

SASSARI EOLICA SRL

Addendum sui Sistemi tecnologici e metodologie per la mitigazione dell'impatto dell'avifauna con gli aerogeneratori

Impianto Eolico “Sassari” - 28 MW

Comune di Sassari - località Campanedda | Sassari Eolica S.r.l.

Ph.D. Vincenzo Satta - Dottore agronomo e ingegnere ambientale

Addendum sui Sistemi tecnologici e metodologie per la mitigazione dell'impatto dell'avifauna con gli aerogeneratori

La rapida espansione dell'energia eolica su scala globale, proiettata a raddoppiare la capacità installata da 1 a 2 TW tra il 2024 e il 2029 per raggiungere i target net-zero, introduce elementi antropici critici nello spazio aereo inferiore utilizzato dall'avifauna¹. Sebbene gli impianti eolici rappresentino solo una frazione della mortalità totale causata da strutture artificiali, il rischio di collisione con i rotori in funzione costituisce una barriera significativa per l'approvazione dei progetti e la conservazione delle specie sensibili¹.

L'analisi dell'interazione tra avifauna e aerogeneratori richiede una comprensione approfondita dei limiti sensoriali dei volatili e l'integrazione di strategie di mitigazione attive e passive in grado di bilanciare la generazione di energia pulita con la protezione della biodiversità¹.

Limiti sensoriali dell'avifauna e dinamiche di collisione

La vulnerabilità dei volatili nei confronti degli aerogeneratori deriva da un disallineamento tra le loro attitudini evolutive e le sfide ottiche poste dalle moderne turbine eoliche¹. Nonostante l'elevata acuità visiva complessiva, molte specie di uccelli possiedono campi visivi laterali molto sviluppati a discapito della visione frontale¹. I grandi rapaci, come le aquile reali (*Aquila chrysaetos*), volano frequentemente con la testa inclinata verso il basso alla ricerca di prede, imbattendosi in ampi angoli ciechi frontali che impediscono loro di percepire gli ostacoli situati lungo la propria traiettoria di volo⁵.

A questa barriera anatomica si aggiunge il fenomeno neurologico noto come *motion smear* (sfocatura da movimento)⁶. Quando le pale di un aerogeneratore ruotano a velocità elevate, l'immagine del rotore cambia troppo rapidamente per essere elaborata dalla retina dei volatili, decadendo in una sfocatura trasparente e apparentemente uniforme che l'animale percepisce come uno spazio aereo aperto e sicuro da attraversare⁵.

Inoltre, l'interazione varia significativamente a seconda del gruppo tassonomico; i chiropteri, ad esempio, affrontano sfide sensoriali del tutto differenti derivanti dal loro sistema di ecolocalizzazione e dalla tendenza a cacciare insetti che possono essere attratti dalle emissioni termiche o dall'illuminazione delle turbine, riportando in molti contesti tassi di mortalità nettamente superiori rispetto a quelli dell'avifauna¹.

Sistemi di mitigazione passiva: modifiche cromatiche, ottiche e ambientali

Le soluzioni di mitigazione passiva si basano sulla modifica strutturale, cromatica o ambientale degli aerogeneratori al fine di incrementarne la visibilità intrinseca o ridurre l'attrattiva ecologica, eliminando la necessità di sensori di attivazione in tempo reale².

Colorazione di contrasto e riduzione della sfocatura visiva

L'applicazione di vernici ad alto contrasto su una singola pala del rotore è finalizzata a interrompere l'uniformità visiva generata dalla rotazione, riducendo l'effetto del *motion smear* e creando uno stimolo intermittente percepibile dall'occhio del volatile⁷. Questa tecnica è stata testata attraverso rigorosi protocolli Before-After-Control-Impact (BACI) in diversi contesti geografici, evidenziando risultati contrastanti legati alla variabilità dello sfondo e del paesaggio. Nel parco eolico di Smøla, in Norvegia, un esperimento condotto su un arco temporale di circa undici anni ha previsto la verniciatura in nero di una singola pala su quattro aerogeneratori sperimentali, confrontandoli con quattro turbine di controllo adiacenti⁵. Lo studio ha registrato una riduzione del tasso di mortalità annuale complessivo dell'avifauna superiore al 70%, con un effetto particolarmente drastico sulle popolazioni di aquila di mare, che non hanno registrato alcuna collisione post-trattamento rispetto ai sei individui deceduti nella fase precedente presso le medesime turbine⁵. Tuttavia, la ridotta numerosità campionaria e il basso numero assoluto di carcasse di altre specie di rapaci rinvenute (come i soli due gheppi rilevati nell'intero periodo) limitano la generalizzazione di questi risultati su scala globale⁵. Per questo motivo questa tecnica non è stata proposta in passato.

Per valutare la validità della misura in contesti biogeografici differenti, uno studio BACI condotto in un parco eolico nel bacino del Mediterraneo ha previsto la verniciatura in nero di una pala su quattro aerogeneratori selezionati all'interno di un gruppo di venti turbine complessive, effettuando ricerche giornaliere delle carcasse per 9,5 anni prima del trattamento e 3,5 anni dopo l'applicazione¹². I risultati hanno confermato una riduzione significativa del 74% del tasso di mortalità complessivo, evidenziando tuttavia una forte selettività tassonomica: il trattamento ha mostrato la massima efficacia per i passeriformi e i grandi uccelli acquatici, risultando invece meno incisivo per i rapaci locali¹².

Al contrario, lo studio pilota i cui risultati sono stati diffusi nel 2025 (monitoraggio agosto 2021 - ottobre 2024) presso il parco eolico terrestre di Westereems a Eemshaven, nei Paesi Bassi, non ha evidenziato alcuna riduzione statisticamente rilevante dei tassi di collisione su sette turbine dotate di una pala nera rispetto alle sette di controllo¹³. I ricercatori hanno ipotizzato che l'elevata densità di strutture industriali, i molteplici colori dello sfondo e la complessità visiva dell'area portuale abbiano neutralizzato il contrasto offerto dalla pala nera¹³.

Il progetto di Eemshaven ha inoltre integrato valutazioni approfondite sugli impatti secondari delle modifiche cromatiche: indagini condotte sui piloti d'aviazione civile regionale hanno confermato l'assenza di rischi per la sicurezza del volo, mentre l'installazione di termometri

interni e ispezioni dei materiali non ha rilevato fenomeni di surriscaldamento strutturale o deterioramento precoce dei compositi dovuti al maggiore assorbimento termico del colore nero¹³.

Studio BACI e Localizzazione	Configurazione Sperimentale	Durata del Monitoraggio	Tasso di Riduzione della Mortalità	Specie con Maggiore Beneficio	Limiti della Sperimentazione
Smøla (Norvegia)	4 turbine con 1 pala nera, 4 turbine di controllo ¹⁰ .	11 anni totali (7,5 pre-trattamento, 3,5 post) ⁵ .	>70% complessivo ⁵ .	Aquila di mare (<i>Haliaeetus albicilla</i>) ⁵ .	Campione limitato (8 turbine); basso numero assoluto di carcasse (42 totali) ⁵ .
Bacino del Mediterraneo	4 turbine con 1 pala nera, 16 turbine di controllo ¹² .	13 anni totali (9,5 pre-trattamento, 3,5 post) ¹² .	74% complessivo ¹² .	Passeriformi e grandi uccelli acquatici ¹² .	Minore efficacia protettiva riscontrata per i rapaci locali ¹² .
Westereems (Paesi Bassi)	7 turbine con 1 pala nera, 7 turbine di controllo ¹³ .	3 anni totali (agosto 2021 - ottobre 2024) ¹³ .	Nessuna riduzione significativa ¹³ .	Nessuna specie rilevata ¹³ .	Sfondo industriale denso che annulla il contrasto ottico del nero ¹³ .

Nel settore eolico offshore, il consorzio Ecowende (costituito da Shell ed Eneco) ha avviato nel maggio 2026 l'installazione del parco di Hollandse Kust West VI (760 MW) nel Mare del Nord, integrando sette aerogeneratori Vestas V236-15.0 MW dotati di una singola pala dipinta di rosso, lunga 115,5 metri¹⁴. Il colore rosso è stato selezionato in alternativa al nero e ai pigmenti fluorescenti poiché i test termo-meccanici condotti da Vestas hanno dimostrato una migliore resistenza agli agenti salini e un minore assorbimento termico, preservando l'integrità strutturale della pala¹⁴. Il progetto si inserisce in un concetto ecologico più ampio che prevede un corridoio

di volo non antropizzato verso l'area protetta Natura 2000 "De Bruine Bank", ottenuto mediante un maggiore distanziamento tra le turbine e l'innalzamento dell'altezza minima delle pale dal livello del mare per favorire il passaggio sicuro dei marassi¹⁵.

Inefficacia dei trattamenti riflettenti l'ultravioletto (UV)

L'ipotesi di incrementare la visibilità delle pale mediante l'uso di vernici riflettenti i raggi ultravioletti, basata sul presupposto che molti uccelli percepiscano lunghezze d'onda invisibili all'uomo, è stata smentita da studi genomici e prove sul campo⁵. Le analisi del genoma dei grandi rapaci, in particolare dell'aquila reale, hanno rivelato un sistema visivo sintonizzato sullo spettro del violetto anziché dell'ultravioletto⁵. Di conseguenza, esperimenti comparativi condotti su turbine stradali e costiere non hanno evidenziato alcuna differenza significativa nel comportamento di evitamento o nei tassi di mortalità tra aerogeneratori trattati con vernici UV-riflettenti e aerogeneratori standard⁵.

Geometrie di contrasto bio-informate

Un approccio innovativo pubblicato nel 2025 sul *Journal of the Royal Society Interface* propone l'uso di pattern grafici geometrici applicati lungo le pale per alterare il flusso ottico percepito dai volatili durante il volo²¹. Invece di una colorazione uniforme, il posizionamento di strisce diagonali con angolazioni variabili genera stimoli visivi alternati (segnali di espansione e rotazione simultanei) che impediscono la fusione dell'immagine anche a velocità angolari elevate, consentendo ai rapaci di valutare correttamente la distanza e la velocità del rotore indipendentemente dalle condizioni di illuminazione dello sfondo²¹. Tali studi richiamano i test di laboratorio eseguiti originariamente da Hodos (2003) sul gheppio americano (*Falco sparverius*), i quali avevano dimostrato che configurazioni a strisce sottili sfalsate su tutte e tre le pale garantivano una visibilità della punta della pala superiore rispetto a pale completamente monocromatiche⁸.

Gestione ecologica e agricola del suolo

La rimozione dei fattori di attrazione trofica all'interno del perimetro del parco eolico costituisce un'efficace contromisura passiva². La lavorazione superficiale del terreno (fresatura del suolo a una profondità di 3-8 cm eseguita annualmente prima della stagione riproduttiva) riduce drasticamente la copertura vegetale spontanea e la densità di insetti, soprattutto Ortoteri alla base delle torri². Questa tecnica, testata in Spagna, ha ridotto l'attività di caccia del grillaio (*Falco naumanni*), determinando un calo medio dell'75-100% (nessuna collisione nel biennio sulle turbine con terreno fresato) dei tassi di mortalità per collisione².

Sistemi di mitigazione attiva: monitoraggio e interazione dinamica

Le tecnologie di mitigazione attiva operano mediante il rilevamento in tempo reale dei volatili in avvicinamento, attivando risposte di deterrenza sensoriale o imponendo l'arresto parziale o

totale del rotore (*curtailment*)².

Sistemi ottici intelligenti e intelligenza artificiale

L'uso di telecamere ottiche ad alta risoluzione accoppiate a sensori termici e algoritmi di visione computerizzata rappresenta una delle soluzioni più diffuse per la protezione mirata delle specie protette²⁴.

- **IdentiFlight:** Questo sistema combina un'unità di rilevamento dotata di otto telecamere a campo largo (WFOV), disposte circolarmente per garantire una copertura emisferica di 360 gradi fino a una distanza di 1,3 km, con un'unità ottica mobile di tracciamento ad alta risoluzione (HRSC) montata su una testa pan-tilt²⁵. L'algoritmo di intelligenza artificiale analizza in tempo reale oltre 200 attributi morfologici e cinematici del bersaglio (quali apertura alare, frequenza di battito delle ali e postura di volo), stimando la distanza e la velocità di avvicinamento²⁶. Qualora il sistema rilevi una traiettoria di collisione con una delle turbine associate, invia un comando automatico al sistema SCADA rallentando la rotazione delle pale a una velocità inferiore a 2 giri al minuto (2 rpm) entro pochi secondi²⁵. Il sistema presenta un rapporto di copertura ottimale (N') compreso tra 1,4 e 2,0 aerogeneratori per singola torre di monitoraggio, potendo raggiungere un picco di 3,2 in condizioni topografiche pianeggianti²⁸. In Germania, IdentiFlight è stato sottoposto a validazione rigorosa da parte dei centri di ricerca ARSU e OekoFor, completando con successo la certificazione di efficacia per la tutela del nibbio reale (*Milvus milvus*)²⁹. L'adozione di questi sistemi riduce drasticamente l'impatto economico derivante da sanzioni legali e risarcimenti penali legati alla cattura illegale o uccisione involontaria (*take*) di specie protette da leggi federali o comunitarie, come testimoniato dai casi giudiziari avvenuti nello stato del Wyoming, dove la morte di aquile reali ha comportato sanzioni per 1 milione di dollari a Duke Energy e 2,5 milioni di dollari a PacifiCorp, oltre all'obbligo di implementare piani di conformità ambientale con budget annui stimati in \$600.000 per impianto²⁸.
- **DTBird:** Sistema modulare integrato direttamente sull'aerogeneratore². DTBird associa telecamere ad alta risoluzione a un sistema di deterrenza acustica a due stadi: emette suoni bioacustici di avvertimento quando il volatile attraversa la soglia esterna dell'area di collisione potenziale e segnali ad alta potenza (tramite dispositivi acustici a lungo raggio - LRAD) in caso di penetrazione profonda, attivando l'arresto d'emergenza della turbina qualora l'animale non devii la propria rotta². L'efficacia di rilevamento e reazione di DTBird è stata validata sul campo mediante l'impiego di aeromobili a pilotaggio remoto (UAV) progettati per imitare la firma ottica, il peso e la colorazione dell'aquila reale³².
- **Spoor AI:** Soluzione basata esclusivamente su software in grado di elaborare i dati video catturati da telecamere industriali esistenti installate sulle turbine o su sistemi di monitoraggio offshore³³. Spoor ha validato l'uso di telecamere montate su boe meteoceaniche SEAWATCH Wind Lidar fornite da Fugro presso il parco eolico galleggiante di Hywind Tampen nel Mare del Nord, consentendo il tracciamento continuo 3D dei flussi

migratori marini e l'analisi dell'altezza di volo in condizioni estreme³⁵. Presso l'impianto offshore di Aberdeen Bay, il monitoraggio Spoor ha registrato e analizzato oltre 137.000 tracce di volatili in diciannove mesi, senza rilevare alcuna collisione effettiva con i rotori³³.

Sistemi multisensoriali e di rilevamento impatto in tempo reale

La ricerca tecnologica ha sviluppato architetture integrate per superare i limiti ambientali delle singole tecnologie ottiche:

- **Il sistema ATOM:** Sviluppato per operare nella zona spazzata dal rotore, combina telecamere termiche stereoscopiche, una telecamera nel campo visibile, rilevatori acustici ornitologici e di chiroteri, e un ricevitore VHF sintonizzato per intercettare i segnali dei tag radio Motus applicati ai volatili durante i programmi di monitoraggio migratorio²⁴. Il sistema è stato dispiegato sperimentalmente da Willmott et al. (2023) su turbine offshore negli Stati Uniti per caratterizzare il comportamento di volo notturno²⁴.
- **Aerosense e WT-Bird:** Questi sistemi affrontano la complessa sfida della rilevazione e della verifica dell'avvenuto impatto²⁴. WT-Bird, originariamente concepito dal centro di ricerca olandese TNO, si basa sull'installazione di sensori di vibrazione accoppiati ad accelerometri all'interno delle pale in fibra di vetro, capaci di registrare l'onda d'urto acustica generata dall'impatto di un corpo estraneo²⁴. Il sistema, in grado di rilevare impatti di piccoli volatili del peso di soli 50 grammi e di 7 centimetri di diametro (rappresentativi delle specie di passeriformi più diffuse nelle zone costiere), attiva immediatamente le telecamere ottiche posizionate sulla navicella per registrare il corpo in caduta e facilitare l'identificazione della specie¹³. Aerosense rappresenta l'evoluzione dotata di intelligenza artificiale di questa tecnologia, in grado di discriminare con precisione gli urti biologici da vibrazioni indotte da fulmini, pioggia battente, grandine o distacco di ghiaccio²⁴. Questa prevenzione dell'ispezione visiva riduce drasticamente i tempi di fermo macchina e i costi associati, considerando che per un aerogeneratore offshore da 12 MW i tempi di inattività non pianificati possono comportare perdite di fatturato stimate in circa €18.000 al giorno³⁸.

Rete radar ed elaborazione di scenari di curtailment coordinati

Mentre i sistemi ottici operano sulla scala della singola turbina, la tecnologia radar offre una copertura volumetrica a lungo raggio adatta a prevenire collisioni di massa lungo i principali corridoi migratori³⁹.

Radar ornitologici dedicati

Dispositivi come il radar tridimensionale Accipiter NM1-24D o il sistema 3Bird Stabilized Offshore Radar consentono il tracciamento di uccelli e chiroteri in tempo reale²⁴. Il sistema 3Bird integra un meccanismo di autolivellamento giroscopico indipendente e algoritmi software proprietari in grado di regolare automaticamente la sensibilità di rilevamento e filtrare il rumore di fondo

(clutter) generato dal moto ondoso marino e dall'altezza delle onde, garantendo l'affidabilità del monitoraggio anche in condizioni di tempesta offshore²⁴.

Radar meteorologici continentali e ottimizzazione economica del curtailment

Un'importante svolta metodologica nell'ottimizzazione energetica dello spegnimento temporaneo delle turbine è stata presentata da Bauer et al. (2026) su *Nature Sustainability*⁴¹. I ricercatori hanno analizzato i dati storici di 37 radar meteorologici distribuiti in cinque nazioni europee (Francia, Germania, Belgio, Paesi Bassi e Lussemburgo), valutando i pattern di volo di migrazione notturna in prossimità di circa 42.000 aerogeneratori attivi⁴¹.

Il modello ha confrontato l'efficacia di diversi scenari di arresto mirati a prevenire il 50% o il 90% delle collisioni stimate⁴¹. Lo studio evidenzia che l'implementazione di algoritmi di curtailment coordinati su base transfrontaliera, impostati per arrestare le turbine solo quando l'indice potenziale di collisione per chilowattora prodotto supera una determinata soglia critica, consente di salvaguardare il 90% dei flussi migratori con una perdita di produzione elettrica annua contenuta tra l'1,2% e il 7,6%⁴¹. Al contrario, i sistemi di arresto a soglia fissa basati solo sulla densità ornitologica locale (*blanket curtailment*) comportano perdite di generazione eolica comprese tra il 2% e il 20%, risultando economicamente insostenibili per gli operatori di rete⁴.

Regolazione cinetica attiva: il concetto cyber-fisico SKARV

Il progetto di ricerca **SKARV** (*Slippe fuglekollisjoner med Aktiv Regulering av Vindturbiner*), guidato dall'istituto norvegese SINTEF Energy Research in collaborazione con NTNU, NINA e i partner industriali Equinor e TotalEnergies (con validità operativa programmata dal 2024 al 2027), rappresenta l'avanguardia nei sistemi di controllo attivo degli aerogeneratori⁴².

Architettura di controllo closed-loop

A differenza dei metodi di curtailment che arrestano o rallentano drasticamente la turbina sotto la soglia di sicurezza, SKARV mira a evitare le collisioni apportando minime regolazioni transitorie alla velocità angolare del rotore durante la normale operatività d'esercizio⁶. Il sistema integra i dati provenienti da radar a lungo raggio e telecamere montate sulla navicella, calcolando la traiettoria del volatile a una distanza di 100-200 metri dall'aerogeneratore⁶.

Se l'algoritmo predittivo calcola, con un anticipo minimo di 5 secondi, un punto di intersezione critico tra la rotta dell'uccello e il piano di rotazione, il sistema di controllo cyber-fisico invia impulsi istantanei al modulatore di coppia del generatore e agli attuatori del passo delle pale (*pitch control*), modificando temporaneamente la velocità del rotore⁶. Questa variazione infinitesimale consente di sfasare la posizione spaziale delle pale di circa 20 gradi rispetto alla traiettoria di volo stimata del volatile nell'istante esatto del transito, permettendogli di attraversare indenne lo spazio vuoto compreso tra due pale successive⁴⁶.

Limiti meccanici ed inerziali delle grandi turbine

Le simulazioni numeriche condotte dal dipartimento di cibernetica ingegneristica della NTNU indicano una potenziale riduzione della mortalità dell'avifauna fino all'80%, preservando al contempo la continuità della produzione elettrica⁴⁵. Tuttavia, la fattibilità fisica del sistema si scontra con l'enorme inerzia rotazionale delle moderne turbine multimegawatt⁴⁶. Ad esempio, per uno sfasamento angolare di 20 gradi, una turbina on shore da 5,6 MW richiede un tempo di risposta fisica di almeno 4 secondi⁴⁶.

Inoltre, per stormi numerosi o specie caratterizzate da traiettorie di volo altamente irregolari e non modellabili matematicamente (come i chiropteri), il sistema SKARV deve necessariamente escludere la micro-regolazione dinamica a favore di un protocollo di arresto d'emergenza rapido, il quale richiede dai 12 ai 16 secondi di transizione meccanica per un aerogeneratore standard da 5,8 MW⁶. NINA sta attualmente elaborando i dati ornitologici raccolti dal radar di Lista Bird Observatory in Norvegia per affinare i modelli matematici di volo ed identificare le specie che trarranno il massimo beneficio da questa innovazione cyber-fisica⁴⁶.

Quadro normativo, linee guida e applicazione nel contesto italiano

In Italia, lo sviluppo degli impianti eolici terrestri e marini deve coniugare gli obiettivi del Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC) con la tutela rigorosa degli habitat e delle specie prioritarie, secondo le direttive europee e la legislazione nazionale⁴⁷.

La Valutazione di Impatto Ambientale (VIA) e il ruolo di ISPRA

Il quadro normativo nazionale, governato dal D.Lgs. 152/2006 e recepite la Direttiva VIA 2011/92/UE, prescrive che gli Studi di Impatto Ambientale (SIA) contengano valutazioni approfondite sulla componente biodiversità⁴⁷. Nell'ambito delle valutazioni ambientali statali, l'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) fornisce supporto tecnico specialistico alla Commissione Tecnica VIA/VAS del MASE⁴⁹.

Nel maggio 2024, su istanza della Direzione Generale Valutazioni Ambientali del MASE, è stato istituito un tavolo tecnico mirato alla stesura di Linee Guida standardizzate per la redazione dei SIA per gli impianti FER terrestri⁴⁹. Queste linee guida impongono al proponente di dettagliare preventivamente gli accorgimenti progettuali volti a minimizzare l'impatto visivo e acustico⁴⁷:

- Le torri degli aerogeneratori devono essere esclusivamente di tipo tubolare e prive di tiranti per impedire la sosta o la nidificazione dei rapaci, riducendo le superfici d'impatto statico⁴⁷.
- La superficie esterna delle turbine deve essere rivestita con vernici antiriflesso con tonalità neutre per prevenire fenomeni di abbagliamento visivo che possano disorientare i volatili in volo⁴⁷.

Nello scenario dei parchi eolici onshore italiani, le aziende specializzate in tecnologie di conservazione collaborano strettamente con i produttori di componenti elettrici per

industrializzare i sistemi attivi³⁸. Un esempio di questa sinergia è rappresentato dalla partnership tra Weidmüller e ProTecBird: Weidmüller fornisce quadri elettrici in acciaio inossidabile progettati per resistere ad ambienti ostili, equipaggiati con sistemi di controllo modulari industriali (come u-control) e sistemi I/O (come u-remote) per ospitare l'hardware dei sistemi attivi anticollisione AVES Wind³⁸. Il sistema AVES Wind rileva i volatili tramite fotocamere AI e imposta automaticamente le pale in modalità "idle" (passo bandiera e minima rotazione passiva) fino all'allontanamento del soggetto dall'area di sicurezza³⁸.

Parametro Regolatorio / Tecnico	Prescrizione / Standard Nazionale Italiano	Riferimento Normativo o Linea Guida
Geometria di Supporto	Obbligo di torri tubolari lisce; divieto assoluto di tiranti strutturali per prevenire la sosta dell'avifauna ⁴⁷ .	D.Lgs. 152/2006 e Linee Guida VIA regionali/nazionali ⁴⁷ .
Trattamento Superficiale	Verniciatura antiriflesso a bassa riflettanza con tonalità cromatiche neutre (grigio/bianco opaco) ⁴⁷ .	Linee Guida VIA Ministero dell'Ambiente (MASE) ⁴⁷ .
Distanza Minima Forestale	Distanza minima raccomandata di 200 metri dai margini forestali per la tutela della chiropterofauna ⁴⁸ .	Linee Guida EUROBATS e protocolli di monitoraggio ISPRA ⁴⁸ .
Monitoraggio Ornitologico	Ricerca sistematica di nidi di rapaci entro un raggio di 500-1000 metri dal perimetro dell'impianto ⁵⁰ .	Protocollo di Monitoraggio ANEV - Osservatorio Eolico e Fauna ⁵⁰ .
Interferenza Rete Elettrica	Installazione di dissuasori e marcatori di linea (spirali ad alta visibilità o sfere aeronautiche) sui cavi aerei connessi ³⁹ .	Linee Guida ISPRA per la mitigazione dell'impatto delle linee elettriche ⁵¹ .

Valutazione di Incidenza Ambientale (VInCA) e aree sensibili

Le aree classificate come Important Bird Areas (IBA) o inserite nella rete comunitaria Natura 2000, quali Zone di Protezione Speciale (ZPS) e Zone Speciali di Conservazione (ZSC), richiedono l'applicazione del D.P.R. 357/97 e successive modifiche per l'elaborazione della Valutazione di Incidenza Ambientale (VInCA)⁵². Le linee guida nazionali per la VInCA stabiliscono che se uno studio evidenzia un'incidenza negativa significativa e irreversibile sull'avifauna selvatica protetta dalla Direttiva Uccelli, il progetto non può essere approvato, a meno che non si ricorra alle procedure di deroga previste dall'Articolo 6, paragrafo 4 della Direttiva Habitat, che richiedono l'assenza di soluzioni alternative, la presenza di motivi imperativi di rilevante interesse pubblico e l'adozione di adeguate misure compensative approvate dalla Commissione Europea⁵².

Per ridurre i tassi di mortalità ed evitare contenziosi in fase di VInCA, gli operatori devono inoltre mitigare gli impatti delle linee elettriche di connessione alla rete nazionale⁵¹. ISPRA raccomanda l'installazione di marcatori visivi a spirale o sfere aeronautiche sui conduttori e sulle funi di guardia per eliminare il rischio di collisione, una tecnica che ha dimostrato riduzioni dell'impatto comprese tra il 37% e il 73% in contesti internazionali³⁹.

Sintesi delle prospettive future e raccomandazioni operative

I dati accumulati nell'ultimo decennio evidenziano che l'impatto dell'avifauna con gli aerogeneratori non può essere risolto mediante una singola tecnologia universale, richiedendo un approccio integrato basato sulla specificità ecologica di ciascun sito d'installazione².

La pianificazione iniziale deve rimanere la misura di mitigazione principale per evitare corridoi migratori ad alta densità o habitat critici per la riproduzione²³. L'adozione di modifiche visive passive, quali la verniciatura di contrasto (pala nera o rossa) o i pattern di sfasamento geometrico, deve essere attentamente valutata in base alle caratteristiche cromatiche dello sfondo paesaggistico per garantire che il contrasto visivo generato sia effettivamente percepibile dalle specie locali¹³.

Nei siti ad alta sensibilità ecologica, l'integrazione di sistemi attivi multisensoriali (radar + visione computazionale AI) rappresenta lo strumento più efficace per minimizzare i tassi di mortalità, riducendo al minimo le ore di fermo macchina e le perdite economiche associate³. Infine, lo sviluppo di sistemi di regolazione cinetica attiva (SKARV) apre nuove prospettive ingegneristiche in grado di riconciliare l'incremento di potenza delle turbine di nuova generazione con la tutela dinamica dello spazio aereo condiviso con le comunità aviarie⁴³.

Bibliografia

1. Bio-informed blade patterns for mitigating bird collisions with wind turbines, <https://royalsocietypublishing.org/rsif/article/23/238/20250719/481584/Bio-informed-blade-patterns-for-mitigating-bird>
2. Mitigation measures for preventing collision of birds with wind turbines - Tethys, <https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/Garcia->

[Rosa and Tande 2023.pdf](#)

3. Remote Sensing Methods Combined with Anti-collision Systems to Reduce Avian Collisions with Wind Turbines, Facilitating the Energy Transition, https://austriaca.at/Oxc1aa5576_0x003eaff6.pdf
4. Strategies for Mitigating Impacts to Birds and Bats from Offshore Wind Energy Development: Available Evidence and Data Gaps | bioRxiv, <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2024.08.20.608845v3.full-text>
5. Paint it Black: Does Painting Wind Turbine Blades Increase Visibility to Reduce Bird Fatalities? - Renewable Energy Wildlife Institute, https://rewi.org/wp-content/uploads/2021/11/AWWI-Research-Brief_Paint-it-Black-11_19_21.pdf
6. How can control engineering save birds in wind farms? - SINTEF Blog, <https://blog.sintef.com/energy/how-can-control-engineering-save-birds-in-wind-farms/>
7. Can Painting Wind Turbine Blades Black Really Save Birds? - National Audubon Society, <https://www.audubon.org/magazine/can-painting-wind-turbine-blades-black-really-save-birds>
8. Paint it black: Efficacy of increased wind turbine rotor blade visibility to reduce avian fatalities, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7452767/>
9. Paint it black: Efficacy of increased wind turbine rotor blade visibility to reduce avian fatalities, <https://prosjekt.statsforvalteren.no/siteassets/hubro/paint-it-black-efficacy-of-increased-wind-turbine-rotor-blade-visibility-to-reduce-avian-fatalities-may-et-al-2020.pdf>
10. (PDF) Paint it black: Efficacy of increased wind turbine rotor blade visibility to reduce avian fatalities - ResearchGate, https://www.researchgate.net/publication/343220612_Paint_it_black_Efficacy_of_increased_wind_turbine_rotor_blade_visibility_to_reduce_avian_fatalities
11. Black Wind Turbines: the way forward for reducing avian collision risk? - BSG Ecology, <https://bsg-ecology.com/black-wind-turbines-the-way-forward-for-reducing-avian-collision-risk/>
12. Efficacy of painting wind turbine blades as a mitigation measure to reduce bird collisions in a Mediterranean wind farm | Authorea, <https://www.authorea.com/doi/full/10.22541/authorea.15003733/v1>
13. Black Blade study at RWE location Eemshaven, <https://www.rwe.com/en/research-and-development/wind-power/black-blade-study/>
14. Denmark's bird-collision experiment is blunt and simple: paint one blade red. Now seven turbines will each carry a 379-foot red blade to see if visibility cuts strikes without redesigning the whole machine - Vozpopuli, <https://www.vozpopuli.com/indux/en/denmarks-bird-collision-experiment-is-blunt-and-simple-paint-one-blade-red-now-seven-turbines-will-each-carry-a-379-foot-red-blade-to-see-if-visibility-cuts-strikes-without-redesigning-the/5327/>
15. Ecowende has installed the first of 52 wind turbines at its Hollandse Kust West

- wind farm offshore Netherlands - energy-pedia, [https://www.energy-pedia.com/news/netherlands/ecowende-has-installed-the-first-of-52-wind-turbines-at-its-hollandse-kust-west-\(hkw\)-wind-farm-53-kilometres-off-the-coast-of-ijmuiden-i-204122](https://www.energy-pedia.com/news/netherlands/ecowende-has-installed-the-first-of-52-wind-turbines-at-its-hollandse-kust-west-(hkw)-wind-farm-53-kilometres-off-the-coast-of-ijmuiden-i-204122)
16. Vestas will test a single 379-foot red blade on seven offshore turbines in a 760 MW Dutch wind farm to cut bird collisions, using contrast as a low-tech fix for one of wind power's hardest optics problems - OkDiario, <https://okdiario.com/techy/en/vestas-will-test-a-single-379-foot-red-blade-on-seven-offshore-turbines-in-a-760-mw-dutch-wind-farm-to-cut-bird-collisions-using-contrast-as-a-low-tech-fix-for-one-of-wind-powers-hardest-opt/4567/>
 17. First Wind Turbine Installed at Hollandse Kust West VI Site - offshoreWIND.biz, <https://www.offshorewind.biz/2026/06/01/first-wind-turbine-installed-at-hollandse-kust-west-vi-site/>
 18. Vestas and Ecowende Launch Red-Blade Trial at North Sea Wind Farm - Power System Technology, <https://www.powersystems.technology/vestas-and-ecowende-launch-red-blade-trial-at-north-sea-wind-farm/>
 19. Vestas trials red turbine blades to mitigate bird collisions - Energy Source & Distribution, <https://esdnews.com.au/vestas-trials-red-turbine-blades-to-mitigate-bird-collisions/>
 20. First turbine rises at 760MW Hollandse Kust West - reNEWS, <https://www.renews.biz/offshore-wind/first-turbine-rises-at-760mw-hollandse-kust-west/>
 21. Could striped wind turbines save millions of birds? - Science X, <https://sciencex.com/news/2026-05-striped-turbines-millions-birds.html>
 22. Mitigation measures for preventing collision of birds with wind turbines - SINTEF, https://www.sintef.no/globalassets/project/eera-deepwind-2023/presentasjoner/environmental_garcia-rosa.pdf
 23. Minimizing Collision Risk to Wildlife During Operations, <https://rewi.org/guide/chapters/04-minimizing-collision-risk-to-wildlife-during-operations/>
 24. Wind Energy Monitoring and Mitigation Technologies Tool - Tethys, <https://tethys.pnnl.gov/wind-energy-monitoring-mitigation-technologies-tool>
 25. How It Works — IdentiFlight - Bird Detection System, <https://www.identiflight.com/howitworks>
 26. AI-Backed Sensors Help Reduce Wind Turbine Risks to Protected Birds - The Revelator, <https://therevelator.org/ai-wind-turbines-birds/>
 27. IdentiFlight - Bird Detection System, <https://www.identiflight.com/>
 28. IdentiFlight, http://califaep.org/docs/AEP_2016_IdentiFlight_Permitting.pdf
 29. IdentiFlight - OekoFor GbR, http://www.oekofor.de/en/portfolio/idf_en/
 30. DTBird & DTBat | AI-Powered Bird and Bat Monitoring Systems, <https://www.dtbird.com/en/>
 31. Comprehensive Bird Preservation at Wind Farms - PMC, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7795295/>

32. Evaluating the Effectiveness of a Detection and Deterrent System in Reducing Golden Eagle Fatalities at Operational Wind - DTBird,
<https://www.dtbird.com/wp-content/uploads/2025/10/Evaluating-the-Effectiveness-of-a-Detection-and-Deterrent-System-in-Reducing-Golden-Eagle-Fatalities-at-Operational-Wind-Facilities.pdf>
33. Monitoring for Operational Wind Farms - Spoor AI, <https://www.spoor.ai/bird-monitoring-operational-windfarms>
34. Spoor enables wind energy and wildlife to coexist | Business Norway,
<https://businessnorway.com/solutions/spoor-enables-wind-energy-and-wildlife-to-coexist>
35. Offshore Wind Bird Monitoring: Validating Spoor's Buoy-Mounted Camera Technology, <https://www.thebiodiversityconsultancy.com/projects/offshore-wind-bird-monitoring-validating-spoor-buoy-mounted-camera-technology/>
36. Fugro and Spoor create new AI bird-monitoring solution for offshore wind farms, <https://www.fugro.com/news/business-news/2025/fugro-and-spoor-create-new-ai-bird-monitoring-solution-for-offshore-wind-farms>
37. Bird collision monitoring system for multi-megawatt wind turbines WT-Bird® - TNO (Publications),
<https://publications.tno.nl/publication/34628752/7gu29j/e06027.pdf>
38. AI-based anti-collision system for wind turbines - Weidmüller,
https://www.weidmueller.com/int/industries/wind_energy/protectbird.jsp
39. Mitigation measures to reduce impact of onshore wind power projects | IUCN,
https://iucn.org/sites/default/files/2022-06/05_mitigation_measures_to_reduce_impact_of_onshore_wind_power_projects_here_1.pdf
40. DOCUMENTAZIONE INTEGRATIVA SPONTANEA * * * * * Titolo Elaborato: A4
Codice Elaborato: PZ/23/01 P-VIA IT PZ R - Valutazioni e Autorizzazioni Ambientali - VAS - VIA - AIA, <https://va.mite.gov.it/File/Documento/1161071>
41. Radar data can help protect birds from wind turbines,
<https://www.wsl.ch/en/news/radar-data-can-help-protect-birds-from-wind-turbines/>
42. New NorthWind spin-off will help prevent bird collisions,
<https://www.northwindresearch.no/news/new-northwind-spin-off-will-help-prevent-bird-collisions/>
43. SKARV: Active wind turbine control for bird strike prevention - SINTEF,
<https://www.sintef.no/en/projects/2024/skarv-active-wind-turbine-control-for-bird-strike-prevention/>
44. SKARV will work on making wind turbines more bird-friendly - SINTEF,
<https://www.sintef.no/en/latest-news/2025/skarv-will-work-on-making-wind-turbines-more-bird-friendly/>
45. Active control of wind turbine speed can lead to fewer bird strikes - SINTEF,
<https://www.sintef.no/en/latest-news/2023/active-control-of-wind-turbine-speed-can-lead-to-fewer-bird-strikes/>

46. A practical path to fewer bird strikes in wind energy - SINTEF,
<https://www.sintef.no/en/latest-news/2025/a-practical-path-to-fewer-bird-strikes-in-wind-energy/>
47. Linee guida per la valutazione di impatto ambientale degli impianti eolici - Regione Toscana,
[https://www.regione.toscana.it/documents/10180/271924/Linee+guida+per+la+valutazione+di+impatto+ambientale+degli+impianti+eolici+\(2012\)/44f63668-222f-4eaf-b321-506cfc685365?version=1.0](https://www.regione.toscana.it/documents/10180/271924/Linee+guida+per+la+valutazione+di+impatto+ambientale+degli+impianti+eolici+(2012)/44f63668-222f-4eaf-b321-506cfc685365?version=1.0)
48. LINEE GUIDA PER LA VALUTAZIONE DELL'IMPATTO DEGLI IMPIANTI EOLICI SUI CHIROTTERI, https://www.mammiferi.org/wp-content/uploads/2018/10/LG_eolico.pdf
49. Linee Guida per la redazione degli studi di impatto ambientale relativi ad impianti eolici onshore - ISPRA,
<https://www.isprambiente.gov.it/files2026/pubblicazioni/manuali-e-linee-guida/llggeolico.pdf>
50. Protocollo di Monitoraggio dell'Osservatorio Nazionale su Eolico e Fauna - ANEV,
https://www.anev.org/wp-content/uploads/2019/04/Protocollo-di-Monitoraggio_Osservatorio-Eolico-e-Fauna.pdf
51. Linee guida per la mitigazione dell'impatto delle linee elettriche sull'avifauna - Metadato, <https://va.mite.gov.it/IT/DatiEStrumenti/MetadatoRisorsa/0032b3a4-10e1-4f75-b96c-be4b5fec00fc>
52. WEBINAR 9 Le norme tecniche per la redazione degli studi di impatto ambientale La Valutazione di Incidenza Ambientale (VIncA) - ISPRA,
https://www.isprambiente.gov.it/files2021/eventi/studi-impatto-ambientale/faq-webinar_9_vinca_31marzo.pdf
53. Wind Energy Bird & Bat Radar Monitoring & Mitigation Systems (BMMS) - DeTect, Inc, <https://detect-inc.com/wind-energy-bird-bat-radars/>