

**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

PROPONENTE

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

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

PROGETTAZIONE

**TECNOCONSULT**
ENGINEERING CONSTRUCTION S.R.L.

Via Einaudi, 20C
60032 FANO (PU) IT –



ELABORATO

N. TITOLO
ELABORATO

RELAZIONE TECNICA VALUTAZIONE IMPATTI EMF SULLA FAUNA MARINA

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

CODICE COMMESSA	SCICLI	CODICE ELABORATO	REL_44
-----------------	--------	------------------	--------

INDICE DELLA RELAZIONE

1	INTRODUZIONE	3
1.1	BREVE DESCRIZIONE DEL PROGETTO	3
2	SCOPO DEL DOCUMENTO	5
3	OPERE PRINCIPALI IN MARE	6
4	CAMPI ELETTROMAGNETICI GENERATI DAI CAVI SOTTOMARINI	7
4.1	CENNI TEORICI	7
4.2	EMF DA CAVIDOTTI MARINI	8
4.3	SCELTE PROGETTUALI	11
5	EFFETTI DEI CAMPI ELETTROMAGNETICI SULLA FAUNA MARINA	12
5.1	SPECIE MARINE ELETTRO/MAGNETO-SENSIBILI.....	12
5.1.1	<i>Elasmobranchi</i>	12
5.1.2	<i>Altri pesci</i>	14
5.1.3	<i>Mammiferi marini</i>	15
5.1.4	<i>Tartarughe marine</i>	17
5.1.5	<i>Invertebrati</i>	18
6	MISURE DI MITIGAZIONE	20
7	CONCLUSIONI	23
8	RIFERIMENTI	24

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.

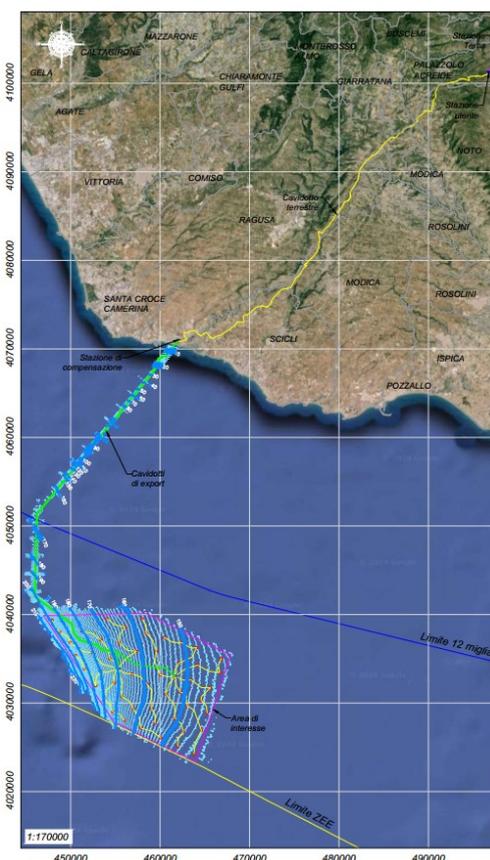


Figura 1-1 – Layout di impianto

2 SCOPO DEL DOCUMENTO

La presente relazione ha lo scopo di analizzare i potenziali effetti dovuti all'utilizzo di cavi sottomarini, in particolare tratta le conseguenze sulla fauna marina dei campi elettromagnetici generati dal passaggio della corrente all'interno dei cavi elettrici per il trasporto dell'energia dal parco eolico offshore alla Rete di Trasmissione Nazionale (RTN).

Alcuni animali marini hanno recettori specializzati in grado di rilevare campi elettrici e/o magnetici. Usano questi sensi per la navigazione, l'orientamento o il rilevamento di altri organismi. Sebbene un numero limitato di esperimenti scientifici abbia dimostrato che alcuni animali hanno la capacità di rispondere ai campi elettromagnetici, non esistono prove conclusive per determinare che i campi elettromagnetici provenienti da un parco eolico offshore possano causare alcun impatto o incidere negativamente sulla fauna marina.

Nonostante i cavi elettrici e di telecomunicazione sottomarini siano impiegati da diversi decenni, negli ultimi anni, grazie al forte sviluppo del settore delle energie rinnovabili marine (Marine Renewable Energies o MRE), è presente una maggiore attenzione verso le possibili conseguenze del loro utilizzo.

3 OPERE PRINCIPALI IN MARE

Si riporta di seguito l'elenco sintetico delle principali opere previste dal progetto.

OPERE IN MARE:

- 50 aerogeneratori di potenza nominale unitaria pari a 15 MW, per una potenza nominale complessiva di 750 MW, composti da turbina, torre e fondazione galleggiante;
- Una rete elettrica sottomarina a tensione nominale pari a 66 kV che collega gli aerogeneratori in serie, raggruppandoli in 13 sezioni principali, per poi connettersi alle due Stazioni di Trasformazione Offshore (STO1 e STO2) offshore 66/220 kV;
- Due piattaforme marine che ospitano ciascuna una STO 66/220 kV, attrezzata con 2 trasformatori, 1 reattore per la compensazione della potenza reattiva, apparecchiature, quadri di controllo e manufatti di servizio e accessori;
- Quattro elettrodotti sottomarini, due per ogni STO, di collegamento tra le due Stazioni di Trasformazione Offshore e la buca giunti terra-mare, costituiti da un cavo in AT 220 kV di lunghezza rispettivamente pari a circa 54 km (x2) e 49 km (x2), di cui 1100 m realizzati con HDD (Horizontal Directional Drilling) per la parte di transizione terra_mare.

La parte di approdo e atterraggio (transizione terra-mare del cavo marino realizzata con HDD) inizia in mare a circa 480 m dalla linea di battigia e raggiunge la buca giunti dopo aver bypassato la spiaggia (in corrispondenza della spiaggia denominata "degli americani"), l'area libera dedicata ad eventi fieristici di fianco al parcheggio, la Strada Provinciale 63 fino all'area agricola a nord della SP63.

La lunghezza complessiva dei cavi stimata è di circa 140 Km per quelli a 66 kV di interconnessione tra gli aerogeneratori e tra questi e le Stazioni di Trasformazione Offshore su piattaforma marina, e di rispettivamente 54 km (x2) e 49 km (x2) di cavi di export (dalle Stazioni sino alla HDD) per un totale di 316 km complessivi.

4 CAMPI ELETTROMAGNETICI GENERATI DAI CAVI SOTTOMARINI

4.1 Cenni teorici

I campi elettromagnetici sono un tipo di radiazione elettromagnetica generata da fonti naturali e antropiche come il campo geomagnetico terrestre, i temporali, i cavi elettrici e i dispositivi elettronici.

Le onde elettromagnetiche, secondo la teoria di Maxwell, sono fenomeni oscillatori, generalmente di tipo sinusoidale, costituite da due grandezze che variano periodicamente nel tempo: il campo elettrico ed il campo magnetico.

Il **campo elettrico (E)** è definito come una proprietà o perturbazione dello spazio prodotta dalla presenza di cariche elettriche, positive o negative. Qualsiasi conduttore elettrico produce un campo elettrico associato, che esiste anche quando nel conduttore non scorre alcuna corrente. Più alta è la tensione, più intenso è il campo elettrico risultante ad una certa distanza dal conduttore; mentre per una data tensione l'intensità diminuisce al crescere della distanza. L'intensità del campo elettrico si misura in Volt per metro (V/m).

Il **campo magnetico (H)** è definito come una proprietà o perturbazione dello spazio prodotta dal movimento di cariche elettriche, ossia dalla presenza di correnti elettriche oppure da magneti. Il campo magnetico, quindi, viene generato quando circola corrente elettrica e risulta più intenso più è alta la corrente. L'intensità del campo magnetico si esprime in Ampere per metro (A/m) anche se solitamente ci si riferisce ad una grandezza correlata ossia la densità di flusso magnetico o induzione magnetica (B), misurata in microtesla (μT).

L'oscillazione del campo magnetico crea a sua volta un **campo elettrico indotto**, o campo **iE-field**, il quale ha le stesse proprietà di un campo elettrico prodotto dalla tensione sui conduttori all'interno del cavo (E), tranne per il fatto che è generato attraverso un meccanismo diverso. Tale campo elettrico indotto può essere creato ad esempio dal movimento di un animale acquatico che passa attraverso il campo magnetico statico (B) generato attorno al cavo sottomarino.

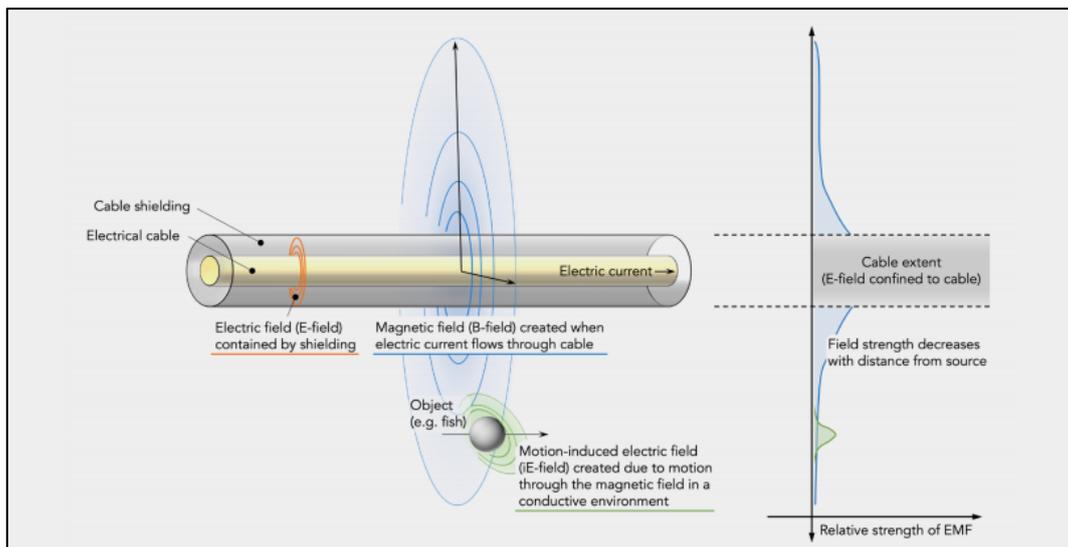


Figura 4-1 – EMF generato da un cavo elettrico (sinistra) e relativa intensità di campo (destra)

Pertanto, un campo elettrico variabile nel tempo genera, in direzione perpendicolare a se stesso, un campo magnetico, anch'esso variabile, che a sua volta influisce sul campo elettrico stesso. Questi campi concatenati determinano nello spazio la propagazione di un campo elettromagnetico, indipendentemente dalle cariche e correnti elettriche che li hanno generati.

Le principali caratteristiche delle onde elettromagnetiche dipendono da una loro proprietà fondamentale: la frequenza f , ossia il numero di oscillazioni compiute in un secondo. Tale grandezza si misura in cicli al secondo o Hertz (Hz) e relativi multipli e sottomultipli. Strettamente connessa con la frequenza è la lunghezza d'onda λ , che è la distanza percorsa dall'onda durante un tempo di oscillazione e corrisponde alla distanza tra due massimi o due minimi dell'onda (l'unità di misura è il metro con relativi multipli e sottomultipli).

4.2 EMF da cavidotti marini

Le industrie MRE utilizzano cavi a corrente alternata o a corrente continua, spesso in combinazione con stazioni di trasformazione. Attualmente nei parchi eolici offshore i cavi più utilizzati sono HVAC (High Voltage Alternating Current), tuttavia col progredire del settore MRE si prevede che diventerà più comune l'utilizzo di cavi HVDC (High Voltage Direct Current), grazie alle migliori prestazioni elettriche su distanze più lunghe ed alle minori perdite di potenza. Pertanto, il tipo di cavo di alimentazione utilizzato (AC o DC) influenza il tipo di campo elettromagnetico generato.

Il campo elettrico prodotto dai cavi di alimentazione, sia AC che DC, non risulta apprezzabile sul fondale marino o sulla massa d'acqua circostante in quanto la tensione sui conduttori di rame all'interno del cavo viene bloccata dalla copertura metallica esterna del cavo interrato. Al contrario il campo magnetico del cavo elettrico sottomarino è molto meno schermato dalla copertura metallica; pertanto, ciascun cavo sarà circondato da un campo magnetico. Inoltre, tale campo magnetico, come detto in precedenza, induce a sua volta un debole campo elettrico che non è correlato alla tensione del cavo ma è invece correlato alla

quantità di flusso di corrente attraverso il cavo. Ciò significa che, quando il flusso di corrente sul cavo elettrico sottomarino aumenta o diminuisce, aumentano o diminuiscono sia il campo magnetico che quello elettrico indotto.

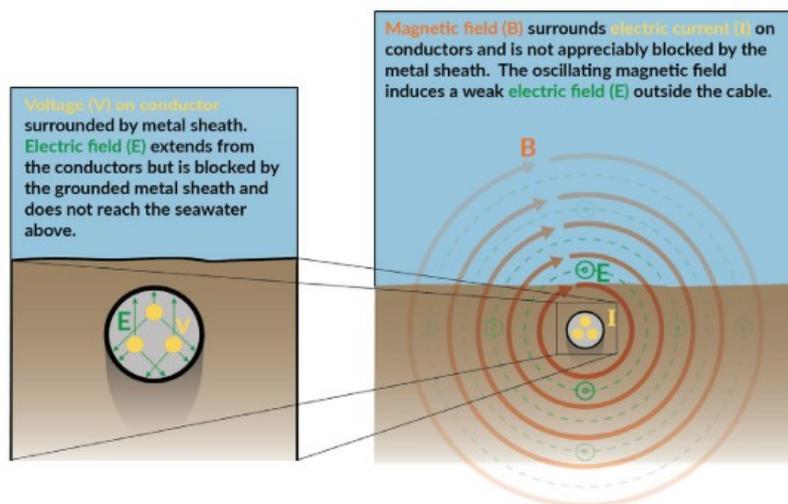


Figura 4-2 – Campo elettrico (E) e magnetico (B) per un cavidotto marino interrato

Oltre alla copertura metallica attorno al cavo, i cavi elettrici sottomarini sono generalmente interrati sotto il fondale marino per la loro protezione. Poiché i campi elettromagnetici generati dai cavi elettrici sottomarini diminuiscono rapidamente con la distanza dal cavo, l'interramento dei cavi riduce sostanzialmente i livelli dei campi elettrici - magnetici e indotti nell'acqua di mare. Aumentando la profondità di posa, si riduce il campo magnetico sul fondale marino.

Laddove si incontrano condizioni del fondale marino duro o infrastrutture esistenti, i cavi elettrici sono spesso ricoperti con materassi di cemento, ghiaia o altre misure per proteggere il cavo. Sebbene questa copertura non raggiunga lo stesso livello di riduzione dei campi elettromagnetici dell'interramento e della distanza, i livelli di campo elettromagnetico per i cavi interrati e coperti da materasso sono abbastanza simili.

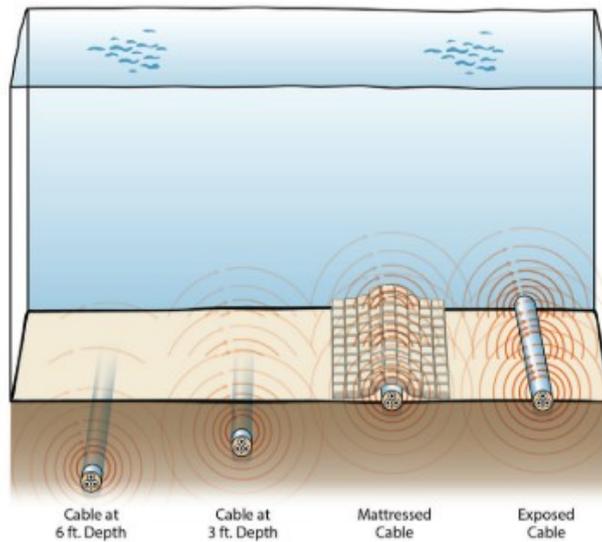


Figura 4-3 – Propagazione dell’EMF per cavi interrati

Pertanto, i fattori da cui dipende l’intensità del campo elettromagnetico generato dai cavi sottomarini sono:

- La tipologia di corrente che scorre all’interno del cavo, se alternata (AC) o continua (DC);
- Il flusso di corrente che scorre all’interno del cavo, da cui dipende l’intensità del campo magnetico generato;
- La distanza dal cavo, in quanto all’aumentare della distanza diminuisce rapidamente l’intensità del campo elettromagnetico;
- La profondità di interrimento del cavo.

In particolare, per il presente progetto si prevede di interrare i cavi di export ad una profondità di 1 m dal fondale marino. I risultati dei calcoli effettuati con tale configurazione interrata indica un valore di 3 µT ad una distanza di 1 m dal fondale (/53/). Per maggiori informazioni si rimanda alla REL_43 - RELAZIONE TECNICA EMISSIONI ELETTROMAGNETICHE.

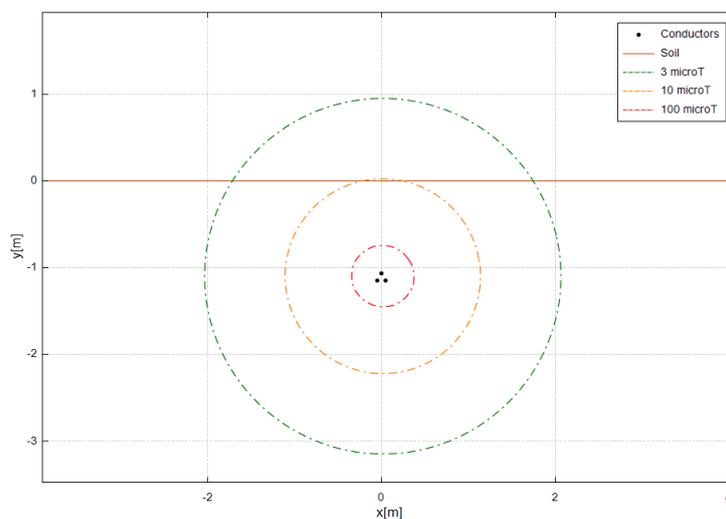


Figura 4-4 - Grafico del campo elettromagnetico del cavo marino 220kV nella condizione interrata

4.3 Scelte progettuali

Nel presente progetto, le linee elettriche che collegheranno gli aerogeneratori fino alle stazioni di trasformazione offshore (cavidotti inter-array) saranno esercitate alla tensione di 66 kV, mentre le linee di collegamento delle stazioni di trasformazione offshore fino alla terraferma (cavidotto export) saranno esercitate alla tensione di 220 kV. Entrambe le tipologie di cavo produrranno una corrente alternata con frequenza pari a 50 Hz.

I cavidotti marini saranno costituiti da un cavo tripolare con conduttori di fase realizzati in rame, isolante in XLPE, schermatura in piombo e guaina esterna in polietilene.

I materiali plastici attorno ai conduttori svolgono una funzione di isolamento magnetico - termico, oltre che di protezione.



Figura 4-5 - Sezione tipica del cavo marino XLPE tripolare in rame

Per la posa dei cavi si prevede di utilizzare una nave posacavi in modo tale che i cavi saranno interrati tra 1 e 2 m come forma di protezione da attività di pesca a strascico, ancoraggi etc; mentre, ove siano necessari attraversamenti sottomarini di condotte esistenti, sarà garantito un adeguato livello di protezione (preferibilmente crossing bridge prefabbricato). Inoltre, all'approdo, nella zona di transizione tra la parte marina e quella terrestre, le linee di export saranno realizzate con HDD per un tracciato complessivo di circa 1.1 km, di cui 480 m in mare.

Per maggiori informazioni riguardo alle caratteristiche dei cavi utilizzati far riferimento al documento REL_06 - RELAZIONE ELETTRICA (rif. /52/).

5 EFFETTI DEI CAMPI ELETTROMAGNETICI SULLA FAUNA MARINA

La capacità di rilevare campi elettrici o magnetici supporta le funzioni vitali essenziali di alcuni animali marini; numerose specie utilizzano i campi elettromagnetici naturali per l'orientamento, la navigazione e la localizzazione di predatori o prede su scale spaziali grandi e piccole (/5/, /6/).

Sebbene le interazioni fisiche tra i campi elettromagnetici indotti dai cavi e i campi elettromagnetici presenti in natura non siano ad oggi ancora ben comprese, i campi elettromagnetici provenienti dai cavi sottomarini possono mascherare o distorcere i segnali naturali dei campi elettromagnetici che gli animali utilizzano per le loro funzioni vitali.

La maggior parte della letteratura disponibile e della ricerca scientifica è basata su esperimenti di laboratorio e studi condotti in campo per comprendere l'elettrosensibilità e/o la magnetosensibilità delle specie dovuta ai cavi di esportazione di energia offshore, nonché su cavi elettrici e di telecomunicazione, oltre a studi in laboratorio.

Si ritiene che la maggiore probabilità di esposizione dei pesci ai cavi MRE sia per i pesci demersali che vivono vicino al fondale marino, oltre alle fasi sensibili della storia della vita, dagli embrioni alle larve, in particolare quelli con lunghi periodi di incubazione (/7/, /8/).

5.1 Specie marine elettro/magneto-sensibili

Sono stati segnalati sensi magnetici e/o elettrici per un'ampia gamma di taxa marini. Prove di un senso magnetico sono disponibili per i mammiferi marini, le tartarughe marine, molti gruppi di pesci (compresi gli elasmobranchi) e per diversi gruppi di invertebrati. La capacità di rilevare campi elettrici è ben nota per i pesci elasmobranchi e la diffusa presenza di strutture anatomiche (ampolla di Lorenzini) suggerisce che si tratti di una capacità praticamente universale all'interno del gruppo. Anche i pesci ratto, alcuni gruppi di pesci ossei (lamprede e storioni) e alcuni teleostei hanno un sistema elettrosensoriale altamente avanzato, sebbene la maggior parte dei teleostei (il gruppo più numeroso di pesci ossei) non lo possieda. Pochi invertebrati sono stati testati per il senso elettrico ed alcune prove recenti sono state riportate nei crostacei decapodi (granchi, gamberetti e aragoste). In generale, le specie bentoniche e demersali (come molluschi, gamberetti, seppie, sogliola, nasello, ecc.) trattenendosi sul fondale, nel quale trovano nutrimento, potrebbero essere maggiormente suscettibili all'azione dei campi elettromagnetici rispetto a quelle pelagiche, considerando che l'azione del campo diminuisce all'aumentare della distanza dal cavo. Nonostante le prove comportamentali, fisiologiche e anatomiche delle capacità di rilevamento dei campi elettromagnetici per molte specie, permangono lacune nei dati nella comprensione di queste capacità.

5.1.1 Elasmobranchi

Le informazioni esistenti forniscono una prova evidente che i pesci elasmobranchi (squali, razze, pesci pattini) possono rilevare sia i campi elettrici che i campi magnetici.

Tutti i pesci elasmobranchi possiedono un sistema elettrosensoriale unico noto come ampolle di Lorenzini, ossia organi sensoriali costituiti da una vasta gamma di recettori individuali che rilevano l'ambiente

circostante tramite degli stimoli del campo elettrico, impiegando dei canali ionici voltaggio-sensibili come elementi eccitabili. I pesci elasmobranchi inoltre rilevano i campi magnetici usando il loro sistema elettrosensoriale, in particolare Kalmijn (1974, 1981) ha sviluppato per tale specie un modello di induzione elettromagnetica.

Gli stimoli elettromagnetici sono importanti per gli elasmobranchi non solo per l'orientamento e la navigazione ma anche per altre importanti funzioni. In primo luogo, gli elasmobranchi sono in grado di rilevare deboli campi bioelettrici prodotti dalle loro prede naturali in modo da poterle localizzare anche quando si nascondono sotto la sabbia o durante la notte. In secondo luogo, l'elettrosenso è utilizzato nella rilevazione e nell'individuazione della posizione di altri individui della specie, permettendo le interazioni sociali durante la riproduzione. Infine, la terza funzione dell'elettrosenso è quella di rilevare i campi bioelettrici prodotti da potenziali predatori. È stato verificato che stimoli elettrici fasici da 0,1 a 1 Hz, rilevati da squali gatto appena nati, possono interrompere la respirazione di questi ultimi in modo da evitarne il rilevamento da parte dei predatori e migliorarne la sopravvivenza.

Per quanto detto in precedenza è possibile che gli elasmobranchi risultino sensibili agli stimoli elettrici e magnetici associati ai cavi subacquei. Diversi studi empirici dimostrano che squali e razze risultano sensibili a campi bipolari e uniformi con gradienti fino a 1-5 nV/cm ($=1-5 \times 10^{-7}$ V/m).

L'energia generata dagli impianti eolici offshore viene trasmessa ai siti onshore tramite sistemi in corrente alternata (AC) che producono un campo magnetico alternato esterno al cavo con frequenza 50 Hz. I neuroni primari elettrosensoriali nei pesci elasmobranchi mostrano la massima sensibilità ai campi elettrici alternati da 1-10 Hz, ma anche un'ampia banda di risposta da 0,01-25 Hz (/10/, /11/). Pertanto, sulla base di studi neurofisiologici, la sensibilità diretta ai campi elettrici variabili a 50 Hz per gli elasmobranchi è da molto bassa a nulla. Tuttavia, alcuni studi sperimentali hanno osservato cambiamenti comportamentali ed un aumento del movimento da parte di alcuni squali gatto e razze spinose quando sono stati alimentati i cavi in AC di impianti eolici offshore.

Gli squali e le razze sono più sensibili ai campi elettrici in corrente continua (DC) permanenti; questi campi possono essere prodotti direttamente da fonti di energia o indotti da campi magnetici permanenti.

Nel caso di un sistema di cavi DC monopolare con un unico cavo di alimentazione e il percorso della corrente di ritorno che scorre attraverso l'oceano (oggi utilizzato raramente), può esserci un campo elettrico diretto risultante di 20 mV/cm che è molto al di sopra delle soglie sensoriali note per i pesci elasmobranchi. Sebbene non siano forniti dati comportamentali diretti, si prevede che gli squali e le razze rilevino, rispondano e mostrino comportamenti aversivi (evitamento) a questi campi elettrici relativamente forti (/42/, /49/). È stato osservato che le razze modificano la loro rotta nel campo di nuoto quando incontrano un campo DC non uniforme, probabilmente per correggere il loro percorso in relazione ai campi elettrici indotti dalle correnti d'acqua che attraversano il campo magnetico terrestre (/13/).

Allo stesso modo, uno squalo che nuota in acque ferme rileverebbe il campo elettrico indotto mentre si avvicina al cavo. Tuttavia, la percezione di un campo elettrico indotto da parte di uno squalo elettrosensibile è un fenomeno complesso e dipende da diversi fattori come le caratteristiche del cavo, la corrente elettrica, la configurazione del cavo, l'orientamento del cavo rispetto al campo geomagnetico, la direzione di nuoto dell'animale, i movimenti locali delle maree, ecc.

Dagli esperimenti di neurofisiologia effettuati in campo è risultato che la velocità minima di variazione del campo magnetico che ha suscitato una risposta nei pesci pattini è stata di 200 $\mu\text{T}/\text{sec}$ (/14/, /15//16/). Inoltre, dai monitoraggi degli squali martello sono stati osservati movimenti ripetuti fortemente correlati con i cambiamenti dell'intensità del campo magnetico lungo la rotta migratoria (/47/). Tuttavia rimane ancora da stabilire il meccanismo alla base di tali osservazioni.

5.1.2 Altri pesci

Vi sono evidenze di sensibilità ai campi elettromagnetici anche da parte di altre specie di pesci, oltre agli elasmobranchi. L'elettrorecezione, infatti, è comune nei pesci non teleostei (/34/, /28/).

Oltre ai pesci elasmobranchi, è noto che anche le lamprede e gli storioni hanno un senso elettrico. Inoltre, i pesci gatto sono noti per avere organi elettrosensoriali (/34/, /28/), e risposte ai campi elettrici sono state riportate nelle anguille d'acqua dolce.

In particolare, gli organi sensoriali per l'elettrorecezione nei pesci sono classificati come ampollari o tuberosi (/35/): i recettori ampollari sono sintonizzati su campi di frequenza più bassi (da $<0,1$ a 25 Hz), mentre i recettori tuberosi sono sintonizzati su campi di frequenza più elevati (da 50 a >2000 Hz). I recettori tuberosi sono conosciuti solo in due ordini teleostei di pesci elettrici d'acqua dolce (Gymnotiformes in Sud America e Mormyriiformes in Africa; /35/), mentre le ampolle di Lorenzini o organi simili sono stati trovati in elasmobranchi, pesci ratto, lamprede, storioni e pesci gatto.

I ruoli funzionali per l'elettro-ricezione in questi taxa di pesce sono simili a quelli descritti per gli elasmobranchi. Il rilevamento delle prede è il ruolo primario del senso elettrico nei pesci (/28/). Altri ruoli potenziali per il senso elettrico includono il rilevamento dei predatori e ruoli sociali o riproduttivi.

Per quanto riguarda il campo magnetico, il senso magnetico nei pesci è utilizzato per l'orientamento e la navigazione attraverso segnali geomagnetici (/36/, /37/, /38/). L'uso del senso magnetico per queste funzioni spiegherebbe la capacità dei pesci come il salmone e il tonno di compiere migrazioni a lunga distanza attraverso l'oceano aperto e per le specie diadromiche di raggiungere i loro affluenti natali con notevole precisione; anche se questa ipotesi deve ancora essere sostenuta da prove evidenti (/38/).

Un esperimento nella baia di San Francisco (U.S.) ha esaminato la migrazione del salmone Chinook e dello storione verde attraverso un cavo sottomarino a corrente continua ad alta tensione (HVDC) da 200 kV. La migrazione del salmone è risultata in gran parte invariata, sebbene i modelli di movimento indicassero che il cavo stesso o altri campi magnetici antropogenici (ad esempio quelli provenienti da grandi ponti metallici) hanno influenzato alcuni cambiamenti nel movimento (/33/).

Westerberg (2000) e Öhman et al. (2007) hanno riportato una velocità di nuoto più lenta nell'anguilla europea in migrazione che attraversa un cavo DC. Alcune singole anguille hanno virato mentre passavano su un cavo elettrificato e hanno nuotato più lentamente, il che suggerisce che abbiano rilevato il campo magnetico del cavo; tuttavia, alle anguille non è stato impedito di attraversare il cavo e pertanto quest'ultimo non costituisce un ostacolo alla loro migrazione.

Sono riportate risposte dei pesci a campi magnetici compresi tra 10 e 12 μT (/27/, /32/). Tuttavia, sulla base delle sensibilità riportate per altri gruppi di animali e dei livelli teorici per i pesci, le sensibilità probabili

sono molto più basse (/23/, /24/). Walker et al. (1984), ad esempio, hanno teorizzato che il tonno pinna gialla può rilevare intensità di campo magnetico comprese tra 1 e 100 nT. I livelli minimi di sensibilità per i pesci elettrorecettivi (non elasmobranchi) sono generalmente riportati intorno a 0,1 $\mu\text{V}/\text{cm}$.

Gli studi effettuati suggeriscono pertanto che la maggior parte delle specie di pesci risponde ai segnali generati da campi a bassa frequenza, nell'intervallo da <0,1 a 25 Hz (/28/). Non è chiaro quindi quante specie possano rispondere alle frequenze elettriche comprese nell'intervallo 50-60 Hz ed ai campi variabili nel tempo, ossia agli effetti dei cavi AC tipicamente utilizzati per gli impianti eolici offshore.

5.1.3 Mammiferi marini

Lo studio della sensibilità magnetica tra i mammiferi marini si è concentrata principalmente nei cetacei.

Molte specie di cetacei migrano stagionalmente fino a migliaia di chilometri ogni anno tra le zone di alimentazione estiva e le zone di svernamento, muovendosi dalle acque settentrionali a quelle meridionali. Resta ancora molto da capire sull'ipotesi che gli animali acquatici utilizzino il senso magnetico per navigare su queste lunghe distanze (/26/). Ad oggi, le prove della sensibilità magnetica dei cetacei sono teoriche (basate su studi di correlazione), comportamentali, fisiologiche, e anatomiche (ovvero la presenza di magnetite).

Dati statisticamente affidabili, ottenuti da studi effettuati sui cetacei, hanno dimostrato che esiste una correlazione tra il comportamento dei mammiferi marini ed i campi geomagnetici. All'interno dell'Ordine dei Cetacea, i membri dei misticeti (balene e megattere) e degli odontoceti (delfini e capodogli), hanno mostrato correlazioni positive con le differenze del campo geomagnetico, rendendolo così più plausibile che tutti i membri dell'Ordine dei Cetacei siano magnetosensibili. Sebbene nessuno degli studi abbia determinato il meccanismo della magnetosensibilità, la conclusione da questi studi è che i membri dell'ordine dei Cetacei possono percepire il campo magnetico terrestre e potrebbero usarlo per migrare su lunghe distanze (/25/). Inoltre, non è chiaro se venga utilizzato esclusivamente il campo geomagnetico o vi siano in aggiunta altri segnali regionali, né quali effetti possano avere delle perturbazioni del campo geomagnetico dovute ai cavi di alimentazione interrati. È ipotizzabile però che i mammiferi marini siano sensibili ai cambiamenti dei campi magnetici (/26/).

Da alcuni studi psicologici-comportamentali in cui si esponevano i delfini a campi magnetici permanenti sono risultati reazioni (ossia movimento, espirazioni acute, attività acustica ed elettrocardiogramma) per intensità di campo magnetico di 32, 108 e 168 μT rispettivamente nel 79, 63 e 53% delle prove, indicando che i delfini sono sensibili ai campi magnetici permanenti (/51/).

Dai risultati di diversi progetti è stato dimostrato che i cavi CA interrati ad una profondità di 1 m tipicamente emettono intensità di campo superiori a 0,05 μT fino a 20 m di distanza e 20 m lungo il fondale del mare (Tabella 5.1); per un cavo DC tali valori del campo si estenderebbero ad almeno 45 m sopra il cavo e fino a circa 50 m lungo il fondale marino (Tabella 5.2). Va notato tuttavia che il campo magnetico AC variabile nel tempo può essere non rilevato dai mammiferi marini (/1/). Nel caso in esame, come riportato nella REL_43 - RELAZIONE TECNICA EMISSIONI ELETTROMAGNETICHE, i cavi di export, interrati ad una profondità di 1 m, presentano un'intensità del campo magnetico di 3 μT ad una distanza di 1 m dal fondale marino (/53/).

Per quanto riguarda la sensibilità ai campi elettrici, non è stata riportata alcuna prova di elettrosensibilità nei mammiferi marini.

Magnetic Field (micro Tesla)	Distance above seabed (m)										
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
0	7.85E+0	3.47E-1	1.27E-1	6.52E-2	3.94E-2	2.62E-2	1.87E-2	1.40E-2	1.09E-2	8.69E-3	7.10E-3
±2	2.42E+0	3.30E-1	1.25E-1	6.44E-2	3.91E-2	2.61E-2	1.87E-2	1.40E-2	1.09E-2	8.67E-3	7.09E-3
±4	1.47E+0	2.85E-1	1.17E-1	6.21E-2	3.82E-2	2.57E-2	1.84E-2	1.39E-2	1.08E-2	8.63E-3	7.06E-3
±6	7.70E-1	2.31E-1	1.06E-1	5.86E-2	3.68E-2	2.51E-2	1.81E-2	1.37E-2	1.07E-2	8.55E-3	7.00E-3
±8	3.80E-1	1.80E-1	9.28E-2	5.43E-2	3.50E-2	2.42E-2	1.76E-2	1.34E-2	1.05E-2	8.45E-3	6.93E-3
±10	2.23E-1	1.38E-1	8.00E-2	4.95E-2	3.29E-2	2.32E-2	1.71E-2	1.31E-2	1.03E-2	8.31E-3	6.84E-3
±12	1.47E-1	1.06E-1	6.82E-2	4.47E-2	3.07E-2	2.20E-2	1.65E-2	1.27E-2	1.01E-2	8.16E-3	6.74E-3
±14	1.05E-1	8.29E-2	5.79E-2	4.00E-2	2.84E-2	2.08E-2	1.58E-2	1.23E-2	9.80E-3	7.98E-3	6.62E-3
±16	7.90E-2	6.61E-2	4.93E-2	3.57E-2	2.61E-2	1.96E-2	1.50E-2	1.18E-2	9.51E-3	7.79E-3	6.48E-3
±18	6.16E-2	5.36E-2	4.21E-2	3.18E-2	2.39E-2	1.83E-2	1.43E-2	1.14E-2	9.20E-3	7.58E-3	6.34E-3
±20	4.95E-2	4.43E-2	3.61E-2	2.83E-2	2.19E-2	1.71E-2	1.35E-2	1.09E-2	8.88E-3	7.36E-3	6.18E-3
±22	4.06E-2	3.71E-2	3.12E-2	2.52E-2	2.00E-2	1.59E-2	1.28E-2	1.04E-2	8.55E-3	7.13E-3	6.02E-3
±24	3.39E-2	3.15E-2	2.72E-2	2.25E-2	1.83E-2	1.48E-2	1.20E-2	9.89E-3	8.21E-3	6.90E-3	5.85E-3
±26	2.88E-2	2.70E-2	2.38E-2	2.01E-2	1.67E-2	1.37E-2	1.13E-2	9.41E-3	7.88E-3	6.66E-3	5.68E-3
±28	2.48E-2	2.34E-2	2.10E-2	1.81E-2	1.53E-2	1.28E-2	1.07E-2	8.94E-3	7.54E-3	6.42E-3	5.50E-3
±30	2.15E-2	2.05E-2	1.86E-2	1.63E-2	1.40E-2	1.18E-2	1.00E-2	8.48E-3	7.22E-3	6.18E-3	5.33E-3
±32	1.89E-2	1.81E-2	1.66E-2	1.47E-2	1.28E-2	1.10E-2	9.40E-3	8.04E-3	6.89E-3	5.94E-3	5.15E-3
±34	1.67E-2	1.61E-2	1.49E-2	1.34E-2	1.18E-2	1.02E-2	8.83E-3	7.62E-3	6.58E-3	5.71E-3	4.97E-3
±36	1.49E-2	1.44E-2	1.34E-2	1.22E-2	1.08E-2	9.52E-3	8.30E-3	7.22E-3	6.28E-3	5.48E-3	4.80E-3
±38	1.33E-2	1.29E-2	1.22E-2	1.11E-2	1.00E-2	8.87E-3	7.80E-3	6.84E-3	5.99E-3	5.26E-3	4.63E-3
±40	1.20E-2	1.17E-2	1.11E-2	1.02E-2	9.25E-3	8.27E-3	7.33E-3	6.47E-3	5.71E-3	5.04E-3	4.46E-3
±42	1.09E-2	1.06E-2	1.01E-2	9.39E-3	8.57E-3	7.72E-3	6.90E-3	6.13E-3	5.44E-3	4.83E-3	4.29E-3
±44	9.91E-3	9.70E-3	9.26E-3	8.66E-3	7.95E-3	7.22E-3	6.50E-3	5.81E-3	5.19E-3	4.63E-3	4.13E-3
±46	9.06E-3	8.88E-3	8.51E-3	8.00E-3	7.40E-3	6.76E-3	6.12E-3	5.51E-3	4.95E-3	4.44E-3	3.98E-3
±48	8.32E-3	8.17E-3	7.85E-3	7.42E-3	6.90E-3	6.34E-3	5.77E-3	5.23E-3	4.72E-3	4.25E-3	3.83E-3
±50	7.66E-3	7.53E-3	7.27E-3	6.89E-3	6.44E-3	5.95E-3	5.45E-3	4.96E-3	4.50E-3	4.07E-3	3.68E-3
±52	7.08E-3	6.97E-3	6.74E-3	6.42E-3	6.03E-3	5.59E-3	5.15E-3	4.71E-3	4.29E-3	3.90E-3	3.55E-3
±54	6.56E-3	6.47E-3	6.27E-3	5.99E-3	5.65E-3	5.27E-3	4.87E-3	4.48E-3	4.10E-3	3.74E-3	3.41E-3
±56	6.10E-3	6.02E-3	5.85E-3	5.60E-3	5.30E-3	4.96E-3	4.61E-3	4.26E-3	3.91E-3	3.59E-3	3.28E-3
±58	5.68E-3	5.61E-3	5.47E-3	5.25E-3	4.99E-3	4.69E-3	4.37E-3	4.05E-3	3.74E-3	3.44E-3	3.16E-3
±60	5.31E-3	5.25E-3	5.12E-3	4.93E-3	4.70E-3	4.43E-3	4.15E-3	3.86E-3	3.57E-3	3.30E-3	3.04E-3

Magnetic Field (micro Tesla)	Distance above seabed (m)										
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
±62	4.97E-3	4.92E-3	4.80E-3	4.64E-3	4.43E-3	4.19E-3	3.94E-3	3.68E-3	3.42E-3	3.17E-3	2.93E-3
±64	4.66E-3	4.62E-3	4.52E-3	4.37E-3	4.18E-3	3.97E-3	3.74E-3	3.51E-3	3.27E-3	3.04E-3	2.82E-3
±66	4.39E-3	4.34E-3	4.25E-3	4.12E-3	3.96E-3	3.77E-3	3.56E-3	3.35E-3	3.13E-3	2.92E-3	2.71E-3
±68	4.13E-3	4.09E-3	4.01E-3	3.90E-3	3.75E-3	3.58E-3	3.39E-3	3.20E-3	3.00E-3	2.80E-3	2.61E-3
±70	3.90E-3	3.86E-3	3.79E-3	3.69E-3	3.56E-3	3.40E-3	3.23E-3	3.05E-3	2.87E-3	2.69E-3	2.52E-3
±72	3.68E-3	3.65E-3	3.59E-3	3.50E-3	3.38E-3	3.24E-3	3.08E-3	2.92E-3	2.76E-3	2.59E-3	2.43E-3
±74	3.49E-3	3.46E-3	3.40E-3	3.32E-3	3.21E-3	3.08E-3	2.94E-3	2.80E-3	2.64E-3	2.49E-3	2.34E-3
±76	3.30E-3	3.28E-3	3.23E-3	3.15E-3	3.06E-3	2.94E-3	2.81E-3	2.68E-3	2.54E-3	2.40E-3	2.26E-3
±78	3.14E-3	3.12E-3	3.07E-3	3.00E-3	2.91E-3	2.81E-3	2.69E-3	2.57E-3	2.44E-3	2.31E-3	2.18E-3
±80	2.98E-3	2.96E-3	2.92E-3	2.86E-3	2.78E-3	2.68E-3	2.58E-3	2.46E-3	2.34E-3	2.22E-3	2.10E-3
±82	2.84E-3	2.82E-3	2.78E-3	2.73E-3	2.65E-3	2.57E-3	2.47E-3	2.36E-3	2.25E-3	2.14E-3	2.03E-3
±84	2.70E-3	2.69E-3	2.65E-3	2.60E-3	2.54E-3	2.46E-3	2.37E-3	2.27E-3	2.17E-3	2.06E-3	1.96E-3
±86	2.58E-3	2.56E-3	2.53E-3	2.49E-3	2.43E-3	2.35E-3	2.27E-3	2.18E-3	2.09E-3	1.99E-3	1.89E-3
±88	2.46E-3	2.45E-3	2.42E-3	2.38E-3	2.32E-3	2.26E-3	2.18E-3	2.10E-3	2.01E-3	1.92E-3	1.83E-3
±90	2.35E-3	2.34E-3	2.32E-3	2.28E-3	2.23E-3	2.16E-3	2.09E-3	2.02E-3	1.94E-3	1.85E-3	1.77E-3
±92	2.25E-3	2.24E-3	2.22E-3	2.18E-3	2.13E-3	2.08E-3	2.01E-3	1.94E-3	1.87E-3	1.79E-3	1.71E-3
±94	2.16E-3	2.15E-3	2.13E-3	2.09E-3	2.05E-3	2.00E-3	1.94E-3	1.87E-3	1.80E-3	1.73E-3	1.66E-3
±96	2.07E-3	2.06E-3	2.04E-3	2.01E-3	1.97E-3	1.92E-3	1.87E-3	1.81E-3	1.74E-3	1.67E-3	1.60E-3
±98	1.99E-3	1.98E-3	1.96E-3	1.93E-3	1.89E-3	1.85E-3	1.80E-3	1.74E-3	1.68E-3	1.62E-3	1.55E-3
±100	1.91E-3	1.90E-3	1.88E-3	1.86E-3	1.82E-3	1.78E-3	1.73E-3	1.68E-3	1.62E-3	1.57E-3	1.50E-3

Tabella 5.1 - Tabella dei campi magnetici AC medi calcolati per vari progetti a distanze lungo e sopra il fondale marino (1/).

Magnetic Field (micro Tesla)	Distance above seabed (m)										
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
0	78.27	2.73	0.83	0.40	0.23	0.15	0.11	0.08	0.06	0.05	0.04
±2	19.55	2.47	0.81	0.39	0.23	0.15	0.11	0.08	0.06	0.05	0.04
±4	5.98	1.92	0.74	0.37	0.22	0.15	0.11	0.08	0.06	0.05	0.04
±6	2.78	1.40	0.65	0.35	0.21	0.14	0.10	0.08	0.06	0.05	0.04
±8	1.59	1.02	0.55	0.32	0.20	0.14	0.10	0.08	0.06	0.05	0.04
±10	1.02	0.75	0.46	0.29	0.19	0.13	0.10	0.07	0.06	0.05	0.04
±12	0.71	0.57	0.39	0.26	0.18	0.13	0.09	0.07	0.06	0.05	0.04
±14	0.53	0.44	0.32	0.23	0.16	0.12	0.09	0.07	0.05	0.04	0.04
±16	0.40	0.35	0.27	0.20	0.15	0.11	0.08	0.07	0.05	0.04	0.04
±18	0.32	0.29	0.23	0.18	0.13	0.10	0.08	0.06	0.05	0.04	0.04
±20	0.26	0.24	0.20	0.16	0.12	0.10	0.08	0.06	0.05	0.04	0.03
±22	0.21	0.20	0.17	0.14	0.11	0.09	0.07	0.06	0.05	0.04	0.03
±24	0.18	0.17	0.15	0.12	0.10	0.08	0.07	0.06	0.05	0.04	0.03
±26	0.15	0.15	0.13	0.11	0.09	0.08	0.06	0.05	0.04	0.04	0.03
±28	0.13	0.13	0.11	0.10	0.08	0.07	0.06	0.05	0.04	0.04	0.03
±30	0.12	0.11	0.10	0.09	0.08	0.07	0.06	0.05	0.04	0.03	0.03
±32	0.10	0.10	0.09	0.08	0.07	0.06	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03
±34	0.09	0.09	0.08	0.07	0.06	0.06	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03
±36	0.08	0.08	0.07	0.07	0.06	0.05	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03
±38	0.07	0.07	0.07	0.06	0.05	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03
±40	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02
±42	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02
±44	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02
±46	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02
±48	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02
±50	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02
±52	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02
±54	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02
±56	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02
±58	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
±60	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
±62	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02

Magnetic Field (micro Tesla)	Distance above seabed (m)										
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
±64	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
±66	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01
±68	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01
±70	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01
±72	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01
±74	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
±76	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
±78	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
±80	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
±82	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
±84	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
±86	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
±88	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
±90	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
±92	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
±94	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
±96	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
±98	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
±100	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

Tabella 5.2 - Tabella dei campi magnetici DC medi calcolati per vari progetti a distanze lungo e sopra il fondale marino (/1/).

5.1.4 Tartarughe marine

È noto che le tartarughe marine possiedono una sensibilità geomagnetica, ma non una sensibilità elettrica, che viene utilizzata per l'orientamento, la navigazione e la migrazione. I campi magnetici della Terra vengono sfruttati in due modi: 1) per informazioni direzionali (tipo bussola) per mantenere una direzione lungo una traiettoria particolare e 2) per informazioni posizionali o di tipo cartografico per valutare una posizione relativa ad una specifica destinazione geografica (/23/).

Le prove della capacità delle tartarughe marine di percepire i campi magnetici consistono per la maggior parte in studi osservativi e sperimentali. I metodi sperimentali includono lo spostamento delle tartarughe marine e la manipolazione sensoriale (ad esempio occhiali per bloccare i segnali visivi e forti magneti trasportati sulle teste delle tartarughe). Più recentemente, studi di telemetria satellitare hanno fornito informazioni dettagliate sui processi di navigazione delle tartarughe marine e hanno permesso agli scienziati di ricostruire le rotte migratorie (/50/). Infine, esistono anche prove anatomiche in cui la magnetite è stata isolata nella materia dura delle tartarughe verdi (/24/).

Molti esperimenti di spostamento e manipolazione sensoriale hanno dimostrato che i cambiamenti nell'intensità del campo e nell'angolo di inclinazione possono far deviare le tartarughe dalla loro direzione originale; tuttavia, i meccanismi alla base delle capacità sensoriali delle tartarughe marine sono ancora poco noti.

Numerosi studi hanno dimostrato magnetosensibilità e risposte comportamentali a intensità di campo comprese tra 0,0047 e 4000 μT per le tartarughe caretta e tra 29,3 e 200 μT per le tartarughe verdi. Sebbene altre specie non siano state studiate, somiglianze anatomiche, biologiche e comportamentali suggeriscono che potrebbero essere reattive per livelli di soglia simili.

Per quanto riguarda il rilevamento dei campi magnetici provenienti dai cavi sottomarini, i livelli emessi da questi sono ben al di sopra del campo magnetico terrestre. Va ricordato che i campi magnetici AC variabili nel tempo possono non essere percepiti dagli organismi marini sensibili al campo geomagnetico statico persistente generato dalla Terra. Tuttavia, i risultati degli studi sperimentali suggeriscono che le tartarughe marine siano in grado di rilevare i campi magnetici DC emessi dai cavi sottomarini in prossimità di 45 m al di sopra dello stesso e fino a 50 m orizzontalmente dai cavi.

È noto che le tartarughe marine utilizzano molteplici segnali (sia geomagnetici che non magnetici) per la navigazione e la migrazione. Tuttavia, le conclusioni sugli effetti dei campi magnetici generati dai cavi elettrici sono ancora ipotetiche poiché non è noto come le tartarughe marine rilevino o elaborino le fluttuazioni del campo magnetico terrestre.

5.1.5 Invertebrati

Esistono prove di risposta ai campi elettrici e magnetici in almeno 3 phyla di invertebrati marini: Mollusca, Arthropoda ed Echinodermata.

Si sa poco sull'elettrocezione negli invertebrati; in generale la sensibilità riportata ai campi elettrici per gli invertebrati varia da circa 3 a 20 mV/cm (/20/).

Studi recenti, effettuati da Patullo e Macmillan (2007), affermano di aver riportato la prima prova di una risposta comportamentale degli invertebrati a un campo elettrico. Sono state osservate risposte comportamentali nei gamberi di acqua dolce (*Cherax destructor*) dovuti a campi elettrici di basso livello, del tipo generato da potenziali prede. I gamberi hanno mostrato una risposta di attrazione ai campi elettrici DC che producono una densità di corrente di 0,4 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ (/20/). Ulteriori esperimenti su un altro gambero d'acqua dolce (*Procambarus clarkii*) hanno dimostrato risposte ai campi elettrici, sebbene a intensità più elevate (/20/). La stimolazione del *Procambarus clarkii* con campi elettrici a DC, 4 Hz, 10 Hz, 100 Hz e 1000

Hz ha stimolato risposte comportamentali solo a campi a 20 mV/cm o superiori. Le risposte più evidenti al campo elettrico sono state riportate per la frequenza di 4 Hz.

I ruoli funzionali ipotizzati per l'elettrosenso degli invertebrati sarebbero gli stessi dimostrati per i pesci. L'individuazione delle prede è suggerita come funzione primaria, mentre l'identificazione di predatori e conspecifici è un altro ruolo possibile. Sebbene Patullo e Macmillan (2007) hanno concluso che le loro ricerche sui gamberi forniscono prove dell'esistenza di un elettrosenso, Steullet et al. (2007) hanno risposto che tali prove continuano a mancare per gli invertebrati.

Per quanto riguarda la magnetorecezione vi sono prove sperimentali sia per i molluschi marini che per gli artropodi. La presenza di magnetite biogenica, infatti, è nota nei molluschi marini da quasi cinquant'anni.

Si ipotizza che il ruolo funzionale del senso magnetico degli invertebrati riguardi l'orientamento e la navigazione utilizzando segnali geomagnetici. L'uso del senso magnetico per queste funzioni potrebbe spiegare la capacità delle aragoste di navigare durante la migrazione e di localizzare la loro tana. Sono state segnalate risposte comportamentali anche per diversi gruppi di artropodi marini (aragosta spinosa dei Caraibi) e per gli anfipodi.

Recenti indagini sul senso magnetico nei molluschi si sono concentrate sul nudibranco *Tritonia diomedea*. Lohmann e Willows (1987) hanno condotto esperimenti comportamentali sulla *Tritonia diomedea* che hanno dimostrato la capacità di questa specie di ricavare informazioni direzionali dal campo magnetico terrestre e di utilizzare queste informazioni per l'orientamento. Sono stati studiati anche i meccanismi neurali alla base di queste capacità. I neuroni pedali nel cervello hanno risposto con una maggiore attività elettrica ai cambiamenti nel campo geomagnetico. Gli autori hanno ipotizzato che i neuroni identificati facciano parte del sottostante percorso per il senso magnetico o per l'orientamento geomagnetico.

Con i suoi neuroni pedali grandi e identificabili, la *Tritonia diomedea* è un organismo modello per tali analisi elettrofisiologiche dei meccanismi neurali del senso magnetico. Uno studio del macrobenthos sopra e intorno al cavo DC SwePol non ha rilevato alcun cambiamento evidente nella composizione delle specie, nell'abbondanza o nella biomassa, suggerendo che il campo magnetico in prossimità del cavo non ha influenzato le risorse bentoniche (/18/).

Pertanto, le specie di invertebrati elettrosensibili finora identificate hanno soglie di sensibilità superiori al livello dei campi elettrici indotti dai cavi sottomarini e pertanto non sarebbero influenzate da tali campi. Eventuali impatti sulle specie magnetosensibili derivanti da un campo magnetico alterato in prossimità di un cavo dipenderebbero da come una specie utilizza il proprio senso magnetico. Come con i pesci, le specie di invertebrati che utilizzano il campo geomagnetico per guidare i loro movimenti attraverso un'area con un cavo sottomarino possono essere confuse quando incontrano il campo magnetico del cavo (/17/). Possono cambiare la direzione del loro viaggio in base al campo alterato.

6 MISURE DI MITIGAZIONE

Dai dati provenienti dagli studi ed esperimenti effettuati, oltre alle informazioni da letteratura, non è stato stabilito che esistano impatti negativi associati all'esposizione ai campi elettromagnetici provenienti dai cavi sottomarini di un livello tale da influenzare le popolazioni o gli ecosistemi esistenti. Tuttavia, è opportuno considerare delle possibili soluzioni che possano ridurre al minimo o evitare l'esposizione ai campi elettromagnetici.

Esistono diversi aspetti della progettazione e installazione dei cavi sottomarini che influenzano i livelli del campo magnetico nelle vicinanze del cavo. Questi aspetti includono il flusso di corrente, la configurazione del cavo, la conduttività e la permeabilità dei materiali della guaina e dell'armatura, la distanza dai cavi e la profondità di sepoltura. Il ruolo di questi fattori è riassunto brevemente di seguito.

Ubicazione

In generale è opportuno evitare aree con presenza di habitat con specie elettrosensibili e/o magnetosensibili. I cavi installati seguendo questo approccio potrebbero avere una lunghezza maggiore ma si eviterebbe che le specie sensibili possano entrare in contatto con la fonte dei campi elettromagnetici.

Caratteristiche del cavo

L'intensità del campo magnetico prodotto da un cavo è direttamente proporzionale alla corrente che percorre il cavo stesso e inversamente proporzionale alla distanza da esso (Legge di Biot Savart). Pertanto, maggiore è il flusso di corrente, maggiore è il campo magnetico.

Poiché a parità di potenza, all'aumentare della tensione, diminuisce la corrente, i cavi a tensione più elevata producono campi magnetici inferiori rispetto ai cavi a tensione inferiore.

Profondità di interrimento

Come per tutte le sorgenti, l'intensità del campo (e la potenziale esposizione da parte di organismi) ha una relazione inversa con la distanza dai cavi. Per i cavi sottomarini un fattore che influenza la massima esposizione potenziale degli organismi marini è la profondità di sepoltura dei cavi. L'effetto della profondità di interrimento sull'intensità del campo magnetico nell'acqua sovrastante può essere apprezzato dalla Figura 6-1. In condizioni idonee del fondale marino solitamente i cavi vengono interrati 1-2 metri sotto il fondale per fornire una separazione fisica tra i livelli più elevati dei campi elettromagnetici adiacenti al vado e gli organismi che vivono vicino al fondo della colonna d'acqua.

In alcuni casi, le condizioni del substrato potrebbero non prestarsi adeguate alla sepoltura sotto i sedimenti naturali. Un'alternativa è posizionare il cavo direttamente sul fondo del mare o in una fossa poco profonda e posizionare materassi di roccia o cemento sopra il cavo, proteggendo contemporaneamente il cavo e aggiungendo un'ulteriore barriera che ridurrebbe i livelli di campi elettromagnetici nella colonna d'acqua.

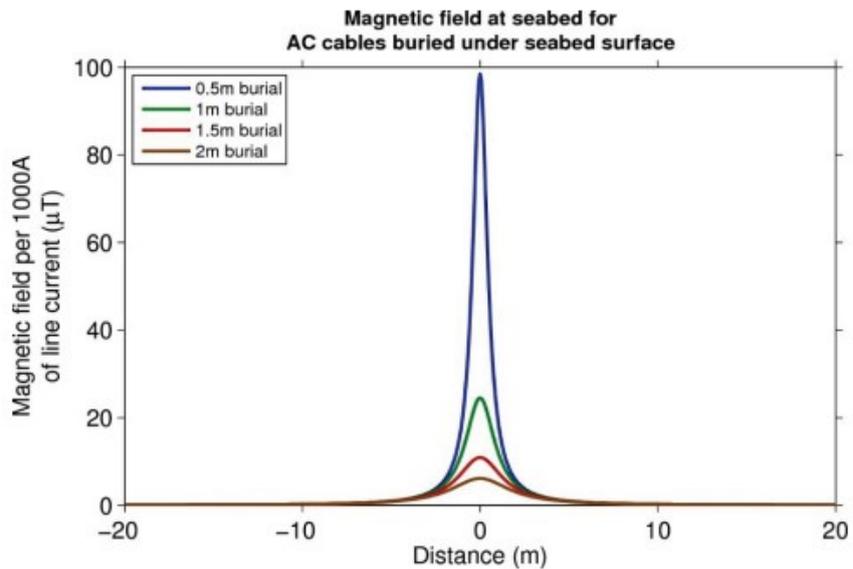


Figura 6-1 - Profili del campo magnetico a livello del fondale marino per un cavo CA interrato a 0,5 m, 1 m, 1,5 m e 2 m.

Posizionamento dei cavi

Data la natura vettoriale dei campi magnetici, è possibile ottenere una mitigazione del campo magnetico risultante ottimizzando la disposizione delle fasi dei cavi in parallelo.

Nella Figura 6-2 seguente si riportano le formule per il calcolo dell'induzione magnetica generata da un sistema trifase composto da conduttori rettilinei disposti tra di loro parallelamente e percorsi da una terna di correnti simmetrica ed equilibrata. Si nota che la disposizione con i conduttori ai vertici di un triangolo equilatero è quella che, a parità di condizioni, minimizza il campo magnetico.

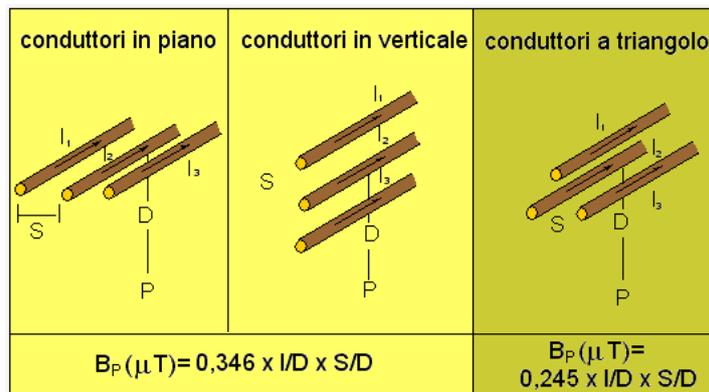


Figura 6-2 – Induzione magnetica generata nel punto P da una linea trifase con conduttori rettilinei, paralleli e correnti equilibrate e simmetriche (CEI 106-12)

A volte, i cavi sottomarini vengono stesi mediante perforazione direzionale orizzontale dalla riva in condotti per ridurre al minimo i disturbi in acque poco profonde prima di emergere come cavi separati.

Per quanto riguarda i cavi in corrente continua le configurazioni che posizionano i cavi più vicini tra loro e con la stessa corrente avranno campi magnetici più bassi, come illustrato in Figura 6-3. In casi estremi, una configurazione coassiale in cui un cavo di alimentazione DC è contenuto interamente all'interno del conduttore di ritorno conterrà totalmente il campo magnetico.

Tuttavia, esistono limiti pratici e tecnici alla distanza d'installazione dei cavi a causa di condizioni fisiche, come il tipo di fondale marino, o vincoli operativi, come fornire spazio sufficiente per la manutenzione e la riparazione di ciascun cavo.

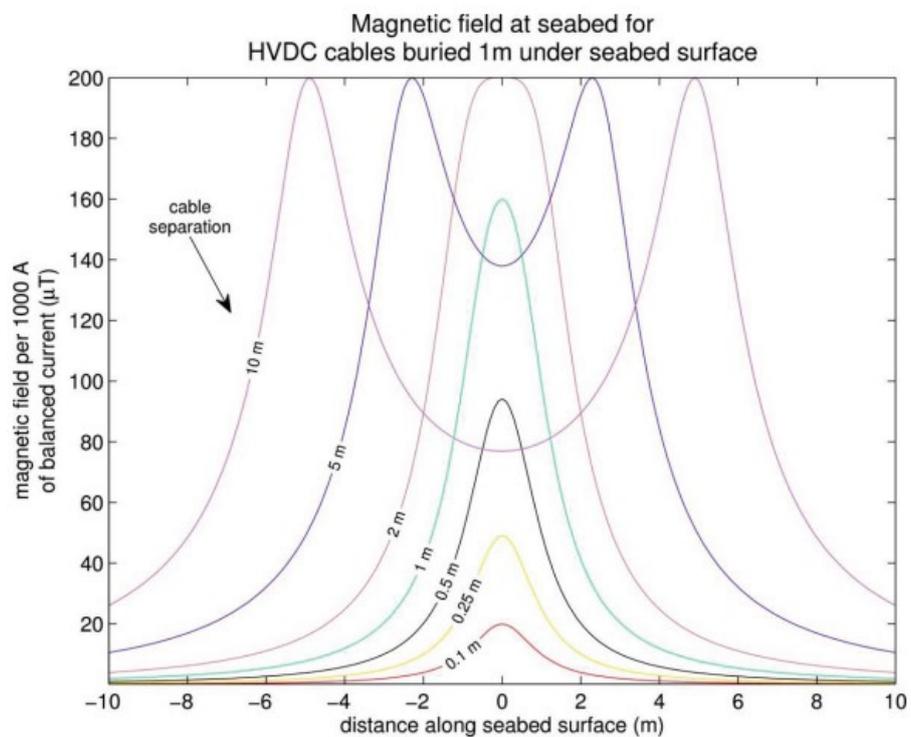


Figura 6-3 – Profili del campo magnetico sulla superficie del fondale marino per cavi DC sepolti 1 m sotto il fondale

7 CONCLUSIONI

Come è noto, i cavi sottomarini, che siano in corrente alternata (AC) o continua (DC), emettono un campo elettromagnetico durante la loro fase operativa. Gli studi scientifici relativi ai campi elettromagnetici nell'ambiente marino hanno fatto progressi significativi negli ultimi 20 anni per cercare di capire il modo in cui la fauna selvatica rileva e risponde a questi campi. Ad oggi non sono stati osservati impatti negativi su specie elettrosensibili o magnetosensibili dopo l'esposizione a campi elettromagnetici provenienti dai cavi sottomarini. In alcune specie sono state osservate risposte comportamentali alla presenza di cavi sottomarini (maggior movimento, cambio di rotta, evitamento), ma tali reazioni ai campi elettromagnetici non sono traducibili come impatti negativi.

Dalle informazioni disponibili è possibile trarre le seguenti conclusioni:

- Un cavo sottomarino operativo produce un campo elettrico non apprezzabile sul fondale marino in quanto viene contenuto dalla guaina metallica esterna del cavo. Il campo magnetico invece non è schermato dalla protezione e perciò risulta apprezzabile anche a distanza dal cavo. La variazione del campo magnetico circostante inoltre produce un campo elettrico indotto il quale può essere percepito dalla fauna marina;
- Le specie con elettrosensibilità sono in grado di rilevare i campi elettromagnetici provenienti sia dai cavi DC che da quelli AC, con una sensibilità maggiore per i cavi DC. I taxa includono gli elasmobranchi, alcuni pesci teleostei e alcuni crostacei decapodi;
- Le specie con magnetosensibilità hanno maggiori probabilità di rilevare i campi elettromagnetici provenienti dai cavi DC piuttosto che dai cavi AC. I taxa includono le tartarughe marine, alcuni mammiferi marini (cetacei) e alcuni crostacei;
- L'intensità del campo elettromagnetico decresce rapidamente con l'aumentare della distanza dal cavo e con la profondità di interrimento del cavo stesso.

Il progetto prevede l'utilizzo di cavi in AC, quindi campi elettromagnetici a corrente alternata che risultano meno impattanti rispetto a quelli DC. Questo è dovuto anche alla difficoltà dei sistemi di percezione dei campi di alcune specie marine che non sono in grado di rispondere alla rapida variazione dei campi generati da correnti alternate al di sotto di certe intensità di campo magnetico.

I cavi saranno inoltre interrati con una profondità di sepoltura di circa 1-2 m, la quale limiterebbe, ma non eviterebbe del tutto, l'intensità del campo elettromagnetico.

Infine, una mitigazione del campo magnetico si ottiene ottimizzando la disposizione delle fasi dei cavi in parallelo.

Tali scelte progettuali permettono di mitigare e rendere accettabili i potenziali effetti generati dai campi elettromagnetici dovuti ai cavi sottomarini sulla flora marina.

Nel complesso è possibile affermare che, sulla base dei dati da letteratura e dalle osservazioni sperimentali, non esistono prove conclusive per cui i campi elettromagnetici provenienti da un cavo sottomarino creino effetti ambientali negativi su individui o popolazioni marine. In generale, pertanto, gli effetti dei campi elettromagnetici sono considerabili da bassi a trascurabili.

8 RIFERIMENTI

- /1/ *Tricas T., Gill A., 2011, Effects of EMFs from undersea power cables on elasmobranchs and other marine species.*
- /2/ *Hermans A., Winter H.V., Gill A.B., Murk A.J., 2024, Do electromagnetic fields from subsea power cables effect benthic elasmobranch behaviour? A risk-based approach for the Dutch Continental Shelf.*
- /3/ *National Renewable Energy Laboratory, Pacific Northwest National Laboratory, 2022, Electromagnetic Field Effects on Marine Life.*
- /4/ *Copping A.E., Hemery L. G., Viehman H., Seitz A. C., Staines G. J., Hasselman D. J., 2021, Are fish in danger? A review of environmental effects of marine renewable energy of fishes.*
- /5/ *Kirschvink, J. L., 1997, Magnetoreception: homing in on vertebrates.*
- /6/ *Tricas, T.C., New, J.G., 1997, Sensitivity and response dynamics of elasmobranch electrosensory primary afferent neurons to near threshold fields.*
- /7/ *Gill, A.B., Desender, M., 2020, Risk to animals from electromagnetic fields emitted by electric cables and marine renewable energy devices.*
- /8/ *Nyqvist, D., Durif, C., Johnsen, M.G., De Jong, K., Forland, T.N., Sivle, L.D., 2020, Electric and magnetic senses in marine animals, and potential behavioral effects of electromagnetic surveys.*
- /9/ *Kalmijn A.J., Gonzalez I.F., McClune M.C., 2002, The physical nature of life.*
- /10/ *New J. G., Tricas T. C., 1997, Electrorceptors and Magnetoreceptors: Morphology and Function.*
- /11/ *Bodznick D., J. Montgomery, Tricas T. C., 2003, Electrorception: extracting behaviorally important signals from noise.*
- /12/ *Gill A. B., Y. Huang, I. Gloyne-Phillips, J. Metcalfe, V. Quayle, J. Spencer, V. Wearmouth, 2009, COWRIE 2.0 Electromagnetic Fields (EMF) Phase 2: EMF-sensitive fish response to EM emissions from sub-sea electricity cables of the type used by the offshore renewable energy industry.*
- /13/ *Kalmijn A.J., 1988, Detection of weak electric fields.*
- /14/ *Andrianov G.N., H.R. Brown, O.B. Ilyinsky, 1974, Responses of central neurons to electrical and magnetic stimuli of the ampullae of Lorenzini in the Black Sea skate.*
- /15/ *Akoev G.N., O.B. Ilyinsky, P.M. Zadan, 1976, Responses of electroreceptors (ampullae of Lorenzini) of skates to electric and magnetic fields.*
- /16/ *Brown H. R., O. B. Ilyinsky, 1978, Ampullae of lorenzini in magnetic-field.*
- /17/ *Gill A. B., I. Gloyne-Phillips K. J. Neal, and J. A. Kimber, 2005, The potential effects of electromagnetic fields generated by sub-sea power cables associated with offshore wind farm developments on electrically and magnetically sensitive marine organisms - a review.*
- /18/ *Andrulewicz E. D., D. Napierska and Z. Otremba, 2003, The environmental effects of the installation and functioning of the submarine SwePol Link HVDC transmission line: a case study of the Polish marine area of the Baltic Sea.*
- /19/ *Lohmann, K. J. and A. O. D. Willows, 1987, Lunar-modulated geomagnetic orientation by a marine mollusk.*

- /20/ Steullet, P., D. H. Edwards, and C. D. Derby, 2007, *An electric sense in crayfish?*
- /21/ Patullo, B. W. and D. L. Macmillan, 2007, *Crayfish respond to electrical fields.*
- /22/ Papi, F., P. Luschi, S. Akesson, S. Capogrossi, and G.C. Hays. 2000. *Open-sea migration of magnetically disturbed sea turtles.*
- /23/ Lohmann, K. J., B. E. Witherington, C. M. F. Lohmann, and M. Salmon. 1997. *Orientation, navigation, and natal beach homing in sea turtles.*
- /24/ Kirschvink, J. L. 1983. *Biomagnetic geomagnetism.*
- /25/ Klinowska, M. 1990. *Geomagnetic orientation in cetaceans: behavioral evidence, In Sensory Abilities of Cetaceans: Laboratory and Field Evidence.*
- /26/ Walker, M.M., C.E. Diebel, J.L. Kirschvink. 2003. *Detection and Use of the Earth's Magnetic Field by Aquatic Vertebrates, In Sensory Processing in the Aquatic Environment.*
- /27/ Walker, M. M., J. L. Kirschvink, S. B. R. Chang, and A. E. Dizon. 1984. *A candidate magnetic sense organ in the yellowfin tuna, Thunnus albacares.*
- /28/ Collin, S. P. and D. Whitehead. 2004. *The functional roles of passive electroreception in nonelectric fishes.*
- /29/ Lohmann, K. J. and C. M. F. Lohmann. 1996a. *Detection of magnetic field intensity by sea turtles.*
- /30/ Lohmann, K. J. and C. M. F. Lohmann. 1996b. *Orientation and open-sea navigation in sea turtles.*
- /31/ Kirschvink, J. L. and J. L. Gould. 1981. *Biogenic magnetite as a basis for magnetic-field detection in animals.*
- /32/ Nishi, T. and G. Kawamura. 2005. *Anguilla japonica is already magnetosensitive at the glass eel phase.*
- /33/ Wyman, M.T., Klimley, P.A., Battleson, R.D., Agosta, T.V., Chapman, E.D., Haverkamp, P.J., Pagel, M.D., Kavet, R., 2018. *Behavioral responses by migrating juvenile salmonids to a subsea high-voltage DC power cable.*
- /34/ Bullock, T. H, 2005, *Electroreception. Springer Science Business Media*
- /35/ Bullock, T.H., 2002, *The future of research on electroreception and electrocommunication.*
- /36/ Dittman, A. H. and T. P. Quinn, 1996, *Homing in Pacific salmon: Mechanisms and ecological basis.*
- /37/ Lohmann, K. J., C. M. F. Lohmann, and C. S. Endres, 2008,. *The sensory ecology of ocean navigation.*
- /38/ Walker, M. M., C. E. Diebel, and J. L. Kirschvink, 2007, *Sensory systems neuroscience.*
- /39/ Brown, H. R. and O. B. Ilyinsky. 1978. *Ampullae of lorenzini in magnetic-field.*
- /40/ Andrianov, G.N., H.R. Brown, and O.B. Ilyinsky. 1974. *Responses of central neurons to electrical and magnetic stimuli of the ampullae of Lorenzini in the Black Sea skate.*
- /41/ Kalmijn, A.J., 1988, *Detection of weak electric fields.*
- /42/ Cliff, G. and S. F. J. Dudley. 1992. *Protection against shark attack in South Africa, 1952-90.*
- /43/ Bodznick, D., J. Montgomery, and T. C. Tricas. 2003. *Electroreception: extracting behaviorally important signals from noise.*
- /44/ New, J. G. and T. C. Tricas. 1997. *Electroreceptors and Magnetoreceptors: Morphology and Function.*

- /45/ Kalmijn, A.J. 1974. *The detection of electric fields from inanimate and animate sources other than electric organs.*
- /46/ Kalmijn, A.J., 1981, *Biophysics of geomagnetic field detection.*
- /47/ Klimley, A. P. 1993. *Highly directional swimming by scalloped hammerhead sharks, Sphyrna lewini, and subsurface irradiance, temperature, bathymetry, and geomagnetic field.*
- /48/ 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.*
- /49/ Yano, K., H. Mori, K. Minamikawa, S. Ueno, S. Uchida, K. Nagai, M. Toda, and M. Masuda, 2000, *Behavioral Response of Sharks to Electric Stimulation. Bulletin of Seikai.*
- /50/ Papi, F., P. Luschi, S. Akesson, S. Capogrossi, and G. C. Hays. 2000. *Open-sea migration of magnetically disturbed sea turtles.*
- /51/ Kuznetsov, V. B., 1999,. *Vegetative responses of dolphin to changes in permanent magnetic field.*
- /52/ REL_06 - RELAZIONE ELETTRICA.
- /53/ REL_43 RELAZIONE TECNICA EMISSIONI ELETTROMAGNETICHE