il ciclo di vita degli impianti. La diffusione di modelli di economia circolare rappresenta quindi una condizione fondamentale affinché il settore eolico possa consolidare il proprio ruolo nella transizione energetica e contribuire in maniera concreta allo sviluppo di un sistema energetico e industriale sempre più sostenibile.

BIBLIOGRAFIA

- [1] André, A., Kullberg, J., Nygren, D., Mattsson, C., Nedev, G., & Haghani, R. (2020). Re-use of wind turbine blade for construction and infrastructure applications. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 942(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/942/1/012015>

- [2] Beauson, J., Laurent, A., Rudolph, D. P., & Pagh Jensen, J. (2022). The complex end-of-life of wind turbine blades: A review of the European context. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 155, 111847. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2021.111847>

- [3] Díaz, H., & Guedes Soares, C. (2020). Review of the current status, technology and future trends of offshore wind farms. Ocean Engineering, 209, 107381. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2020.107381>

- [4] el Fadli, O., Hmamed, H., Naseri, N., & Lagrioui, A. (2026). Strategic selection of offshore wind turbine foundations using a novel RANCOM–CoCoSo model: Application to the Essaouira–Agadir Atlantic coast, Morocco. Ocean Engineering, 357(P1), 125466. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2026.125466>

- [5] Hasheminezhad, A., Nazari, Z., Yang, B., Ceylan, H., & Kim, S. (2024). A comprehensive review of sustainable solutions for reusing wind turbine blade waste materials. Journal of Environmental Management, 366, 121735. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2024.121735>

- [6] Hu, Y., Zhang, Y., Li, Y., Wang, Y., Li, G., & Liu, X. (2024). Wind turbine blade recycling: A review of the recovery and high-value utilization of decommissioned

wind turbine blades. *Resources, Conservation and Recycling*, 210, 107813.
<https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2024.107813>

- [7] Jensen, J. P., & Skelton, K. (2018). Wind turbine blade recycling: Experiences, challenges and possibilities in a circular economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 97, 165–176. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2018.08.041>
- [8] Jia, X., Feng, Z., Chen, J., An, M., Hou, A., Zhang, Y., Chen, S., Du, C., Cheng, Y., & Zhang, G. (2025). Upcycling Wind Turbine Blade Waste into High-Performance Flexible Thermal Insulation Composites. *ACS Applied Engineering Materials*.
<https://doi.org/10.1021/acsaenm.5c00902>
- [9] Johst, P., Kucher, M., Bühl, M., Schulz, P., Kupfer, R., Schilling, L., Santos, R. M., Carneiro, C., Voigt, P., Modler, N., & Böhm, R. (2023). Identification and Environmental Assessments for Different Scenarios of Repurposed Decommissioned Wind Turbine Blades. *Materials Circular Economy*, 5(1).
<https://doi.org/10.1007/s42824-023-00085-7>
- [10] Joustra, J., Flipsen, B., & Balkenende, R. (2021). Structural reuse of high end composite products: A design case study on wind turbine blades. *Resources, Conservation and Recycling*, 167, 105393.
<https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2020.105393>
- [11] Khalid, M. Y., Arif, Z. U., Hossain, M., & Umer, R. (2023). Recycling of wind turbine blades through modern recycling technologies: A road to zero waste. *Renewable Energy Focus*, 44, 373–389.
<https://doi.org/10.1016/J.REF.2023.02.001>

- [12] Li, L., & Kang, X. (2025). Recycling wind turbine blades: A comprehensive review of challenges, solutions, and future directions. *Journal of Building Engineering*, 114, 114489. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2025.114489>

- [13] Martulli, L. M., Diani, M., Sabetta, G., Bontumasi, S., Colledani, M., & Bernasconi, A. (2025). Critical review of current wind turbine blades' design and materials and their influence on the end-of-life management of wind turbines. *Engineering Structures*, 327, 119625. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2025.119625>

- [14] Martynowicz, P., Ślimak, P., & Kumsa, D. K. (2026). Advancing Offshore Wind Capacity Through Turbine Size Scaling. In *Energies* (Vol. 19, Issue 7). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/en19071625>

- [15] Mishnaevsky, L. (2021). Sustainable end-of-life management of wind turbine blades: Overview of current and coming solutions. In *Materials* (Vol. 14, Issue 5, pp. 1–26). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ma14051124>

- [16] Mishnaevsky, L., Branner, K., Petersen, H. N., Beauson, J., McGugan, M., & Sørensen, B. F. (2017). Materials for wind turbine blades: An overview. In *Materials* (Vol. 10, Issue 11). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ma10111285>

- [17] Nagle, A. J., Mullally, G., Leahy, P. G., & Dunphy, N. P. (2022). Life cycle assessment of the use of decommissioned wind blades in second life applications. *Journal of Environmental Management*, 302, 113994. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2021.113994>

- [18] O’Leary, K., Pakrashi, V., & Kelliher, D. (2019). Optimization of composite material tower for offshore wind turbine structures. *Renewable Energy*, 140, 928–942. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2019.03.101>
- [19] Paulsen, E. B., & Enevoldsen, P. (2021). A multidisciplinary review of recycling methods for end-of-life wind turbine blades. *Energies*, 14(14). <https://doi.org/10.3390/en14144247>
- [20] Sánchez, S., López-Gutiérrez, J. S., Negro, V., & Esteban, M. D. (2019). Foundations in offshore wind farms: Evolution, characteristics and range of use. Analysis of main dimensional parameters in monopile foundations. In *Journal of Marine Science and Engineering* (Vol. 7, Issue 12). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/JMSE7120441>
- [21] Shields, M., Beiter, P., Nunemaker, J., Cooperman, A., & Duffy, P. (2021). Impacts of turbine and plant upsizing on the levelized cost of energy for offshore wind. *Applied Energy*, 298, 117189. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2021.117189>
- [22] Spini, F., & Bettini, P. (2024). End-of-Life wind turbine blades: Review on recycling strategies. *Composites Part B: Engineering*, 275, 111290. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2024.111290>
- [23] Stavridou, N., Koltsakis, E., & Baniotopoulos, C. C. (2020). A comparative life-cycle analysis of tall onshore steel wind-turbine towers. *Clean Energy*, 4(1), 48–57. <https://doi.org/10.1093/ce/zkz028>

- [24] Tanvir, M. S., & Etminan, A. (2026). Comparative analysis of offshore and onshore wind turbines: Efficiency, design, and environmental impact. *Wind Engineering*, 50(1), 200–215. <https://doi.org/10.1177/0309524X251386646>
- [25] Yu, X., Zhang, C., Li, J., Bai, X., Yang, L., Han, J., & Zhou, G. (2025). Reuse of Retired Wind Turbine Blades in Civil Engineering. In *Buildings* (Vol. 15, Issue 14). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/buildings15142414>

SITOGRAFIA

- [1] Spinning Wing: www.spinningwing.com
- [2] Electrical Academica: www.electricalacademia.com
- [3] Solar Energia: www.solar-energia.net
- [4] Savree: www.savree.com
- [5] Nauticando: www.nauticando.net
- [6] Blade – Made: www.blade-made.com
- [7] Projects Superuse Studios: www.projects.superuse-studios.com
- [8] PureVolt: www.purevolt.ie/index.php
- [9] Universal kraft: www.universalkraft.com
- [10] Greenprophet: www.greenprophet.com
- [11] Reblade: www.reblade.com
- [12] Vattenfall: www.group.vattenfall.com