

**PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UNA CENTRALE EOLICA OFFSHORE  
DENOMINATA "SCICLI"  
E OPERE DI CONNESSIONE  
POTENZA NOMINALE: 750 MW**

Procedura di Valutazione di Impatto Ambientale ex D.lgs.152/2006  
Domanda di Autorizzazione Unica ex D.lgs. 387/ 2003  
Domanda di Concessione Demaniale Marittima ex R.D. 327/1942

PROFONENTE

**NINFEA RINNOVABILI S.r.l.**

Largo agosto n. 3 20122  
MILANO  
P.IVA: 11920550966

PROGETTAZIONE

**TECNOCONSULT**  
ENGINEERING CONSTRUCTION SRL

Via Einaudi, 20C  
60032 FANO (PU) IT –



ELABORATO

N. TITOLO  
ELABORATO

## IMPATTO DEL BIOFOULING SULLE STRUTTURE DEL PARCO EOLICO

DATA	REVISIONE	EMISSIONE	VERIFICATO	APPROVATO
LUGLIO 2024	00	TECNOCONSULT	NINFEA RINNOVABILI	NINFEA RINNOVABILI

CODICE COMMESSA	SCICLI	CODICE ELABORATO	REL_47
-----------------	--------	------------------	--------



## **INDICE DELLA RELAZIONE**

<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE</b> .....	<b>3</b>
1.1	BREVE DESCRIZIONE DEL PROGETTO .....	3
<b>2</b>	<b>SCOPO DEL DOCUMENTO</b> .....	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>QUADRO NORMATIVO</b> .....	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>IL FENOMENO DEL BIOFOULING</b> .....	<b>9</b>
4.1	PROCESSO DI SVILUPPO .....	9
4.2	FATTORI AMBIENTALI CHE INFLUENZANO LO SVILUPPO DI BIOFOULING.....	11
4.3	PRINCIPALI ORGANISMI DI MACROFOULING .....	15
4.4	IMPATTI DEL BIOFOULING SULLE STRUTTURE SOMMERSE .....	19
<b>5</b>	<b>IL DATABASE EUROPEO DEL BIOFOULING</b> .....	<b>24</b>
<b>6</b>	<b>CONTROLLO DEL BIOFOULING</b> .....	<b>27</b>
6.1	PREVENZIONE DEGLI EFFETTI DEL BIOFOULING .....	27
6.2	MANUTENZIONE DEL BIOFOULING .....	28
<b>7</b>	<b>SCELTE PROGETTUALI</b> .....	<b>31</b>
<b>8</b>	<b>CONCLUSIONI</b> .....	<b>32</b>
<b>9</b>	<b>RIFERIMENTI</b> .....	<b>33</b>

## 1 INTRODUZIONE

L'energia eolica è una delle fonti energetiche rinnovabili fondamentali per la transizione ecologica.

Nel 2023 in Europa, l'installazione di impianti eolici ha registrato un aumento significativo di +17 GW, un record storico, ma, nonostante questa evoluzione, la capacità eolica installata sembra essere ancora insufficiente per soddisfare gli obiettivi della Unione Europea al 2030.

Infatti, la Direttiva 2023/2413 di promozione dell'energia da fonti rinnovabili (c. d. RED III), pubblicata nella Gazzetta Ufficiale Europea del 31 ottobre 2023, ha aumentato dal 32 % al 42,5 % l'obiettivo dell'Unione relativo alla quota di energia da fonti rinnovabili nel consumo lordo di energia entro il 2030, con l'ambizione di raggiungere il 45 %.

In Italia, la potenza eolica installata annuale non segue l'andamento richiesto per raggiungere gli obiettivi 2030 e nel 2023 i nuovi impianti, secondo dati Terna-Gaudì, ammontano a circa 488 MW, in leggera diminuzione sul 2022 (-7%).

Con la sempre minore disponibilità di siti da destinare all'installazione di parchi eolici onshore, l'eolico offshore rappresenta una possibilità per incrementare le energie rinnovabili in Italia e raggiungere sia gli obiettivi energetici posti dalle istituzioni europee per il 2030 sia gli obiettivi intermedio al 2025 e quello del 2030 indicati dal nuovo PNIEC in via di approvazione.

L'Italia è contraddistinta da mari profondi e l'eolico galleggiante presenta le caratteristiche idonee per lo sviluppo di questa specifica tecnologia. Infatti, le strutture flottanti possono essere posizionate anche dove i fondali hanno notevoli profondità, rimanendo anche molto distanti dalla costa. Questo consente la riduzione dell'impatto visivo percepito dalla terraferma e consente lo sfruttamento di aree con disponibilità più elevata della risorsa vento.

### 1.1 Breve descrizione del progetto

In linea con gli indirizzi di politica energetica nazionale ed internazionale relativi alla promozione dell'utilizzo delle fonti rinnovabili volti alla riduzione delle emissioni di gas climalteranti, NINFEA RINNOVABILI S.r.l. si propone di avviare un progetto per la realizzazione di un nuovo impianto eolico offshore denominato "Scicli", di potenza pari a 750 MW, in uno specchio d'acqua nello Stretto di Sicilia a circa 27km dalla costa Siciliana tra Marina di Modica e Marina di Ragusa.

Il progetto prevede l'installazione offshore di:

- 50 aerogeneratori di potenza nominale di 15 MW cadauno, per una potenza nominale complessiva pari a 750 MW, localizzati ad una distanza minima di 27 km e massima di 40 km dalla costa Siciliana;
- 2 sottostazioni elettriche offshore su fondazione fissa (jacket) per l'innalzamento della tensione da 66 kV a 220 kV, ubicate ad una distanza minima di 33 km da costa;
- Cavi di campo (inter-array) per il collegamento delle turbine alle sottostazioni elettriche offshore;

- 4 cavidotti di export a 220 kV per il trasporto dell'energia dalle stazioni elettriche offshore al punto di giunzione a terra.

Il progetto prevede l'installazione onshore di:

- Buca giunti e gruppo di compensazione a terra;
- Cavidotto terrestre per il trasporto di energia dalla stazione di compensazione a terra alla stazione di trasformazione da 220kV a 380kV (stazione utente) ubicata nei pressi della futura Stazione Terna;
- Stazione di trasformazione da 220kV a 380kV (stazione utente);
- Cavidotto di collegamento a 380kV dalla stazione utente alla futura stazione Terna.

Per la connessione del Parco Eolico off-shore di Scicli sono previste delle opere di connessione che consistono in nuove opere della Rete di Trasmissione Nazionale (RTN), in particolare una nuova Stazione Elettrica (SE) a 380 kV da inserire in entra – esci alla esistente linea 380 kV della RTN “Chiamonte Gulfi – Priolo. Per la nuova SE RTN è in fase di approvazione, da parte di Terna, la localizzazione.

Lo schema di connessione alla RTN è individuato nella Soluzione Tecnica Minima Generale (STMG), con codice pratica 202203856, rilasciata da Terna S.p.A. allegata al preventivo di connessione.

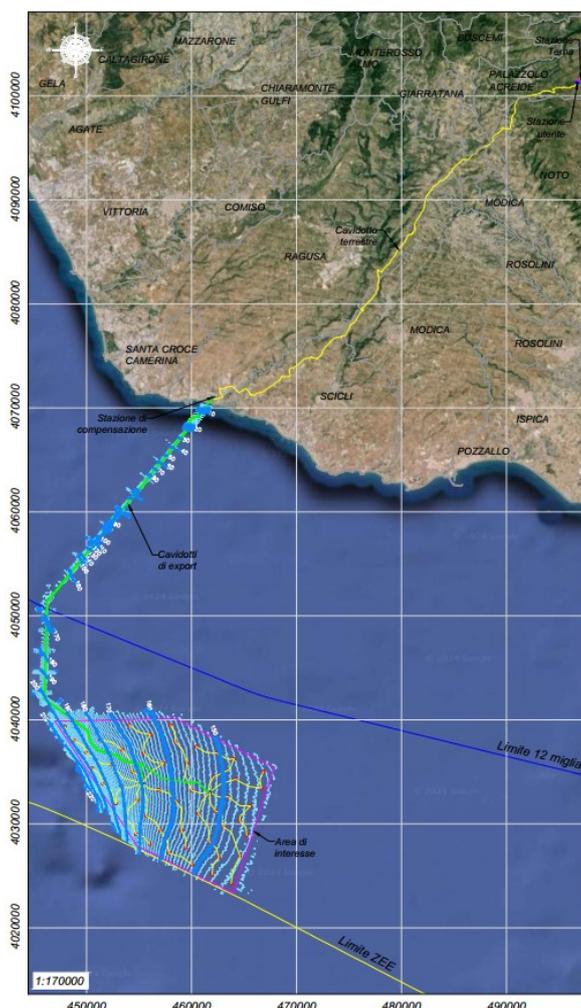


Figura 1-1 – Layout di impianto

## 2 SCOPO DEL DOCUMENTO

Scopo del presente documento è fornire un quadro generale dell’impatto del biofouling sulle strutture marine del parco eolico, descrivendo il processo di formazione ed identificandone i principali effetti. In particolare viene fatta una valutazione qualitativa della presenza di biofouling sulle strutture marittime sommerse e sull’ambiente marittimo circostante.

Infine vengono riportate le possibili misure di prevenzione e mitigazione del fenomeno di biofouling.

### 3 QUADRO NORMATIVO

Dal punto di vista normativo esistono diversi standard, linee guida e legislazioni a livello internazionale circa la determinazione, il controllo, il trattamento e lo smaltimento dell'accrescimento biocenotico sulle strutture installate a mare. Tali documenti sono spesso basati su dati raccolti nei mari del nord Europa e pertanto non direttamente rappresentativi per località o regioni in altre aree del mondo.

Il mercato dell'energia eolica offshore inoltre è più giovane rispetto ai mercati offshore dell'Oil & Gas e della nautica, per tale motivo si hanno pochi riferimenti che si occupano specificamente del settore delle energie rinnovabili marine. Pertanto, è stato opportuno valutare le normative applicabili ad entrambi i settori.

Di seguito vengono riportate le principali fonti di riferimento per quanto riguarda il biofouling per le strutture sommerse, sia a livello nazionale che internazionale:

- Regolamento (CE) n. 1907/2006 del Parlamento Europeo e del Consiglio, del 18 dicembre 2006, concernente la registrazione, la valutazione, l'autorizzazione e la restrizione delle sostanze chimiche (REACH), che istituisce un'agenzia europea per le sostanze chimiche, che modifica la direttiva 1999/45/CE e che abroga il regolamento (CEE) n. 793/93 del Consiglio e il regolamento (CE) n. 1488/94 della Commissione, nonché la direttiva 76/769/CEE del Consiglio e le direttive della Commissione 91/155/CEE, 93/67/CEE, 93/105/CE e 2000/21/CE. Il regolamento vieta l'immissione sul mercato e l'uso di composti organostannici. In particolare, tali composti non possono essere immessi nel mercato o utilizzati come sostanze o all'interno di miscele che abbiano funzione biocida per prevenire l'incrostazione di microrganismi, piante o animali su:
  - a) Imbarcazioni di qualsiasi lunghezza da utilizzare per la navigazione marittima, costiera, estuariata, interna o lacustre;
  - b) Gabbie, galleggianti, reti e qualsiasi altra apparecchiatura o impianto utilizzato nella piscicoltura e nella molluschicoltura;
  - c) Qualsiasi apparecchiatura o impianto parzialmente o totalmente sommerso;
- 2004 – L'Organizzazione Marittima Internazionale delle Nazioni Unite (IMO <https://www.imo.org/>) ospita la Convenzione Internazionale per il Controllo e la Gestione dell'acqua di zavorra e dei sedimenti delle navi, la quale fornisce standard e linee guida per prevenire, minimizzare ed eliminare il trasferimento di organismi nocivi e patogeni nelle acque di zavorra e nei sedimenti;
- 2008 – Direttiva Quadro sulla Strategia Marina dell'UE (MSFD, Direttiva 2008/56/CE, [https://commission.europa.eu/index\\_it](https://commission.europa.eu/index_it)) entra in vigore con l'obiettivo di una più efficace tutela dell'ambiente marino e della biodiversità. La MSFD propone agli Stati membri di raggiungere il "Buono Stato Ambientale" con la valutazione di 11 Descrittori, tra cui il D2 – *Specie Non Indigene*, attraverso un approccio di gestione adattivo che deve essere mantenuto aggiornato e rivisto ogni sei anni;
- 2011 – il Comitato per la Protezione dell'Ambiente Marino dell'IMO (MEPC) adotta le Linee guida IMO per il controllo e la gestione del biofouling delle navi per ridurre al minimo il trasferimento di

specie acquatiche invasive (IAS), ulteriormente integrate dalle Linee Guida del 2012 per ridurre al minimo il trasferimento di specie acquatiche invasive come il biofouling nelle barche da diporto (incrostazione dello scavo);

- 2015 – Entrata in vigore del Regolamento UE sulle specie esotiche invasive (Regolamento IAS 1143/2014, [https://commission.europa.eu/index\\_it](https://commission.europa.eu/index_it)) che stabilisce norme per prevenire, ridurre al minimo e mitigare gli impatti negativi causati dalle specie invasive. Il Regolamento impone agli Stati membri di studiare le vie di introduzione e diffusione delle specie invasive e di istituire sistemi di sorveglianza e piani di azione per accertare, tra le altre cose, le adeguate misure preventive;
- American Bureau of Shipping – Guidance notes on Biofouling management plans – August 2019;
- NI572 – Classification and Certification of Floating Offshore Wind Turbines. Fornisce le linee guida e le raccomandazioni per la classificazione e la certificazione delle piattaforme galleggianti progettate come supporto delle turbine eoliche offshore galleggianti;
- NI624 R00 – Risk-based structural integrity management of offshore jacket structures. Stabilisce i requisiti per la gestione dell'integrità strutturale basata sull'analisi del rischio per le piattaforme offshore;
- DNVGL-ST-0126 - Design of Offshore Wind Turbine Structures;
- DNV-RP-C205 - Environmental conditions and environmental loads. Fornisce una guida per la modellazione, l'analisi e la previsione delle condizioni ambientali oltre che una guida per il calcolo dei carichi ambientali che possono agire sulle strutture;
- DNV-ST-0119 - Floating wind turbine structures. Fornisce i principi generali per la progettazione strutturale delle strutture eoliche galleggianti;
- DNV-OS-E301 - Position mooring;
- DNVGL ST 0437 - Load and site conditions for wind turbines;
- DNVGL-RP-B101 - Corrosion protection of floating production and storage units;
- DNVGL-CP-0110 - Anti-fouling systems;
- ISO 12944-5 (2019) - Paints and varnishes - Corrosion protection of steel structures by protective paint systems - Part 5: Protective paint systems. Fornisce indicazioni per le vernici e i sistemi di verniciatura utilizzati per la protezione dalla corrosione delle strutture in acciaio;
- ISO 19901-1 (2015) - Petroleum and natural gas industries - Specific requirements for offshore structures - Part 1: Metocean design and operating considerations;
- ISO 19902 (2020) - Petroleum and natural gas industries – Fixed steel offshore structures;
- ISO 19904-1 - Petroleum and natural gas industries - Floating offshore structures - Part 1: Monohulls, semi-submersibles and spars;



- Regolamento (CE) n. 782/2003 del Parlamento Europeo e del Consiglio, del 14 aprile 2003, sul divieto dei composti organostannici sulle navi;
- Regolamento (CE) n. 536/2008 della Commissione del 13 giugno 2008 sul divieto dei composti organostannici sulle navi.

## 4 IL FENOMENO DEL BIOFOULING

Con il termine “biofouling” si indica un complesso fenomeno marino consistente nell’incrostazione biologica dei corpi sommersi. Il biofouling consiste nell’accumulo biologico indesiderato di organismi acquatici come microrganismi, piante e animali su superfici e strutture immerse o esposte all’ambiente acquatico. Le opere installate in mare divengono, in tempi più o meno brevi, oggetto di colonizzazione da parte di organismi marini. Questa biocrescita, in determinati casi, potrebbe causare una riduzione di efficienza operativa degli apparati riducendo la durata di vita utile.

Il biofouling pertanto rappresenta un punto di attenzione condiviso da tutti i settori marittimi in cui si ha l’impiego di strutture sommerse, dalla nautica alle opere portuali e costiere fino all’Oil & Gas. Pertanto, anche il settore delle energie rinnovabili marine (Marine Renewable Energy o MRE), che comprende le tecnologie per l’energia eolica offshore e l’energia oceanica (come quella del moto ondoso e delle maree), prevede l’utilizzo di installazioni marine e attrezzature sommerse di varie dimensioni e forma che vengono utilizzate in mare per lunghi periodi di tempo.

Il presente progetto del parco eolico offshore, comprendendo installazioni a mare, sarà interessato dalla presenza di accrescimento biocenotico sulla superficie sommersa delle fondazioni (siano esse floater galleggianti o strutture fisse reticolari), degli ormeggi e dei cavi elettrici non interrati.

Si evidenzia il fatto che il fenomeno del biofouling è maggiore in prossimità della superficie del mare e nullo ad elevate profondità. Pertanto, i componenti soggetti a potenziali impatti sono limitati allo strato marino superficiale.

### 4.1 Processo di sviluppo

Il biofouling è un processo complesso che comporta la colonizzazione da parte di organismi microfouling, come virus, batteri, cianobatteri, funghi, protozoi e microalghe e organismi più grandi che provocano macroincrostazioni, inclusi macroinvertebrati e macroalghe. Il macrofouling comprende organismi calcarei con incrostazione dura come cirripiedi, mitili e vermi tubicoli e organismi con incrostazione morbida come alghe non calcaree, spugne, anemoni, tunicati e idroidi. Nella successione delle comunità che colonizzano i substrati duri si possono riconoscere una sequenza *temporale*, una *stagionale* e una *biotica* o *vera successione*. La sequenza temporale è ampiamente descritta come una successione di stadi di colonizzazione e prevede quattro fasi (Wahl, 1989; Railkin, 2003; Callow, 2011):

- 1) La prima fase inizia quasi istantaneamente, entro pochi minuti o ore dall’immersione, in cui i substrati assorbono e formano un biofilm condizionante biochimico, costituito da materiale organico come glicoproteine, proteoglicani e polisaccaridi naturali disciolti nell’acqua di mare;
- 2) Successivamente si viene a formare un biofilm contenente batteri colonizzatori e microalghe. Nel giro di poche ore i colonizzatori primari, ossia assemblaggi di organismi unicellulari che secernano sostanze extracellulari polimeriche (SEP), aderiscono al substrato. In questo modo, i microrganismi insieme alle SEP facilitano l’insediamento dei macrofouler;

- 3) Nel giro di giorni o settimane dall'immersione si viene a formare una comunità più complessa formata da organismi pluricellulari e pascolatori come spore di alghe, funghi marini, larve di idroidi, briozoi e cirri-piedi. I colonizzatori secondari costituiti da macrofouler sessili, compresi soft e hard fouler, sviluppano e ricoprono il microfouling. Man mano che crescono ed invecchiano, i macrofouler forniscono "microhabitat" in grado di attirare nuovi insediamenti;
- 4) Infine, dopo settimane o mesi, i substrati vengono colonizzati dai colonizzatori terziari che tipicamente vi risiedono all'interno del biofouling sessile. Le comunità di biofouling raggiungono la maturità entro pochi anni, accompagnata da un aumento della diversità e della ricchezza delle specie. Le comunità sono caratterizzate da una varietà di organismi bentonitici ed epibentonitici sessili e mobili. Tali comunità possono evolversi in strati diversi e talvolta molto spessi popolati sia da organismi di hard fouling (cirri-piedi, mitili, vermi tubicoli, coralli, ecc.) che da popolazioni di soft fouling (ascidi, idroidi e macroalghe).

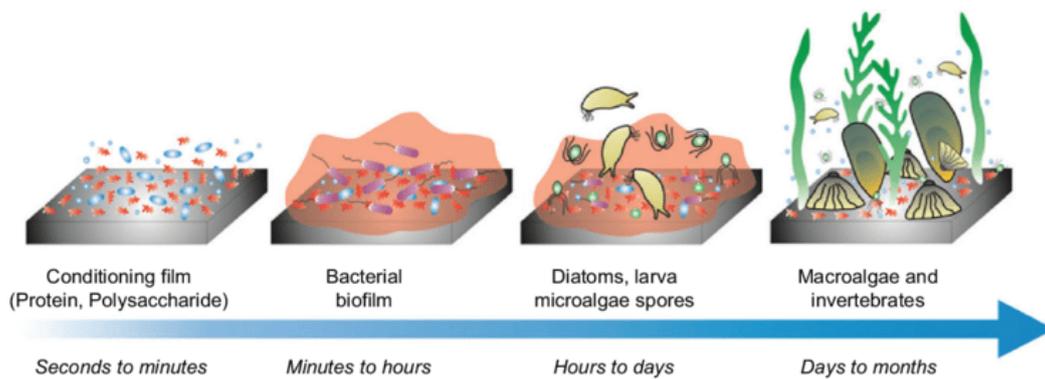


Figura 4.1 – Fasi di colonizzazione del biofouling

Queste quattro fasi sono regolate da meccanismi fisici e biologici in maniera diversa: il film batterico ha una natura mista biologico-fisica, mentre con il micro e il macro fouling i fattori biologici cominciano a prevalere su quelli fisici.

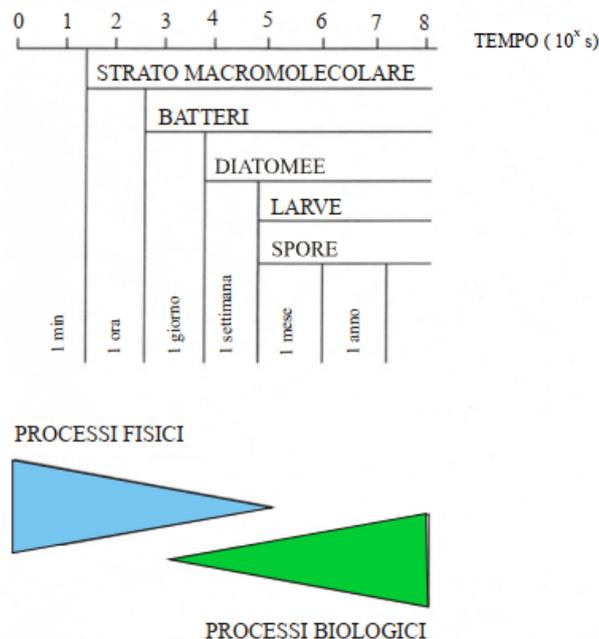


Figura 4.2 – Sequenza temporale sviluppo biofouling (A.I. Railkin, 2004)

Va però esplicitamente menzionato che in ambiente naturale il processo di biofouling è molto variabile e non è detto che segua esattamente questa sequenza schematica.

Questo modello “successivo” di colonizzazione infatti risulta più tradizionale e tende a semplificare eccessivamente il processo di colonizzazione implicando una causalità da uno stadio all’altro.

È ormai ampiamente accettato che la colonizzazione segua un modello più dinamico e “probabilistico”, in cui l’assenza di uno stadio non impedisce il verificarsi di un altro stadio. Ad esempio alcune specie di cirripedi e briozoi possono stabilirsi su un substrato senza la presenza di un biofilm condizionante. La colonizzazione dipende quindi fortemente dal tipo e dal numero di organismi, il cui insediamento è indipendente l’uno dall’altro, che potrebbero attaccarsi o colonizzare il substrato. Nell’assenza di substrato, i foulants possono aggregarsi e formare neve marina, che rimane nell’acqua di mare e può eventualmente attaccarsi ad un substrato. Gli organismi viventi come larve di invertebrati e spore di alghe, restando intrappolati nella neve marina, crescono dopo l’attaccamento (Rittschof, 2010).

## 4.2 Fattori ambientali che influenzano lo sviluppo di biofouling

Lo sviluppo del biofouling ed il numero di organismi che aderiscono nelle strutture sommerse dipendono da molti fattori. La composizione delle comunità di organismi di biofouling infatti varia notevolmente a livello geografico, stagionale e locale a seconda delle profondità o ai diversi livelli di esposizione alle onde ed è influenzata da numerosi fattori abiotici e biotici (Wahl, 1989).

I fattori abiotici si identificano con le caratteristiche dell’ambiente, comprendono pertanto le caratteristiche fisico-chimiche dell’acqua di mare come la temperatura, il pH, il contenuto di ossigeno

disciolto e quello di sostanza organica. Tra i fattori abiotici si aggiungono anche le condizioni idrodinamiche dell'area come la velocità della corrente, l'esposizione alle onde, la distanza dalla riva e la profondità. Oltre a questi, l'insediamento iniziale e la crescita di biofouling sono influenzati anche da altri fattori abiotici che includono le caratteristiche del substrato (come la composizione del materiale (ad esempio metallo o plastica), il colore, la ruvidità, il periodo di immersione ed il movimento (ad esempio attrezzature in movimento libero come turbine mareomotrici rispetto a turbine statiche con fondazioni) (Lehaitre et al., 2008; Cao et al., 2011; Van Der Stap et al., 2016). I fattori biotici invece sono costituiti dagli organismi viventi che sono presenti nell'ambiente e dalle relazioni che intercorrono tra essi. Tra questi, la biologia dei diversi organismi determinerà la probabilità di un insediamento su un substrato sommerso. Questo, a sua volta, dipende da molte interazioni specie-specifiche e può differire notevolmente da specie a specie ed a seconda del luogo. Inoltre, anche gli stimoli chimici rilasciati in risposta alla competizione, alla riproduzione, al pascolo ed alla predazione svolgono un ruolo importante nell'insediamento e nel reclutamento della superficie di diversi organismi (Dayton et al., 1971; Raffaelli et al. 1999; Johnson et al., 1989).

Molti fattori sono correlati e sono tutti direttamente o indirettamente influenzati dalla stagionalità e dalla localizzazione. Sebbene il processo di biofouling sia evidentemente complesso e fortemente dipendente da fattori fisici, geografici e da parametri biologici, il presente documento si concentrerà sui più importanti fattori abiotici.

### Temperatura dell'acqua

La temperatura dell'acqua del mare è correlata alla latitudine ed alla stagionalità ed è un importante determinante geografico della composizione delle comunità marine, compresa quella del biofouling, influenzando in particolare il periodo di deposizione delle uova, l'insediamento, la crescita e la riduzione degli organismi (Newell et al., 1980). In generale, il tasso di crescita del biofouling aumenta con la temperatura. Nelle zone polari quindi, a causa delle basse temperature ( $< 5^{\circ}\text{C}$ ), è previsto un minor biofouling, che si verificherà prevalentemente durante la metà dell'estate quando le temperature sono più alte. Al contrario, nelle località tropicali e subtropicali, il biofouling è più intenso poiché le temperature più calde ( $> 20^{\circ}\text{C}$ ) consentono la riproduzione continua durante tutto l'anno. Nelle zone temperate, con un clima mite ( $5\text{--}20^{\circ}\text{C}$ ), il biofouling si verificherà durante tutto l'anno e mostrerà una forte stagionalità, con una maggior riproduzione e crescita a partire dalla primavera (inizio Aprile) fino all'autunno (fine Ottobre) (Lehaitre et al., 2008; Hellio et al., 2009).

La temperatura del substrato in cui crescono gli organismi invece ha un'influenza significativamente minore sullo sviluppo del biofouling (Almeida et al., 2009).

### Profondità e disponibilità di luce

La profondità e la disponibilità di luce influenzano notevolmente la composizione e la crescita degli organismi di biofouling.

I macrofouler, in particolare gli organismi fotosintetici come le macroalghe, sono generalmente più abbondanti all'interno della zona eufotica (0-40 m) (Bartsch et al., 2008). Questa zona è generalmente più

calda, presenta livelli di luce più elevati ed è ricca di plancton, il quale funge da principale risorsa alimentare per molti organismi non fotosintetici.

Poiché con la profondità si ha una minore intensità luminosa, all'interno di questa zona, la crescita del biofouling e della biomassa generalmente diminuiscono con la profondità (Lehaitre et al., 2008; Almeida et al., 2020). Nonostante la diminuzione della pressione del biofouling con la profondità, l'insediamento di invertebrati sessili filtranti, come i cirripedi delle ghiande e i mitili, che spesso costituiscono la maggior parte del macrofouling, avviene anche a grandi profondità (Foster et al, 1987).

### Correnti e distanza dalla riva

Sia la composizione che l'estensione del biofouling su un substrato colonizzabile sono influenzate dalle correnti e dalla distanza dalla costa (Almeida et al., 2020). Molti organismi, come i mitili, i cirripedi e i vermi tubicoli beneficiano delle correnti in quanto si nutrono di particelle sospese nell'acqua o di sostanze nutritive disciolte nell'acqua (Railkin, 2003). Le larve mobili di molti invertebrati e le spore di alghe vengono trasportate al largo dalle correnti e, quanto più vicino è il substrato alla riva, tanto maggiore è la probabilità di successo della colonizzazione, specialmente di strutture fisse come le piattaforme (Almeida et al., 2020). L'impatto delle correnti e del flusso d'acqua sulle comunità di biofouling dipenderà dalle velocità e dalle forze di taglio generate in prossimità del substrato (Koehl et al., 2007). Ad esempio, mentre gli organismi filtranti sessili possono beneficiare di flussi elevati in termini di ricezione di particelle come risorsa alimentare, forti correnti possono allontanare gli organismi dal substrato. Per far fronte allo spostamento, quando sono in forma adulta, molti organismi sessili come i cirripedi hanno sviluppato meccanismi sofisticati per una forte adesione superficiale (Swain et al., 2000; Kamino, 2013; Rittschof et al., 2008). D'altra parte, flussi inferiori possono facilitare l'insediamento di larve/ spore di alcuni organismi.

### Materiale del substrato

I diversi materiali utilizzati come substrato artificiale determineranno la loro reattività e tossicità e, pertanto, influenzeranno la suscettibilità al biofouling dei substrati. Le proprietà fisico-chimiche dei materiali possono influenzare la chimica dell'acqua e la chimica dell'interfaccia acqua-substrato, influenzando la formazione e la composizione dei nutrienti dello strato di condizionamento macromolecolare. Queste proprietà influenzano i batteri presenti sul substrato, solitamente con una maggiore diversità associata con substrati biologicamente e chimicamente inerti più stabili, facilitando così un rapido condizionamento macromolecolare e la successiva formazione di biofilm (Whitehead et al, 2009). Questo, a sua volta, può influenzare l'insediamento e la crescita del macrofouling. È stato segnalato che l'alluminio, l'acciaio al carbonio e il bronzo sono più suscettibili al biofouling rispetto ad alcuni substrati non metallici come la fibra di vetro, il polietilene, la poliammide e la gomma (Titah-Benbouzid et al., 2017; Pomerat et al., 1947). Tra i substrati metallici, quelli a base di alluminio sembrano presentare molto meno biofouling rispetto, ad esempio, a quelli a base di bronzo e monel (Vinagre et al., 2019 dati non pubblicati). Tuttavia, la risposta dei biofouler ai materiali non è universale e diversi gruppi di biofouling o specie differenti all'interno del gruppo possono mostrare risposte diverse allo stesso materiale a seconda della temperatura e profondità.

### Forma e bagnabilità del substrato

La forma dei substrati influenza le condizioni fisiche e ambientali offerte agli organismi. Una maggiore eterogeneità del substrato consentirà di creare diversi microhabitat fornendo una superficie più ampia, che consente una maggiore diversità e una minore concorrenza tra le specie.

Anche il livello di microstruttura, la rugosità e la consistenza possono influenzare la capacità degli organismi di aderire a tale superficie, ad esempio per quanto riguarda l'accumulo di biofilm e successivamente l'estensione di biofouling (Koehl, 2007; Aldred et al., 2010; Scardino et al., 2008; Scardino et al., 2011). Molte alghe hanno spore non mobili con bassa o nessuna selettività per il substrato e per queste la microstruttura è importante per trattenere fisicamente le spore e consentire loro di aderire. Inoltre, l'insediamento di molte larve di invertebrati è influenzato dalla microstruttura, che funge da indizio per la selezione del sito larvale (Richmond et al., 1991; Koehl, 2007). Di conseguenza, le superfici più lisce sono generalmente meno suscettibili alla biofouling rispetto alle superfici più ruvide (Scardino et al., 2008; Scardino et al., 2011).

La microstruttura di un substrato influisce sulla sua bagnabilità, e questa ne influenza l'adesione degli organismi di biofouling poiché il processo di bagnatura determina l'effettiva area di contatto e la forza di interazione tra l'adesivo e il substrato. Tuttavia, non è possibile stabilire una relazione univoca tra le caratteristiche idrodinamiche della superficie e la forza di adesione dell'organismo. Ad esempio, mentre la forza adesiva dei cirripedi delle ghiande sembra essere maggiore su superfici ad alta bagnabilità (Roberts et al., 1991), diverse specie sembrano depositarsi ad un tasso più elevato su substrati idrofobici (*Balanus improvisus*) o su substrati idrofili (*B. Amphitrite*) (Clare et al., 2009).

### Colore del substrato

Il colore di un substrato si riferisce alla quantità di energia riflessa e assorbita dal substrato, nonché alla temperatura del substrato, che possono essere determinanti per l'insediamento del biofouling (Dahlem et al., 1984).

È stato dimostrato che il colore di un substrato esercita una maggiore influenza sulle prime fasi del biofouling ed è quindi un fattore da considerare principalmente per le attrezzature immerse per brevi periodi.

Le larve e le spore di molti organismi mostrano una fototassi negativa e preferiscono substrati più scuri e meno riflettenti durante l'insediamento (Clare et al., 2009; Dahlem et al., 1984; Swain et al., 2006). Inoltre, i biofilm batterici sono influenzati dal colore del substrato e potrebbero quindi essere importanti nel determinare i successivi biofouler che potrebbero non essere direttamente influenzati dal colore del substrato (Swain et al., 2006; Dobretsov et al., 2006; Dobretsov et al., 2013). Con il passare del tempo (mesi-anni), man mano che le comunità di biofouling diventano più complesse, le differenze tra substrati più scuri e più chiari dovrebbero diventare trascurabili (Dobretsov et al., 2013).

### 4.3 Principali organismi di Macrofouling

Il biofouling è un processo complesso e differisce in modo significativo a seconda del luogo e conta oltre 4000 diversi tipi di organismi marini associati al biofouling (Cao et al., 2011; Yebra et al., 2004). Mentre il numero di microfouler può essere molto elevato su un substrato, gli organismi meno diversificati che causano il macrofouling costituiscono la maggior parte del peso e/o del carico e dello spessore idrodinamico. Cinque gruppi di macrofouler sono stati identificati come quelli che causano il maggiore impatto sulle strutture marine di energia rinnovabile (MRE) impiegate in mare attraverso diversi meccanismi (Ayers et al., 1952; Richmond et al., 1991; Lejars et al., 2012), ossia:

- Alghe kelp (soft-fouling);
- Briozoi (da morbidi a duri a seconda della specie);
- Mitili;
- Cirripiedi di ghiande;
- Vermi tubicoli calcarei (incrostazioni dure).

Di seguito vengono descritti brevemente i suddetti gruppi principali di macrofouler all'interno delle acque europee, il cui impatto sul settore MRE viene descritto nel capitolo successivo.

#### Alga Kelp

Le alghe kelp sono grandi alghe brune intertidali e subtidali dell'Ordine delle Laminarie (ad esempio, *Laminaria* spp., *Saccharina latissima* e *Saccorhiza polyschides*) che spesso formano grandi popolazioni nei mari temperato-freddi (es. Nord Europa). Le alghe si trovano solitamente dalla zona di marea fino a una profondità di 30 m a seconda della disponibilità di luce e dell'esposizione alle onde e alle correnti (Steneck et al., 2002). Alcune specie possono popolare acque più profonde a causa di un'alta concentrazione di fucoxantina, un pigmento che permette loro di utilizzare la parte blu dello spettro della radiazione solare (Gallardo et al., 2015). Le alghe kelp europee hanno una durata di circa 15 anni e gli assemblaggi raggiungono generalmente i 5 m di lunghezza con le alghe kelp più lunghe al mondo, il *Macrocystis pyrifera*, che raggiunge i 50 m di lunghezza (Gallardo et al., 2015). La *Macrocystis pyrifera* è originariamente una specie del Pacifico meridionale, ma è stata segnalata come Specie Non Nativa (SNN) in tutto il mondo compresa l'Europa, rappresentando quindi una specie biofouler anche nelle regioni europee.

Il ciclo di vita delle Laminariales mostra una forte stagionalità nella maggior parte delle specie.

La luce, la temperatura e il fotoperiodo influenzano notevolmente la crescita, in particolare dello sporofito adulto, non solo influenzando l'attività fotosintetica, ma anche agendo come fattore scatenante per la regolazione della crescita stagionale. In Europa, le specie temperate-fredde crescono a temperature comprese tra 0-20 °C, mentre le specie temperato-calde possono crescere fino a temperature di 23-24 °C. La fruttificazione avviene generalmente durante periodi di crescita bassa o nulla. Pertanto, molte Laminarie fruttificano comunemente a partire dall'autunno all'inverno, in coincidenza con la diminuzione delle

condizioni di luce e temperatura in diminuzione, e solo poche specie fruttificano principalmente in estate. Le spore mobili possono essere rilasciate per diversi mesi (Bartsch et al., 2008).



Figura 4.3 – Alghe kelp laminarie

### Briozoi

Il Phylum Bryozoa comprende tre classi: Stenolaemata, Gymnolaemata e Phylactolaemata. I Briozoi (animali muschi) formano caratteristiche colonie dense composte da numerose unità individuali-zooidi-che agiscono coordinate all'interno delle colonie. Le colonie variano per modello e forma. Esistono molte forme da "incrostanti" a "cespugliose", che possono essere sia calcaree che non calcaree.

La dimensione della colonia è variabile e varia da millimetri a metri a seconda della specie (Ryland, 1974).

L'attaccamento ai substrati è facilitato da forti bioadesivi subacquei (Soule et al., 1977) e i briozoi possono raggiungere profondità abissali, a seconda della specie e della sua modalità di sviluppo larvale (Ostrovsky, 2013).

Le colonie di bryozoan si espandono generalmente durante l'estate tramite gemmazione asessuata che comprende la formazione di cloni dallo zooide primario o dal gruppo di zooidi che rimangono attaccati alla colonia. La durata della vita dei briozoi è indefinita poiché il germogliamento può avvenire continuamente in diverse parti della colonia.

L'insediamento su substrati artificiali può essere osservato entro 1 ora o 1 giorno dall'immersione di un substrato artificiale (Roberts et al., 1991) ed è spesso molto specifico e fortemente influenzato dalle proprietà chimiche del substrato. Alcune specie preferiscono stabilirsi su substrati biofilmati (*Bugula neritina* e *B. stolonifera*), mentre altri (*B. flabellata* e *Celleporella hyalina*) preferiscono substrati senza biofilm stabiliti (Ryland, 1974; Mihm et al., 1981; Prendergast, 2010). Inoltre, alcune larve sono in grado di rilevare la presenza di individui maturi, consentendo la selezione di substrati idonei all'insediamento (Soule et al., 1977).



Figura 4.4 – Briozoi cespugliosi

### Mitili

I mitili sono organismi dominanti nelle zone intertidali e subtidali e possono sopravvivere in ecosistemi marini diversi e diversificati. Le cozze tollerano un'ampia gamma di condizioni ambientali, ad esempio la salinità e la temperatura dell'acqua, e mostrano sia un grande potenziale riproduttivo che una crescita rapida (Bayne, 1976; Widdows, 1991). Complessivamente, questo permette alle cozze di essere un organismo invasivo altamente adattabile e potenzialmente efficace. Molte specie di cozze crescono fino a superare i 100 mm e spesso vivono per più di 10 anni, con alcune specie che hanno una durata di vita significativamente più lunga (Widdows, 1991; Dinesen et al., 2014). I mitili spesso dominano la crescita marina su strutture offshore nei primi 30 m della colonna d'acqua, ma possono vivere almeno fino ad una profondità di 100 m (Bayne, 1976). Le due cozze più comuni associate alla biofouling nelle acque europee sono la cozza blu (*Mytilus edulis*) e la cozza mediterranea (*M. galloprovincialis*).

Le cozze raggiungono la maturità riproduttiva generalmente entro 1-5 anni, a seconda di fattori quali la temperatura dell'acqua, la profondità, le correnti e l'esposizione.

Le larve generalmente preferiscono stabilirsi su substrati ruvidi, idrofobici e/o biofilmati o su alghe filamentose. Le larve e i giovani insediati sono in grado di staccarsi volontariamente da un substrato per trovare un sito adatto dove riattaccarsi. Dopo l'insediamento, le larve si trasformano in adulti.



Figura 4.5 – Mitili incrostati

## Cirripiedi di ghianda

I cirripiedi sono crostacei delle Infraclassi Ascothoracica e Cirripedia. Il superordine Thoracica (Cirripedia) comprende i cirripiedi più comuni, cioè i cirripiedi a collo d'oca/gambo/pedunculanti e i cirripiedi a ghianda (Foster, 1987). I cirripiedi rappresentano gli unici crostacei che vivono attaccati ai substrati come adulti sessili.

I cirripiedi (d'ora in poi riferiti ai cirripiedi delle ghiande) costituiscono un gruppo macroincrostazioni potenzialmente dominante in una varietà di luoghi e rappresentano una grande minaccia per molte strutture marine (Holm, 2012). I cirripiedi sono molto resistenti allo spostamento da parte delle correnti e delle onde in quanto la loro forza di adesione è molto elevata, anche se varia a seconda del substrato, della specie e dell'età/dimensioni degli individui. Nelle acque europee, i cirripiedi si trovano comunemente nelle zone di marea sublitorali (0-100 m) e alcune specie si trovano anche in acque più profonde. I cirripiedi sono generalmente piccoli, ma alcune specie possono raggiungere i 75 mm di altezza (ad esempio, *Chirona Hameri*).

I cirripiedi hanno un ciclo di vita complesso che subisce diverse fasi di sviluppo. Lo sviluppo del cirripede è principalmente influenzato dalla temperatura.

Uno dei fattori principali dell'insediamento larvale sono i segni chimici conspecifici che indicano la presenza di altri cirripiedi, mentre d'altra parte possono essere respinti dalla presenza di organismi predatori. Durante questo processo, le larve si librano sul substrato e secernono adesivi temporanei per guidare altre larve in arrivo a stabilirsi nelle vicinanze, con un conseguente maggior numero di segnali lasciati dalle larve sui substrati attraenti (Abramova et al., 2019). I biofilm batterici consolidati possono avere un effetto inibitorio, neutro o attraente sull'insediamento larvale del cirripede, a seconda della specie e l'insediamento può essere osservato già entro 1 ora dall'immersione del substrato (Roberts et al., 1991). Dopo l'insediamento il cirripede si trasforma in un cirripede giovanile con placche calcificate. Il cirripede continua ad espandere le sue piastre di base e laterali mentre cresce e muta per tutta la sua vita. L'efficace adesione al substrato è assicurata da un cemento insolubile composto da materiali proteici con uno strato lipidico esterno che si indurisce molto rapidamente dopo la secrezione.

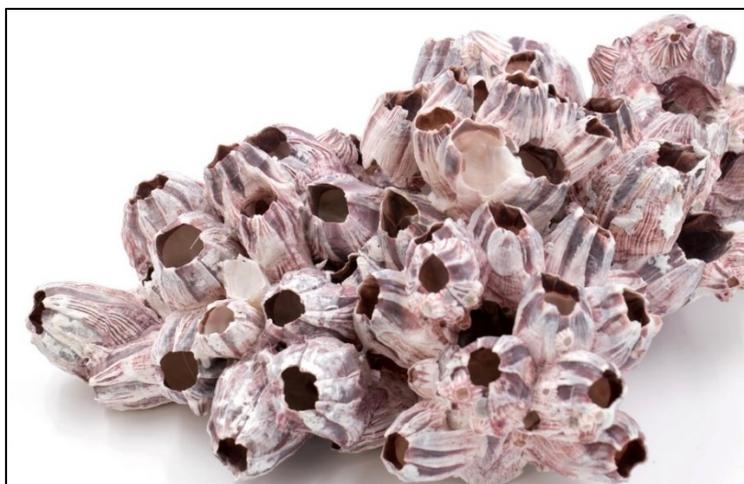


Figura 4.6 – Grappolo di cirripiedi a ghianda

### Vermi tubicoli calcarei

I tubevermi calcarei (serpulidi) sono organismi stanziali che si nutrono in sospensione e vivono in tubi calcarei che costruiscono per attaccarsi al substrato (generalmente substrati duri ma possono anche essere macroalghe). I serpulidi possono raggiungere lunghezze considerevoli fino a 70 mm (ad esempio, *Serpula vermicularis*) e possono essere trovati a profondità fino a 200 m.

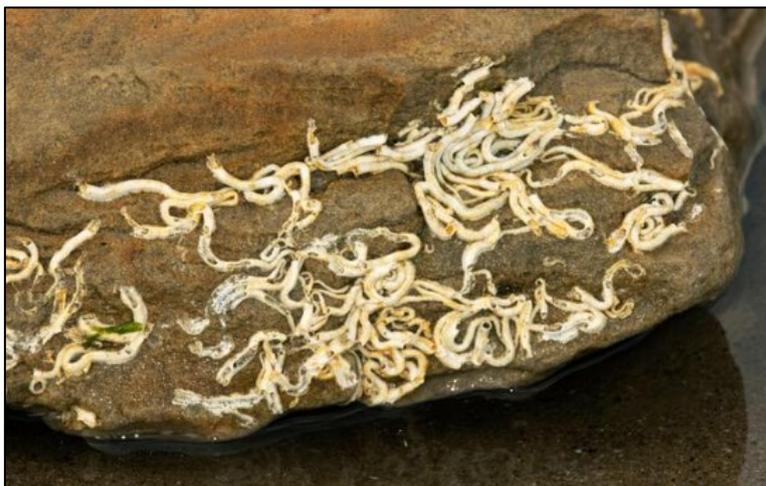


Figura 4.7 – Tubovermi calcarei

## 4.4 Impatti del biofouling sulle strutture sommerse

Il fenomeno del biofouling rappresenta un effetto indesiderato vecchio quanto la navigazione stessa. Dal momento in cui le navi sono state messe in acqua per la prima volta, migliaia di organismi acquatici hanno trovato nuove superfici per crescere, svilupparsi e nutrirsi.

I set di bio-organismi che crescono sulle strutture sommerse sono in grado di aggiungere fino a più di 150 chilogrammi di peso in più per metro quadrato, aderendo saldamente alla superficie sommersa.

Come conseguenza di questo processo di adesione, l'incrostazione altera le proprietà idrodinamiche, la massa strutturale e la rugosità dei dispositivi sommersi, accelera la corrosione di materiali e provoca perdite di integrità e di efficienza operativa delle apparecchiature.

Pertanto, la crescita marina deve essere considerata sia in fase di progettazione che di monitoraggio dei componenti del parco eolico, per evitare danneggiamento e/o costi di manutenzione considerevoli nel corso della vita utile del parco eolico a causa di ripetute pulizie e possibili guasti in caso di accumuli significativi e non preventivati.

Ne consegue che i piani di manutenzione per gli impianti eolici offshore sono di fondamentale importanza in quanto le attività di manutenzione rappresentano una quota parte molto rilevante degli interi costi operativi dell'impianto.

Oltre agli effetti negativi generati dal biofouling va sottolineato anche l'effetto positivo di ripopolamento delle aree marine offerto dalle superfici sommerse, ossia il cosiddetto "Effetto Reef".

Di seguito viene presentata una sintesi dei principali impatti del biofouling.

### Aumento di peso delle strutture sommerse

Tra i cinque gruppi di organismi di macrofouling menzionati al capitolo precedente, le cozze, i cirripedi e le alghe sono i più problematici per quanto riguarda l'aumento di peso. Gli assemblaggi di cozze aggiungono rapidamente un peso sostanziale alle strutture. Ad esempio, in uno studio al largo della costa occidentale portoghese, l'*M. galloprovincialis* ha registrato circa 24 kg/m<sup>2</sup> di peso in aria nei pannelli di prova sommersi per 12 mesi a 5 m di profondità (Vinagre et al., 2019, dati non pubblicati). In un altro studio nel Mar Mediterraneo, dopo un periodo molto più lungo di immersione delle attrezzature (pali di piattaforma offshore di gas sommersi per circa 17,5 anni), si sono registrati assemblaggi di *M. galloprovincialis* di circa 155 kg/m<sup>2</sup> di peso in aria vicino alla superficie (Relini et al., 1998). I cirripedi e i briozoi, anche se non sono pesanti come le cozze, possono aggiungere un peso considerevole alle strutture. Ad esempio, al largo della costa occidentale portoghese, il cirripede *Perforatus perforatus* e il briozoo *Bugula sp.* hanno raggiunto un peso fresco di circa 4-5 kg/m<sup>2</sup> sui pannelli di prova sommersi per 12 mesi, a profondità di 10 e 5 m rispettivamente (Vinagre et al., 2019 dati non pubblicati). Le colonie del briozoo *Schizoporella errata* provenienti dal Mar Mediterraneo su piattaforme offshore di gas sommerse per circa 17,5 anni hanno avuto aumenti di peso fresco di circa 5 kg/m<sup>2</sup> a una profondità di 12 m. Gli assemblaggi di alghe kelp ammontano regolarmente a pesi elevati nel loro ambiente naturale (ad esempio, fino a 40 kg/m<sup>2</sup> di peso in aria).

Tuttavia, poiché la densità di tali organismi (1325 kg/m<sup>3</sup> in accordo agli standard DNV) è simile alla densità dell'acqua di mare, essi sono vicini alla galleggiabilità neutra. Pertanto l'effetto principale della presenza di biofouling per le attrezzature MRE è una maggiore resistenza delle parti mobili (Miller et al., 2016).

### Aumento di spessore/ruvidità delle strutture sommerse

Le cozze, i cirripedi e, in misura minore, i serpulidi, i briozoi e le alghe kelp, aumentano notevolmente il diametro/spessore superficiale e la rugosità dei dispositivi e dei componenti sommersi, portando ad una maggiore resistenza e ad una ridotta mobilità delle parti mobili (Miller et al., 2016). Inoltre, è possibile che l'aumento del diametro/spessore superficiale dei componenti possa danneggiare altri componenti adiacenti più sensibili.



Figura 8 – Strato esterno di incrostazioni dovute al biofouling

### Corrosione delle strutture sommerse

La corrosione delle apparecchiature MRE può essere indotta e/o accelerata da organismi micro e macro incrostanti (Jia et al., 2019; Kleemann, 1996). I microrganismi marini anaerobici possono indurre la MIC (Microbiologically Influenced Corrosion) ed i macrofouler possono facilitare la MIC avviata dagli organismi che crescono sotto i macrofouler in condizioni ipossiche/anossiche. Inoltre, alcuni macrofouler possono favorire la corrosione localizzata poiché utilizzano sostanze chimiche per aderire o perforare i substrati (Kleemann, 1996; Blackwood et al., 2017). Mentre ciascuno dei cinque gruppi di organismi di biofouling è in grado di aderire fortemente ai substrati con diversi gradi di intensità, i cirripedi e i serpulidi presentano generalmente la maggiore forza di adesione. Dei due, i cirripedi sono solitamente più difficili da rimuovere dalle apparecchiature MRE rispetto ai serpulidi, e di solito causano implicazioni più gravi (Schultz et al., 1999). Questo è dovuto al fatto che di solito per rimuovere completamente i cirripedi è necessario grattare la superficie poiché la sostanza collosa da loro prodotta una volta indurita risulta fortemente incollata alla superficie; questa operazione può creare dei graffi esponendo così la superficie all'acqua marina ed inducendo una corrosione accelerata.

La forza di adesione dei cirripedi può essere ridotta in modo specifico mediante dei rivestimenti siliconici grazie i quali l'attaccamento degli organismi è più debole (Holm et al., 2006). Alghe, mitili e briozoi mostrano generalmente una forza di adesione più debole e sono più facili da rimuovere durante la manutenzione. Tuttavia, le forze generate dalle correnti e dalle onde su questi insediamenti di organismi stabilizzati possono causare l'abrasione dei dispositivi/componenti a causa del loro grande peso o volume e di conseguenza accelerano la corrosione.



Figura 9 – Corrosione derivante da biofouling

### Introduzione di specie non indigene

Per “Specie non indigene” (Non Indigenous Species o NIS) si intendono le specie che, accidentalmente o volontariamente, vengono introdotte in un ambiente al di fuori della loro naturale area di distribuzione. La IUCN (International Union for Conservation of Nature) le definisce come specie che *“si stabilizzano in ecosistemi o habitat naturali o semi-naturali, sono agenti di cambiamento e minacciano la diversità biologica”*. Qualora le condizioni siano a loro favorevoli, queste specie possono entrare in competizione con quelle indigene (o autoctone), diventando pericolosamente invasive a tal punto da diventare una minaccia per la biodiversità, comportando anche gravi danni economici ed ambientali.

L’aumento del numero di specie invasive trasportate in regioni diverse è dovuto principalmente alle attività umane, la maggior parte di esse infatti viene trasportata come fouling sullo scafo delle imbarcazioni o sfruttando passivamente l’acqua di zavorra delle grosse navi cargo. In generale gli effetti delle specie invasive possono essere suddivisi in tre categorie: ecologico, economico e sanitario; tuttavia, quest’ultima categoria è più correlata al trasferimento di malattie attraverso l’acqua di zavorra che non al biofouling.

Le strutture dei parchi eolici offshore, che siano fisse o galleggianti, essendo ancorate in una determinata area non comportano trasferimento di specie non indigene. Il trasporto di specie invasive si può invece verificare tramite le navi dedicate all’installazione delle turbine, qualora queste provengano da aree diverse dal punto di vista della biodiversità rispetto al sito di installazione.

### Effetto Reef

Qualsiasi struttura artificiale posta deliberatamente in ambiente marino agirà come una barriera corallina artificiale, attirando organismi marini e imitando le funzioni delle barriere coralline naturali. Le strutture offshore, pur avendo uno scopo diverso, possono essere considerate come barriere coralline artificiali in grado di attirare diversi organismi che si attaccano, si insediano e crescono su di esse e costituiscono allo stesso tempo un rifugio e una notevole fonte di cibo per i pesci.

I parchi eolici offshore pertanto possono agire come promotori della diversità e della funzionalità degli ecosistemi e spesso presentano comunità più diversificate e abbondanti di quelle circostanti, comprese le

barriere coralline naturali e il substrato molle. Anche le strutture flottanti come le catene e gli ancoraggi delle turbine rappresentano un ulteriore substrato duro adatto per la colonizzazione degli organismi.

Il tipo di comunità che colonizza queste superfici varierà a seconda delle proprietà fisico-chimiche della superficie, della profondità, del grado di movimento e della velocità della corrente. In generale la colonizzazione dell'epifauna ha raggiunto una copertura di circa il 100% su tutte le strutture, sebbene la composizione della comunità su turbine, ormeggi e cavi variasse sostanzialmente con una zonizzazione verticale distinta.

Un numero crescente di studi conferma che le barriere coralline artificiali migliorano la biodiversità aumentando la biomassa degli invertebrati e dei pesci



Figura 10 – Colonizzazione fondazioni sommerse piattaforme petrolifere

## 5 IL DATABASE EUROPEO DEL BIOFOULING

Per consentire un rapido accesso ai dati riguardanti lo sviluppo del biofouling, nell'ambito del progetto OCEANIC (<https://www.wavec.org/en/services/tools>) è stata creata una banca dati europea sul biofouling a supporto del settore MRE e delle altre industrie marittime. Il database raccoglie in un unico documento dati qualitativi e quantitativi per gruppi di biofouling, comprese le specie non native associate al MRE e correlate alle attrezzature marine, in diverse ecoregioni europee. I dati raccolti sono stati ottenuti dal campionamento delle comunità degli organismi di biofouling nei siti d'esame lungo i banchi di prova europei; questi dati sono stati poi confrontati con quelli tratti da letteratura e dai rapporti sottoposti a revisione prioritaria. Lo studio effettuato permette di fornire informazioni sulla presenza di una data specie di organismi di biofouling a seconda dell'area e dati sui parametri chiave di biofouling, come lo spessore e il peso delle incrostazioni.

La banca dati ha lo scopo di aiutare il settore MRE e le industrie offshore per comprendere quali siano le comunità di biofouling a cui i loro dispositivi sono più sensibili, a seconda dell'area in cui si trovano, per permettere di prendere decisioni più consapevoli sia in fase di progettazione che di manutenzione delle opere. Infine, la mappatura del biofouling permette di prevedere lo sviluppo di specie non autoctone (NIS) sostenendo lo sviluppo dei piani di gestione del rischio di biosicurezza e della ricerca accademica.

Le informazioni contenute nel database descrivono i seguenti attributi, per ciascun sito, utili a fornire informazioni sul biofouling per il settore MRE:

- Regione, Provincia ed Ecoregione: consente una panoramica dei paesi inclusi nella mappatura e fornisce informazioni sui possibili modelli di comunità di biofouling.
- Paese e sito: definisce il paese e l'ubicazione del campione. Sono stati inclusi anche i siti non europei nel Mediterraneo.
- Distanza dalla riva: definisce la distanza tra il sito campionato e la costa più vicina.
- Tipo di attrezzatura/struttura: descrive le superfici rilevate, comprese le attrezzature/strutture del settore MRE e dell'oil & gas; sono state incluse barriere artificiali intenzionali e pannelli di prova.
- Periodo di immersione: Definisce il periodo (mesi/anni) durante il quale il biofouling potrebbe crescere (cioè, dalla distribuzione delle apparecchiature fino alla raccolta dei dati).
- Profondità: definisce la profondità in cui i dati sono stati recuperati.
- Temperatura e altezza dell'onda: presenta i dati relativi a temperatura e altezza dell'onda nell'area campionata (o per l'area più vicina).
- Dati di biofouling: include informazioni qualitative e quantitative sui campioni raccolti sul campo e sugli organismi di biofouling presenti nei campioni: alghe kelp, briozoi, mitili, cirripedi di ghianda e tubevermi calcarei e altri biofouler sessili pertinenti, tra cui le specie non indigene (NIS). La tassonomia è stata standardizzata in base a quanto riportato nel registro WoRMS (World Record of Marine Species) (<http://www.marinespecies.org>). I dati quantitativi sui campioni comprendono il peso e lo spessore del biofouling ed il peso e le dimensioni del biofouler (lunghezza o altezza, a

seconda della specie). Il peso è stato standardizzato principalmente a kg di peso fresco per metro quadrato.

- Riferimento: Identifica la fonte dei dati di biofouling presentati.

Attualmente, la banca dati comprende nove ecoregioni che includono 20 paesi/aree (vedi Figura 11).

Il database contiene dati provenienti da strutture poste tra la terraferma fino a 195 km al largo. I dati coprono un intervallo di profondità dalla superficie fino a 90 m di profondità e un tempo di immersione che va da 10 giorni a 39 anni. Il database descrive e caratterizza le colonie di insediamenti su una serie di diverse strutture e materiali artificiali rilevanti per il settore MRE.

Region	Ecoregion	Countries
I	South European Atlantic Shelf	Portugal, Spain (north coast), France (west coast)
II	Western Mediterranean Sea	Italy (west coast)
III	Adriatic Sea	Italy (east coast)
IV	Aegean Sea	Turkey (west coast)
V	Levantine Sea	Turkey (south coast), Egypt
VI	Celtic Seas	Ireland
VII	North Sea	England, Scotland, Belgium, Netherlands, Germany, Denmark, Sweden (west coast), "North Sea"
VIII	Baltic Sea	Sweden (east coast), Poland
IX	White Sea	Russia (west coast)



Figura 11 – Siti interessati dal database europeo del biofouling. Ecoregioni: I, Piattaforma atlantica dell’Europa meridionale; II, Mar Mediterraneo occidentale; III Mare Adriatico; IV Mar Egeo; V Mar Levantino; VI, Mari Celtici; VII, Mare del Nord; VIII, Mar Baltico; IX Mar Bianco. Siti chiave (quadrati in bianco): area e numero di registrazioni record del biofouling.

In accordo al database disponibile nell'ambito del progetto OCEANIC, si nota un peso massimo in aria di biofouling nel mar Mediterraneo di  $156 \text{ kg/m}^2$ , mentre non sono disponibili dati sullo spessore di accrescimento per la medesima area. Pertanto, si può stimare un valore di accrescimento massimo di biofouling pari a 100 mm, in linea con i parametri definiti dallo standard "DNVGL ST 0437 - Load and site conditions for wind turbines".

La densità di tale biofouling può essere assunta preliminarmente pari a  $1325 \text{ kg/m}^3$ , in accordo alle prescrizioni dello standard "DNVGL ST 0437 - Load and site conditions for wind turbines".

## 6 CONTROLLO DEL BIOFOULING

La gestione del biofouling si esplica generalmente in due fasi:

- una preventiva durante la progettazione attraverso il corretto dimensionamento delle strutture e degli spessori, stimando anche il carico aggiuntivo futuro dovuto all'accrescimento biologico, o tramite l'eventuale ricorso a speciali coating antivegetativi (esenti dalla presenza di composti organostannici ormai vietati dalla normativa internazionale) che inibiscono o ritardano l'attecchimento delle specie incrostanti;
- l'altra correttiva, durante l'esercizio delle opere attraverso l'attuazione di un piano di monitoraggio e manutenzione finalizzato al controllo delle condizioni di accrescimento.

### 6.1 Prevenzione degli effetti del biofouling

Come detto in precedenza al Capitolo 5, disporre di dati affidabili e specifici sugli effetti ingegneristici del biofouling per ciascuna area geografica, è fondamentale per permettere una progettazione e pianificazione dell'impianto più funzionale. Pertanto, la consultazione del database europeo sul biofouling e dei dati reperibili in letteratura, sono il primo passo per prevenire gli effetti negativi determinati dal biofouling poiché permettono di effettuare una corretta valutazione che tenga conto anche dell'aumento peso e dello spessore/rugosità e del conseguente carico idrodinamico (corrente e carico delle onde), dovuto al tipo di biofouling sito-specifico.

Un'altra eventuale soluzione di mitigazione del biofouling può essere l'utilizzo di soluzioni antivegetative (*antifouling systems*), ossia un rivestimento, una vernice, un trattamento superficiale volti ad impedire ai foulers di aderire alle superfici.

Fino a qualche anno fa le soluzioni antivegetative consistevano principalmente nell'uso di sostanze biocide, soprattutto tributilstagno (TBT) o a base di rame. Sebbene il TBT si sia rivelato molto efficace, la sua pronunciata persistenza nei sedimenti ed il bioaccumulo si sono combinati con prove sostanziali del suo significativo impatto ambientale su numerose specie marine non bersaglio come molluschi e pesci. Nel 1999 l'IMO (International Maritime Organization) ha riconosciuto ufficialmente il grave rischio ambientale connesso all'uso del TBT e dal 2008 è stato emesso il divieto di tale composto a livello globale.

La tendenza si sta spostando verso la modifica delle superfici per renderle superidrofobiche (autopulenti) o per introdurre funzionalità antimicrobica sulle superfici per eliminare l'adesione microbica. Una volta che i biofilm colonizzano una superficie, ne alterano le proprietà e ne determinano le proprietà di adesione. Quindi la modifica delle superfici per impedire le fasi iniziali di l'attaccamento del biofilm è di vitale importanza nel controllo del biofouling. L'aggiunta di metalli nei polimeri, ad esempio, migliora non solo le loro proprietà meccaniche, ma induce anche caratteristiche antimicrobiche.

Tra le ultime ricerche, Palanichamy e Subramanian hanno riportato uno studio in cui la batteriocina incorporata nella vernice a base epossidica ha mostrato proprietà antivegetativa nell'acqua di mare naturale. Azemar et al. hanno recentemente riportato lo sviluppo di vernici antivegetative ibride. Gli autori hanno riportato l'uso di un copolimero con poli ( $\epsilon$ -caprolattone) e poli (dimetilsilossano) come legante

producendo una vernice che associa idrofobicità e proprietà biodegradabili. Le vernici riportate prevenivano l'insediamento e la proliferazione delle incrostazioni, il rilascio di biocidi e livelli elevati e costanti di idrofobicità (Azemar et al., 2015). Carteau et al. hanno riportato lo sviluppo di vernici antivegetative ecocompatibili che utilizzano polimeri biodegradabili e sostanze meno tossiche, dimostrando che è possibile ottenere attività antivegetativa con sostanze a minore tossicità.

Tuttavia, ad oggi, l'applicazione dei suddetti studi e relativi sistemi di rivestimento innovativi per sistemi eolici offshore è ancora molto limitata (o inesistente).

## 6.2 Manutenzione del biofouling

Le sole misure di prevenzione del biofouling non sono sufficienti per evitarne la formazione. Per tale motivo è necessario predisporre un piano di monitoraggio ed eventualmente di manutenzione subacqueo tramite OTS e/o ROV dell'impianto che riguardi le strutture di fondazione, le linee di ormeggio ed i cavi elettrici, al fine di controllare le condizioni di sviluppo delle bio-incrostazioni per evitare superino i limiti definiti in fase di progettazione e, di conseguenza, che possano pregiudicare il corretto funzionamento dell'impianto.

È consigliabile ispezionare le strutture e le apparecchiature dopo un periodo di 1-4 anni. L'ispezione visiva e la quantificazione della composizione e dello spessore delle incrostazioni possono essere combinate con la pulizia regolare della superficie esterna.

Le attività di manutenzione vengono effettuate in situ, spesso in mare aperto, durante la vita utile dell'impianto. Tali attività richiedono una logistica operativa specifica e costosa, come navi, professionisti e attrezzature, ed inoltre dipendono dalle condizioni ambientali e meteorologiche. Poiché le apparecchiature/strutture MRE sono progettate per funzionare in modo ottimale per tutta la vita utile di impianto, la manutenzione è particolarmente importante poiché le attuali soluzioni antivegetative potrebbero non essere funzionali durante l'intera durata di vita del progetto (Mérigaud et al., 2016; Borthwick, 2016). Inoltre, le attività di manutenzione comportano anche tempi di inattività, impedendo la produzione di energia e di conseguenza causando di conseguenza una perdita di ricavi. A causa della natura variabile del biofouling e del suo impatto sulle strutture/attrezzature MRE, la banca dati sul biofouling potrebbe essere particolarmente importante per gli operatori del settore MRE, consentendo loro di essere più consapevoli del biofouling sito-specifico e aiutandoli nella definizione di piani di manutenzione adeguati, comprendendo la natura e la frequenza delle attività da svolgere.

Alcune soluzioni per la pulizia delle superfici sommerse possono essere la pulizia meccanica mediante robot o strumenti manuali, il controllo fisico tramite l'applicazione di acustica (Legg et al., 2015), pressione o radiazione UV (Hunsucker et al, 2019), la pulizia tramite trattamento elettrochimico (Wake et al., 2017) e infine con vapore di iodio (Dickenson et al., 2017).

In generale il processo di rimozione del biofouling si compone di 6 fasi:

- 1) Campagna ispettiva periodica per la determinazione della quantità di crescita marina; di solito questa operazione viene svolta tramite ROV;

- 2) Processo decisionale per verificare se lo spessore dello strato di biofouling è al di sotto del limite consentito; se lo supera si va al passaggio consecutivo;
- 3) Si effettua una ispezione multi-spot più dettagliata per fornire agli operatori maggiori informazioni;
- 4) Sulla base delle informazioni ottenute al passaggio precedente si pianifica la prossima rimozione;
- 5) Viene effettuata la rimozione del biofouling, in genere tramite ROV;
- 6) A seguito della rimozione viene fatta una nuova ispezione per valutare lo stato di pulizia.

È chiaro che si tratti di un'operazione costosa e dispendiosa in termini di tempo a causa delle molteplici fasi richieste. L'ispezione è quindi un aspetto cruciale dell'intero processo di rimozione.

### Rimozione meccanica subacquea

Storicamente la crescita marina veniva rimossa dai subacquei, ma negli ultimi anni il metodo di pulizia e rimozione del biofouling più utilizzato è tramite ROV, ossia veicoli telecomandati. Nella maggior parte dei casi, come attuttore di pulizia viene utilizzato un getto d'acqua ad alta pressione, che agisce anche come forza sul ROV (Sivcev et al., 2018; Benzon et al., 2021). Per mantenere una discreta efficienza di pulizia, il ROV deve rimanere vicino alla struttura di interesse perché la corrente a getto decelera rapidamente nell'acqua. In alternativa è possibile utilizzare ROV equipaggiati con spazzole morbide in grado di rimuovere le incrostazioni.



Figura 12 – Rimozione dello strato di biofouling tramite getto d'acqua ad alta pressione attaccato al ROV

I ROV sono più economici dei subacquei, tuttavia, relativamente inefficienti negli ambienti offshore difficili a causa delle correnti d'acqua sottomarine, delle onde e dell'effetto del cavo collegato. Pertanto, le forze esterne complicano la stabilizzazione del ROV necessaria affinché il getto d'acqua possa pulire efficacemente.

I veicoli subacquei autonomi (Autonomous Underwater Vehicles o AUV) vengono utilizzati raramente a causa della necessità di soluzioni robuste e affidabili e della durata limitata della batteria per il

funzionamento degli strumenti di pulizia. Tuttavia, gli AUV non hanno alcun cavo collegato come i ROV, il che di conseguenza limita le forze esterne derivanti dai disturbi.

L'automazione può potenzialmente migliorare l'efficienza della pulizia dei ROV e ridurre i costi operativi della rimozione di biofouling. Gli algoritmi di controllo convenzionali per i ROV industriali sono incentrati sul controllo del manipolatore di pulizia, e quindi l'operatore ha ancora un ruolo attivo nel controllo del robot. La pulizia completamente autonoma richiede un buon tracciamento della traiettoria e una buona eliminazione dei disturbi.

Seguire e tracciare il percorso è un altro aspetto importante nella pulizia autonoma del ROV. Se non affrontato adeguatamente, il cavo può impigliarsi nelle strutture oppure ostacoli imprevisti possono rendere problematico il funzionamento. Anche se vengono affrontati entrambi, il percorso di pulizia ottimale può essere difficile da determinare e seguire quando si verificano disturbi esterni.

Per quanto riguarda i componenti tubolari sottomarini come i cavi elettrici e le linee di ormeggio è possibile utilizzare anche sistemi di pulizia ed ispezione costituiti da un telaio fornito di rulli e spazzole posto intorno alla circonferenza del componente e, trainato da un ROV, scorrendo lungo la superficie rimuove efficacemente le incrostazioni dovute alla crescita marina.

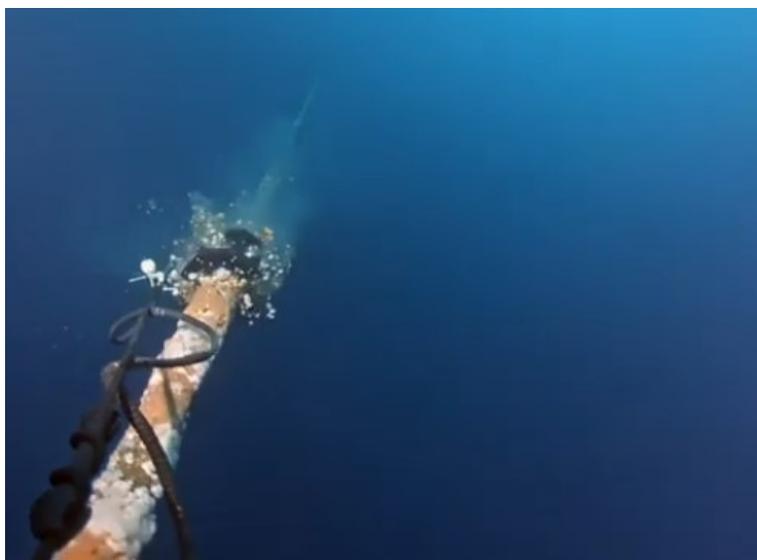


Figura 13 – Sistema di pulizia per cavi elettrici/ormeggio (Fonte <https://www.ashtead-technology.com/product/riser-rope-cleaning-and-inspection-system/>)

## 7 SCELTE PROGETTUALI

In considerazione delle valutazioni dei precedenti capitoli, il presente impianto eolico offshore prenderà in considerazione tutti gli opportuni accorgimenti progettuali per limitare il fenomeno del biofouling (ove possibile) e tenere in considerazione la presenza di biocenosi sul dimensionamento delle strutture marine per tutta la loro vita utile.

Inoltre, non si prevedono applicazioni di protezioni antivegetative contro la colonizzazione biologica, poiché anche se fossero utilizzate sostanze testate per garantire la massima compatibilità ambientale, i trattamenti dovrebbero essere eseguiti a secco, non hanno un effetto durevole e le operazioni di ripristino comporterebbero inevitabilmente rilascio di sostanze in fase di preparazione delle superfici.

Per il contrasto della corrosione elettrochimica invece si prevederanno cicli di pitturazione con vernici anticorrosive a base epossidica oltre ad un idoneo sistema di protezione catodica.

## 8 CONCLUSIONI

La conoscenza dei parametri dell'accrescimento biologico, noto come biofouling, è un aspetto importante nella progettazione e nel dimensionamento delle strutture offshore sommerse e semi-sommerse. Tale accrescimento modifica, infatti, le condizioni di carico delle strutture incrementando le masse e le azioni dinamiche di trascinamento sotto l'azione delle correnti e delle onde. In generale, la valutazione del peso aggiunto, della densità e della rugosità associata alla massa di biofouling sono evidenziati come importanti elementi di supporto al processo decisionale ingegneristico.

Lo spessore della crescita marina è correlato alla superficie aggredibile e all'esposizione dei componenti ed è influenzato dalla composizione delle specie di organismi e dai tassi di crescita, che a loro volta sono influenzati dalle caratteristiche ambientali specifiche del luogo.

Pertanto, se da un lato il biofouling può determinare un incremento positivo della disponibilità trofica nell'area interessata ed un effetto di ripopolamento con conseguente aumento della biodiversità; dall'altro, per il settore dell'MRE (Marine Renewable Energy), vi sono molteplici effetti da considerare come descritto nella Sezione 4.4, sia in fase di dimensionamento che durante la loro successiva gestione e manutenzione.

In conclusione, saranno prese in considerazione i seguenti aspetti durante lo sviluppo del progetto:

- La progettazione dei componenti impiantistici marini sarà opportunamente sviluppata tenendo in considerazione il fenomeno del biofouling, per tutta la vita operativa dell'opera;
- Verrà redatto un piano di manutenzione e monitoraggio in cui saranno previste periodiche ispezioni ed operazioni di pulizia e rimozione delle incrostazioni derivanti dalla crescita marina, in modo da rilevare ed eventualmente mitigare gli effetti del biofouling;
- Sarà previsto l'applicazione di rivestimenti anticorrosivi associati ad adeguati sistemi di protezione catodica delle strutture. Non sono previste pitture antivegetative.

## 9 RIFERIMENTI

- /1/ Danovaro R., Bianchelli S., Brambilla P., Brussa G., Corinaldesi C., Del Borghi A., Dell'Anno A., Frascchetti S., Greco S., Grosso M., Nepote E., Rigamonti L., Boero F., 2023, *Making Eco-sustainable Floating Offshore Wind Farms: siting, impact assessment, mitigations and compensations.*
- /2/ Pedro Almeida Vinagre, Teresa Simas, Erica Cruz, Emiliano Pinori and Johan Svenson, 2020, *Marine Biofouling: A European Database for the Marine Renewable Energy Sector.*
- /3/ Wahl M. , 1989, *Marine epibiosis. I. Fouling and antifouling: Some basic aspects.*
- /4/ Railkin A.I., 2003, *Marine Biofouling: Colonization Processes and Defenses.*
- /5/ Callow J.A.; Callow M.E., 2011, *Trends in the development of environmentally friendly fouling-resistant marine coatings.*
- /6/ Rittschof D., 2010, *Research on practical environmentally benign antifouling coatings.*
- /7/ Haberlin Damien; Cohuo Alfonso; Doyle Thomas K, 2020, *Ecosystem benefits of floating offshore wind.*
- /8/ Lehaitre M.; Delauney L.; Compère C., 2008, *Biofouling and underwater measurements. In Real-Time Observation Systems for Ecosystem Dynamics Harmful Algal Blooms: Theory, Instrumentation Modelling.*
- /9/ Cao S.; Wang J.; Chen H.; Chen D., 2011, *Progress of marine biofouling and antifouling technologies.*
- /10/ Van Der Stap T.; Coolen J.W.P.; Lindeboom H.J., 2016, *Marine Fouling Assemblages on Offshore Gas Platforms in the Southern North Sea: Effects of Depth and Distance from Shore on Biodiversity.*
- /11/ Dayton P.K., 1971, *Competition, disturbance, and community organization: The provision and subsequent utilization of space in a rocky intertidal community.*
- /12/ Raffaelli D.; Hawkins S.J., 1999, *Intertidal Ecology.*
- /13/ Johnson L.E.; Strathmann R.R., 1989, *Settling barnacle larvae avoid substrata previously occupied by a mobile predator.*
- /14/ Newell R.; Branch G., 1980, *The influence of temperature on the maintenance of metabolic energy balance in marine invertebrates.*
- /15/ Foster B., 1987, *Barnacle ecology and adaptation.*
- /16/ Bartsch I.; Wiencke C.; Bischof K.; Buchholz C.M.; Buck B.H.; Eggert A.; Feuerpfel P.; Hanelt D.; Jacobsen S.; Kare, R., 2008, *The genus Laminaria sensu lato: Recent insights and developments.*
- /17/ Hellio C.; Yebra D., 2009, *Advances in Marine Antifouling Coatings and Technologies.*
- /18/ Yebra D.M.; Kiil S.; Dam-Johansen K., 2004, *Antifouling technology—Past, present and future steps towards efficient and environmentally friendly antifouling coatings.*
- /19/ Dafforn K.A.; Lewis J.A.; Johnston E.L., 2011, *Antifouling strategies: History and regulation, ecological impacts and mitigation.*
- /20/ Amara I.; Miled, W.; Slama R.B.; Ladhari N., 2018, *Antifouling processes and toxicity effects of antifouling paints on marine environment.*

- /21/ Koehl, M. *Mini review: Hydrodynamics of larval settlement into fouling communities. Biofouling 2007*
- /22/ Swain G.; Anil A.; Baier R.E.; Chi, F.S.; Conte E.; Cook A.; Hadfield M.; Haslbeck E.; Holm E.; Kavanagh C., 2000, *Biofouling and barnacle adhesion data for fouling-release coatings subjected to static immersion at seven marine sites.*
- /23/ Kamino K., 2013, *Mini-review: Barnacle adhesives and adhesion.*
- /24/ Rittschof D.; Orihuela B.; Stafslie S.; Daniels J.; Christianson D.; Chisholm B.; Holm E., 2008, *Barnacle reattachment: A tool for studying barnacle adhesion.*
- /25/ Whitehead K.; Verran J., 2009, *The effect of substratum properties on the survival of attached microorganisms on inert surfaces.*
- /26/ Pomeroy C.; Weiss C., 1946, *The influence of texture and composition of surface on the attachment of sedentary marine organisms.*
- /27/ Aldred N.; Scardino A.; Cavaco A.; De Nys R.; Clare A.S., 2010, *Attachment strength is a key factor in the selection of surfaces by barnacle cyprids (Balanus amphitrite) during settlement.*
- /28/ Scardino A.; Guenther J.; De Nys R., 2008, *Attachment point theory revisited: The fouling response to a microtextured matrix.*
- /29/ Scardino A.J.; De Nys R., 2011, *Mini review: Biomimetic models and bioinspired surfaces for fouling control.*
- /30/ Clare A.; Aldred N., 2009, *Surface colonisation by marine organisms and its impact on antifouling research. In Advances in Marine Antifouling Coatings and Technologies.*
- /31/ Dahlem C.; Moran P.; Grant T., 1984, *Larval settlement of marine sessile invertebrates on surfaces of different colour and position.*
- /32/ Dobretsov S.; Dahms H.U.; Qian P.Y., 2006, *Inhibition of biofouling by marine microorganisms and their metabolites.*
- /33/ Dobretsov S.; Abed R.M.; Voolstra C.R., 2013, *The effect of surface colour on the formation of marine micro and macrofouling communities.*
- /34/ Roberts D.; Rittschof D.; Holm E.; Schmidt A., 1991, *Factors influencing initial larval settlement: Temporal, spatial and surface molecular components.*
- /35/ Richmond, M.; Seed, R., 1991, *A review of marine macrofouling communities with special reference to animal fouling.*
- /36/ Titah-Benbouzid H.; Benbouzid M., 2017, *Biofouling issue on marine renewable energy converters: A state of the art review on impacts and prevention.*
- /37/ Steneck R.S.; Graha M.H.; Bourque B.J.; Corbett D.; Erlandson J.M.; Estes J.A.; Tegner M.J., 2002, *Kelp forest ecosystems: Biodiversity, stability, resilience and future.*
- /38/ Gallardo T., 2015, *Marine Algae: General Aspect (Biology, Systematics, Fields and Laboratory Techniques)*
- /39/ Ryland J., 1974, *Behaviour, Settlement and Metamorphosis of Bryzoan Larvae: A Review.*
- /40/ Soule J.D.; Soule D.F., 1977, *Fouling and bioadhesion: Life strategies of bryozoans. In Biology of Bryozoans.*
- /41/ Ostrovsky A.N., 2013, *Evolution of Sexual Reproduction in Marine Invertebrates: Example of Gymnolaemate Bryozoans.*
- /42/ Mihm J.W.; Banta W.C.; Loeb G.I., 1981, *Effects of adsorbed organic and primary fouling films on bryozoan settlement.*

- /43/ Prendergast G.S., 2010, *Settlement and behaviour of marine fouling organisms.*
- /44/ Bayne B., 1976, *Marine Mussels: Their Ecology and Physiology.*
- /45/ Widdows J., 1991, *Physiological ecology of mussel larvae.*
- /46/ Dinesen G.E.; Morton B., 2014, *Review of the functional morphology, biology and perturbation impacts on the boreal, habitat-forming horse mussel *Modiolus modiolus* (Bivalvia: Mytilidae: Modiolinae).*
- /47/ Holm, E.R., 2012, *Barnacles and Biofouling.*
- /48/ Abramova A.; Lind U.; Blomberg A.; Rosenblad M.A., 2019, *The complex barnacle perfume: Identification of waterborne pheromone homologues in *Balanus improvisus* and their differential expression during settlement.*
- /49/ Relini G.; Tixi F.; Relini M.; Torchia G., 1998, *The macrofouling on offshore platforms at Ravenna.*
- /50/ Miller R.; Macleod A., 2016, *Marine Growth Mapping and Monitoring: Feasibility of Predictive Mapping of Marine Growth.*
- /51/ Callaghan J.; Boud R., 2006, *Future Marine Energy. Results of the Marine Energy Challenge: Cost Competitiveness and Growth of Wave and Tidal Stream Energy.*
- /52/ Mérigaud A.; Ringwood J.V., 2016, *Condition-based maintenance methods for marine renewable energy.*
- /53/ Borthwick, A.G.L., 2016, *Marine Renewable Energy Seascape.*
- /54/ Ayers, J.; Turner, H., 1952, *The principal fouling organisms. In Marine Fouling and Its Prevention.*
- /55/ Lejars M.N.; Margailan A.; Bressy C., 2012, *Fouling release coatings: A nontoxic alternative to biocidal antifouling coatings.*
- /56/ Jia R.; Unsal T.; Xu D.; Lekbach Y.; Gu T., 2019, *Microbiologically influenced corrosion and current mitigation strategies: A state of the art review. Int. Biodeterior.*
- /57/ Kleemann K., 1996, *Biocorrosion by Bivalves.*
- /58/ Palanichamy S.; Subramanian G., 2017, *Antifouling properties of marine bacteriocin incorporated epoxy based paint.*
- /59/ Azemar F.; Faÿ F.; Réhel K.; Linossie, I., 2015, *Development of hybrid antifouling paints.*
- /60/ Price S. J.; Figueira R.B., 2017, *Corrosion protection systems and fatigue corrosion in offshore wind structures: current status and future perspectives.*
- /61/ Van Zanten S.; De Gregorio S., 2023, *A closer look at biofouling on dynamic cables at floating wind farms*
- /62/ Sivcev S., Coleman J., Omerdic E., Dooly G., Toal D., 2018, *“Underwater manipulators: A review,” Ocean engineering.*
- /63/ Benzon M., Sørensen F., Liniger J., Pedersen S., Klemmensen S., Schmidt K., 2021, *“Sliding mode control for a marine growth removing rov with water jet disturbance.”*
- /64/ Pedersen S., Liniger J., F. Sørensen, Benzon M., 2022, *On Marine Growth Removal on Offshore Structures.*