



OLT Offshore LNG Toscana S.p.A.



**TERMINALE GALLEGGIANTE DI
RIGASSIFICAZIONE
FSRU - TOSCANA**

**VALUTAZIONE DEL RUMORE SOTTOMARINO DURANTE LE FASI DI ALLIBO DI
UNA METANIERA AL TERMINALE FSRU TOSCANA**

Allibo Settembre 2020

Report per ottemperanza alla prescrizione emendata durante l'ottemperanza al 5° anno di monitoraggio dell'ambiente marino (Decreto No. 188 del 25 Giugno 2020)



Rev.0	19/01/2021	Emissione per commenti	MM/SN/CP	AMDB	CP
Rev.	Data	Descrizione della Revisione	Preparato da	Verificato da	Approvato da

SOMMARIO

1	INTRODUZIONE	3
2	TRAFFICO MARITTIMO NELL'AREA CIRCOSTANTE.....	3
	2.1 TRAFFICO MARITTIMO	3
	2.2 ESEMPI DI EMISSIONE DEL RUMORE DA NAVI.....	4
3	MISURE DEL RUMORE E PIANO DI CAMPIONAMENTO.....	6
4	MATERIALI E METODI.....	6
	4.1 STRUMENTAZIONE PER IL CAMPIONAMENTO	6
	4.2 INDIVIDUAZIONE DELLE FASI DI REGISTRAZIONE.....	7
	4.3 SOGLIE DI RUMORE.....	8
	4.4 METODO DI ANALISI DEI DATI.....	10
5	RISULTATI DELL'ANALISI LOCALE DEL RUMORE	11
	5.1 ANALISI LOCALE FASE DI AVVICINAMENTO.....	12
6	RISULTATI DEL CALCOLO DI SOURCE LEVEL (SL).....	14
	6.1 SOURCE LEVEL (SL) CUMULATIVA	14
	6.2 SL PER COMPONENTI DI FOURIER (MODELLO BELLHOP)	15
7	CONCLUSIONI.....	18
8	BIBLIOGRAFIA.....	19

INDICE FIGURE

<i>Figura 1</i>	<i>Traffico nell'area circostante il Terminale FSRU Toscana</i>	<i>3</i>
<i>Figura 2</i>	<i>Spettri sonori per imbarcazioni di piccole, medie e grandi dimensioni. Dati tratti da Borsani & Farchi, 2011 [1].....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 3</i>	<i>Spettro in terze d'ottava, per la fase di avvicinamento della metaniera all'impianto, fra le ore 7:09 e le ore 7:19 del 9 settembre 2020.</i>	<i>12</i>
<i>Figura 4</i>	<i>Confronto, per la fase di avvicinamento della metaniera (vedi temporizzazione nella Figura 3), fra il livello totale di pressione sonora e quello di TTS e PTS per i cetacei, il tutto espresso in funzione del tempo, con un valore al minuto. Si nota che il valore SPL dell'emissione sonora (linea blu) è molto al di sotto di quello dei due livelli di trauma (linea ciano e rosso).</i>	<i>12</i>
<i>Figura 5</i>	<i>Confronto, per la fase di avvicinamento della metaniera (vedi temporizzazione in Figura 3) fra il livello totale di pressione sonora SPL ed i valori soglia FBR per i Cetacei LFC, MFC e HFC tutti espressi come funzioni del tempo, con un valore al minuto come si vede, l'SPL totale è per tutta la fase di avvicinamento (linea blu), superiore agli FBR per LFC (linea rossa) ed MFC (linea ciano), mentre è inferiore a quello degli HFC (linea verde).</i>	<i>13</i>
<i>Figura 6</i>	<i>La transmission Loss calcolata dal modello Bellhop per la componente 63 Hz usata per il calcolo della distanza di sicurezza rispetto alla soglia FBR di 115 dB re μPa, nella SL(63 Hz).</i>	<i>17</i>
<i>Figura 7</i>	<i>La transmission Loss calcolata dal modello Bellhop per la componente 63 Hz usata per il calcolo della distanza di sicurezza rispetto alla soglia FBR di 105 dB re μPa, nella SL(63 Hz).</i>	<i>17</i>

INDICE TABELLE

<i>Tabella 1</i>	<i>esempi di emissione di navi espressi in kHz dB re 1 μ Pa alla sorgente</i>	<i>5</i>
<i>Tabella 2</i>	<i>Distanza fra l'idrofono e la sorgente del rumore per ognuna delle fasi analizzate.</i>	<i>8</i>
<i>Tabella 3</i>	<i>Definizione dei diversi gruppi funzionali acustici dei Cetacei con le relative bande uditive in frequenza (tabella modificata tratta da Borsani & Farchi, 2011[1]).....</i>	<i>9</i>
<i>Tabella 4</i>	<i>Soglie di prima reazione comportamentale per i diversi gruppi funzionali acustici (Tabella modificata tratta da Borsani & Farchi, 2011[1]).</i>	<i>9</i>
<i>Tabella 5</i>	<i>Livelli di TTS e PTS per i diversi gruppi funzionali di Cetacei (Tabella modificata tratta da Borsani & Farchi, 2011 [1]).</i>	<i>9</i>
<i>Tabella 6</i>	<i>Valori del SPL cumulativo (valore di SPL al minuto)</i>	<i>11</i>

Tabella 7 Calcolo della SL cumulativa mediante la TL a onde “semicilindriche”	14
Tabella 8 TL ricavata dai risultati delle misure e dalle elaborazioni modellistiche	15
Tabella 9 SPL ricavata dai risultati delle misure e dalle elaborazioni modellistiche. I dati di questa Tabella sono direttamente presi dalla “matrice del rumore” di questa campagna.....	16
Tabella 10 Valori di SL ottenuta sommando i valori riportati per gli SPL (PSD) per frequenza a quelli delle TL frequenza-specifiche di cui alle tabelle precedenti	16

APPENDICI**APPENDICE 1: Risultati analisi del Rumore****APPENDICE 2: Analisi Acustica**

1 INTRODUZIONE

Lo scopo di questo documento è quello di ottemperare alla prescrizione redatta dal MATTM durante l'ottemperanza del 5° anno di monitoraggio (Decreto No. 188 del 25 Giugno 2020) che di seguito si riporta: *“Entro un anno solare dalla emissione del presente decreto dovranno essere eseguite, in accordo con la Capitaneria di Porto e ISPRA, delle misure specifiche di rumore per ogni tipologia di nave, durante tutto il periodo di operazioni di arrivo, ormeggio, scarico del GNL e allontanamento delle stesse navi dal Terminale”*.

Nel presente documento sono riportate le misure del rumore sottomarino e la loro valutazione durante le operazioni di allibo di una nave metaniera al Terminale “FSRU Toscana” e delle attività antecedenti (avvicinamento) e successive (allontanamento) nei giorni 9 e 10 settembre 2020. Le valutazioni delle misure saranno effettuate attraverso un'analisi del contributo del rumore dell'allibo sugli effetti biologici dei cetacei (confronto con i valori soglia Ispra [1]) e sulle condizioni ambientali dell'area dove è già presente un importante traffico marittimo.

2 TRAFFICO MARITTIMO NELL'AREA CIRCOSTANTE

2.1 TRAFFICO MARITTIMO

I dati riportati nel presente paragrafo sono ripresi dal Documento RINA P00012749-1-H1 Rev. 1 - Gennaio 2019 [3], di cui un estratto è qui presentato per comprendere quale sia è l'intensità dei traffici marittimi intorno al Terminale “FSRU Toscana” e quale l'impatto in termini di traffico delle attività legate al Terminale Stesso.

L'analisi del traffico navale è stata effettuata sulla base dell'elaborazione dei dati di traffico navale AIS (Automatic Identification System) condotta nel 2017 su un'area di circa 2,500 km² centrata sulla posizione della FSRU Toscana e del Porto di Livorno (principale porto presente nell'area).

Nella

Figura 1 (E) sono rappresentate le rotte elaborate sulla base dei dati AIS con evidenziata la posizione della FSRU Toscana e del Porto di Livorno.

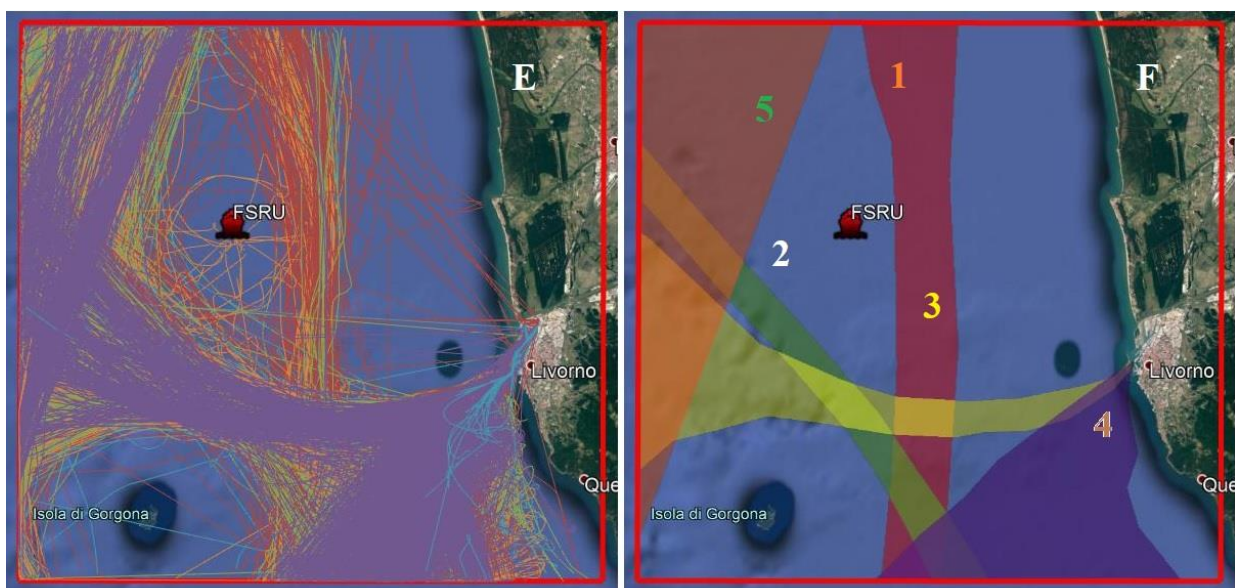


Figura 1 Traffico nell'area circostante il Terminale FSRU Toscana

Nota figura E: Rappresentazione delle rotte in classe GRT 2 (1500-5000 ton) Rosso, GRT 3 (5000-10000 ton) Verde, GRT 4 (10000-30000 ton) Viola, GRT 5 (30000-60000

ton) Azzurro, GRT 6 (>60000 ton) Arancione (attività di pesca esclusa)
Nota figura 1F: identificazione corridoi traffici marittimi

Mentre nella

Figura 1 (F) sono raffigurati i corridoi principali dei traffici marittimi.

- ✓ Corridoio 1: direzione nord/sud;
- ✓ Corridoio 2: direzione nord-ovest/sud;
- ✓ Corridoio 3: direzione est-ovest;
- ✓ Corridoio 4: direzione sud dal porto di Livorno;
- ✓ Corridoio 5: direzione nord-est/sud-ovest.

Il traffico navale da e per il Terminale la “FSRU Toscana” transita attraverso il *corridoio 3* in uscita/entrata dal porto di Livorno (navi di appoggio come rimorchiatori e crew boat) e attraverso il *corridoio 1*, in direzione nord/sud (Metaniere in avvicinamento). **Le interazioni del traffico relativo all’installazione offshore con gli altri corridoi di rotte commerciali interessate dall’area è trascurabile.**

Di seguito si riportano i numeri dei traffici:

- ✓ *Corridoio 1:* direzione nord/sud. Questo corridoio è percorso principalmente dalle navi in transito tra Livorno (tramite connessione con il Corridoio 3) e La Spezia/Marina di Massa. I dati AIS riportano un totale 1,387 passaggi. Meno del 10% del traffico sul Corridoio 1 (113 passaggi) è dovuto ai movimenti di supply vessel e tug vessel diretti alla FSRU Toscana che escono dal Porto di Livorno tramite il Corridoio 3 e si dirigono a nord, verso la FSRU tramite il Corridoio 1;
- ✓ *Corridoio 2:* direzione nord-ovest/sud. Questo corridoio è percorso principalmente dalle navi in transito tra Genova e Savona a nord e Taranto e Salerno a Sud, con un totale di 1,383 passaggi. Circa il 30% dei transiti, raggiunge il Porto di Livorno tramite il Corridoio 3;
- ✓ *Corridoio 3:* direzione est-ovest. Questo corridoio è utilizzato dalle navi in uscita dal Porto di Livorno e dirette verso nord o ovest per un totale di circa 3,500 passaggi (il numero di passaggi è complessivo e tiene conto sia delle navi in ingresso al Porto di Livorno, sia delle navi in uscita). Circa il 70% dei transiti in uscita è diretto a nord verso i Porti di Genova e Savona (tramite connessione con il Corridoio 2), circa il 30% verso le coste francesi e spagnole. **Il Corridoio 3 è utilizzato, come già sottolineato, dalle navi dirette al Terminale-FSRU Toscana tramite connessione con il Corridoio 1 (circa il 5% del traffico totale);**
- ✓ *Corridoio 4:* direzione sud. Questo corridoio è utilizzato dalle navi in uscita dal Porto di Livorno e dirette verso sud, per un totale di circa 15,600 passaggi. Le destinazioni più frequenti sono Olbia, Bastia, Cagliari, Catania, Civitavecchia, Palermo e Napoli;
- ✓ *Corridoio 5:* direzione nord-est/sud-ovest. Questo corridoio interessa marginalmente la zona in esame, e raccoglie principalmente il traffico marittimo tra La Spezia e i porti del sud (Cagliari, Gioia Tauro, Napoli) per un totale di 3,600 passaggi.

2.2 ESEMPI DI EMISSIONE DEL RUMORE DA NAVI

A titolo di esempio si riportano in **Figura 2** le stime in 1/3 di ottava del di rumore prodotto da navi di diverse dimensioni (large, medium e small)ed in Tabella 1 i valori dei Source level e la frequenza per varie tipologie di navi. Tali valori rappresentano un esempio del rumore emesso da navi in movimento e sono stati utilizzati successivamente nel presente documento per un confronto empirico.

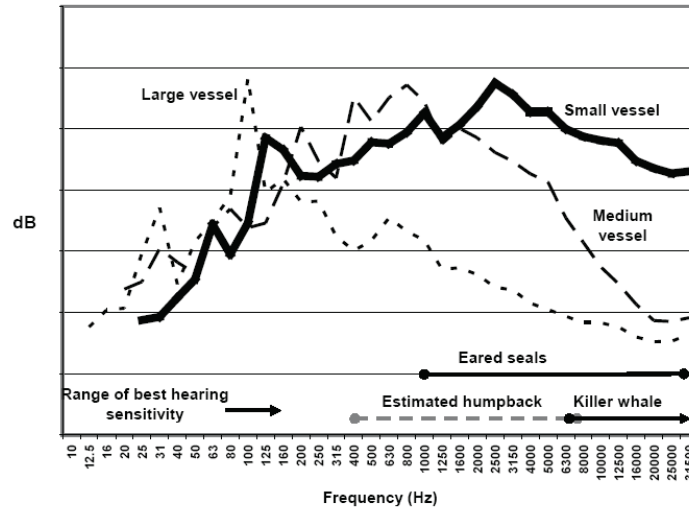


Figura 2 Spettri sonori per imbarcazioni di piccole, medie e grandi dimensioni. Dati tratti da Borsani & Farchi, 2011 [1]

Tabella 1 Esempi di emissione di navi espressi in kHz dB re 1 μ Pa alla sorgente

Tipo di emissione per alcuni mezzi nautici a determinate frequenze. Dati tratti da Borsani & Farchi, 2011 [1]			
Type of vessel	Frequency (kHz)	Source level (dB re 1 μ Pa)	Reference
Rigid inflatable	6.3	152	Malme et al. 1989
Fishing boat	0.25 – 1.0	151	Greene 1985
Fishing trawler	0.1	158	Malme et al. 1989
34 m (twin diesel engine)	0.63	159	Malme et al. 1989
Rimorchiatori	1-5	160-180	Simmonds et al. 2004
Tanker (135m)	0.43	169	Buck and Chalfant 1972
Tanker (179m)	0.06	180	Ross 1976
Supertanker (266m)	0.008	187	Thielele and Odengaard 1983
Supertanker (340)	0.007	190	Thielele and Odengaard 1983
Containership (219m)	0.033	181	Buck and Chalfant 1972
Containership (274m)	0.008	181	Ross 1976
Freighter (135m)	0.041	172	Thielele and Odengaard 1983

Oltre ai dati di cui sopra, per un corretto confronto si è tenuto conto della normativa ed in particolare:

- La Direttiva 2008/56/CE istituisce un quadro per l'azione comunitaria nel campo della politica per l'ambiente marino. Essa contiene gli indirizzi affinché tutti gli Stati membri possano adottare le misure necessarie per conseguire o mantenere un buono stato ecologico dell'ambiente marino;
- Recepimento italiano della direttiva di cui sopra D lgs 190/2010;
- la Decisione 477/2010/EU nella quale sono stati stabiliti i criteri e gli standard metodologici per la valutazione del grado di conseguimento del buono stato ecologico delle acque. In Allegato alla Decisione sono riportate le condizioni generali di applicazione dei criteri (Parte A) e la definizione dei criteri stessi (Parte B). In particolare, il punto 11 della Parte B individua come descrittori dei suoni di origine antropogenica per l'Indicatore 11.2: le tendenze nei livelli di rumorosità ambiente per i suoni continui a bassa frequenza (es: passaggio di navi), nelle bande 63Hz e 125Hz, di 1/3 di ottava frequenza centrale misurate tramite misurazioni e/o utilizzando modelli.

3 MISURE DEL RUMORE E PIANO DI CAMPIONAMENTO

Le misure in campo del rumore sono state effettuate il 9 e 10 settembre 2020 durante l'allibio della metaniera Global Energy (capacità di carico pari a circa 170.000mc, lunghezza nave pari a 295 m) al Terminale FSRU Toscana seguendo le modalità di esecuzione descritte dal documento "Piano di Monitoraggio del Rumore per il Terminale FSRU Toscana" paragrafo 3.4. Tali misure e tali modalità di analisi sono state indispensabili anche per la validazione del Piano di monitoraggio del Rumore presentato congiuntamente al presente documento.

In particolare, le misure che sono state effettuate durante l'allibio di una nave metaniera (Tipologia 1¹) sono state condotte con le seguenti modalità:

- a) mantenendo il mezzo nautico a 4 miglia nautiche in posizione ortogonale sul lato destro rispetto a quella del Terminale (lato dei bracci di carico) prima dell'inizio dell'allibio, tenendo conto della traiettoria d'avvicinamento della metaniera oggetto di indagine (tale posizione risulta quella più idonea ad eliminare l'eventuale schermatura di propagazione del rumore da parte dello scafo del Terminale).
- b) con registrazioni di 10 minuti ²a due profondità (sopra e sotto il termoclino presente nel mese di settembre 2020) per tutte le fasi di avvicinamento, affiancamento, allibio (fasi preparatorie alla scarica denominata "fase di raffreddamento", fase di scarica e fase di max rata di scarica) e allontanamento di una metaniera al Terminale (dettagli al capitolo 4.2).
- c) in una giornata di mare calmo in modo da ridurre l'effetto del rumore causato dalle onde.

4 MATERIALI E METODI

4.1 STRUMENTAZIONE PER IL CAMPIONAMENTO

Idrofono digitale omnidirezionale Aquatech DH200GP per la registrazione dei dati acustici nella banda 10 Hz - 90 kHz.

I dati di rumore acustico acquisiti dall'idrofono digitale sono stati campionati a 192 kHz (frequenza di campionamento, necessaria per misurare le frequenze di cui sopra) con una sensibilità di -156 dB re V/uPa. Il rumore elettronico dello strumento, se valutato in termini di pressione acustica, a 30 kHz ha un livello equivalente inferiore al livello del rumore del mare a forza "zero", che, secondo letteratura, è intorno a +22 dB re 1uPa/√Hz, pertanto tutto il rumore registrato è relativo a suoni realmente presenti in acqua e non a interferenze introdotte dallo strumento di misura.

Le misure sono state effettuate registrando e georeferenziando la posizione del punto in coordinate geografiche WGS84 mantenendo il sistema (idrofono+CTD) isolato elettricamente dall'imbarcazione e disaccoppiato elasticamente rispetto al movimento indotto della superficie, ad almeno 2 metri dall'imbarcazione tenuta a motori e pompe ferme. I dati sono stati registrati su file in formato digitale e verificati in tempo reale mediante un'uscita analogica su PC dedicato, con visualizzazione di spettrogramma.

Sonda multiparametrica CTD Agetec IMSV per la misura di Temperatura, Profondità, Conducibilità e calcolo diretto della Velocità del suono. I dati sono stati registrati su file con PC dedicato mediante il software APWin, con visualizzazione in tempo reale del profilo verticale di temperatura e di tutti i parametri fisici citati.

Per ogni attività prevista è stato effettuato un profilo continuo di CTD alla profondità di -55m con idrofono spento. Successivamente, con sonda spenta, registrazione a -55m e -8m di 10' ognuna.

Ricevitore Radar Raymarine con antenna esterna per la rilevazione di navi e imbarcazioni intorno alla stazione di misura.

¹ Stralcio del piano di monitoraggio del rumore: "La configurazione attuale e futura di esercizio del Terminale "FSRU Toscana" prevede le seguenti tipologie di navi: Tipologia 1: navi metaniere (navi da 65000 a 180000 m³; Tipologia 2: navi metaniere di piccola taglia (SSLNGC) di circa 7500 m³". Attualmente la tipologia 1 (navi metaniere) ricopre la totalità delle tipologie di navi in arrivo al Terminale".

² La tempistica di 10 minuti di misura effettuate per ogni fase si ritengono adeguate, in quanto per ogni fase il rumore rimane omogeneo.

4.2 INDIVIDUAZIONE DELLE FASI DI REGISTRAZIONE

L'analisi delle misure è stata effettuata per le fasi di Avvicinamento, Affiancamento (quest'ultima comprendente la fase di manovra con 3 rimorchiatori e la fase di attracco), Allibo (quest'ultimo suddiviso nella fase di Raffreddamento che rappresenta la fase preparatoria alla scarica; fase di Scarica e fase di Maximum Rate di scarica) ed Allontanamento. Di seguito se ne riporta una descrizione dettagliata:

Avvicinamento: La metaniera naviga con una precisa rotta di avvicinamento durante la quale il pilota sale a bordo (a circa 2-3nm). La nave viene agganciata da 2 rimorchiatori (un terzo è presente nelle immediate vicinanze del Terminale per assistere alla manovra) e ad una distanza di circa 2 nm viene rimorchiata. La velocità di avvicinamento, in funzione della distanza dal Terminale, passa da circa 9knt (a 9km di distanza) a 1knt (a 1km di distanza). Tali velocità rispettano l'ordinanza 6/2014 della Capitaneria di Livorno che impone una velocità inferiore a 6knt all'interno delle 2nm di raggio.

Affiancamento: La metaniera trainata da 2 rimorchiatori (il terzo solo in assistenza) procede lentamente fino ad affiancarsi al Terminale. In questa fase il terzo rimorchiatore si posiziona a metà della metaniera ed in caso di necessità procede con la spinta della stessa per completare l'allibo. In questa fase (suddivisa successivamente in fase di manovra e di attracco) i rimorchiatori hanno ovviamente un importante contributo al rumore registrato.

Allibo (raffreddamento, Scarica e maximum rate di scarica): Metaniera e Terminale ormai affiancate iniziano le procedure di allibo (preparazione alla scarica, scarica e preparazione per il distacco). Presenti, a 500 m dal Terminale solo 2 rimorchiatori in stand-by pronti ad intervenire in caso di emergenza (con i motori in funzione).

Allontanamento: La metaniera si allontana dal Terminale con l'ausilio di 2 rimorchiatori. La velocità di allontanamento passa da 2knt a 6knt, sempre in accordo all'ordinanza 6/2014 della Capitaneria di Porto di Livorno.

In ognuna di queste fasi l'analisi del rumore è stata eseguita aspettandosi che sia la metaniera la sorgente di rumore più potente nell'area di indagine: perciò, la sorgente è sempre presa come puntiforme e concentrata nella posizione della nave metaniera³. La posizione della metaniera è a sua volta coincidente; in tutte le fasi dell'Allibo, escluse quelle di Avvicinamento ed Allontanamento, con la posizione dell'impianto FSRU "Toscana". Nelle fasi di Avvicinamento ed Allontanamento, invece, si valuta la posizione della nave nell'intervallo temporale in cui sono fatte le misure con l'idrofono.

Il rumore nelle diverse fasi di registrazione è stato considerato come se fosse generato da un'unica sorgente ed identificato come segue:

- avvicinamento ed allontanamento: il punto emissivo è stato considerato la nave Metaniera in movimento (con i Rimorchiatori a supporto). Per tali fasi, constatato che la maggior fonte emissiva di rumore è la nave in movimento con i rimorchiatori si è deciso che tutto il rumore misurato (comprensivo di tutto il sistema: nave rimorchiatori e terminale) sia generato dalla sorgente nave in movimento.
- affiancamento: la metaniera si affianca al Terminale con i rimorchiatori in azione. Il punto emissivo anche in questo caso è rappresentato da Metaniera e Rimorchiatori come nella fase precedente. In questa fase la distanza del Terminale dalla Nave metaniera è molto piccola per cui l'approssimazione fatta è realmente trascurabile.
- Allibo: la Metaniera è ormeggiata al Terminale ed i rimorchiatori permangono nelle strette vicinanze (500m). Il punto emissivo in quest'ultimo caso è rappresentato da Metaniera e Terminale; il contributo del rumore dei rimorchiatori in stand by per semplicità è considerato come emesso da un'unica sorgente nella posizione dell'FSRU Toscana".

³ Si evidenzia che nelle misure effettuate con idrofono nell'area di indagine non è possibile suddividere i vari contributi derivanti da Terminale, Nave metaniera, rimorchiatori e rumore di fondo (anche derivante da navi in transito descritte nel capitolo 2). Tutto il rumore registrato con le analisi del caso viene imputato in modo cautelativo al sistema in questione (metaniera, rimorchiatori e terminale)

Nella Tabella 2 si riportano le distanze fra idrofono e sorgente del rumore (così come appena definita) nelle diverse fasi analizzate, secondo le misurazioni da radar, in *miglia nautiche* (n.m.) ed in metri.

Tabella 2 Distanza fra l'idrofono e la sorgente del rumore per ognuna delle fasi analizzate.

Fase analizzata	Distanza idrofono-sorgente (in n.m. e m)
Avvicinamento (-55m)	3 n.m. = 5556 m
Affiancamento - manovra della Metaniera con i 3 rimorchiatori (M+3R) (-8;-55m)	3,4 n.m. = 6296,8 m
Affiancamento -Attracco (-8;-55m)	4 n.m. = 7408 m
Allibo – Raffreddamento (-8;-55m)	4 n.m. = 7408 m
Allibo – Discarica (-8;-55m)	4 n.m. = 7408m
Allibo - Maximum Rate (-8;-55m)	4 n.m. = 7408m
Allontanamento -8m	1,1 n.m. = 2037m
Allontanamento -55m	0,9 n.m. = 1666m

Nota: Per ogni fase sono state fatte come definito dal piano, due misure: una sopra il termoclino (-8m dal livello del mare) ed una sotto il termoclino (-55m dal livello del mare). Per le fasi di avvicinamento a causa della logistica (tempo di registrazione del rumore e movimento della metaniera) non è stato possibile effettuare due misure per cui è stata presa la misura a -55 m per essere confrontata nelle future misure fasi invernali (come da piano di monitoraggio del rumore presentato congiuntamente al presente documento). Per la fase di allontanamento, invece, è stato possibile effettuare le misure sopra e sotto il termoclino (-8; -55 m dal livello del mare) in quanto la metaniera, seppur in movimento, è transitata ad una distanza tale da permetterle le misure.

Le distanze indicate in Tabella 2 sono state utilizzate in § **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** per il calcolo dei dB “persi” dalla pressione sonora complessiva fra la sorgente e l'idrofono, mediante la formula semi-cilindrica della *transmission loss* (TL). Tale metodo ha permesso di calcolare il SL alla sorgente pur avendo misurato il rumore a 4 n.m.

4.3 SOGLIE DI RUMORE

I dati raccolti con l'idrofono sono stati elaborati in modo da mettere in evidenza il rapporto fra il *livello di pressione di rumore* locale *sound pressure level* (SPL) realmente misurato ed i valori di soglia indicati dalle linee guida di ISPRA [1] (come da capitolo 1.2 “linee guida ISPRA” del documento “Piano di monitoraggio del rumore” per i diversi *gruppi funzionali acustici* dei Cetacei (Tabella 3). Per tale confronto, sono rilevanti due tipi di valori soglia:

- quello di prima risposta comportamentale *First Behaviour Response* (FBR) (Tabella 4), diverso per i tre gruppi funzionali acustici (*Low Frequency Cetaceans* (LFC), *Mid Frequency Cetaceans* (MFC) ed *High Frequency Cetaceans* (HFC))
- quelli di barotrauma acustico, suddiviso in *Temporary noise-induced Threshold Shift* (TTS) e *Permanent noise-induced Threshold Shift* (PTS), uguali per tutti i cetacei (Tabella 5) .

Oltre alle soglie precedenti, è opportuno anche confrontare il SL (source level) con il valore pari a 185 dB re μ Pa previsto dal documento “Valutazione previsionale di impatto acustico subacqueo” [5] redatto in fase autorizzativa (assoggettabilità alla VIA).

Nel presente lavoro i livelli FBR di tali gruppi funzionali rappresentano le soglie per i soli rumori non impulsivi, con valori rispettivamente per ogni gruppo di 105 dB re 1μ Pa, 115 dB re 1μ Pa e 145 dB re 1μ P come valori medi degli intervalli di SPL segnalati.

I livelli di barotrauma TTS e PTS identici per tutti i Cetacei sono indicati in Tabella 5, e sono rispettivamente 224 dB re 1 μ Pa e 230 dB re 1 μ Pa.

Tabella 3 Definizione dei diversi gruppi funzionali acustici dei Cetacei con le relative bande uditive in frequenza (tabella modificata tratta da Borsani & Farchi, 2011[1]).

Functional hearing group	Estimated auditory bandwidth	Genera represented (Number species/subspecies)	Frequency-weighting network
Low-frequency cetaceans	7 Hz to 22 kHz	<i>Balaena, Caperea, Eschrichtius, Megaptera, Balaenoptera</i> (13 species/subspecies)	M _s (lf: low-frequency cetaceans)
Mid-frequency cetaceans	150 Hz to 160 kHz	<i>Steno, Sousa, Sotalia, Tursiops, Stenella, Delphinus, Lagenodelphis, Lagenorhynchus, Lissodelphis, Grampus, Peponocephala, Feresa, Pseudorca, Orcinus, Globicephala, Orcaella, Physeter, Delphinapterus, Monodon, Ziphius, Berardius, Tasmacetus, Hyperoodon, Mesoplodon</i> (57 species/subspecies)	M _{ml} (mf: mid-frequency cetaceans)
High-frequency cetaceans	200 Hz to 180 kHz	<i>Phocena, Neophocena, Phocenoides, Platanista, Inia, Kogia, Lipotes, Pontoporia, Cephalorhynchus</i> (20 species/subspecies)	M _M (hf: high-frequency cetaceans)

Tabella 4 Soglie di prima reazione comportamentale per i diversi gruppi funzionali acustici (Tabella modificata tratta da Borsani & Farchi, 2011[1]).

<p>Valori soglia per Impulsi singoli (tipo battipali): Sound exposure levels SEL: 183 dB re: 1 μPa²-s</p> <p>Valori soglia per Impulsi multipli (tipo survey geosismici): Cetacei bassa frequenza: 120 dB re: 1 μPa RL (RMS/pulse duration) Cetacei media frequenza: 90-180 dB re: 1 μPa RL (RMS/pulse duration) Cetacei alta frequenza: non applicabile</p> <p>Valori soglia per rumori non impulsivi (tipo perforazione, navi etc): Cetacei bassa frequenza: 100-110 dB re: 1 μPa RMS SPL Cetacei media frequenza: 110-120 dB re: 1 μPa RMS SPL Cetacei alta frequenza: 140-150 dB re: 1 μPa RMS SPL</p>
--

Tabella 5 Livelli di TTS e PTS per i diversi gruppi funzionali di Cetacei (Tabella modificata tratta da Borsani & Farchi, 2011 [1]).

Marine mammal groups	Low, Mid, High -frequency cetaceans		Low, Mid, High -frequency cetaceans	
	Single pulses, Multiple pulses,	Non-pulses	Single pulses, Multiple pulses,	Non-pulses
Effetto	Perdita permanente (PTS) di sensibilità uditiva		Perdita temporanea (TTS) di sensibilità uditiva	
Sound pressure level (SPL)	230 dB re: 1 μ Pa (peak) (flat)	230 dB re: 1 μ Pa (peak) (flat)	224 dB re: 1 μ Pa (peak) (flat)	224 dB re: 1 μ Pa (peak) (flat)

Gli strumenti per il confronto fra i livelli di rumore registrati dall'idrofono e le soglie di cui sopra (soglie ISPRA e valori di confronto stimati nel processo di VIA) sono stati sviluppati nell'Appendice 2.

4.4 METODO DI ANALISI DEI DATI

I dati di rumore acustico acquisiti dall'idrofono digitale si riferiscono a valori di pressione SPL(t) in un intervallo di tempo definito (intervallo di misura). Con la serie temporale ottenuta si è deciso di affrontare due tipi di analisi differenti che, approfondendo aspetti diversi, risultano complementari e ampliamenti sufficienti a caratterizzare il contesto di rumore che si realizza durante le fasi operative di allibo di una nave metaniera al Terminale.

- a) Con l'analisi statistica (la cui metodologia viene completamente dettagliata in Appendice 2) si indaga sul tempo di permanenza del valore istantaneo di rumore SPL(t) al di sotto o al di sopra delle soglie indicate nelle linee guida ISPRA (Tabelle riportate nel Capitolo **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**);
- b) Nell'analisi spettrale invece si ricava, mediante una trasformata di Fourier a partire dalla serie temporale misurata, la distribuzione in frequenza del rumore relativo ad ogni fase operativa analizzata (spettro di frequenza SPL(f)), i dettagli della metodologia seguita si trovano anch'essi in Appendice 2. Obiettivo di questo step è ricavare un valore di SL (Source Level) alla sorgente che sia immediatamente confrontabile con le soglie indicate da ISPRA e con il valore di 185 dB comunicato nel documento di VIA. Per ottenere ciò si è scelto di operare mediante due strade:
 - Ottenendo nel punto di misura un valore di SPL "cumolato, misura in dB dell'RMS delle fluttuazioni di pressione dovute all'onda sonora, risultante dal *contributo di tutte le frequenze* ascoltate dall'idrofono, e poi ricostruendo a ritroso il rumore prodotto dalla sorgente, ovvero il SL anch'esso "cumolato", attraverso una formula semplificata, ma sufficientemente accurata per questa stima. Questo approccio è evidentemente conservativo come ampiamente sottolineato nell'Appendice 2 contando nel valore finale sicuramente contributi provenienti da fonti diverse dal sistema Terminale-Metaniera-Rimorchiatori (traffico marittimo descritto nel capitolo 2) e contando frequenze non udibili da alcuni tipi di cetacei;
 - Individuando delle frequenze caratteristiche dei mezzi coinvolti nell'analisi (metaniere, rimorchiatori e Terminale), isolando dallo spettro a quelle frequenze i relativi valori di SPL(f) e propagando questi ultimi a ritroso fino alla sorgente per ottenere i valori di SL(f) per essere confrontati con le soglie già citate in precedenza. Questa propagazione "monocromatica" (ovvero relativa ad una sola frequenza) viene effettuata-questa volta per mezzo di un modello di propagazione acustica (modello Bellhop) che necessita come dato di input anche dello stato del mezzo in cui il rumore si propaga, ovvero i dati misurati dalla sonda CTD ("condizioni Oceanografiche" descritte in Appendice 2). Infine con lo stesso procedimento e lo stesso strumento modellistico, a partire da ogni SL(f) ottenuta, è stata ricavata, per i valori massimi di ogni frequenza individuata, la distanza dalla fonte di rumore a cui l'SPL(f) risulta inferiore alle soglie ISPRA (quella FBR, ovvero la prima risposta comportamentale dei cetacei presenti nell'area non essendo le altre mai superate).

5 RISULTATI DELL'ANALISI LOCALE DEL RUMORE

Per ciascuna delle fasi del monitoraggio identificate in Avvicinamento, Affiancamento (manovra ed attracco), Allibo (Raffreddamento, Discarica, Maximum Rate di discarica) ed Allontanamento, sono stati eseguiti:

- gli spettri in terze d'ottava (così come spiegato in appendice 2);
- la percentuale di tempo di superamento delle soglie FBR da parte degli SPL istantanei;
- la comparazione degli SPL al minuto coi livelli degli FBR e la comparazione degli SPL al minuto con i livelli TTS e PTS.

Gli SPL di cui si parla in questo paragrafo sono i valori cumulativi su tutte le frequenze, in modo da tener conto di tutta l'energia sonora che arriva all'apparato uditivo dei cetacei senza distinzione delle frequenze. Tale valore risulta cautelativo per un duplice motivo:

- l'SPL cumulato tiene conto anche dei rumori ambientali estranei al "Sistema allibo" generati ad esempio dalle navi le cui emissioni, a basse frequenze, si propagano per molti km.
- considerando che le bande uditive dei tre gruppi funzionali sono molto sovrapposte e particolarmente estese: questa trattazione può risultare cautelativa, ma garantisce la completa sicurezza nell'analisi e la possibilità di confrontare SPL misurato cumulato i valori soglia di tutti i gruppi di cetacei (LFC, MFC, HFC).

Per ogni fase studiata l'SPL cumulato è risultato sempre inferiore ai livelli soglia di trauma sia Temporaneo che Permanente - ISPRA [1] (TTS e PTS) che non vengono mai raggiunti nella posizione a 4 mn dal Terminale FSRU Toscana (posizione dell'idrofono, come da capitolo 3). Per cui possiamo asserire che a 4mn, pur avendo sviluppato un'analisi conservativa non vi è nessun danno causato dal rumore per i cetacei, come si evince dalla Tabella 6.

Tabella 6 Valori del SPL cumulativo (valore di SPL al minuto)

Fase e profondità	SPL dB re 1µPa	TTS dB re 1µPa	PTS dB re 1µPa
Avvicinamento, 55m	130,67 ± 0,99	224	230
Affiancamento – manovra (M+3R), 8m	128,95 ± 0,08		
Affiancamento – manovra (M+3R) 55m	129,67 ± 0,29		
Affiancamento -Attracco, 8m	129,08 ± 0,09		
Affiancamento -Attracco, 55m	129,81 ± 0,25		
Allibo -Raffreddamento, 8m	129,33 ± 0,09		
Allibo -Raffreddamento, 55m	128,37 ± 0,44		
Allibo -Discarica, 8m	129,90 ± 0,26		
Allibo -Discarica, 55m	129,13 ± 0,08		
Allibo -Maximum Rate di discarica, 8m	129,32 ± 0,10		
Allibo -Maximum Rate di discarica, 55m	128,93 ± 0,06		
Allontanamento, 8m	128,73 ± 0,05		
Allontanamento, 55m	128,81 ± 0,08		

Nella Tabella 6 i valori di SPL cumulativo, superano i valori soglia di primo disturbo comportamentale (FBR – ISPRA [1]). Dato che l'analisi effettuata risulta molto cautelativa per tali valori soglia si è provveduto (come indicato nel capitolo materiali e metodi) a sviluppare un confronto tra SPL (f) e gli SL (f) a determinate frequenze con i valori FBR.

Di seguito si riporta l'analisi completa per la fase di Avvicinamento (-55m) mentre le altre fasi sono riportate integralmente in Appendice 1 del presente documento.

5.1 ANALISI LOCALE FASE DI AVVICINAMENTO

Le registrazioni durante la fase di Avvicinamento (-55m dal livello del mare) hanno avuto luogo fra le 7:09 e le 7:19 del 9 settembre 2020, per 10' alla profondità di 55m. Nella seguente Figura sono raffigurati gli spettri in terze d'ottava.

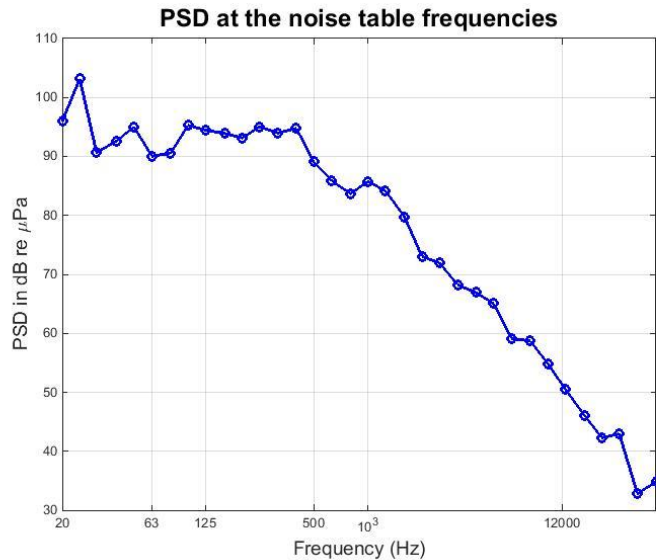


Figura 3 Spettro in terze d'ottava, per la fase di avvicinamento della metaniera all'impianto, fra le ore 7:09 e le ore 7:19 del 9 settembre 2020.

Nelle Figure Figura 4 e Figura 5 vengono rappresentati i valori al minuto del SPL cumulato e confrontati rispettivamente con i valori soglia TTS e PTS indicati nelle linee guida ISPRA e con il valore FBR (per ogni tipologia di cetaceo: per LFC = 105 dB re 1µPa; per MFC = 115 dB re 1µPa e per HFC=145 dB re 1µPa). In tali figure si evidenzia come i valori soglia per i danni fisiologici (TTS e PTS) non sono mai superati, mentre vengono superati i valori FBR per i LFC e MFC ma non per i HFC⁴.

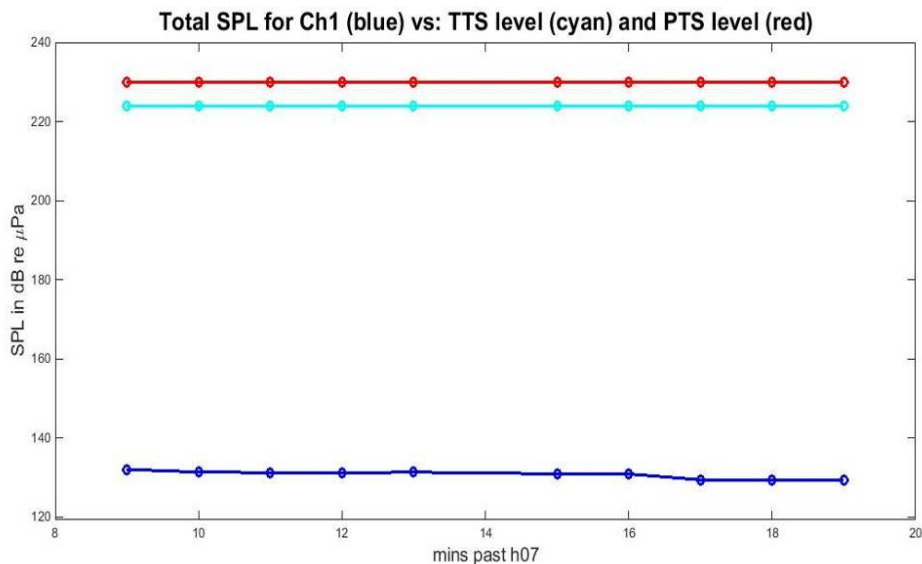


Figura 4 Confronto, per la fase di avvicinamento della metaniera (vedi temporizzazione nella **Figura 3**), fra il livello totale di pressione sonora e quello di TTS e PTS per i cetacei, il tutto espresso in funzione del tempo, con un valore al minuto. Si nota che il valore SPL dell'emissione sonora (linea blu) è molto al di sotto di quello dei due livelli di trauma (linea ciano e rosso).

⁴ Nell'area oggetto di studio sono prevalentemente presenti cetacei appartenenti a specie stazionarie quali tursiopi e stenelle (odontoceti appartenenti al gruppo uditivo delle medie frequenze o "mid-frequency cetaceans"); è inoltre segnalata la presenza di cetacei appartenenti a specie saltuariamente in transito quali le balenottere (misticeti appartenenti al gruppo uditivo delle basse frequenze o "low-frequency cetaceans").

Total SPL for Ch1 (blue) vs FBR level for LFCs (red), MFCs (cyan) and HFCs (green)

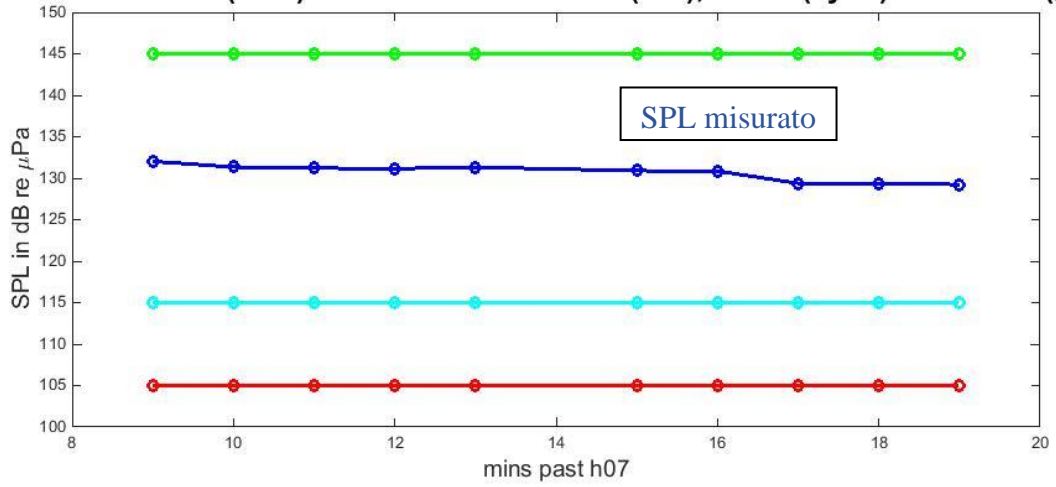


Figura 5 Confronto, per la fase di avvicinamento della metaniera (vedi temporizzazione in **Figura 3**) fra il livello totale di pressione sonora SPL ed i valori soglia FBR per i Cetacei LFC, MFC e HFC tutti espressi come funzioni del tempo, con un valore al minuto come si vede, l'SPL totale è per tutta la fase di avvicinamento (linea blu), superiore agli FBR per LFC (linea rossa) ed MFC (linea ciano), mentre è inferiore a quello degli HFC (linea verde).

6 RISULTATI DEL CALCOLO DI SOURCE LEVEL (SL)

Il calcolo di SL (il valore del rumore alla sorgente), viene affrontato sia per la ricostruzione dell'“SL cumulativo” che per quella SL(f) ad una frequenza stabilita, uno con applicazione della “formula semicilindrica” [4], l'altro con l'uso del modello BELLHOP [2, 3]. Si rimanda all'appendice 2 per i dettagli.

Il valore SL cumulativo è-calcolato per la verifica cautelativa del superamento dei valori soglia di danno fisiologico (TTS e PTS); mentre i valori SL (f) ad una data frequenza vengono calcolati per un confronto meno cautelativo per i valori soglia dei danni comportamentali (FBR).

6.1 SOURCE LEVEL (SL) CUMULATIVA

Nel presente capitolo si riporta il calcolo del SL cumulato da confrontarsi con i limiti di soglia di danno fisiologico.

La formula semicilindrica (presentata in appendice 2) permette di redigere la tabella delle SL cumulative, di seguito riportata, in cui al valore della Transmission Loss ($TL = 15\log_{10}(d/1m)$) si somma il valore medio dell'SPL al minuto per le fasi di studio, attribuendo come incertezza a posteriori la *standard deviation* di questi valori al minuto. Come-descritto in precedenza si evidenzia che il valore SL cumulato calcolato dal valore SPL cumulato sia anche esso molto cautelativo.

Nella Tabella seguente si riportano i dati per ogni fase studiata.

Tabella 7 Calcolo della SL cumulativa mediante la TL a onde “semicilindriche”.

Fase e profondità	TL dB re 1μPa	SPL dB re 1μPa	SL dB re 1μPa	Valori di confronto dB re 1μPa
Avvicinamento, 55m	56,17	130,67 ± 0,99	186,84 ± 0,99	Limiti danni fisiologici TTS = 224 PTS = 230 Valore stimato alla VIA = 185
Affiancamento – manovra (M+3R), 8m	56,99	128,95 ± 0,08	185,94 ± 0,08	
Affiancamento – manovra (M+3R) 55m	56,99	129,67 ± 0,29	186,66 ± 0,29	
Affiancamento - Attracco, 8m	57,36	129,08 ± 0,09	186,44 ± 0,09	
Affiancamento - Attracco, 55m	57,36	129,81 ± 0,25	187,17 ± 0,25	
Allibo - Raffreddamento, 8m	58,04	129,33 ± 0,09	187,37 ± 0,09	
Allibo - Raffreddamento, 55m	58,05	128,37 ± 0,44	186,42 ± 0,44	
Allibo - Discarica, 8m	58,04	129,90 ± 0,26	187,94 ± 0,26	
Allibo - Discarica, 55m	58,05	129,13 ± 0,08	178,18 ± 0,08	
Allibo - Maximum Rate di discarica, 8m	58,04	129,32 ± 0,10	187,36 ± 0,10	
Allibo - Maximum Rate di discarica, 55m	58,05	128,93 ± 0,06	186,98 ± 0,06	
Allontanamento, 8m	56,59	128,73 ± 0,05	185,32 ± 0,05	
Allontanamento, 55m	49,46	128,81 ± 0,08	178,27 ± 0,08	

Dalla lettura della colonna degli SL in Tabella 7 si evidenzia come l'“SL cumulativa ricostruita sia massima nelle fasi di “Discarica” e di “Maximum Rate di discarica”.

Per ogni fase studiata l'“SL cumulato (il valore del rumore alla sorgente) è risultato sempre inferiore ai livelli soglia di trauma sia Temporaneo che Permanente - ISPRA [1] (TTS e PTS). **Per cui possiamo asserire (visto il calcolo cautelativo) che qualsiasi cetaceo “in estrema prossimità” delle sorgenti sonore non subirebbe comunque danni fisici, né temporanei né tantomeno permanenti.**

Confrontando i valori di SL cumulati (che ricordiamo essere cautelativi) con la stima effettuata in sede di VIA, possiamo asserire che i valori SL calcolati dalla misura siano paragonabili a quelli valutati in sede di VIA [3] per cui **i dati misurati non evidenziano un impatto maggiore rispetto a quello valutato durante il processo autorizzativo.**

Concludiamo sottolineando quanto segue:

- da quel che vediamo in questa Tabella 7, possiamo affermare che il **sistema da noi monitorato ha un'emissione acustica (SL in tutte le fasi) paragonabile a quella di una nave in movimento (SL dei vari tipi di nave paragonabili alle metaniere raggiungono al massimo i 180-190 dB re μPa come da valori riportati in Tabella 1).**
- considerato quanto sopra (emissione del rumore dell'allibo paragonabile a quello di una nave in transito) e considerato che il traffico di navi metaniere verso il Terminale (come evidenziato nel Capitolo 2 del presente documento) è previsto attestarsi sul 5 % del traffico totale in transito nella regione di interesse, possiamo affermare **che il contributo di rumore in detta regione derivante dalle attività di allibo presso il Terminale FSRU Toscana è poco significativo rispetto al rumore continuo derivante dal traffico marittimo** (considerando anche la natura non continuativa degli allibi).

6.2 SL PER COMPONENTI DI FOURIER (MODELLO BELLHOP)

L'analisi del Source level ad una data frequenza SL (f) presentata in questo capitolo sarà utilizzata per effettuare un opportuno confronto con i valori limiti di disturbo comportamentale FBR.

Modalità di Calcolo

Immettendo i profili di $c_s(z)$ ottenuti mediante le misure di sonda CTD nel modello BELLHOP, e considerando la posizione relativa dell'idrofono rispetto alla sorgente del rumore, come da Tabella 2, possiamo ottenere la SL(f) per le frequenze di interesse. In Appendice 1 si riportano a titolo esemplificativo le simulazioni BELLHOP effettuate per la determinazione del TL (Trasmission Loss a determinate frequenze) ed il calcolo della SL(f) relative alla fase Allibo_Raffreddamento. Mentre nelle seguenti tabelle si riportano tutti i valori di TL, SPL ed SL a determinate frequenze. Mentre nelle Tabelle seguenti si riportano gli SPL, i TL e gli SL a determinate frequenze (risultato dell'applicazione del modello).

Tabella 8 TL ricavata dai risultati delle misure e dalle elaborazioni modellistiche.

Fase, profondità	TL, f = 63 Hz	TL, f = 125 Hz	TL, f = 500 Hz	TL, f = 1 kHz	TL, f = 12 kHz
Avvicinamento, 55m	55,31	55,32	55,44	55,67	64,42
Affiancamento – manovra (M+3R), 8m	55,38	55,39	55,53	55,79	65,36
Affiancamento – manovra (M+3R) 55m	60,29	60,30	60,44	60,70	70,32
Affiancamento -Attracco, 8m	55,74	55,75	55,90	56,18	66,37
Affiancamento -Attracco, 55m	60,47	60,48	60,63	60,90	71,10
Allibo -Raffreddamento, 8m	56,32	56,33	56,50	56,81	67,97
Allibo -Raffreddamento, 55m	60,89	60,90	61,07	61,37	72,61
Allibo -Discarica, 8m	56,54	56,55	56,72	57,02	68,33
Allibo -Discarica, 55m	60,42	60,43	60,59	60,90	72,18
Allibo -Maximum Rate di scarica, 8m	56,66	56,67	56,84	57,14	68,47
Allibo -Maximum Rate di scarica, 55m	60,27	60,28	60,45	60,75	72,06
Allontanamento, 8m	55,22	55,56	55,35	55,58	64,11
Allontanamento, 55m	58,85	58,86	58,99	59,21	67,70

Tabella 9 SPL ricavata dai risultati delle misure e dalle elaborazioni modellistiche. I dati di questa Tabella sono direttamente presi dalla “matrice del rumore” di questa campagna.

Fase e profondità	SPL, f = 63 Hz	SPL, f = 125 Hz	SPL, f = 500 Hz	SPL, f = 1 kHz	SPL, f = 12 kHz
Avvicinamento, 55m	90,35	95,26	90,05	85,74	52,33
Affiancamento – manovra (M+3R), 8m	77,91	80,59	74,56	65,58	40,68
Affiancamento – manovra (M+3R) 55m	87,97	81,93	77,85	66,29	36,68
Affiancamento -Attracco, 8m	84,08	83,89	77,42	71,19	44,83
Affiancamento -Attracco, 55m	95,90	84,29	76,03	77,09	35,85
Allibo -Raffreddamento, 8m	86,16	82,42	76,60	70,40	39,31
Allibo -Raffreddamento, 55m	80,23	78,05	71,88	67,98	34,57
Allibo -Discarica, 8m	66,91	64,01	53,36	47,83	28,98
Allibo -Discarica, 55m	84,32	84,45	74,73	74,76	35,69
Allibo -Maximum Rate di scarica, 8m	83,15	77,77	73,28	70,06	39,44
Allibo -Maximum Rate di scarica, 55m	83,06	81,72	71,95	66,99	35,55
Allontanamento, 8m	77,87	80,02	78,64	66,49	43,11
Allontanamento, 55m	88,02	81,75	82,93	72,36	35,50

Tabella 10 Valori di SL ottenuta sommando i valori riportati per gli SPL (PSD) per frequenza a quelli delle TL frequenza-specifiche di cui alle tabelle precedenti.

Fase e profondità	SL, f = 63 Hz	SL, f = 125 Hz	SL, f = 500 Hz	SL, f = 1 kHz	SL, f = 12 kHz
Avvicinamento, 55m	145,66	150,58	145,49	141,41	116,75
Affiancamento – manovra (M+3R), 8m	133,29	135,98	130,09	121,37	106,04
Affiancamento – manovra (M+3R) 55m	148,26	142,23	138,29	126,99	106,92
Affiancamento -Attracco, 8m	139,82	139,64	133,32	127,37	111,20
Affiancamento -Attracco, 55m	156,37	144,77	136,66	137,99	106,95
Allibo -Raffreddamento, 8m	142,48	138,75	133,10	127,21	107,28
Allibo -Raffreddamento, 55m	141,12	138,95	132,95	129,35	107,18
Allibo -Discarica, 8m	123,45	120,56	110,08	104,85	97,310
Allibo -Discarica, 55m	144,74	144,88	135,32	135,66	107,87
Allibo -Maximum Rate di scarica, 8m	139,81	134,44	130,12	127,20	107,91
Allibo -Maximum Rate di scarica, 55m	143,33	142,00	132,40	127,74	107,61
Allontanamento, 8m	133,09	135,58	133,99	122,07	107,22
Allontanamento, 55m	146,87	140,61	141,92	131,57	103,20

Considerando le seguenti frequenze di interesse:

- 63Hz e 125Hz: frequenze caratteristiche per l'indicatore D11.2⁵ per i suoni continui a bassa frequenza come il passaggio delle navi (come descritto nel capitolo 2.2) e frequenze che danno il maggior contributo energetico (come da Figura 2 del presente documento) per le navi di grandi dimensioni paragonabili alla Global Energy (metaniera in allibo il 9-10 settembre);
- 1 kHz: frequenza paragonabile a quella dei rimorchiatori, come da Tabella 1 del presente documento;
- 12 kHz: frequenza utilizzata nell'analisi stand alone del Terminale come da piano di monitoraggio del rumore presentato congiuntamente con il presente documento

si evidenzia che i valori maggiori di SL per ogni frequenza scelta (evidenziati in grassetto nella Tabella 10) sono rispettivamente: 156,37 dB re μPa (63 Hz); 150,58 dB re μPa (125 Hz), 141,41 dB re μPa (1 kHz) e 116,75 dB re μPa (12 kHz).

Possiamo quindi affermare che i valori del rumore alla sorgente - SL(f) - alle frequenze di interesse sono tutti inferiori a quelli di danno fisiologico dei cetacei ma superiori (quasi sempre) ai soli valori soglia di prima risposta comportamentale (FBR, stabiliti dalle linee guida

⁵ Indicatore 11.2: le tendenze nei livelli di rumorosità ambiente per i suoni continui a bassa frequenza (es: passaggio di navi), nelle bande 63Hz e 125Hz, di 1/3 di ottava frequenza centrale misurate tramite misurazioni e/o utilizzando modelli

ISPRA [1]) e rispettivamente pari a 105 dB re $1\mu\text{Pa}$ per i LFC (presenti in maniera saltuaria e solo in transito nell'area di interesse), 115 dB re $1\mu\text{Pa}$ per i MFC (prevalentemente presenti nell'area di interesse) e 145 dB re $1\mu\text{Pa}$ per i HFC.

Considerando il valore più alto (156,37 dB re μPa a 63 Hz) durante Affiancamento – manovra (M+3R) 55m, utilizzando il modello Bellhop, alla distanza di 142,5 m il valore di SPL(63 Hz) risulta inferiore al FBR dei cetacei maggiormente presenti nell'area di interesse pari a 115 dB (MFC tra cui tursiopi e stenelle), mentre alla distanza di 877,6 m il valore di SPL(63 Hz) risulta inferiore al FBR dei cetacei LFC pari a 105 dB (cetacei saltuariamente in transito nell'area di interesse).

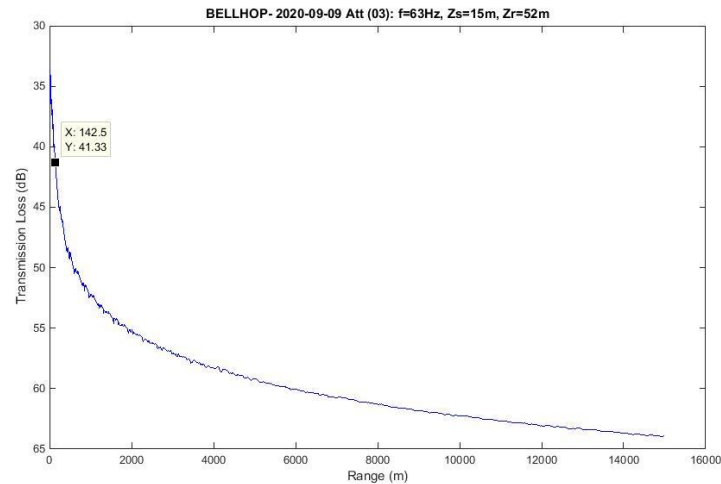


Figura 6 La transmission Loss calcolata dal modello Bellhop per la componente 63 Hz usata per il calcolo della distanza di sicurezza rispetto alla soglia FBR di 115 dB re μPa , nella SL(63 Hz).

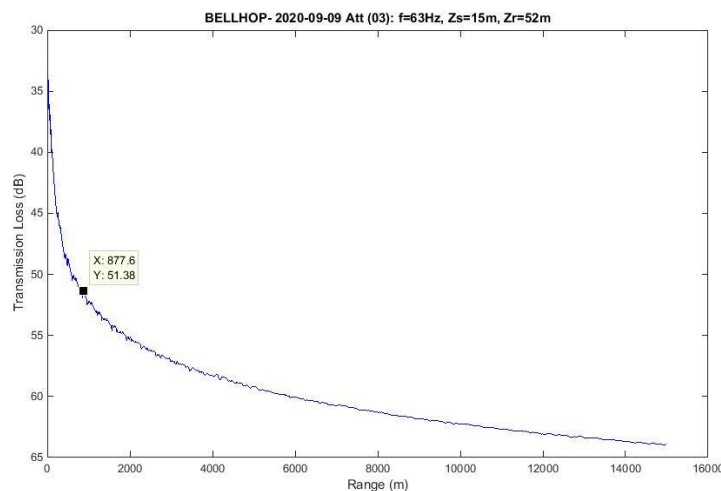


Figura 7 La transmission Loss calcolata dal modello Bellhop per la componente 63 Hz usata per il calcolo della distanza di sicurezza rispetto alla soglia FBR di 105 dB re μPa , nella SL(63 Hz).

Per cui possiamo affermare quanto segue:

- Il rumore alla sorgente alle frequenze di riferimento normativo e tipiche di una nave metaniera in movimento e dei rimorchiatori (sorgenti che danno il maggior contributo al nostro sistema) risulta superiore ai valori di prima risposta comportamentale FBR delle linee guida ISPRA [1], ma a 143 m dalla sorgente la SPL(f) risulta inferiore agli FBR dei cetacei a media frequenza (tursiopi e stenelle prevalentemente presenti nell'area di interesse). (Tabella 9 e Tabella 4).
- In generale nessun tipo di impatto sui cetacei a 878 m dalla sorgente per tutte le specie di cetacei (anche dei cetacei a basse frequenze occasionalmente in transito nell'area di interesse).

7 CONCLUSIONI

Lo scopo di questo documento è quello di ottemperare alla prescrizione redatta dal MATTM durante l'ottemperanza del 5° anno di monitoraggio (Decreto No. 188 del 25 Giugno 2020) che di seguito si riporta: *“Entro un anno solare dalla emissione del presente decreto dovranno essere eseguite, in accordo con la Capitaneria di Porto e ISPRA, delle misure specifiche di rumore per ogni tipologia di nave, durante tutto il periodo di operazioni di arrivo, ormeggio, scarico del GNL e allontanamento delle stesse navi dal Terminale”*.

Nella relazione sono stati riportati i dati delle misure del rumore sottomarino e loro propagazione durante le operazioni di allibo di una nave Metaniera al Terminale “FSRU Toscana” e delle attività antecedenti (avvicinamento) e successive (allontanamento) nei giorni 9 e 10 settembre 2020. Tale misura ottempera alla prescrizione sopra esposta in quanto attualmente al Terminale arrivano navi metaniere tra 65.000mc a 180.000mc che rappresentano la tipologia 1⁶ di navi come da piano di monitoraggio del rumore, e l'unica tipologia di navi attualmente in arrivo.

In particolare, in conformità al Piano di Monitoraggio del Rumore consegnato congiuntamente con il presente documento, sono state effettuate delle registrazioni (sopra e sotto il termocline) mantenendosi ad una distanza di 4 n.m. dal Terminale e registrando il rumore marino in corrispondenza delle fasi di Avvicinamento, Affiancamento (costituita da manovra ed attracco), Allibo (costituita da Raffreddamento, Discarica, Maximum Rate di Discarica) ed Allontanamento della Metaniera.

È stato sviluppato un protocollo di analisi dei dati di allibo che ci proponiamo di utilizzare anche per futuri monitoraggi così come proposti nel Piano di Monitoraggio del Rumore. Tale protocollo si articola in:

- una fase di analisi *locale* dei dati raccolti dall'idrofono, le cui caratteristiche statistiche e spettrali vengono studiate (SPL);
- una fase di ricostruzione (partendo dai dati SPL cumulati e SPL(f)) del valore del Source Level cumulato mediante l'utilizzo di una formula matematica semplificata, e Souce Level ad una determinata frequenza mediante l'utilizzo di un modello di propagazione acustica marina.

La prima conclusione da sottolineare è che il sistema composto dal Terminale “FSRU Toscana”, dalla Metaniera in allibo e dai rimorchiatori ausiliari, ottempera a tutte le prescrizioni di emissione acustica, sia dal punto di vista delle soglie ISPRA di prevenzione del barotrauma ai cetacei, sia da quello del documento di VIA per cui si accordava al sistema in funzionamento una SL massima attorno ai 185 dB re μPa .

In particolare, di seguito riportiamo le conclusioni principali.

- Per ogni fase studiata l'SL cumulato (il valore del rumore alla sorgente cumulato per tutte le frequenze) è risultato sempre inferiore ai livelli soglia di barotrauma sia Temporaneo che Permanente - ISPRA [1] (TTS e PTS). **Per questo, possiamo asserire (visto il calcolo cautelativo) che qualsiasi cetaceo “in estrema prossimità” delle sorgenti sonore non subirebbe comunque danni fisici, né temporanei né permanenti.**
- Confrontando i valori di SL cumulati (che ricordiamo essere cautelativi) con la stima effettuata in sede di VIA, possiamo asserire che i valori SL calcolati dalla misura siano paragonabili a quelli valutati in sede di VIA [Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.] per cui **i dati misurati non evidenziano un impatto maggiore rispetto a quello valutato durante il processo autorizzativo.**

⁶ “La configurazione attuale e futura di esercizio del Terminale “FSRU Toscana” prevede le seguenti tipologie di navi: Tipologia 1: navi metaniere (navi da 65000 a 180000 m³; Tipologia 2: navi metaniere di piccola taglia (SSLNGC) di circa 7500 m³”. Attualmente la tipologia 1 (navi metaniere) ricopre la totalità delle navi in arrivo al Terminale”.

- **Il sistema monitorato (Terminale, rimorchiatori e nave Metaniera) ha un'emissione acustica (SL in tutte le fasi) paragonabile a quella di una nave in movimento.**
- Considerato quanto sopra (emissione del rumore dell'allibo paragonabile a quello di una nave in transito), e considerato che il traffico di navi metaniere verso il Terminale (come evidenziato nel Capitolo 2 del presente documento) è previsto attestarsi sul 5 % del traffico totale in transito nell'area di interesse e quindi anche nel Santuario Pelagos, possiamo affermare **che il contributo di rumore in detta area derivante dalle attività di allibo presso il Terminale FSRU Toscana è poco significativo rispetto al rumore continuo derivante dal traffico marittimo** (considerando anche la natura non continuativa degli allibi, pari a circa 41 operazioni l'anno).
- **Il rumore alla sorgente alle frequenze di riferimento normativo e tipiche di una nave metaniera in movimento e dei rimorchiatori (sorgenti che danno il maggior contributo al nostro sistema) risulta superiore ai valori di prima risposta comportamentale FBR delle linee guida ISPRA [1], ma a 143 m dalla sorgente la SPL(f) risulta inferiore agli FBR dei cetacei a media frequenza (tursiopi e stenelle prevalentemente presenti nell'area di interesse).**
- **In generale nessun tipo di impatto sui cetacei a 878 m dalla sorgente per tutte le specie di cetacei (anche dei cetacei a basse frequenze occasionalmente in transito nell'area di interesse)**

8 BIBLIOGRAFIA

1. Borsani J.F., Farchi C. (2011) "Linee guida per lo studio e la regolamentazione del rumore di origine antropica introdotto in mare e nelle acque interne", ISPRA, Parte seconda, pp. 9-10.
2. Michael B. Porter, Beam tracing for two- and three-dimensional problems in ocean acoustics, The Journal of the Acoustical Society of America 146, 2016 (2019); doi: 10.1121/1.5125262.
3. Michael B. Porter, The BELLHOP Manual and User's Guide: PRELIMINARY DRAFT, scaricabile presso il sito web: <http://oalib.hlsresearch.com/Rays/>.
4. "Venis Cruise 2.0 - Nuovo Terminal Crociere di Venezia, Bocca di Lido - Approfondimenti sulla Componente Rumore". Doc. No. 14-1316-H16, Rev. 0 - Febbraio 2016, Duferco Italia Holding S.p.A., Brescia, Italia, DP Consulting S.r.l. Treviso, Italia
5. Studio preliminare Ambiente SpA. "Valutazione previsionale di impatto acustico subacqueo". Studio Ambiente 2010.



OLT Offshore LNG Toscana S.p.A.



**TERMINALE GALLEGGIANTE DI RIGASSIFICAZIONE
FSRU - TOSCANA**

**VALUTAZIONE DEL RUMORE SOTTOMARINO DURANTE LE FASI DI ALLIBO DI UNA METANIERA AL
TERMINALE “FSRU TOSCANA”**

APPENDICE 1: Risultati analisi Rumore



Rev.0	21/01/2021	Emissione definitiva	MM/SN/CP	AMDB	CP
Rev.	Data	Descrizione della Revisione	Preparato da	Verificato da	Approvato da

SOMMARIO

1	RISULTATI DELL'ANALISI LOCALE DEL RUMORE	4
1.1	Analisi Locale Fase di affiancamento (manovra:M+3R).....	4
1.2	Fase di Affiancamento - Attracco	6
1.3	Fase di Allibo - Raffreddamento	9
1.4	Fase di Allibo - Discarica	12
1.5	Fase di Allibo Maximum Rate di scarica.....	15
1.6	Fase di Allontanamento	18
2	RISULTATI DEL CALCOLO DI SL: SL PER COMPONENTI DI FOURIER (MODELLO BELLHOP).....	22
2.1	Condizioni oceanografiche	22

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1	Spettro in terze d'ottava, come riportate nella tabella del rumore, per la fase detta M+3R, del rumore registrato a -8m, fra le ore 08:32 e le ore 08:41 del 9 settembre 2020.....	4
Figura 2	Confronto, per la fase M+3R, fra i dati raccolti a -8m (vedi temporizzazione in Figura 1), fra il livello totale di pressione sonora e quello di FBR per i Cetacei LFC, MFC e HFC tutti espressi come funzioni del tempo, con un valore al minuto: come si vede, l'SPL totale (linea Blu) è per tutta la fase superiore agli FBR per LFC ed MFC (linea rossa e ciano), mentre è inferiore a quello degli HFC (linea verde). 4	
Figura 3	Confronto, per la fase di M+3R, fra i dati raccolti a -8m (vedi temporizzazione in Figura 1), fra il livello totale di pressione sonora e quello di TTS e PTS per i cetacei, il tutto espresso in funzione del tempo, con un valore al minuto. Si nota che il valore SPL dell'emissione sonora (linea blu) è molto al di sotto di quello dei due livelli di trauma (linea ciano e rosso)	5
Figura 4	Spettro in terze d'ottava, come riportate nella tabella del rumore, per la fase detta M+3R, del rumore registrato a -55m, fra le ore 08:47 e le ore 08:56 del 9 settembre 2020.....	5
Figura 5	Confronto, per la fase M3+R, fra i dati raccolti a -55m (vedi temporizzazione in Figura 4), fra il livello totale di pressione sonora e quello di FBR per i Cetacei LFC, MFC e HFC tutti espressi come funzioni del tempo, con un valore al minuto: come si vede, l'SPL totale (linea Blu) è per tutta la fase superiore agli FBR per LFC ed MFC (linea rossa e ciano), mentre è inferiore a quello degli HFC (linea verde). 6	
Figura 6	Confronto, per la fase di M+3, fra i dati raccolti a -55m (vedi temporizzazione in Figura 4), fra il livello totale di pressione sonora e quello di TTS e PTS per i cetacei, il tutto espresso in funzione del tempo, con un valore al minuto. Si nota che il valore SPL dell'emissione sonora (linea blu) è molto al di sotto di quello dei due livelli di trauma (linea ciano e rosso)	6
Figura 7	Spettro in terze d'ottava, come riportate nella tabella del rumore, per la fase di attracco, del rumore registrato a -8m, fra le ore 09:34 e le ore 09:43 del 9 settembre 2020.....	7
Figura 8	Confronto, per la fase di attracco, fra i dati raccolti a -8m (vedi temporizzazione in Figura 7), fra il livello totale di pressione sonora e quello di FBR per i Cetacei LFC, MFC e HFC tutti espressi come funzioni del tempo, con un valore al minuto: come si vede, l'SPL totale (linea Blu) è per tutta la fase superiore agli FBR per LFC ed MFC (linea rossa e ciano), mentre è inferiore a quello degli HFC (linea verde). 7	
Figura 9	Confronto, per la fase di attracco, fra i dati raccolti a -8m (vedi temporizzazione in Figura 7), fra il livello totale di pressione sonora e quello di TTS e PTS per i cetacei, il tutto espresso in funzione del tempo, con un valore al minuto. Si nota che il valore SPL dell'emissione sonora (linea blu) è molto al di sotto di quello dei due livelli di trauma (linea ciano e rosso)	8
Figura 10	Spettro in terze d'ottava, come riportate nella tabella del rumore, per la fase di attracco, del rumore registrato a -55m, fra le ore 09:49 e le ore 09:59 del 9 settembre 2020.....	8
Figura 11	Confronto, per la fase di attracco, fra i dati raccolti a -55m (vedi temporizzazione in Figura 10), fra il livello totale di pressione sonora e quello di FBR per i Cetacei LFC, MFC e HFC tutti espressi come funzioni del tempo, con un valore al minuto: come si vede, l'SPL totale (linea Blu) è per tutta la fase superiore agli FBR per LFC ed MFC (linea rossa e ciano), mentre è inferiore a quello degli HFC (linea verde).....	9
Figura 12	Confronto, per la fase di attracco, fra i dati raccolti a -55m (vedi temporizzazione in Figura 10), fra il livello totale di pressione sonora e quello di TTS e PTS per i cetacei, il tutto espresso in funzione del tempo, con un valore al minuto. Si nota che il valore SPL dell'emissione sonora (linea blu) è molto al di sotto di quello dei due livelli di trauma (linea ciano e rosso)	9
Figura 13	Spettro in terze d'ottava, come riportate nella tabella del rumore, per la fase di raffreddamento, del rumore registrato a -8m, fra le ore 13:48 e le ore 13:58 del 9 settembre 2020.	10
Figura 14	Confronto, per la fase di raffreddamento, fra i dati raccolti a -8m (vedi temporizzazione in Figura 13), fra il livello totale di pressione sonora e quello di FBR per i Cetacei LFC, MFC e HFC tutti espressi come funzioni del tempo, con un valore al minuto: come si	

vede, l'SPL totale (linea Blu) è per tutta la fase superiore agli FBR per LFC ed MFC (linea rossa e ciano), mentre è inferiore a quello degli HFC (linea verde)	10
Figura 15 Confronto, per la fase di raffreddamento, fra i dati raccolti a -8m (vedi temporizzazione in Figura 13), fra il livello totale di pressione sonora e quello di TTS e PTS per i cetacei, il tutto espresso in funzione del tempo, con un valore al minuto. Si nota che il valore SPL dell'emissione sonora (linea blu) è molto al di sotto di quello dei due livelli di trauma (linea ciano e rosso).....	11
Figura 16. Spettro in terze d'ottava, come riportate nella tabella del rumore, per la fase di raffreddamento, del rumore registrato a -55m, fra le ore 14:02 e le ore 14:12 del 9 settembre 2020.....	11
Figura 17. Confronto, per la fase di raffreddamento, fra i dati raccolti a -55m (vedi temporizzazione in Figura 16), fra il livello totale di pressione sonora e quello di FBR per i Cetacei LFC, MFC e HFC tutti espressi come funzioni del tempo, con un valore al minuto: come si vede, l'SPL totale (linea Blu) è per tutta la fase superiore agli FBR per LFC ed MFC (linea rossa e ciano), mentre è inferiore a quello degli HFC (linea verde)	12
Figura 18 Confronto, per la fase di raffreddamento, fra i dati raccolti a -55m (vedi temporizzazione in Figura 16), fra il livello totale di pressione sonora e quello di TTS e PTS per i cetacei, il tutto espresso in funzione del tempo, con un valore al minuto. Si nota che il valore SPL dell'emissione sonora (linea blu) è molto al di sotto di quello dei due livelli di trauma (linea ciano e rosso).....	12
Figura 19. Spettro in terze d'ottava, come riportate nella tabella del rumore, per la fase di scarica ad 1 pompa, del rumore registrato a -8m, fra le ore 15:17 e le ore 15:26 del 9 settembre 2020.	13
Figura 20. Confronto, per la fase di scarica a 1 pompa, fra i dati raccolti a -8m (vedi temporizzazione in Figura 19), fra il livello totale di pressione sonora e quello di FBR per i Cetacei LFC, MFC e HFC tutti espressi come funzioni del tempo, con un valore al minuto: come si vede, l'SPL totale (linea Blu) è per tutta la fase superiore agli FBR per LFC ed MFC (linea rossa e ciano), mentre è inferiore a quello degli HFC (linea verde)	13
Figura 21. Confronto, per la fase di scarica a 1 pompa, fra i dati raccolti a -8m (vedi temporizzazione in Figura 19), fra il livello totale di pressione sonora e quello di TTS e PTS per i cetacei, il tutto espresso in funzione del tempo, con un valore al minuto. Si nota che il valore SPL dell'emissione sonora (linea blu) è molto al di sotto di quello dei due livelli di trauma (linea ciano e rosso).....	14
Figura 22 Spettro in terze d'ottava, come riportate nella tabella del rumore, per la fase di scarica ad 1 pompa, del rumore registrato a -55m, fra le ore 15:01 e le ore 15:15 del 9 settembre 2020.	14
Figura 23 Confronto, per la fase di scarica a 1 pompa, fra i dati raccolti a -55m (vedi temporizzazione in Figura 22), fra il livello totale di pressione sonora e quello di FBR per i Cetacei LFC, MFC e HFC tutti espressi come funzioni del tempo, con un valore al minuto: come si vede, l'SPL totale (linea Blu) è per tutta la fase superiore agli FBR per LFC ed MFC (linea rossa e ciano), mentre è inferiore a quello degli HFC (linea verde)	15
Figura 24 Confronto, per la fase di scarica a 1 pompa, fra i dati raccolti a -55m (vedi temporizzazione in Figura 22), fra il livello totale di pressione sonora e quello di TTS e PTS per i cetacei, il tutto espresso in funzione del tempo, con un valore al minuto. Si nota che il valore SPL dell'emissione sonora (linea blu) è molto al di sotto di quello dei due livelli di trauma (linea ciano e rosso).....	15
Figura 25. Spettro in terze d'ottava, come riportate nella tabella del rumore, per la fase di Maximum Rate, del rumore registrato a -8m, fra le ore 15:49 e le ore 16:00 del 9 settembre 2020.....	16
Figura 26 Confronto, per la fase di maximum rate, fra i dati raccolti a -8m (vedi temporizzazione in Figura 25), fra il livello totale di pressione sonora e quello di FBR per i Cetacei LFC, MFC e HFC tutti espressi come funzioni del tempo, con un valore al minuto: come si vede, l'SPL totale (linea Blu) è per tutta la fase superiore agli FBR per LFC ed MFC (linea rossa e ciano), mentre è inferiore a quello degli HFC (linea verde)	16
Figura 27 Confronto, per la fase di maximum rate, fra i dati raccolti a -8m (vedi temporizzazione in Figura 25) fra il livello totale di pressione sonora e quello di TTS e PTS per i cetacei, il tutto espresso in funzione del tempo, con un valore al minuto. Si nota che il valore SPL dell'emissione sonora (linea blu) è molto al di sotto di quello dei due livelli di trauma (linea ciano e rosso)	17
Figura 28 Spettro in terze d'ottava, come riportate nella tabella del rumore, per la fase di maximum rate, del rumore registrato a -55m, fra le ore 16:04 e le ore 16:15 del 9 settembre 2020.....	17
Figura 29 Confronto, per la fase di maximum rate, fra i dati raccolti a -55m (vedi temporizzazione in Figura 28), fra il livello totale di pressione sonora e quello di FBR per i Cetacei LFC, MFC e HFC tutti espressi come funzioni del tempo, con un valore al minuto: come si vede, l'SPL totale (linea Blu) è per tutta la fase superiore agli FBR per LFC ed MFC (linea rossa e ciano), mentre è inferiore a quello degli HFC (linea verde)	18
Figura 30 Confronto, per la fase di maximum rate, fra i dati raccolti a -55m (vedi temporizzazione in Figura 28), fra il livello totale di pressione sonora e quello di TTS e PTS per i cetacei, il tutto espresso in funzione del tempo, con un valore al minuto. Si nota che il valore SPL dell'emissione sonora (linea blu) è molto al di sotto di quello dei due livelli di trauma (linea ciano e rosso).....	18
Figura 31 Spettro in terze d'ottava, come riportate nella tabella del rumore, per la fase di allontanamento, del rumore registrato a -8m, fra le ore 09:28 e le ore 09:38 del 10 settembre 2020.	19
Figura 32 Confronto, per la fase di allontanamento, fra i dati raccolti a -8m (vedi temporizzazione in Figura 31) fra il livello totale di pressione sonora e quello di FBR per i Cetacei LFC, MFC e HFC tutti espressi come funzioni del tempo, con un valore al minuto: come si vede, l'SPL totale (linea Blu) è per tutta la fase superiore agli FBR per LFC ed MFC (linea rossa e ciano), mentre è inferiore a quello degli HFC (linea verde)	19
Figura 33 Confronto, per la fase di allontanamento, fra i dati raccolti a -8m (vedi temporizzazione in Figura 31) fra il livello totale di pressione sonora e quello di TTS e PTS per i cetacei, il tutto espresso in funzione del tempo, con un valore al minuto. Si nota che il valore SPL dell'emissione sonora (linea blu) è molto al di sotto di quello dei due livelli di trauma (linea ciano e rosso).....	20
Figura 34 Spettro in terze d'ottava, come riportate nella tabella del rumore, per la fase di allontanamento, del rumore registrato a -55m, fra le ore 09:41 e le ore 09:52 del 10 settembre 2020.....	20

Figura 35 Confronto, per la fase di allontanamento, fra i dati raccolti a -55m (vedi temporizzazione in Figura 34), fra il livello totale di pressione sonora e quello di FBR per i Cetacei LFC, MFC e HFC tutti espressi come funzioni del tempo, con un valore al minuto: come si vede, l'SPL totale (linea Blu) è per tutta la fase superiore agli FBR per LFC ed MFC (linea rossa e ciano), mentre è inferiore a quello degli HFC (linea verde).....	21
Figura 36 Confronto, per la fase di allontanamento, fra i dati raccolti a -55m (vedi temporizzazione in Figura 34), fra il livello totale di pressione sonora e quello di TTS e PTS per i cetacei, il tutto espresso in funzione del tempo, con un valore al minuto. Si nota che il valore SPL dell'emissione sonora (linea blu) è molto al di sotto di quello dei due livelli di trauma (linea ciano e rosso).....	21
Figura 37 Dipendenza della velocità del suono nell'acqua nelle fasi di Raffreddamento (traccia in rosso), di Discarica (traccia in verde), di Maximum Rate (traccia ciano) e di Allontanamento (traccia nera).....	22
Figura 38 Rappresentazione della TL per il segnale acustico durante la fase di raffreddamento, pertinente alla componente a 63 Hz.	23
Figura 39 Rappresentazione della TL per il segnale acustico durante la fase di raffreddamento, pertinente alla componente a 125 Hz.	23
Figura 40 Rappresentazione della TL per il segnale acustico durante la fase di raffreddamento, pertinente alla componente a 12 kHz.	24
Figura 41 La dipendenza dalla sola distanza della TL per il segnale acustico durante la fase di raffreddamento, considerando la profondità di 8m e la componente in frequenza a 63 Hz.	24
Figura 42 La dipendenza dalla sola distanza della TL per il segnale acustico durante la fase di raffreddamento, considerando la profondità di 8m e la componente in frequenza a 125 Hz.	25
Figura 43 La dipendenza dalla sola distanza della TL per il segnale acustico durante la fase di raffreddamento, considerando la profondità di 8m e la componente in frequenza a 12 kHz.	25
Figura 44 La dipendenza dalla sola distanza della TL per il segnale acustico durante la fase di raffreddamento, considerando la profondità di 55m e la componente in frequenza a 63 Hz.	26
Figura 45 La dipendenza dalla sola distanza della TL per il segnale acustico durante la fase di raffreddamento, considerando la profondità di 55m e la componente in frequenza a 125 Hz.	26
Figura 46 La dipendenza dalla sola distanza della TL per il segnale acustico durante la fase di raffreddamento, considerando la profondità di 55m e la componente in frequenza a 12 kHz.	27

1 RISULTATI DELL'ANALISI LOCALE DEL RUMORE

1.1 Analisi Locale Fase di affiancamento (manovra:M+3R)

Durante la fase detta affiancamento-manovra M+3R, la prima delle fasi in cui i rimorchiatori giocano un ruolo importante, le registrazioni sono state effettuate a 8m di profondità, fra le ore 08:32 e le ore 08:41 del 9 settembre 2020, mentre quelle a 55m di profondità fra le ore 8:47 e 8:56 dello stesso giorno.

I grafici riportati dalla Figura 1 alla Figura 3 si riferiscono all'analisi dei dati raccolti a 8m di profondità, mentre quelli dalla Figura 4 alla Figura 6 si riferiscono all'analisi dei dati raccolti a 55 m di profondità.

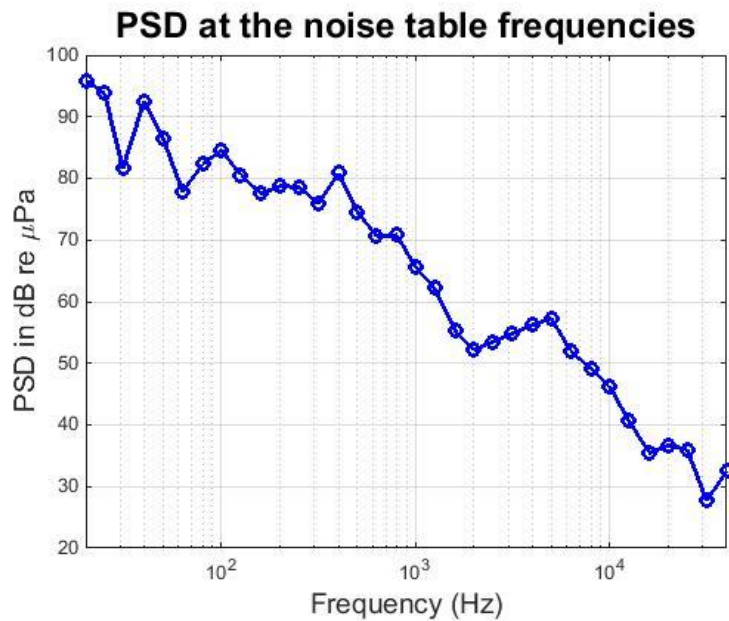


Figura 1 Spettro in terze d'ottava, come riportate nella tabella del rumore, per la fase detta M+3R, del rumore registrato a -8m, fra le ore 08:32 e le ore 08:41 del 9 settembre 2020.

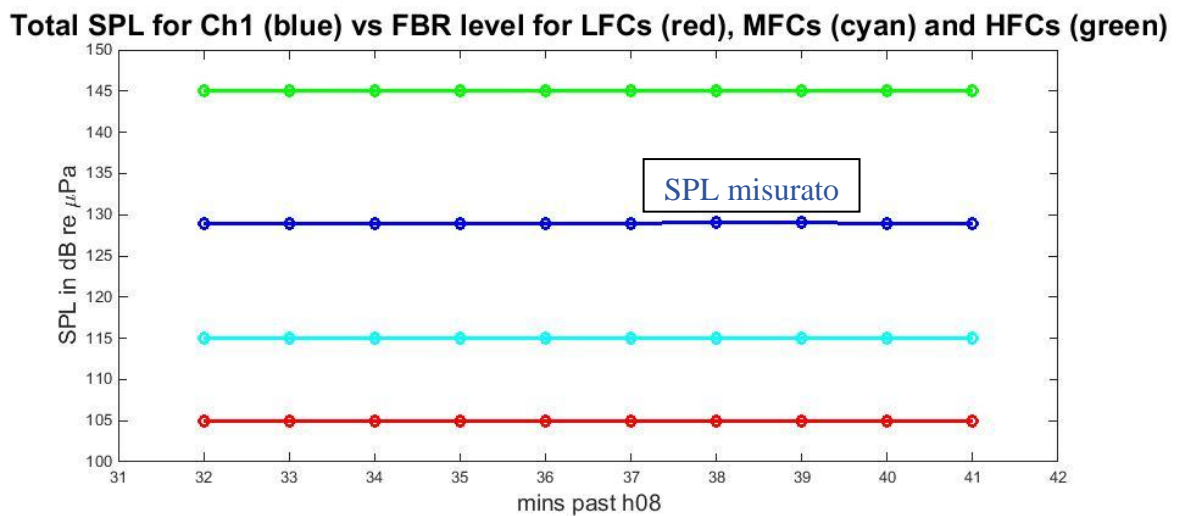


Figura 2 Confronto, per la fase M+3R, fra i dati raccolti a -8m (vedi temporizzazione in Figura 1), fra il livello totale di pressione sonora e quello di FBR per i Cetacei LFC, MFC e HFC tutti espressi come funzioni del tempo, con un valore al minuto: come si vede, l'SPL totale (linea Blu) è per tutta la fase superiore agli FBR per LFC ed MFC (linea rossa e ciano), mentre è inferiore a quello degli HFC (linea verde).

Total SPL for Ch1 (blue) vs: TTS level (cyan) and PTS level (red)

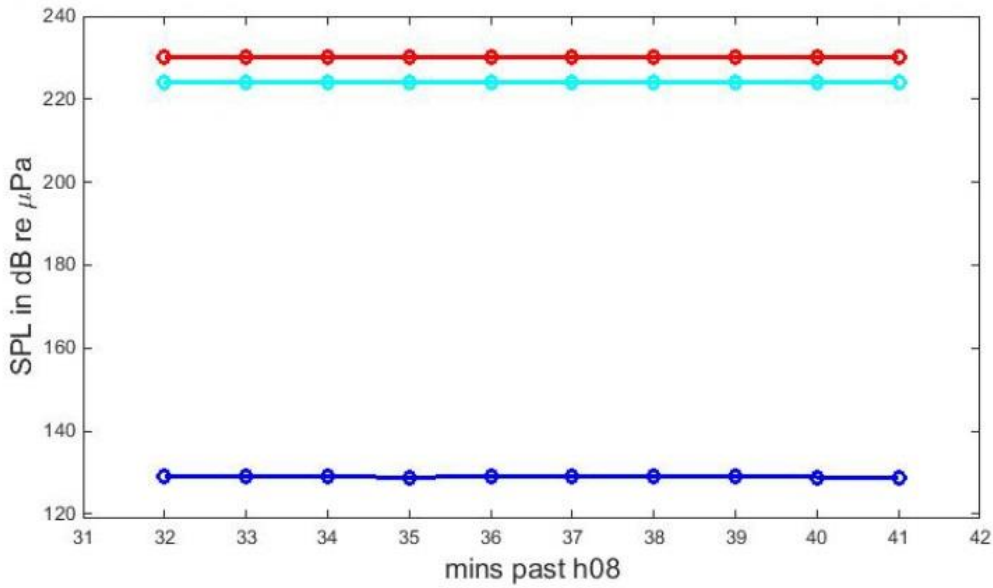


Figura 3 Confronto, per la fase di M+3R, fra i dati raccolti a -8m (vedi temporizzazione in Figura 1), fra il livello totale di pressione sonora e quello di TTS e PTS per i cetacei, il tutto espresso in funzione del tempo, con un valore al minuto. Si nota che il valore SPL dell'emissione sonora (linea blu) è molto al di sotto di quello dei due livelli di trauma (linea ciano e rosso)

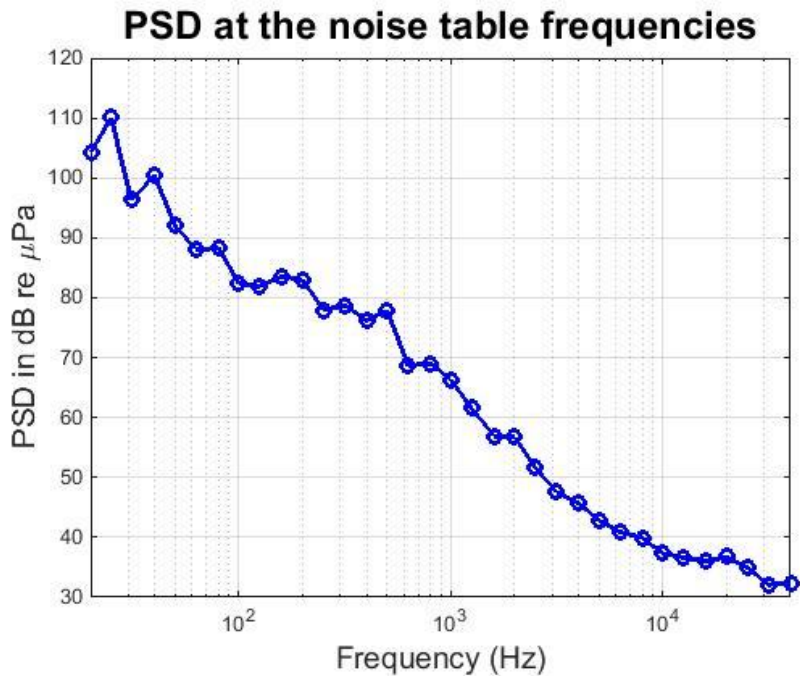


Figura 4 Spettro in terze d'ottava, come riportate nella tabella del rumore, per la fase detta M+3R, del rumore registrato a -55m, fra le ore 08:47 e le ore 08:56 del 9 settembre 2020.

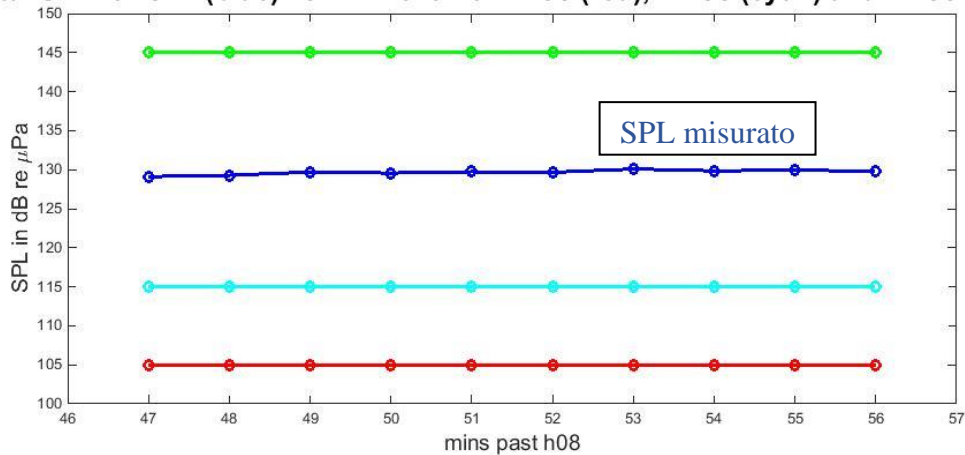
Total SPL for Ch1 (blue) vs FBR level for LFCs (red), MFCs (cyan) and HFCs (green)


Figura 5 Confronto, per la fase M3+R, fra i dati raccolti a -55m (vedi temporizzazione in Figura 4), fra il livello totale di pressione sonora e quello di FBR per i Cetacei LFC, MFC e HFC tutti espressi come funzioni del tempo, con un valore al minuto: come si vede, l'SPL totale (linea Blu) è per tutta la fase superiore agli FBR per LFC ed MFC (linea rossa e ciano), mentre è inferiore a quello degli HFC (linea verde).

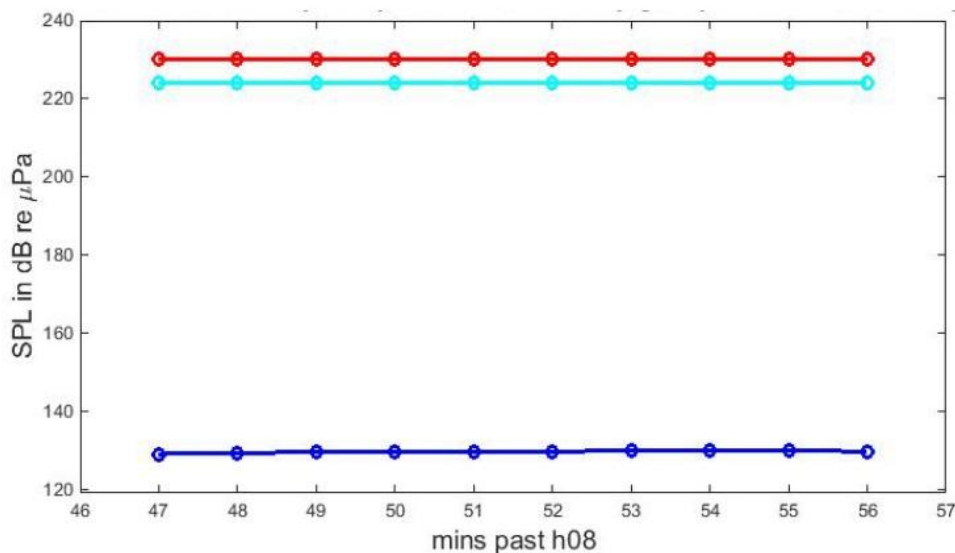
Total SPL for Ch1 (blue) vs: TTS level (cyan) and PTS level (red)


Figura 6 Confronto, per la fase di M+3, fra i dati raccolti a -55m (vedi temporizzazione in Figura 4), fra il livello totale di pressione sonora e quello di TTS e PTS per i cetacei, il tutto espresso in funzione del tempo, con un valore al minuto. Si nota che il valore SPL dell'emissione sonora (linea blu) è molto al di sotto di quello dei due livelli di trauma (linea ciano e rosso)

1.2 Fase di Affiancamento - Attracco

È questa l'altra fase delle operazioni della metaniera in cui i rimorchiatori hanno un ruolo importante. In questa fase le registrazioni sono state fatte a 8m di profondità fra le ore 9:34 e le ore 9:43 del 9 settembre 2020, mentre nello stesso giorno sono state fatte le misure in fase di attracco a 55m fra le ore 9:49 e le ore 9:59. Qui di seguito, i grafici dalla Figura 7 alla Figura 9 riportano i risultati delle analisi dei dati acquisiti a 8m di profondità, mentre i risultati dei dati acquisiti a 55m di profondità sono riportati dalla Figura 10 alla Figura 12.

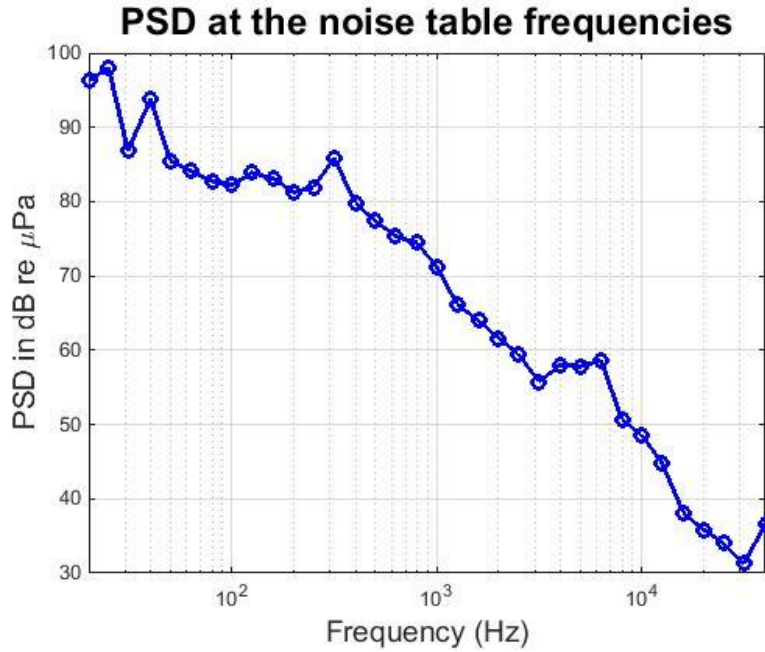


Figura 7 Spettro in terze d'ottava, come riportate nella tabella del rumore, per la fase di attracco, del rumore registrato a -8m, fra le ore 09:34 e le ore 09:43 del 9 settembre 2020.

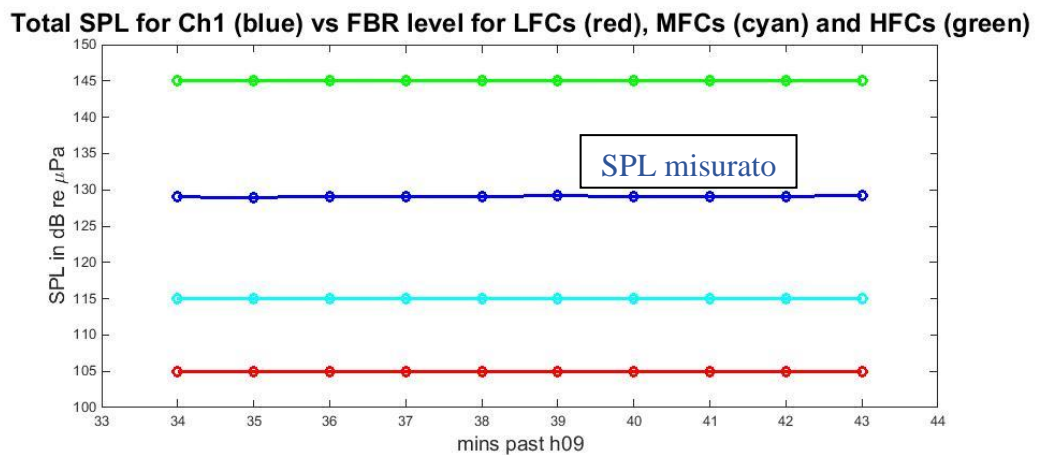


Figura 8 Confronto, per la fase di attracco, fra i dati raccolti a -8m (vedi temporizzazione in Figura 7), fra il livello totale di pressione sonora e quello di FBR per i Cetacei LFC, MFC e HFC tutti espressi come funzioni del tempo, con un valore al minuto: come si vede, l'SPL totale (linea Blu) è per tutta la fase superiore agli FBR per LFC ed MFC (linea rossa e ciano), mentre è inferiore a quello degli HFC (linea verde).

Total SPL for Ch1 (blue) vs: TTS level (cyan) and PTS level (red)

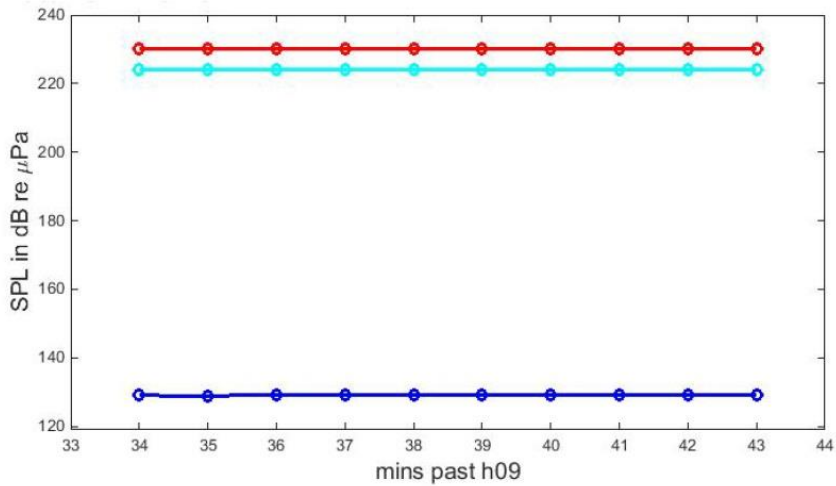


Figura 9 Confronto, per la fase di attracco, fra i dati raccolti a -8m (vedi temporizzazione in Figura 7), fra il livello totale di pressione sonora e quello di TTS e PTS per i cetacei, il tutto espresso in funzione del tempo, con un valore al minuto. Si nota che il valore SPL dell'emissione sonora (linea blu) è molto al di sotto di quello dei due livelli di trauma (linea ciano e rosso)

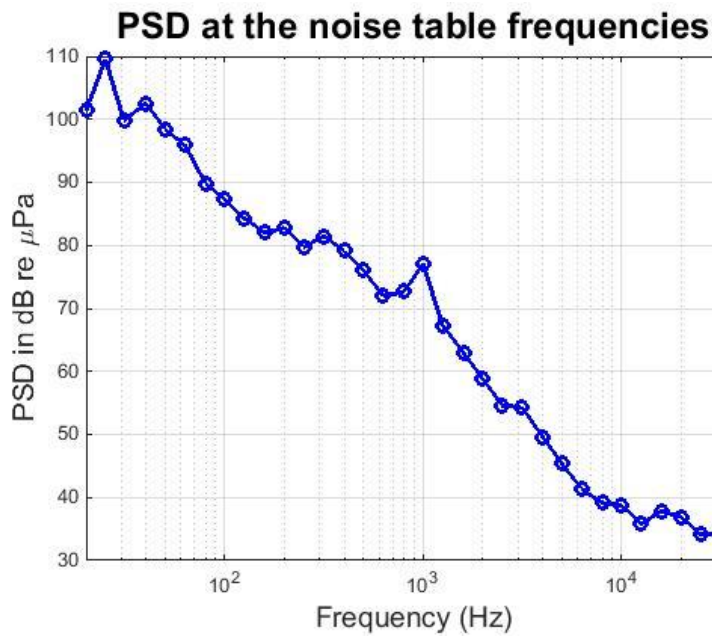


Figura 10 Spettro in terze d'ottava, come riportate nella tabella del rumore, per la fase di attracco, del rumore registrato a -55m, fra le ore 09:49 e le ore 09:59 del 9 settembre 2020.

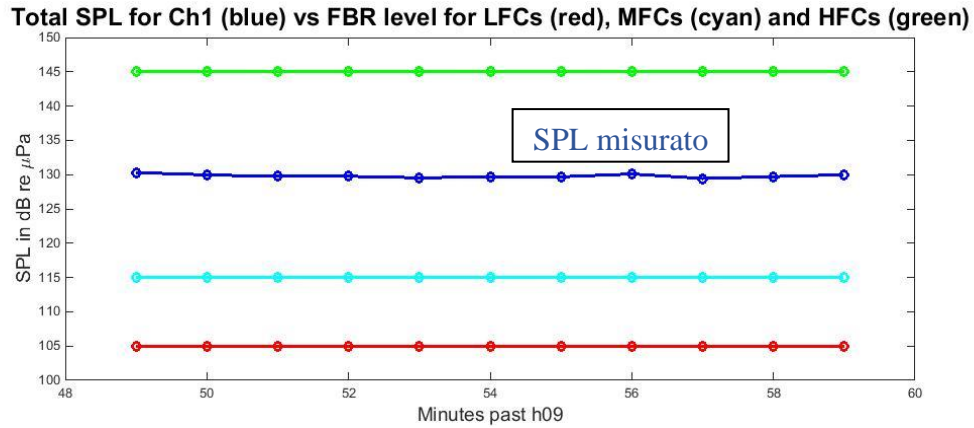


Figura 11 Confronto, per la fase di attracco, fra i dati raccolti a -55m (vedi temporizzazione in Figura 10), fra il livello totale di pressione sonora e quello di FBR per i Cetacei LFC, MFC e HFC tutti espressi come funzioni del tempo, con un valore al minuto: come si vede, l'SPL totale (linea Blu) è per tutta la fase superiore agli FBR per LFC ed MFC (linea rossa e ciano), mentre è inferiore a quello degli HFC (linea verde)..

Total SPL for Ch1 (blue) vs: TTS level (cyan) and PTS level (red)

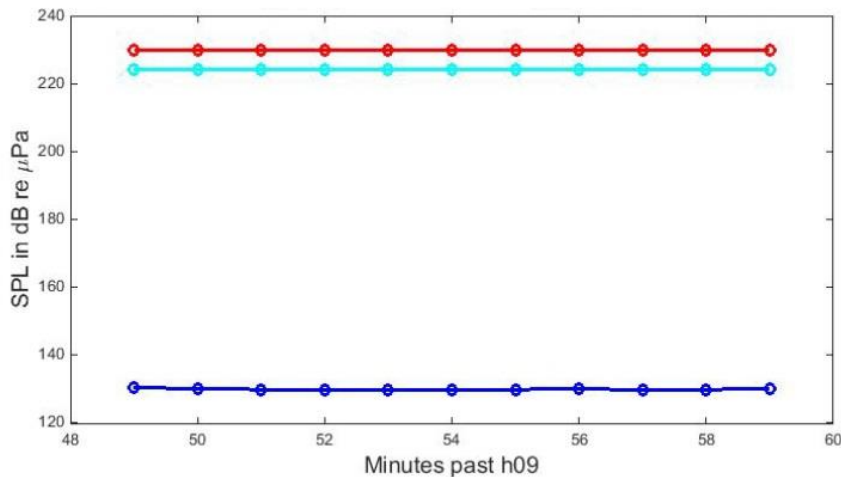


Figura 12 Confronto, per la fase di attracco, fra i dati raccolti a -55m (vedi temporizzazione in Figura 10), fra il livello totale di pressione sonora e quello di TTS e PTS per i cetacei, il tutto espresso in funzione del tempo, con un valore al minuto. Si nota che il valore SPL dell'emissione sonora (linea blu) è molto al di sotto di quello dei due livelli di trauma (linea ciano e rosso)

1.3 Fase di Allibo - Raffreddamento

Durante la fase di raffreddamento le registrazioni sono state effettuate a 8m di profondità, fra le ore 13:48 e le ore 13:58 del 9 settembre 2020, mentre quelle a 55m di profondità fra le ore 14:02 e 14:11. I grafici riportati dalla Figura 13 alla Figura 15 si riferiscono all'analisi dei dati raccolti a 8m di profondità. I grafici riportati dalla Figura 16 alla Figura 18 si riferiscono all'analisi dei dati raccolti a 55m di profondità.

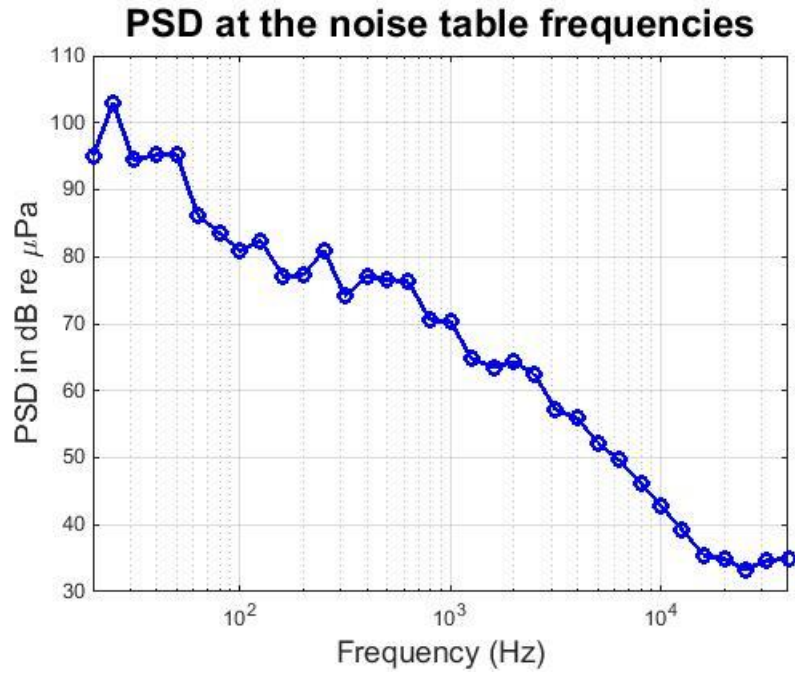


Figura 13 Spettro in terze d'ottava, come riportate nella tabella del rumore, per la fase di raffreddamento, del rumore registrato a -8m, fra le ore 13:48 e le ore 13:58 del 9 settembre 2020.

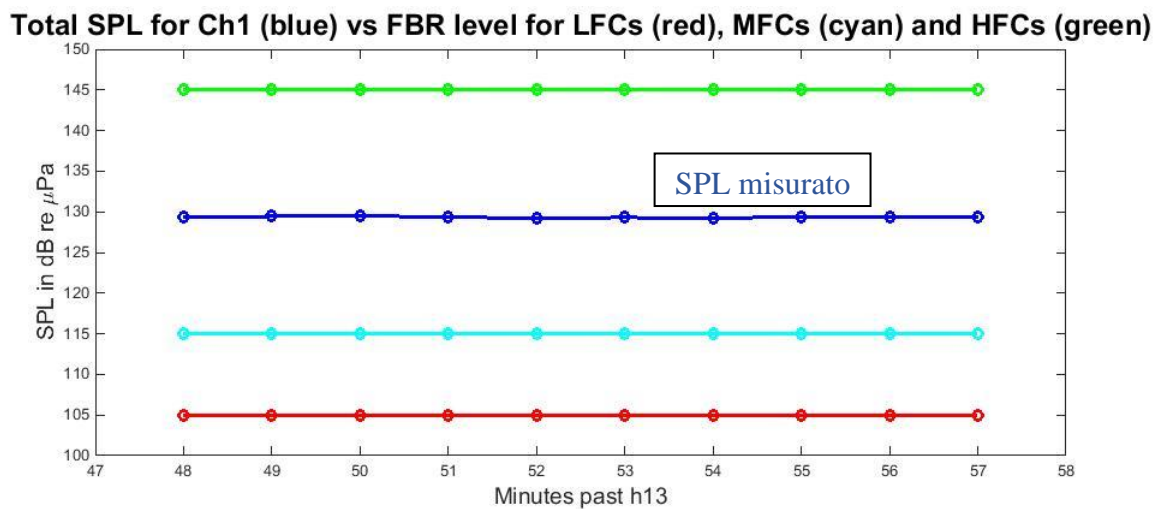


Figura 14 Confronto, per la fase di raffreddamento, fra i dati raccolti a -8m (vedi temporizzazione in Figura 13), fra il livello totale di pressione sonora e quello di FBR per i Cetacei LFC, MFC e HFC tutti espressi come funzioni del tempo, con un valore al minuto: come si vede, l'SPL totale (linea Blu) è per tutta la fase superiore agli FBR per LFC ed MFC (linea rossa e ciano), mentre è inferiore a quello degli HFC (linea verde).

Total SPL for Ch1 (blue) vs: TTS level (cyan) and PTS level (red)

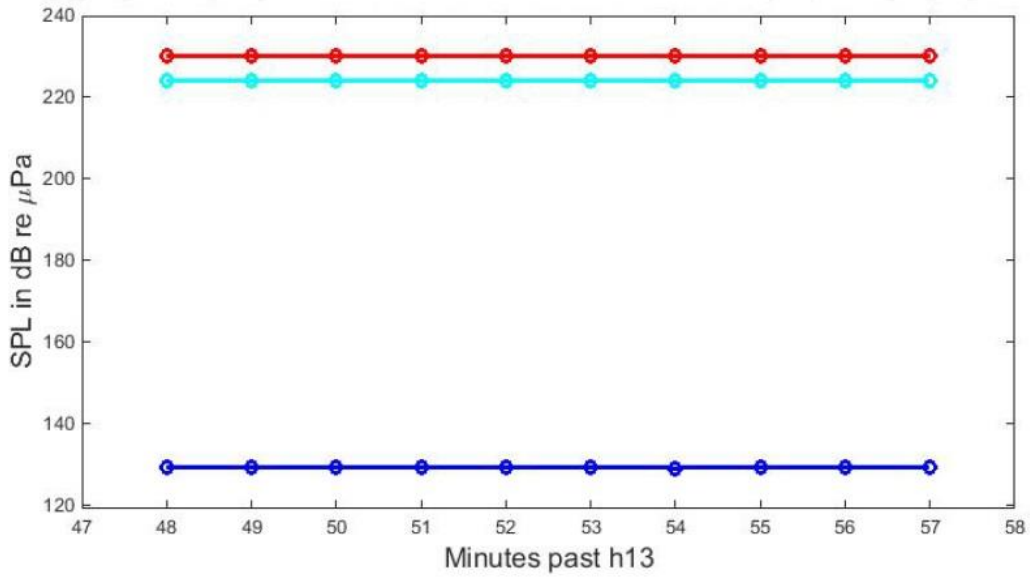


Figura 15 Confronto, per la fase di raffreddamento, fra i dati raccolti a -8m (vedi temporizzazione in Figura 13), fra il livello totale di pressione sonora e quello di TTS e PTS per i cetacei, il tutto espresso in funzione del tempo, con un valore al minuto. Si nota che il valore SPL dell'emissione sonora (linea blu) è molto al di sotto di quello dei due livelli di trauma (linea ciano e rosso)

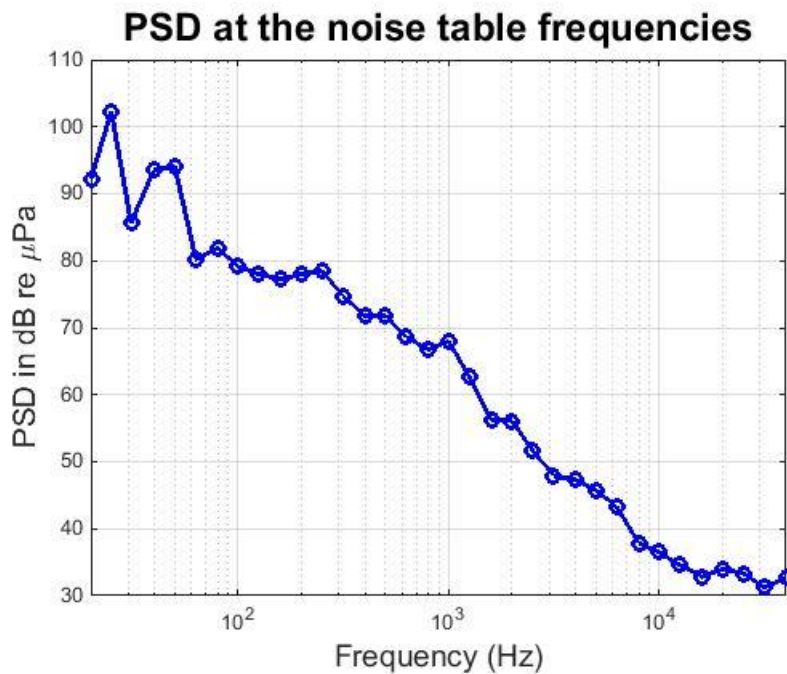


Figura 16. Spettro in terze d'ottava, come riportate nella tabella del rumore, per la fase di raffreddamento, del rumore registrato a -55m, fra le ore 14:02 e le ore 14:12 del 9 settembre 2020.

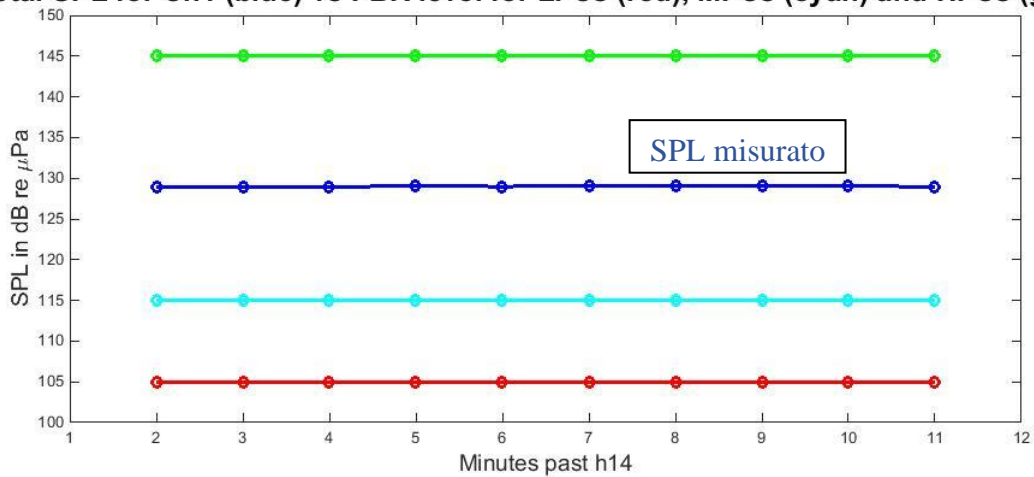
Total SPL for Ch1 (blue) vs FBR level for LFCs (red), MFCs (cyan) and HFCs (green)


Figura 17. Confronto, per la fase di raffreddamento, fra i dati raccolti a -55m (vedi temporizzazione in Figura 16), fra il livello totale di pressione sonora e quello di FBR per i Cetacei LFC, MFC e HFC tutti espressi come funzioni del tempo, con un valore al minuto: come si vede, l'SPL totale (linea Blu) è per tutta la fase superiore agli FBR per LFC ed MFC (linea rossa e ciano), mentre è inferiore a quello degli HFC (linea verde).

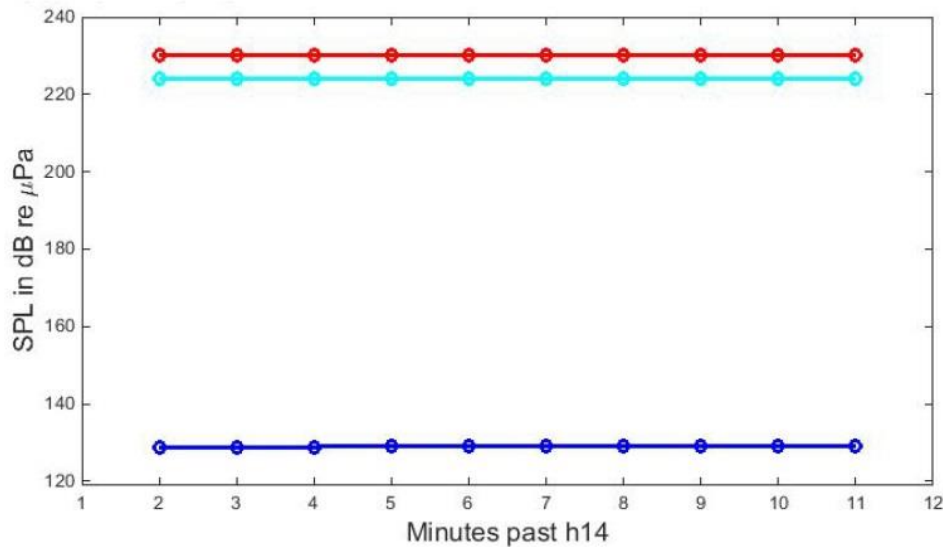
Total SPL for Ch1 (blue) vs: TTS level (cyan) and PTS level (red)


Figura 18 Confronto, per la fase di raffreddamento, fra i dati raccolti a -55m (vedi temporizzazione in Figura 16), fra il livello totale di pressione sonora e quello di TTS e PTS per i cetacei, il tutto espresso in funzione del tempo, con un valore al minuto. Si nota che il valore SPL dell'emissione sonora (linea blu) è molto al di sotto di quello dei due livelli di trauma (linea ciano e rosso)

1.4 Fase di Allibo - Discarica

Le registrazioni durante la fase di Discarica a 8m di profondità sono state effettuate fra le ore 15:17 e 15:27 del 9 settembre 2020. I risultati delle analisi relative sono rappresentati nei grafici dalla Figura 19 alla Figura 21. I grafici relativi all'analisi dei dati raccolti a 55 m di profondità sono riportati dalla Figura 22 alla Figura 24.

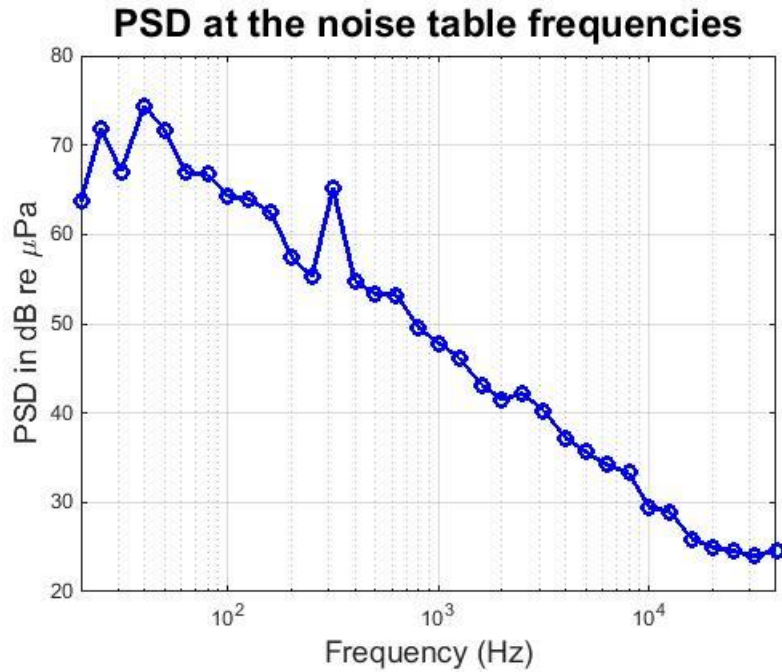


Figura 19. Spettro in terze d'ottava, come riportate nella tabella del rumore, per la fase di scarica ad 1 pompa, del rumore registrato a -8m, fra le ore 15:17 e le ore 15:26 del 9 settembre 2020.

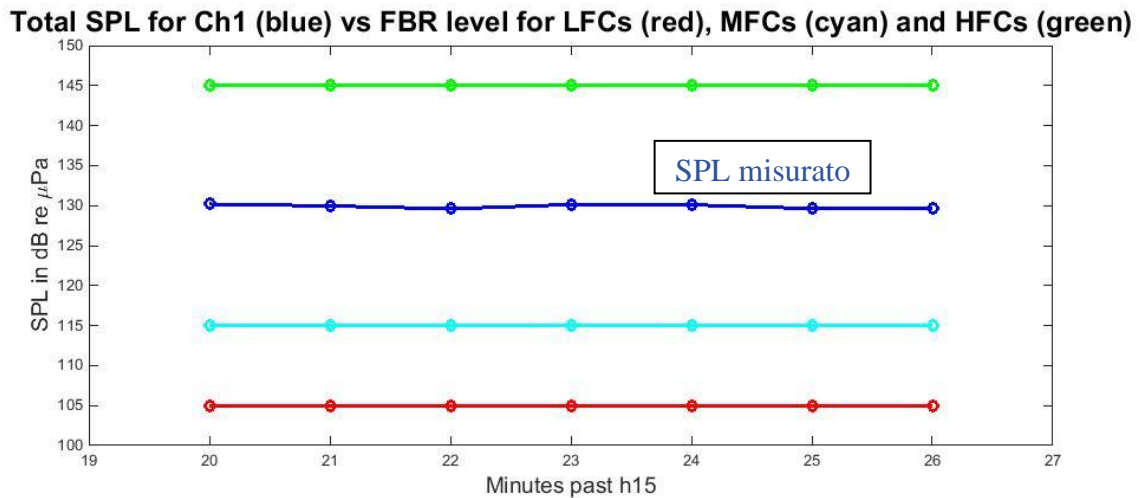


Figura 20. Confronto, per la fase di scarica a 1 pompa, fra i dati raccolti a -8m (vedi temporizzazione in Figura 19), fra il livello totale di pressione sonora e quello di FBR per i Cetacei LFC, MFC e HFC tutti espressi come funzioni del tempo, con un valore al minuto: come si vede, l'SPL totale (linea Blu) è per tutta la fase superiore agli FBR per LFC ed MFC (linea rossa e ciano), mentre è inferiore a quello degli HFC (linea verde).

Total SPL for Ch1 (blue) vs: TTS level (cyan) and PTS level (red)

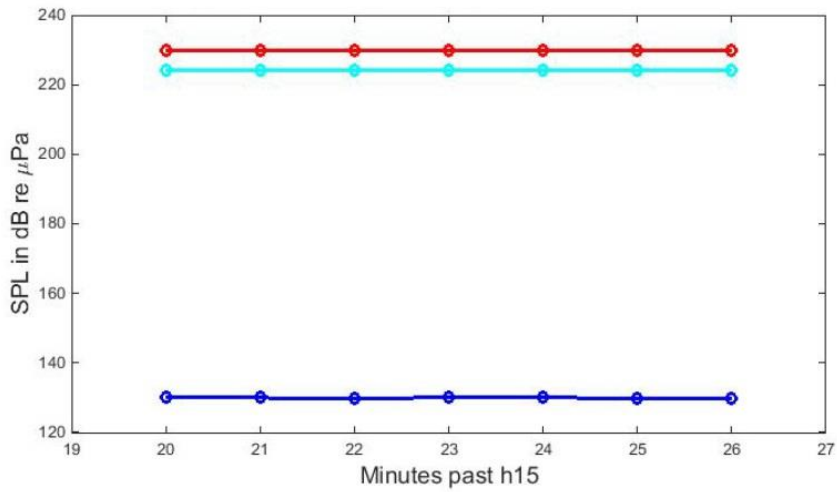


Figura 21. Confronto, per la fase di scarica a 1 pompa, fra i dati raccolti a -8m (vedi temporizzazione in Figura 19), fra il livello totale di pressione sonora e quello di TTS e PTS per i cetacei, il tutto espresso in funzione del tempo, con un valore al minuto. Si nota che il valore SPL dell'emissione sonora (linea blu) è molto al di sotto di quello dei due livelli di trauma (linea ciano e rosso)

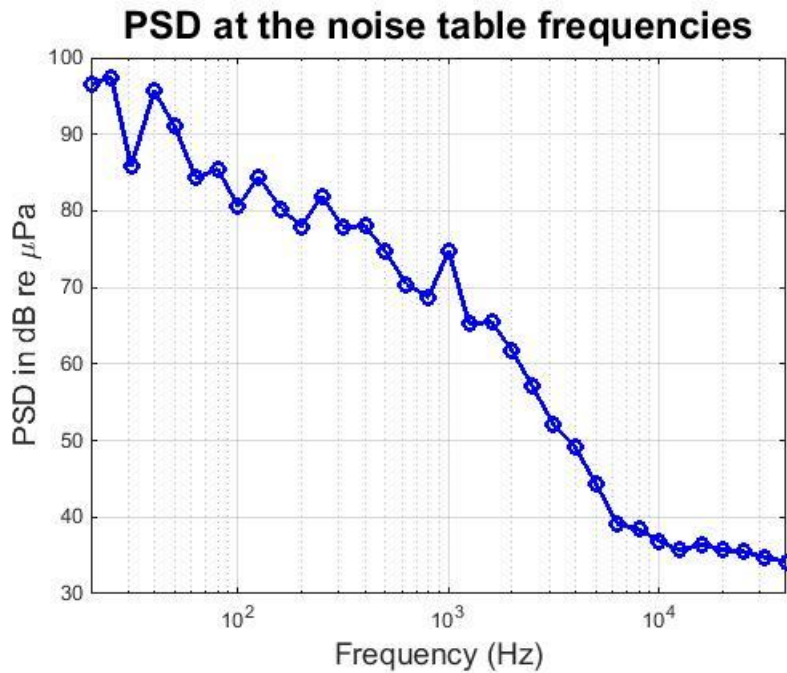


Figura 22 Spettro in terze d'ottava, come riportate nella tabella del rumore, per la fase di scarica ad 1 pompa, del rumore registrato a -55m, fra le ore 15:01 e le ore 15:15 del 9 settembre 2020.

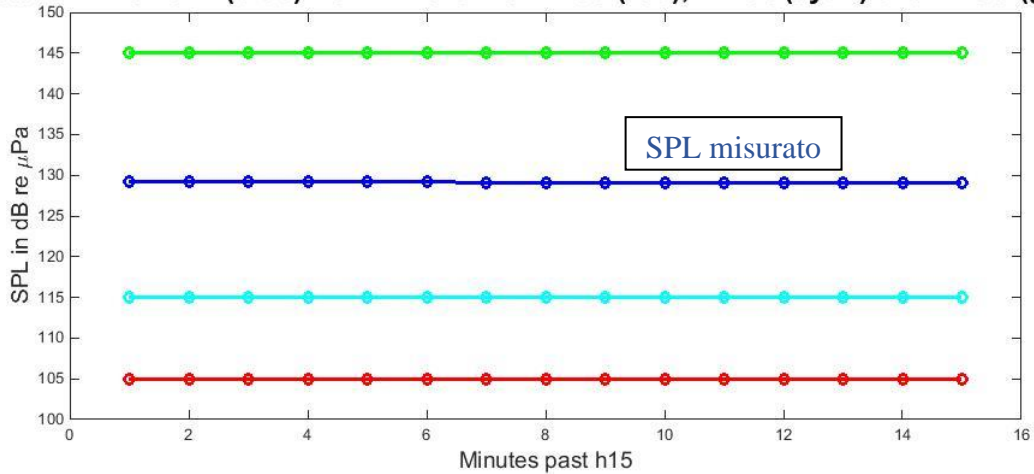
Total SPL for Ch1 (blue) vs FBR level for LFCs (red), MFCs (cyan) and HFCs (green)


Figura 23 Confronto, per la fase di scarica a 1 pompa, fra i dati raccolti a -55m (vedi temporizzazione in Figura 22), fra il livello totale di pressione sonora e quello di FBR per i Cetacei LFC, MFC e HFC tutti espressi come funzioni del tempo, con un valore al minuto: come si vede, l'SPL totale (linea Blu) è per tutta la fase superiore agli FBR per LFC ed MFC (linea rossa e ciano), mentre è inferiore a quello degli HFC (linea verde).

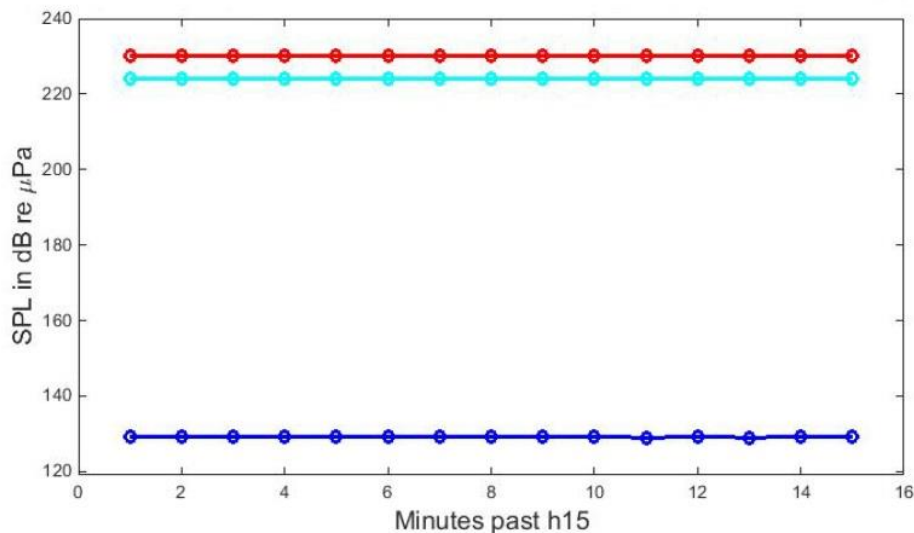
Total SPL for Ch1 (blue) vs: TTS level (cyan) and PTS level (red)


Figura 24 Confronto, per la fase di scarica a 1 pompa, fra i dati raccolti a -55m (vedi temporizzazione in Figura 22), fra il livello totale di pressione sonora e quello di TTS e PTS per i cetacei, il tutto espresso in funzione del tempo, con un valore al minuto. Si nota che il valore SPL dell'emissione sonora (linea blu) è molto al di sotto di quello dei due livelli di trauma (linea ciano e rosso)

1.5 Fase di Allibo Maximum Rate di scarica

Le registrazioni durante la Maximum Rate di scarica sono state effettuate a 8m e a 55m di profondità.

Le misure a 8m di profondità-sono state raccolte fra le ore 15:49 e 16:00 del giorno 9 settembre 2020, mentre quelle a 55m fra le 16:04 e le 16:15 dello stesso giorno. Dalla Figura 25 alla Figura 27 si riportano i risultati delle analisi del rumore registrato a 8 m di profondità. Dalla Figura 28 alla Figura 30 si riportano i risultati delle analisi del rumore registrato a 55 m di profondità.

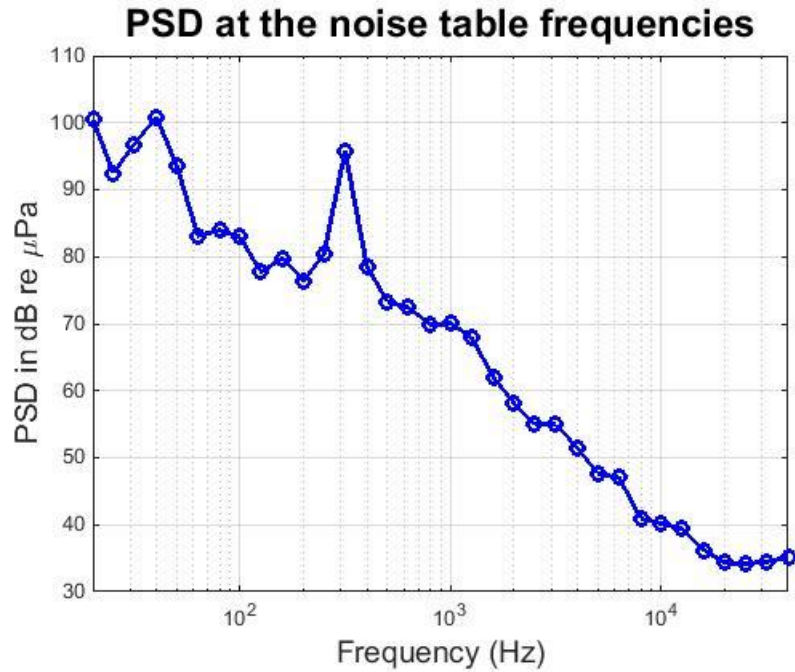


Figura 25. Spettro in terze d'ottava, come riportate nella tabella del rumore, per la fase di Maximum Rate, del rumore registrato a -8m, fra le ore 15:49 e le ore 16:00 del 9 settembre 2020.

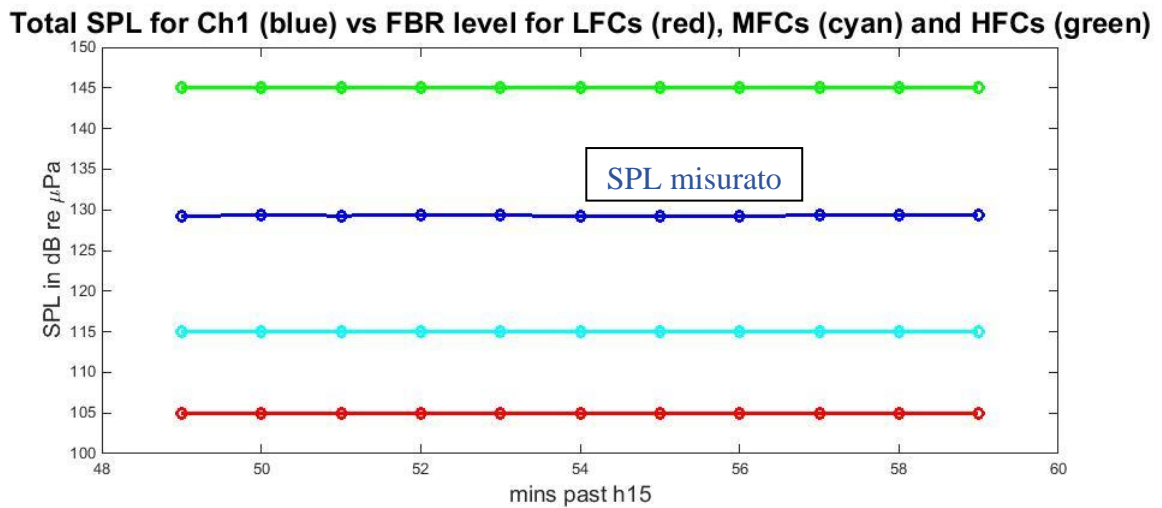


Figura 26 Confronto, per la fase di maximum rate, fra i dati raccolti a -8m (vedi temporizzazione in Figura 25), fra il livello totale di pressione sonora e quello di FBR per i Cetacei LFC, MFC e HFC tutti espressi come funzioni del tempo, con un valore al minuto: come si vede, l'SPL totale (linea Blu) è per tutta la fase superiore agli FBR per LFC ed MFC (linea rossa e ciano), mentre è inferiore a quello degli HFC (linea verde).

Total SPL for Ch1 (blue) vs: TTS level (cyan) and PTS level (red)

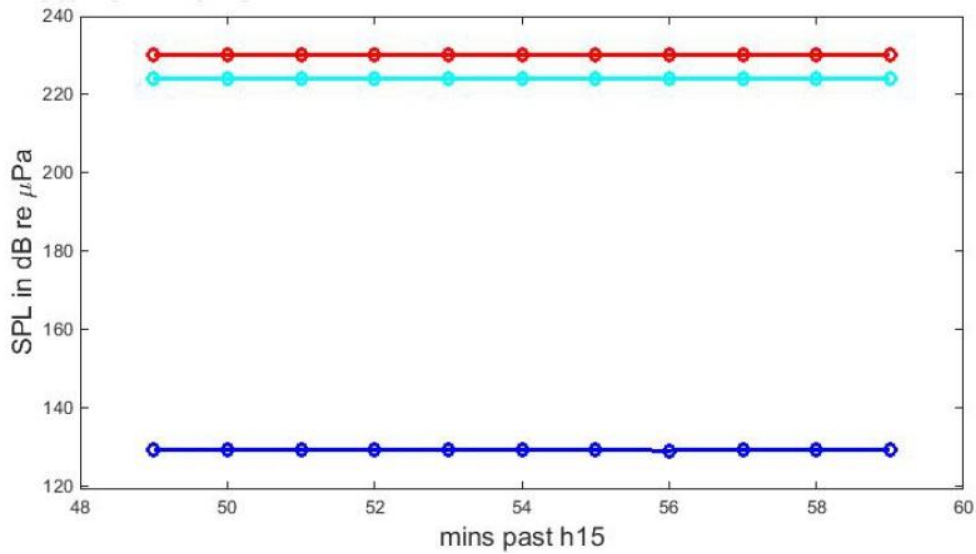


Figura 27 Confronto, per la fase di maximum rate, fra i dati raccolti a -8m (vedi temporizzazione in Figura 25) fra il livello totale di pressione sonora e quello di TTS e PTS per i cetacei, il tutto espresso in funzione del tempo, con un valore al minuto. Si nota che il valore SPL dell'emissione sonora (linea blu) è molto al di sotto di quello dei due livelli di trauma (linea ciano e rosso)

PSD at the noise table frequencies

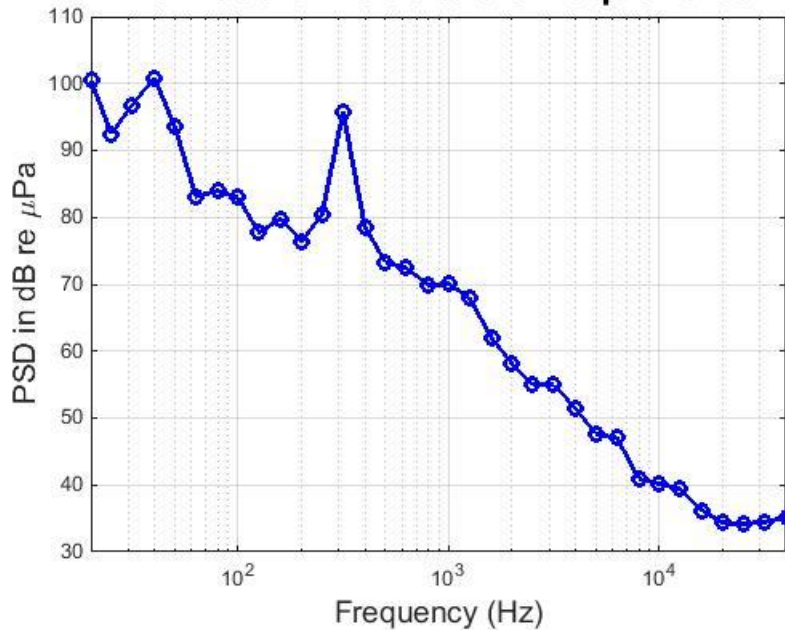


Figura 28 Spettro in terze d'ottava, come riportate nella tabella del rumore, per la fase di maximum rate, del rumore registrato a -55m, fra le ore 16:04 e le ore 16:15 del 9 settembre 2020.

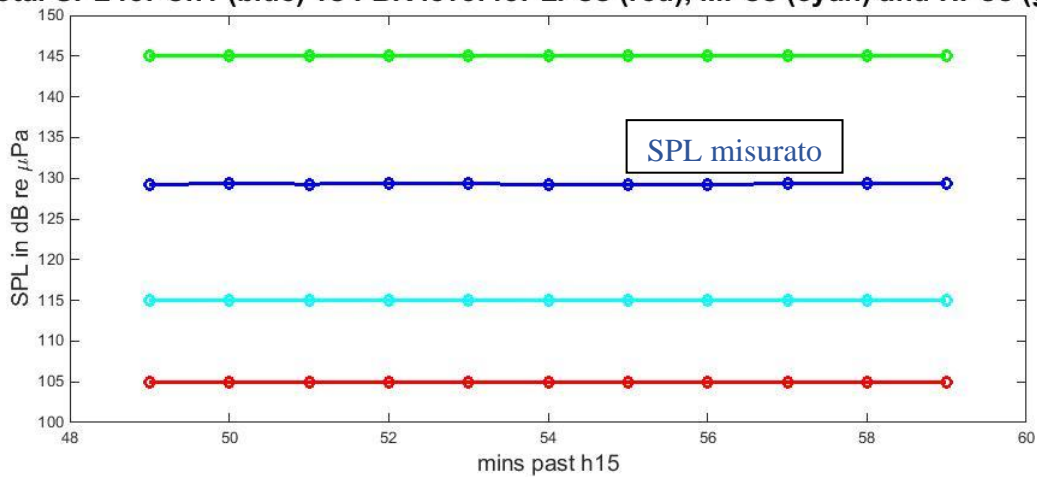
Total SPL for Ch1 (blue) vs FBR level for LFCs (red), MFCs (cyan) and HFCs (green)


Figura 29 Confronto, per la fase di maximum rate, fra i dati raccolti a -55m (vedi temporizzazione in Figura 28), fra il livello totale di pressione sonora e quello di FBR per i Cetacei LFC, MFC e HFC tutti espressi come funzioni del tempo, con un valore al minuto: come si vede, l'SPL totale (linea Blu) è per tutta la fase superiore agli FBR per LFC ed MFC (linea rossa e ciano), mentre è inferiore a quello degli HFC (linea verde).

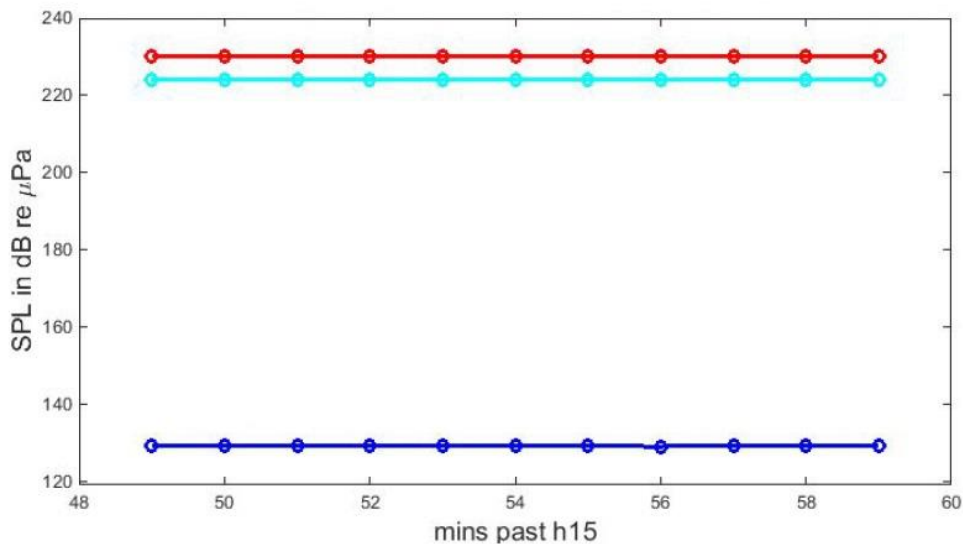
Total SPL for Ch1 (blue) vs: TTS level (cyan) and PTS level (red)


Figura 30 Confronto, per la fase di maximum rate, fra i dati raccolti a -55m (vedi temporizzazione in Figura 28), fra il livello totale di pressione sonora e quello di TTS e PTS per i cetacei, il tutto espresso in funzione del tempo, con un valore al minuto. Si nota che il valore SPL dell'emissione sonora (linea blu) è molto al di sotto di quello dei due livelli di trauma (linea ciano e rosso)

1.6 Fase di Allontanamento

Le registrazioni durante la fase di Allontanamento sono state effettuate a 8m fra le 9:28 alle ore 9:38 e a 55m fra le ore 9:41 e 9:52 del 10 settembre 2020. I risultati delle analisi delle registrazioni a 8m di profondità sono riportati nei grafici dalla Figura 31 alla Figura 33. I risultati delle analisi delle registrazioni a 55m di profondità sono riportati nei grafici dalla Figura 34 alla Figura 36.

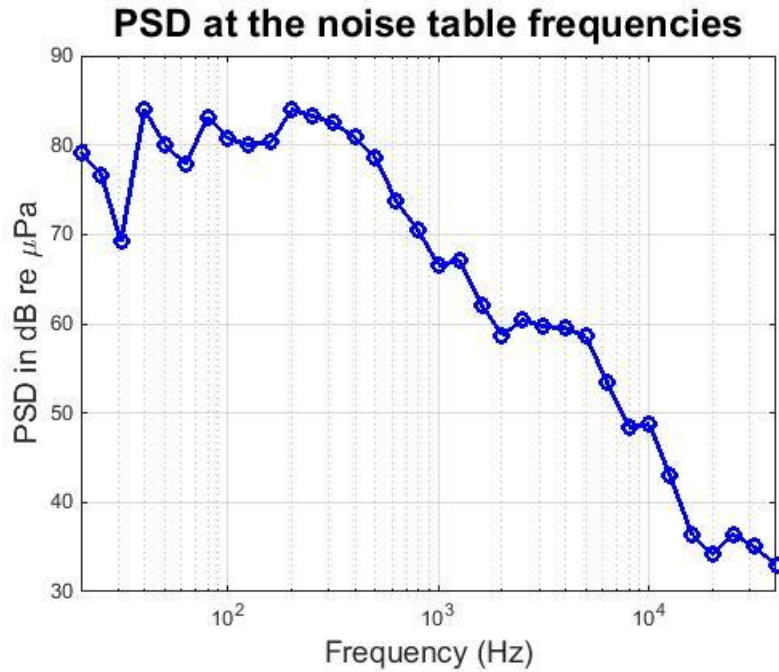


Figura 31 Spettro in terze d'ottava, come riportate nella tabella del rumore, per la fase di allontanamento, del rumore registrato a -8m, fra le ore 09:28 e le ore 09:38 del 10 settembre 2020.

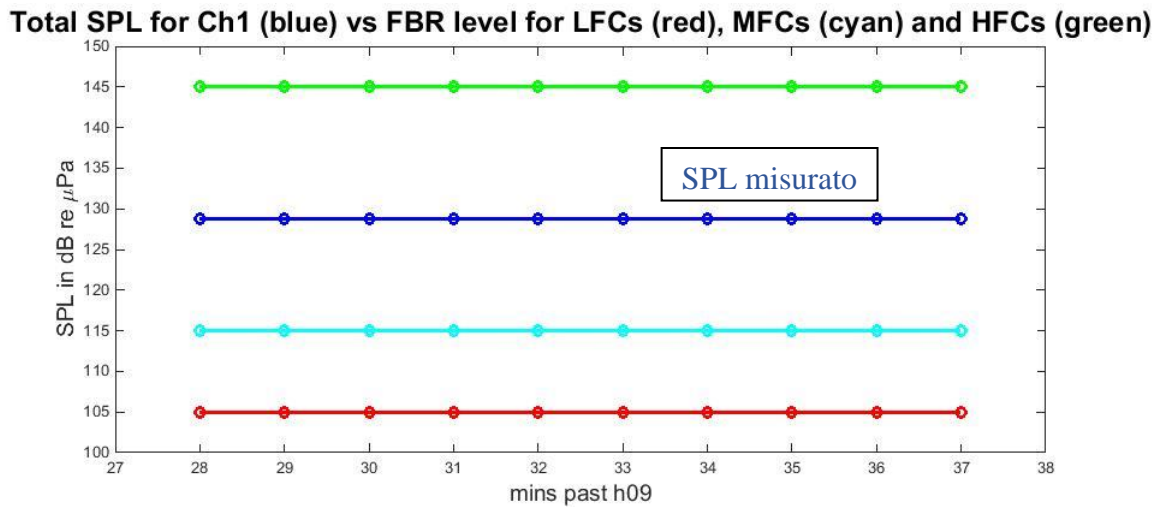


Figura 32 Confronto, per la fase di allontanamento, fra i dati raccolti a -8m (vedi temporizzazione in Figura 31) fra il livello totale di pressione sonora e quello di FBR per i Cetacei LFC, MFC e HFC tutti espressi come funzioni del tempo, con un valore al minuto: come si vede, l'SPL totale (linea Blu) è per tutta la fase superiore agli FBR per LFC ed MFC (linea rossa e ciano), mentre è inferiore a quello degli HFC (linea verde).

Total SPL for Ch1 (blue) vs: TTS level (cyan) and PTS level (red)

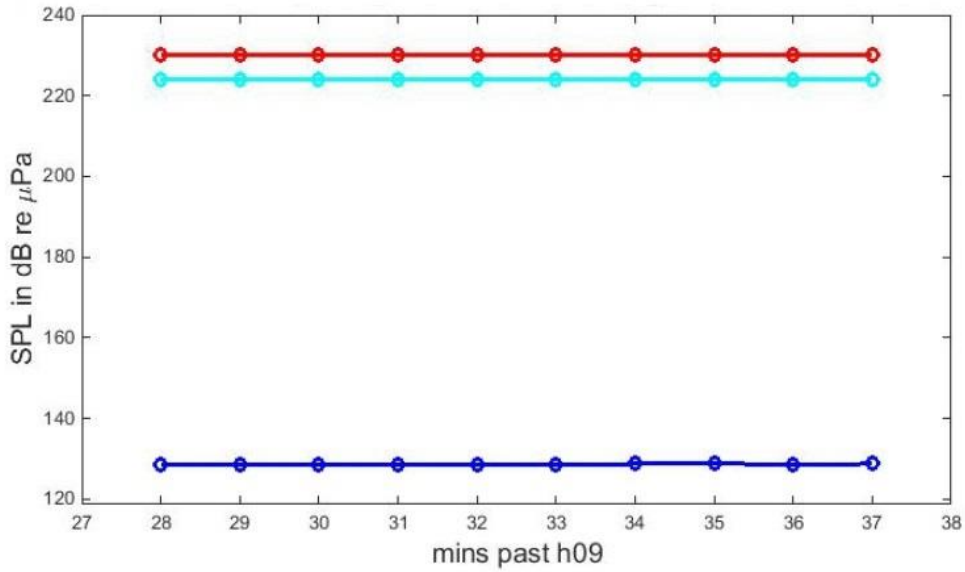


Figura 33 Confronto, per la fase di allontanamento, fra i dati raccolti a -8m (vedi temporizzazione in Figura 31) fra il livello totale di pressione sonora e quello di TTS e PTS per i cetacei, il tutto espresso in funzione del tempo, con un valore al minuto. Si nota che il valore SPL dell'emissione sonora (linea blu) è molto al di sotto di quello dei due livelli di trauma (linea ciano e rosso)

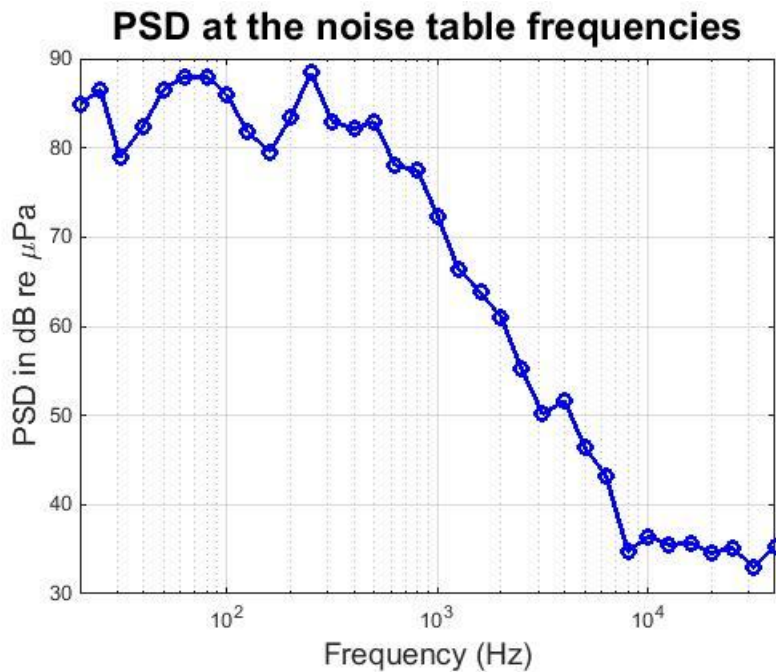


Figura 34 Spettro in terze d'ottava, come riportate nella tabella del rumore, per la fase di allontanamento, del rumore registrato a -55m, fra le ore 09:41 e le ore 09:52 del 10 settembre 2020.

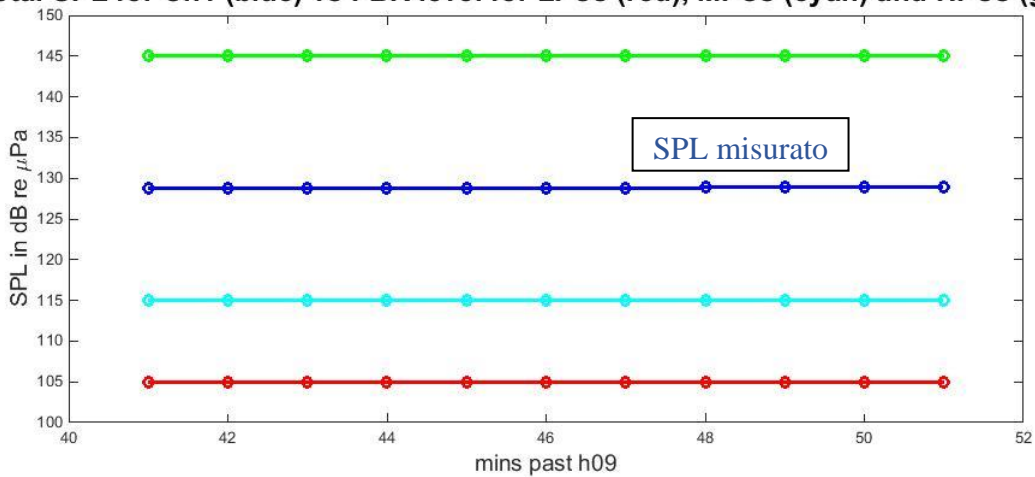
Total SPL for Ch1 (blue) vs FBR level for LFCs (red), MFCs (cyan) and HFCs (green)


Figura 35 Confronto, per la fase di allontanamento, fra i dati raccolti a -55m (vedi temporizzazione in Figura 34), fra il livello totale di pressione sonora e quello di FBR per i Cetacei LFC, MFC e HFC tutti espressi come funzioni del tempo, con un valore al minuto: come si vede, l'SPL totale (linea Blu) è per tutta la fase superiore agli FBR per LFC ed MFC (linea rossa e ciano), mentre è inferiore a quello degli HFC (linea verde).

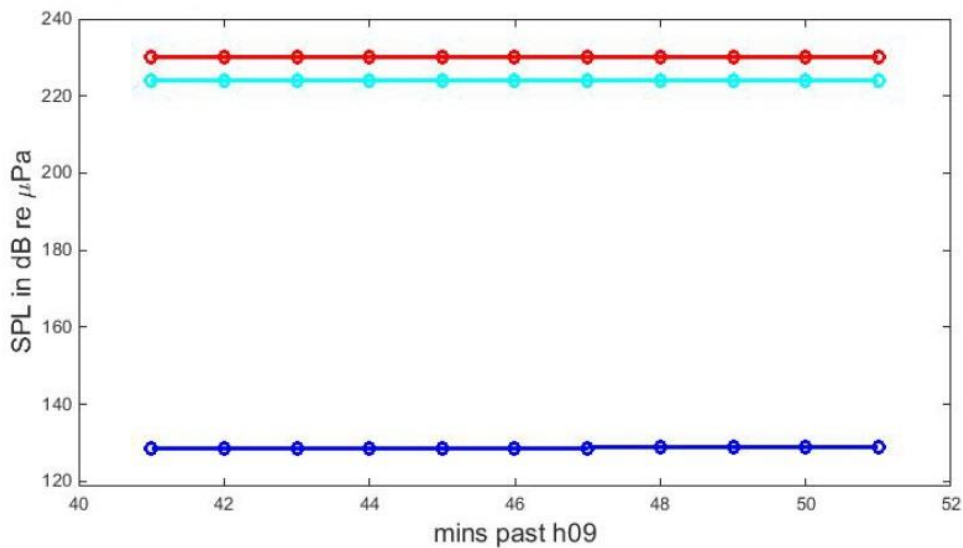
Total SPL for Ch1 (blue) vs: TTS level (cyan) and PTS level (red)


Figura 36 Confronto, per la fase di allontanamento, fra i dati raccolti a -55m (vedi temporizzazione in Figura 34), fra il livello totale di pressione sonora e quello di TTS e PTS per i cetacei, il tutto espresso in funzione del tempo, con un valore al minuto. Si nota che il valore SPL dell'emissione sonora (linea blu) è molto al di sotto di quello dei due livelli di trauma (linea ciano e rosso)

2 RISULTATI DEL CALCOLO DI SL: SL PER COMPONENTI DI FOURIER (MODELLO BELLHOP)

2.1 Condizioni oceanografiche

All'utilizzo del modello Bellhop è necessaria la conoscenza delle *condizioni oceanografiche* del mezzo, che vengono descritte mediante la dipendenza della velocità del suono nell'acqua c_s dalla profondità z , così come misurata dalla sonda CTD durante l'acquisizione dei dati di idrofono. Tali misure della sonda sono riportate a titolo di esempio nella Figura 37 le fasi dell'intera campagna, definite rispetto al moto della metaniera e alle attività correlate di Allibo. Le fasi sono "Avvicinamento", Affiancamento (manovra ed attracco), "Allibo" (Raffreddamento-Discarica-Maximum Rate di discarica) ed "Allontanamento".

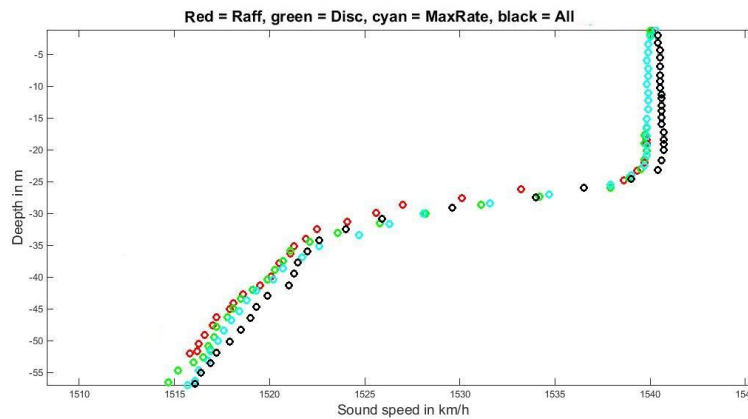


Figura 37 Dipendenza della velocità del suono nell'acqua nelle fasi di Raffreddamento (traccia in rosso), di Discarica (traccia in verde), di Maximum Rate (traccia ciano) e di Allontanamento (traccia nera).

Modalità di calcolo

Immettendo i profili di $c_s(z)$ ottenuti mediante le misure di sonda CTD nel modello BELLHOP, e considerando la posizione relativa dell'idrofono rispetto alla sorgente del rumore, possiamo ottenere la $SL(f)$ per le frequenze di interesse. In questo paragrafo illustreremo, a titolo esemplificativo, alcune simulazioni del BELLHOP mediante i grafici in cui si illustra sia la dipendenza complessiva della Transmission loss (TL) da r e da z , sia quella dalla sola distanza r , per le profondità $z = -8$ m e $z = -55$ m (profondità di interesse in quanto riferite a quelle in cui sono stati acquisiti i dati di idrofono).

Prendiamo in considerazione la fase di Allibo-“Raffreddamento” è evidente, dalla Figura 38, Figura 39, Figura 40 qui di seguito riportate, che il campo acustico alle diverse frequenze ha aspetti diversi; e tuttavia si rileva che la dipendenza dalla frequenza non è *drammaticamente* sensibile (sebbene, in effetti, per frequenze “molto alte” come la $f = 12$ kHz riportata in Figura 40, il pattern del campo $TL(r,z)$ sia sensibilmente diverso).

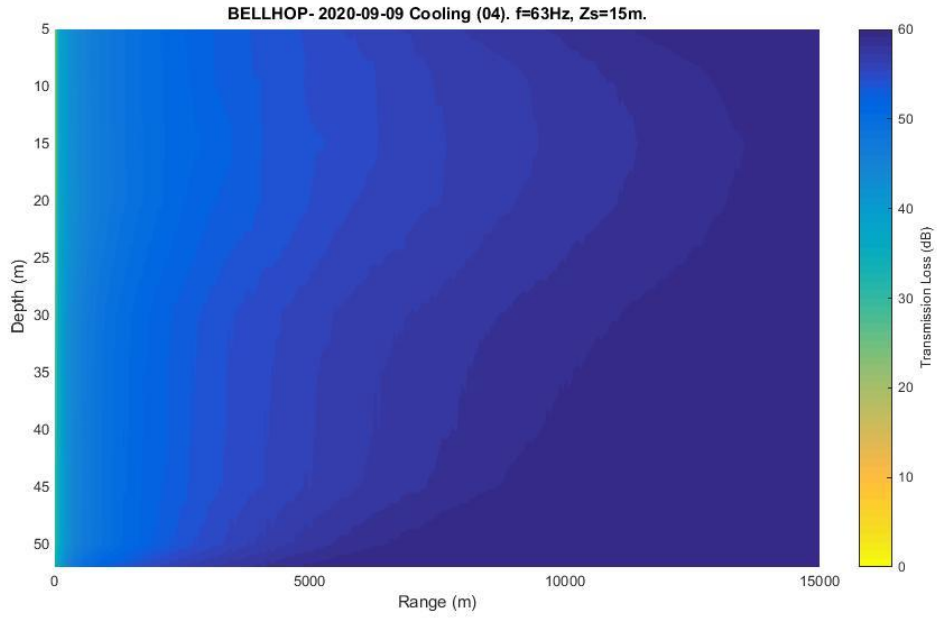


Figura 38 Rappresentazione della TL per il segnale acustico durante la fase di raffreddamento, pertinente alla componente a 63 Hz.

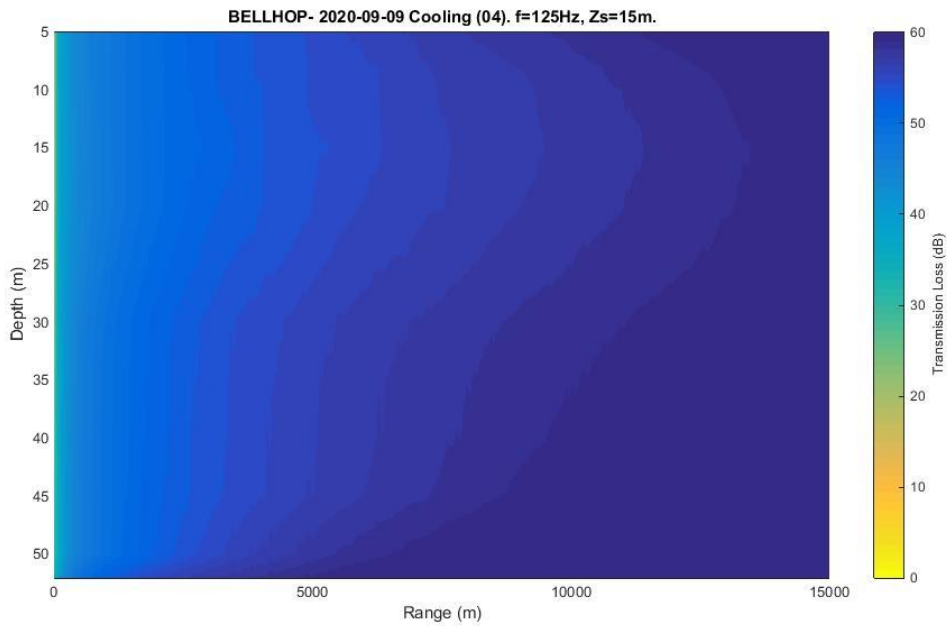


Figura 39 Rappresentazione della TL per il segnale acustico durante la fase di raffreddamento, pertinente alla componente a 125 Hz.

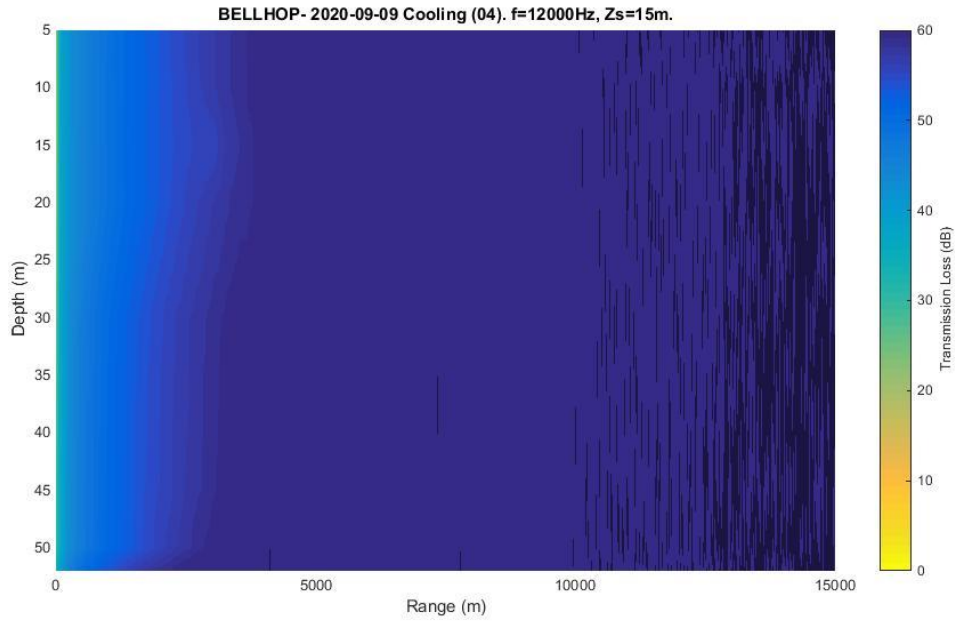


Figura 40 Rappresentazione della TL per il segnale acustico durante la fase di raffreddamento, pertinente alla componente a 12 kHz.

La variazione, a parità d’ogni altro parametro, della TL con la frequenza è ancor più rilevabile osservandone il grafico in funzione della sola distanza, a profondità fissata: dalla Figura 41 alla Figura 43 si riporta la TL(r) a profondità pari a $z = -8m$, rispettivamente per frequenza 63 Hz, 125 Hz e 12 kHz; dalla Figura 44 alla Figura 46 sono riportate le TL per quelle stesse frequenze alla profondità di $z = -55m$.

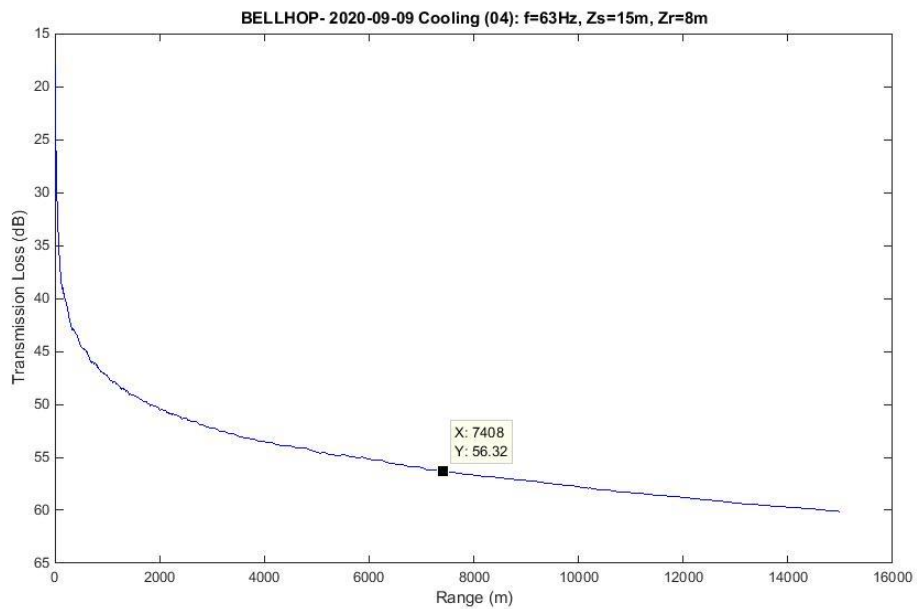


Figura 41 La dipendenza dalla sola distanza della TL per il segnale acustico durante la fase di raffreddamento, considerando la profondità di 8m e la componente in frequenza a 63 Hz.

Come previsto dalla teoria dell'acustica, al crescere della frequenza le onde sonore nel mare divengono via via più evanescenti, acquisendo una più sostanziosa TL: in particolare, mentre passando da 63 Hz a 125 Hz la TL cresce solo dello 0,02%, passando da 125 Hz a 12 kHz la TL aumenta quasi del 19%.

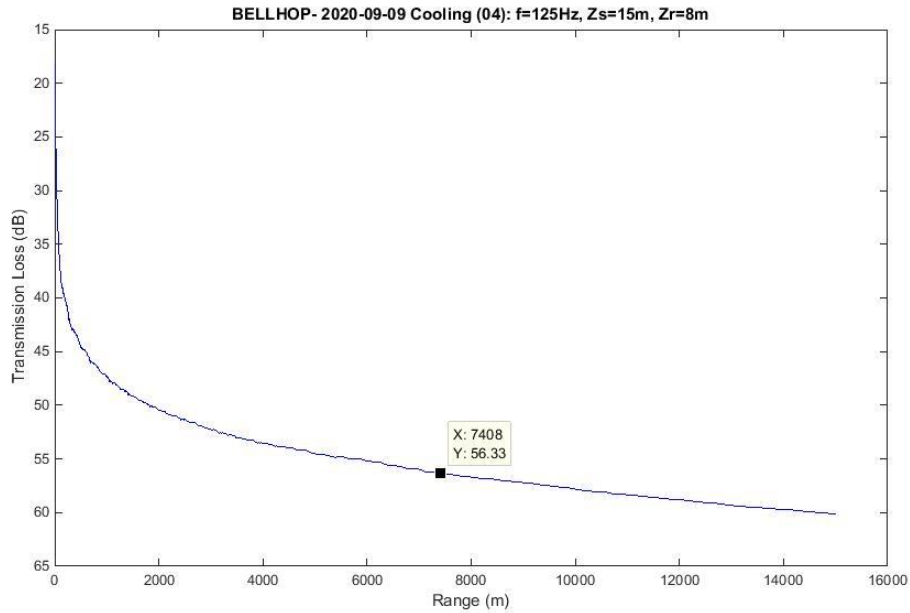


Figura 42 La dipendenza dalla sola distanza della TL per il segnale acustico durante la fase di raffreddamento, considerando la profondità di 8m e la componente in frequenza a 125 Hz.

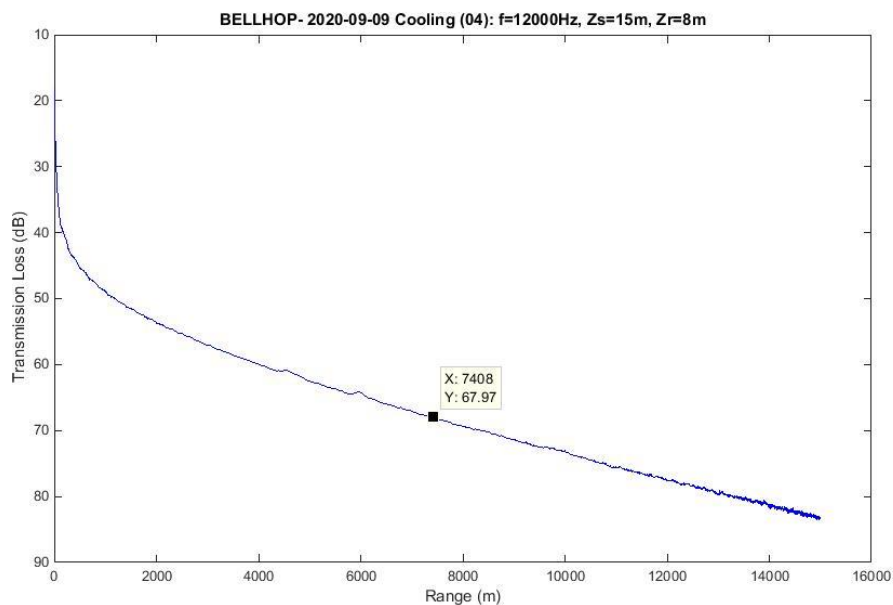


Figura 43 La dipendenza dalla sola distanza della TL per il segnale acustico durante la fase di raffreddamento, considerando la profondità di 8m e la componente in frequenza a 12 kHz.

La dipendenza della TL dalla frequenza, che con la frequenza tende a crescere rendendo l'onda più evanescente, è ovviamente confermata, nella stessa misura, anche dalle simulazioni a $z = -55\text{m}$.

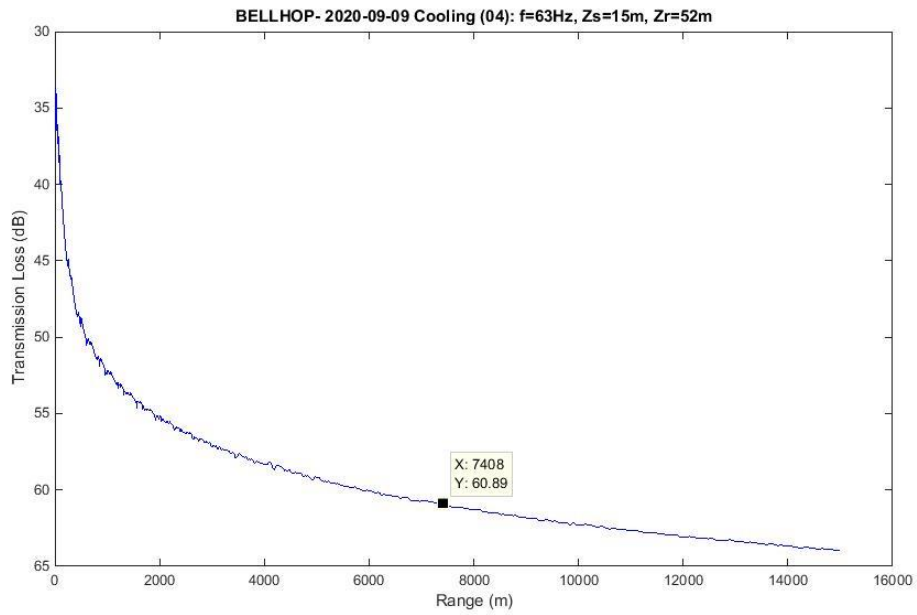


Figura 44 La dipendenza dalla sola distanza della TL per il segnale acustico durante la fase di raffreddamento, considerando la profondità di 55m e la componente in frequenza a 63 Hz.

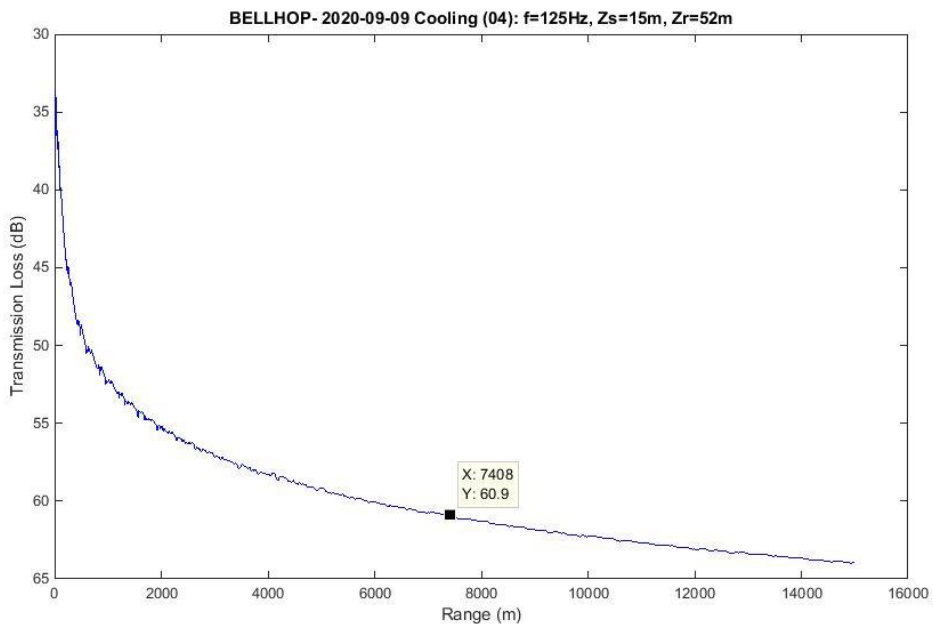


Figura 45 La dipendenza dalla sola distanza della TL per il segnale acustico durante la fase di raffreddamento, considerando la profondità di 55m e la componente in frequenza a 125 Hz.

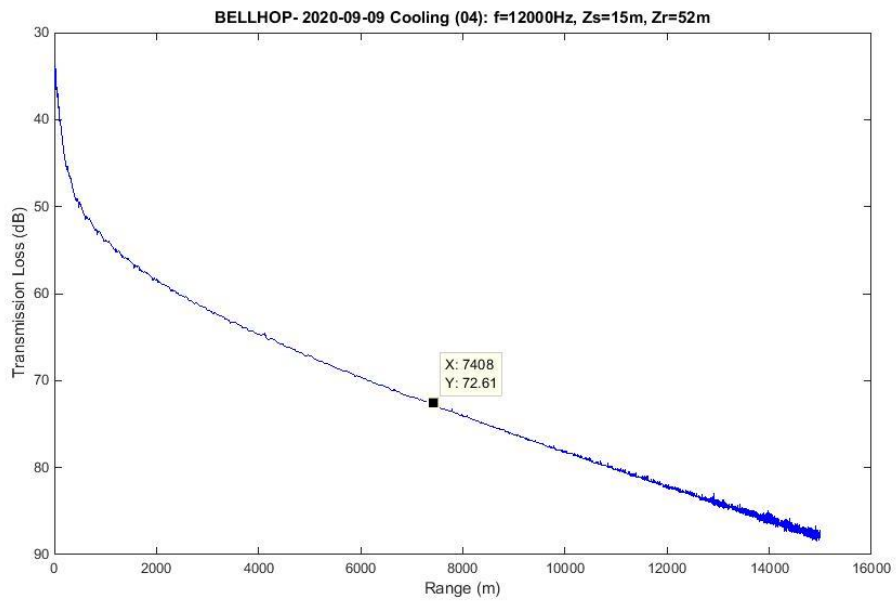


Figura 46 La dipendenza dalla sola distanza della TL per il segnale acustico durante la fase di raffreddamento, considerando la profondità di 55m e la componente in frequenza a 12 kHz.

Per maggiore leggibilità dei valori assunti, le TL alla distanza di 4 miglia nautiche sono evidenziate direttamente sul grafico: l'idrofono ha infatti acquisito le sue misure a 7408 m dalla sorgente.



OLT Offshore LNG Toscana S.p.A.



**TERMINALE GALLEGGIANTE DI RIGASSIFICAZIONE
FSRU - TOSCANA**

**VALUTAZIONE DEL RUMORE SOTTOMARINO DURANTE LE FASI DI ALLIBO DI
UNA METANIERA AL TERMINALE FSRU TOSCANA**

APPENDICE 2: Analisi acustica



Rev 0	19/01/2021	Emissione definitiva	MM/SN/CP	AMDB	CP
Rev.	Data	Descrizione della Revisione	Preparato da	Verificato da	Approvato da

Indice generale

Premessa.....	3
Capitolo 1. Analisi locale del rumore.....	3
Capitolo 1.1. Analisi statistica dei dati	4
Capitolo 1.2. Analisi spettrale	7
Capitolo 2. Ricostruzione del livello di sorgente.....	8
Capitolo 2.1. Misure locali, Equazione d'onda e livello di sorgente	8
Capitolo 2.2 – Metodo semplificato per SL Cumulato.....	9
Capitolo 2.3. Il modello BELLHOP e il calcolo di TL	10
Capitolo 2.3.1 Condizioni Oceanografiche.....	12
Riferimenti.....	13

Indice delle figure

Figura 1 - Letture dei voltaggi riportati dall'idrofono relativamente al dato '2020-09-09_15-17-38ch0.wav': si noti la differenza di amplificazione fra i due canali.	4
Figura 2 - Serie temporali della pressione sonora registrata dai due canali dell'idrofono, riportato a titolo di esempio. Si noti la parziale equalizzazione in ampiezza delle due serie, rispetto a ciò che succedeva per i voltaggi.	5
Figura 3 - Esempio di "SPL istantaneo" per i due canali dell'idrofono: in dB l'equalizzazione fra i canali è quasi completa.	5
Figura 4 - La probabilità a posteriori di avere un dato valore di pressione sonora istantanea. Nel riquadro la relazione fra questa e la probabilità che la pressione sonora istantanea ecceda una data soglia θ	6
Figura 5 - Valore del SPL su ogni minuto di dato degli 11 misurati consecutivamente (in blu), paragonato alle soglie di prima risposta comportamentale (First Behaviour Response, FBR) per i cetacei di bassa (rosso), media (ciano) ed alta (verde) frequenza.....	6
Figura 6 - Spettro di ampiezza per il Ch.1, riportato a titolo di esempio. Nel riquadro, la formula per il valore totale dell'SPL nella banda di frequenze da f_{min} ad f_{max}	7
Figura 7 - Spettro in terze d'ottava per i dati dal Ch1, a titolo di esempio'.	8
Figura 8 - il campo di transmission loss $TL(r,z)$ per ricavare il SL dalle misure dell'idrofono citate, come esempio, in § 0.	12
Figura 9 - La TL di cui in a 10 m di profondità.	12
Figura 10 - Dipendenza della velocità del suono nell'acqua nelle fasi di Avvicinamento (traccia in blu), di Raffreddamento (traccia in rosso), di Discarica (traccia in verde), di Maximum Rate (traccia ciano) e di Allontanamento (traccia nera).	13

Premessa

Come ben spiegato nel Capitolo 1, i dati raccolti dall'idrofono sono serie temporali di scostamenti istantanei della pressione, δp , dalla pressione idrostatica, dovuti al passaggio dell'onda sonora. Con tali fluttuazioni istantanee $\delta p(t)$ si costruiscono i valori di pressione sonora SPL nell'intervallo di tempo definito intervallo di misura: questo SPL è la *misura in dB del quadrato del rapporto fra RMS della pressione sonora ed una pressione di riferimento* (convenzionalmente pari a $1\mu\text{Pa}$). Nell'acquisizione dei dati si è anche definito, ad ogni istante t di misura, un SPL "istantaneo", detto $\text{SPL}(t)$, come la misura in dB del quadrato del rapporto fra la fluttuazione istantanea di pressione portata dall'onda sonora $\delta p(t)$ e la pressione di riferimento. Con tali serie temporali misurate dall'idrofono si è deciso di affrontare due tipi di analisi differenti che, approfondendo aspetti diversi, risultano complementari e ampliamenti sufficienti a caratterizzare il contesto di rumore che si realizza durante le fasi operative considerate.

- a) Con l'analisi statistica si indaga sul tempo di permanenza del valore istantaneo di rumore $\text{SPL}(t)$ al di sotto o al di sopra delle soglie indicate nelle linee guida ISPRA;
- b) Nell'analisi spettrale invece si ricava, mediante una trasformata di Fourier a partire dalla serie temporale misurata, la distribuzione in frequenza del rumore relativo ad ogni fase operativa analizzata (spettro di frequenza $\text{SPL}(f)$). Obiettivo di questo step è ricavare un valore di SL (Source Level) alla sorgente che sia immediatamente confrontabile con le soglie indicate da ISPRA e con il valore di 185 dB comunicato nel documento di VIA. Per ottenere ciò si opera mediante due strade:
 - Ottenendo nel punto di misura un valore di SPL "cumulato", ovvero un contributo di rumore risultante dal contributo di tutte le frequenze ascoltate dall'idrofono, per poi ricostruire a ritroso, attraverso una formula semplificata (ma sufficientemente accurata per stimare l'ordine di grandezza dei valori in gioco), il rumore prodotto dalla sorgente, ovvero il SL anch'esso "cumulato". Questo approccio è evidentemente conservativo poiché ingloba nel valore finale sicuramente contributi provenienti da fonti diverse dal sistema FSRU-Metaniera-Rimorchiatori, e perché va a sommare anche frequenze che i Cetacei non possono udire;
 - Individuando delle frequenze caratteristiche dei mezzi coinvolti nell'analisi (metaniera, rimorchiatori e Terminale), isolando dallo spettro a quelle frequenze i relativi valori di $\text{SPL}(f)$ e propagando questi ultimi a ritroso fino alla sorgente per ottenere i valori di $\text{SL}(f)$ per essere confrontati con le soglie già citate in precedenza. Questa propagazione "monocromatica" (ovvero relativa ad una sola frequenza) viene operata questa volta per mezzo di un modello di propagazione acustica (modello BELLHOP) che necessita come dato di input anche dello stato del mezzo in cui il rumore si propaga, ovvero i dati misurati dalla sonda CTD. Infine, con lo stesso procedimento e lo stesso strumento modellistico, a partire da ogni $\text{SL}(f)$ ottenuta, è possibile ricavare per ogni frequenza analizzata la distanza dalla fonte di rumore a cui l' $\text{SPL}(f)$ risulta inferiore alle soglie ISPRA scelte.

Nella presente Appendice, si entra nei dettagli matematici dell'approccio appena proposto. L' Appendice è dunque così organizzata:

- nel Capitolo 1 viene descritta l'analisi locale del rumore, ossia l'analisi dei dati così come sono collezionati direttamente dall'idrofono: a carico di questo tipo di analisi non vi è alcuna ipotesi fisica restrittiva sulla natura del mezzo acustico "mare", sebbene si facciano delle assunzioni statistiche di ergodicità che permettono di valutare la stocasticità delle fluttuazioni del rumore dalle variazioni temporali di questo.
- gli studi presentati nel capitolo 2 invece, occupandosi della diagnosi del livello di sorgente (*source level*, SL) cioè di fatto l'SPL in prossimità della sorgente del rumore, dove esso *non* viene direttamente misurato, si fondano su come la propagazione del rumore avvenga nel mare attorno al Terminale "FSRU Toscana". Queste ipotesi sono fondanti dell'uso del modello acustico adottato, richiamato nel capitolo 2.1, che permette di arrivare al calcolo della quantità che maggiormente interessa, ossia la perdita in trasmissione (*transmission loss*, TL) richiamata nel capitolo 2.2.

Capitolo 1. Analisi locale del rumore

Per ogni intervallo temporalmente continuo di misura (lungo al più un minuto), l'idrofono raccoglie due serie temporali $d_1(t)$ e $d_2(t)$, che corrispondono rispettivamente alle letture dei voltaggi (espressi in V) nel canale Ch1 (con sensibilità dichiarata dal costruttore di -186 dB re $V/1\mu\text{Pa}$), e nel canale Ch2 (del quale il costruttore dichiara una sensibilità di -148 dB re $V/1\mu\text{Pa}$). Queste serie temporali di voltaggio vengono facilmente tradotte in serie temporali di fluttuazioni di pressione $p_1(t)$ e $p_2(t)$, la pressione sonora espressa in μPa , misurata su ciascuno dei due canali (questi valori $p_i(t)$ sono numeri reali sia positivi che negativi, poiché rappresentano la fluttuazione di pressione rispetto all'equilibrio idrostatico del mezzo, associata all'onda sonora). Le serie temporali sono tutte equispaziate, con una frequenza di campionamento F_s pari a 192 kHz e tempo di campionamento di $\tau_s = 5.2083 \cdot 10^{-6}$ s (relativamente molto piccolo:

questo comporterà in effetti l'accesso a delle frequenze così elevate che non debbono essere considerate di grande interesse per la bioacustica dei Cetacei).

La trattazione locale dei dati si fa direttamente a partire dalle serie temporali $d_1(t)$ e $d_2(t)$ per ogni minuto di misura, disponendo delle sensibilità per Ch1 e Ch2, od anche sulle serie "più fisicamente leggibili" $p_1(t)$ e $p_2(t)$. a lettura delle serie di voltaggi produce le due "evoluzioni temporali" mostrate in Figura 1 la differenza fra le due serie è dovuta alla diversa amplificazione a cui sono soggetti i due canali dell'idrofono. Il confezionamento delle serie temporali $p_1(t)$ e $p_2(t)$ produce le evoluzioni di cui in Figura 2

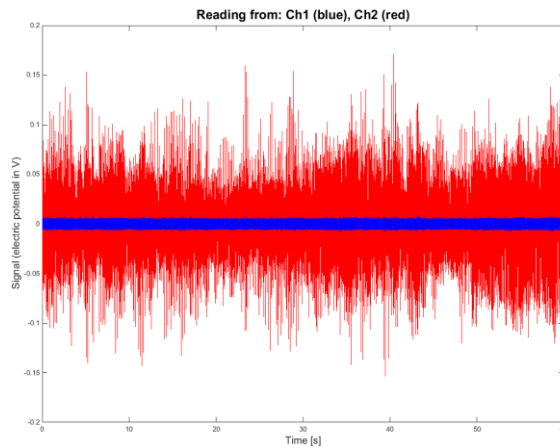


Figura 1- Letture dei voltaggi riportati dall'idrofono relativamente al dato '2020-09-09_15-17-38ch0.wav': si noti la differenza di amplificazione fra i due canali.

Capitolo 1.1. Analisi statistica dei dati

Dalle serie temporali dell'idrofono vogliamo ottenere delle indicazioni sulla pressione sonora, e sui suoi effetti biologici sui Cetacei; tradizionalmente si fa riferimento al *sound pressure level* (SPL), definito come il rapporto in dB fra lo scarto quadratico medio rispetto alla pressione idrostatica dell'ambiente, e una pressione di riferimento p_0 , che in acqua prendiamo pari a $1\mu\text{Pa}$. Qui diamo, inoltre, una definizione di $SPL(t)$ considerando *in ogni istante* il rapporto fra il valore assoluto della *fluttuazione istantanea* $p(t)$ ricavata dall'idrofono e la stessa p_0 : tale quantità è poi espressa in dB. Le serie temporali $SPL(t)$ per i due canali sono riportate nella Figura 3 nell'insero bianco, sovrapposto al tracciato delle serie temporali, la formula della definizione di SPL istantaneo al tempo t . Fra l'altro, in Figura 3 si vede come i valori più importanti dell'SPL istantaneo vengano assunti dal suono come registrato nel Ch1. Il fatto che l'equalizzazione dei canali in termini di SPL istantaneo non sia *esatta*, manifesta la naturale problematicità dell'uso delle calibrazioni nominali dello strumento: conforta però nei grafici in Figura 3 lo scarto di pochi dB fra i due $SPL(t)$.

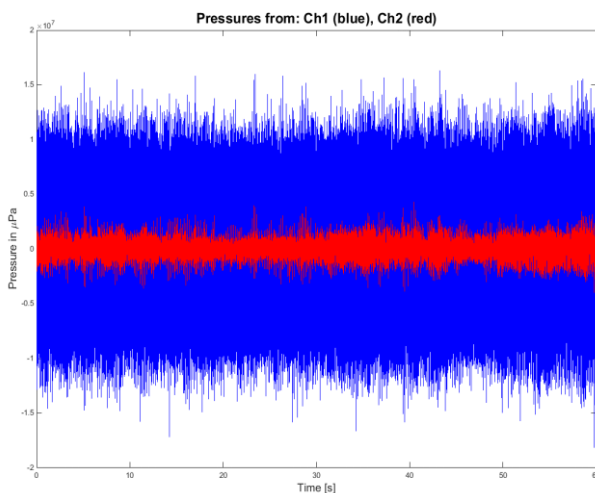


Figura 2 - Serie temporali della pressione sonora registrata dai due canali dell'idrofono, riportato a titolo di esempio. Si noti la parziale equalizzazione in ampiezza delle due serie, rispetto a ciò che succedeva per i voltaggi.

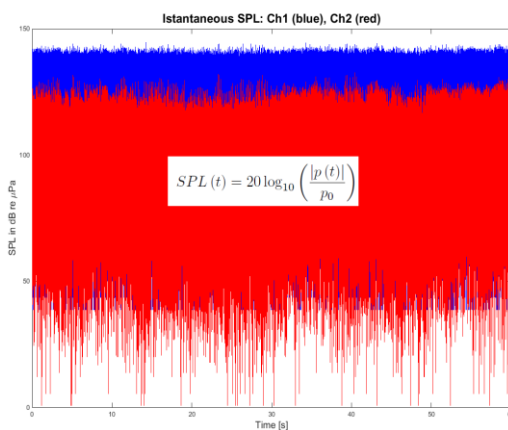


Figura 3 - Esempio di "SPL istantaneo" per i due canali dell'idrofono: in dB l'equalizzazione fra i canali è quasi completa.

Il significato di ciascun valore di $SPL(t)$ è quello del *livello di pressione sonora ad ogni istante*: se costruiamo la *distribuzione statistica* di quei valori avremo la distribuzione del livello di pressione sonora nel tempo (un minuto) delle osservazioni fatte. Tali distribuzioni, ottenute semplicemente come istogrammi normalizzati a 1 degli insiemi di numeri $\{SPL_1(t)\}$ ed $\{SPL_2(t)\}$, esprimono, per ogni valore dell'SPL considerato, la porzione di tempo in cui c'è stata quella pressione sonora istantanea. Nel caso della registrazione '2020-09-09_15-17-38ch0.wav' le due distribuzioni sono quelle riportate in Figura 4 il senso fisico di queste curve è richiamato nel riquadro dello stesso grafico, dove la frazione del tempo di misura in cui la pressione sonora istantanea supera una certa soglia θ , $P(SPL(t) \geq \theta)$, è data semplicemente dalla somma dei valori della distribuzione con $SPL(t)$ da θ in poi. Per ottenere la percentuale del tempo di misura in cui avviene lo stesso sfioramento, ci si limita a moltiplicare codesta $P(SPL(t) \geq \theta)$ per un fattore 100. L'uso di questa informazione è semplicemente quello di mettere le soglie bioacustiche (ISPRA) al posto del valore di θ per valutare, nel dato intervallo di tempo in cui si è fatta la misura, quanta percentuale di quel tempo ha visto l'SPL istantaneo superare tali soglie.

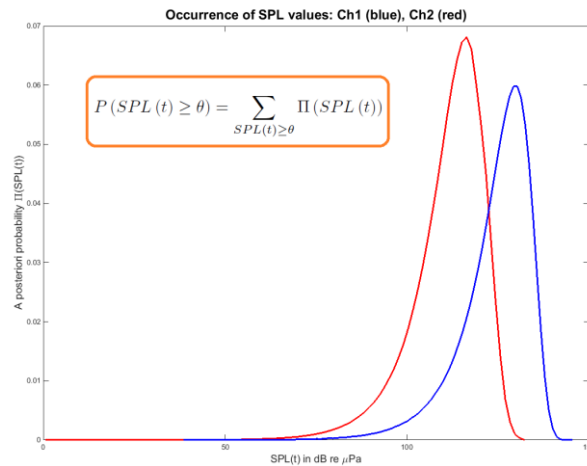


Figura 4 - La probabilità a posteriori di avere un dato valore di pressione sonora istantanea. Nel riquadro la relazione fra questa e la probabilità che la pressione sonora istantanea ecceda una data soglia θ .

Naturalmente, dalle serie delle pressioni $p_1(t)$ e $p_2(t)$ si ricavano anche indicatori più tradizionali, già riportati nella referenza [2] (*Valutazione del rumore sottomarino durante le fasi di allibo di una metaniera al terminale FSRU Toscana – Registrazione e analisi del rumore prodotto*, Maggio 2020), come i valori di SPL di picco e l'SPL “medio” (ossia il valore quadratico medio della $p(t)$ in esame sull'intervallo di tempo di misura).

A partire dalle distribuzioni dei livelli di pressione del suono istantanei si è in grado di calcolare la percentuale del tempo della misura in cui $SPL(t)$ supera le soglie riportate nelle Linee guida ISPRA [6] riportate nel corpo del documento principale, ciascuna soglia essendo relativa alla fisiologia di uno specifico gruppo di Cetacei: in particolare, si sono considerati i valori per emissioni sonore non impulsive (perforazione, passaggio di navi, ...), giudicandola la classe di rumori più simili a quello che è il campo acustico del caso in esame. Di seguito si propone un esempio di confronto in cui abbiamo scelto il valore di SPL soglia θ , invocato nel riquadro della Figura 5, pari a $\theta_{LFC} = 105$ dB re $1\mu\text{Pa}$, $\theta_{MFC} = 115$ dB re $1\mu\text{Pa}$ e $\theta_{HFC} = 145$ dB re $1\mu\text{Pa}$ per i *Cetacei di bassa, media ed alta frequenza* rispettivamente.

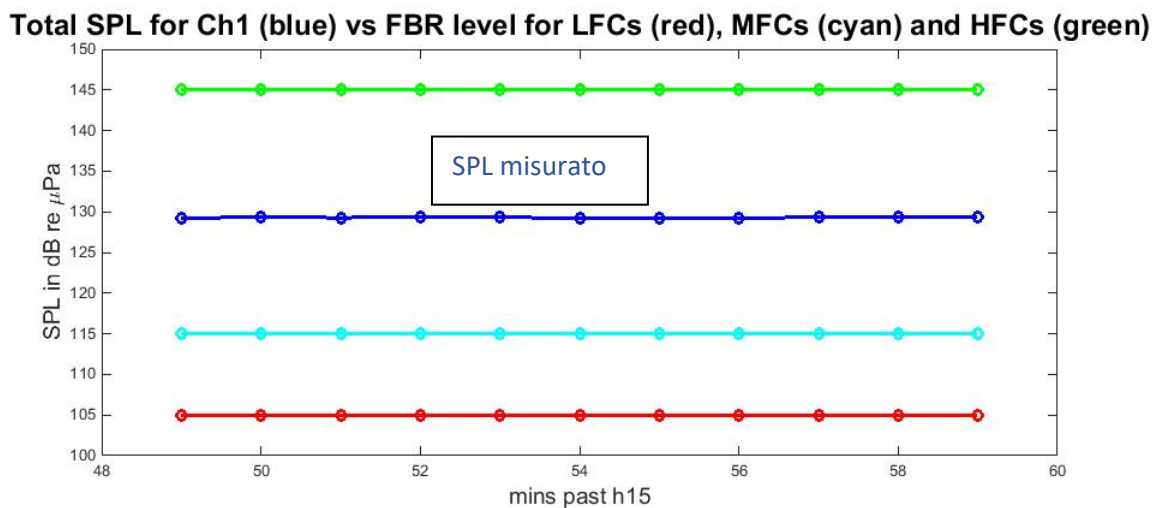


Figura 5 - Valore del SPL su ogni minuto di dato dei 10 misurati consecutivamente (in blu), paragonato alle soglie di prima risposta comportamentale (First Behaviour Response, FBR) per i cetacei di bassa (rosso), media (ciano) ed alta (verde) frequenza.

È importante precisare che il valore di SPL al minuto è calcolato includendo l'energia sonora di tutta la banda di frequenze, da 0 Hz a 40 kHz: così facendo confrontiamo, con i livelli di FBR, TTS e PTS, l'intera energia sonora che raggiunge l'apparato uditivo dei

cetacei. Si tratta di una valutazione cautelativa: le bande uditive dei tre gruppi funzionali di cetacei hanno finestre di frequenze udibili molto vaste e sovrapposte (per i LFC da 7 Hz a 22 kHz, per i MFC da 150 Hz a 160 kHz, per gli HFC da 200 Hz a 180 kHz), che coprono quasi tutta la banda emessa. Perciò non appare esagerato, sebbene *molto cautelativo*, considerare l'SPL cumulativo in frequenza per questi confronti.

Capitolo 1.2. Analisi spettrale

Fino a questo momento il suono registrato è stato trattato senza distinguerne le *componenti in frequenza*. È però notevole la natura “a banda larga” dei segnali: basta calcolare lo spettro di ampiezza $A(f)$ (periodogramma) di uno dei due segnali fisici, per esempio $p_1(t)$, come riportato in Figura 6 per dimostrare che una larghissima banda di frequenze contribuisce significativamente al dato. Il calcolo di questi spettri, fatto con la più tradizionale trasformata di Fourier delle pressioni, è importante perché può essere usato per calcolare il valore dell'SPL pertinente ad una certa banda fra una frequenza f_{\min} ed una frequenza f_{\max} , secondo l'integrale riportato nel riquadro di cui in Figura 6.

L'uso che si fa della grandezza indicata come $SPL(f_{\min}, f_{\max})$ sarà quello di restringere il livello di pressione sonora “totale” relativo alle sole bande di frequenza udibili da questo o quell'altro gruppo funzionale acustico di Cetacei, così come presentati in [2]. Per i cetacei di “bassa frequenza” si intende un intervallo $(f_{\min}, f_{\max}) = (7 \text{ Hz}, 22 \text{ kHz})$, per quelli di “media frequenza” l'intervallo è $(f_{\min}, f_{\max}) = (150 \text{ Hz}, 160 \text{ kHz})$, mentre per quelli di “alta frequenza” vale $(f_{\min}, f_{\max}) = (200 \text{ Hz}, 180 \text{ kHz})$.

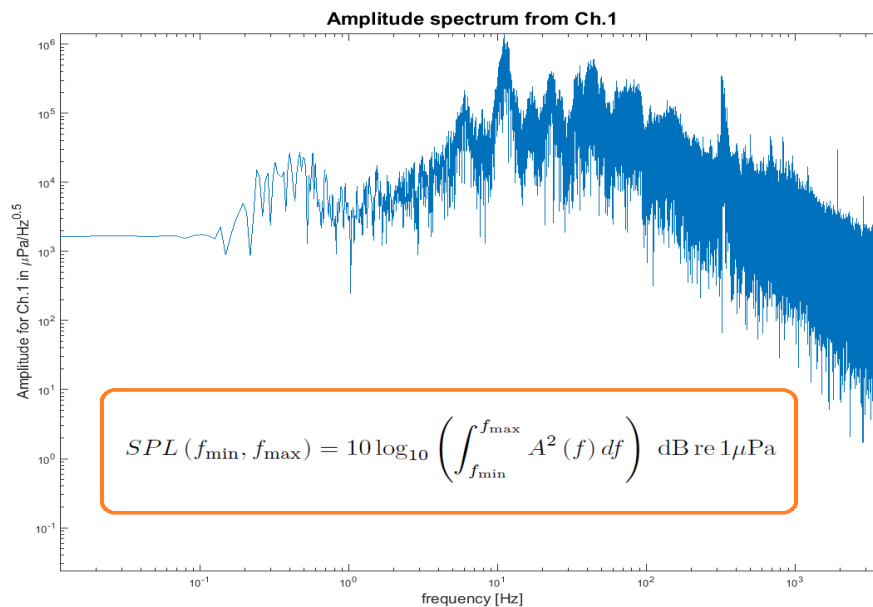


Figura 6 - Spettro di ampiezza per il Ch.1, riportato a titolo di esempio. Nel riquadro, la formula per il valore totale dell'SPL nella banda di frequenze da f_{\min} ad f_{\max} .

Per una maggiore leggibilità, gli spettri possono essere rappresentati anche in terze d'ottava, ossia considerando un insieme di frequenze “sottocampionato” rispetto a tutti i valori di f ammessi dalla trasformata di Fourier della serie temporale: si parla di “terze d'ottava” perché l'assortimento delle frequenze viene scelto in modo che ogni “ottava” (cioè ogni passo unitario su una scala logaritmica in base 2 dell'asse delle frequenze) sia popolata da tre frequenze. Nello spettro di frequenze che va da 20 Hz a 40 kHz le frequenze scelte f_{III} possono essere, per esempio: $f_{III} = 20\text{Hz}, 25\text{Hz}, 31\text{Hz}, 39\text{Hz}, 50\text{Hz}, 63\text{Hz}, 79\text{Hz}, 99\text{Hz}, 125\text{Hz}, 157\text{Hz}, 198\text{Hz}, 250\text{Hz}, 315\text{Hz}, 397\text{Hz}, 500\text{Hz}, 630\text{Hz}, 794\text{Hz}, 1000\text{Hz}, 1260\text{Hz}, 1587\text{Hz}, 2000\text{Hz}, 2520\text{Hz}, 3175\text{Hz}, 4000\text{Hz}, 5040\text{Hz}, 6350\text{Hz}, 8000\text{Hz}, 10079\text{Hz}, 12699\text{Hz}, 16000\text{Hz}, 20159\text{Hz}, 25398\text{Hz}, 32000\text{Hz}$ e 40317Hz : il grafico della densità spettrale di potenza del solito intervallo di dati seguito sin qui è rappresentato in Figura 7, non su tutte le frequenze ammesse dalla trasformata di Fourier, come in Figura 6, ma solo per i valori di f_{III} .

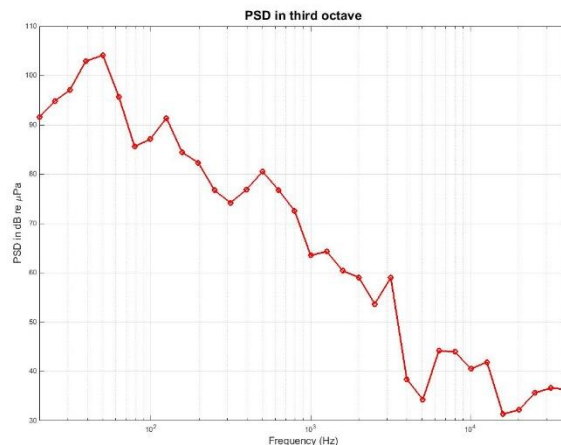


Figura 7 - spettro in terze d'ottava per i dati dal Ch1, a titolo di esempio'.

Capitolo 2. Ricostruzione del livello di sorgente

Con le analisi sopra descritte si caratterizza completamente il rumore registrato nella posizione dell'idrofono. L'obiettivo dei monitoraggi è però quello di caratterizzare il rumore così com'è emesso alla sua sorgente, virtualmente a un metro di distanza dal "punto" in cui la sorgente è concepita. Supponendo che la sorgente sia localizzata nella posizione \mathbf{x}_S , e il ricevitore (idrofono) nella posizione \mathbf{x} , viene definita la funzione transmission loss TL la quantità per cui la relazione fra l'SPL in \mathbf{x} e quello in \mathbf{x}_S , detto *Source Level* (SL), vale:

$$SL = SPL(\mathbf{x}) + TL(\mathbf{x} - \mathbf{x}_S)$$

Per conoscere SL a partire dalle misure di SPL occorre quindi metterci in grado di calcolare la quantità TL opportuna: vediamo più nel dettaglio come si arriva ad essa procedendo per step all'interno del prossimo Capitolo.

Capitolo 2.1. Misure locali, Equazione d'onda e livello di sorgente

Nella posizione \mathbf{x}_S della sorgente viene prodotta una fluttuazione di pressione $p(\mathbf{x}_S)$: questo dà in maniera deterministica la fluttuazione di pressione $p(\mathbf{x})$ che si registra in qualsiasi altro punto \mathbf{x} dello spazio, mediante l'*Equazione dell'onda sonora* (EOS). Il campo acustico $p(\mathbf{x})$ è determinato univocamente dal valore $p(\mathbf{x}_S)$, dall'*indice di rifrazione acustico* del mezzo n , dalle *condizioni al contorno* (cond.∂) che le fluttuazioni di pressione hanno ai confini del mezzo stesso, dalla *geometria relativa* delle posizioni \mathbf{x}_S ed \mathbf{x} . L'implicazione logica

$$p(\mathbf{x}_S) \xrightarrow{EOS, n, cond. \partial} p(\mathbf{x}),$$

utile a determinare il rumore in \mathbf{x} a partire dalla emissione in \mathbf{x}_S , può essere invertita, per ottenere univocamente, a partire dalla conoscenza di $p(\mathbf{x})$ e delle condizioni al contorno e di n , il valore di $p(\mathbf{x}_S)$. Nel nostro monitoraggio dell'inquinamento acustico faremo proprio l'operazione di ricavare il campo in \mathbf{x}_S , posizione della sorgente, che *non* misuriamo, a partire dalle misure nelle stazioni dell'imbarcazione, cioè il campo nelle posizioni \mathbf{x}

$$p(\mathbf{x}) \xrightarrow{EOS, n, cond. \partial} p(\mathbf{x}_S).$$

frutto delle nostre misure. Più che le fluttuazioni di pressione verranno messe in relazione i livelli di pressione sonora in \mathbf{x} ed in \mathbf{x}_S , cioè il *sound pressure level* presso \mathbf{x} , definito come

$$SPL(\mathbf{x}) = 20 \log_{10} \left(\frac{|p(\mathbf{x})|}{p_0} \right),$$

con p_0 pressione di riferimento di solito uguale a $1 \mu\text{Pa}$, ed il *source level* (SL), cioè l'SPL nella posizione \mathbf{x}_S della sorgente,

$$SL = 20 \log_{10} \left(\frac{|p(\mathbf{x}_S)|}{p_0} \right) = SPL(\mathbf{x}_S).$$

Convenzionalmente, si definisce la *transmission loss* (TL) come differenza fra il SL e il SPL:

$$TL(\mathbf{x}) = SL - SPL(\mathbf{x}) :$$

mettendo insieme le due definizioni, otterremo facilmente la TL espressa come

$$TL(\mathbf{x}) = 20 \log_{10} \left(\frac{|p(\mathbf{x}_S)|}{|p(\mathbf{x})|} \right).$$

Per un mezzo acusticamente passivo, come l'acqua del mare, la pressione sonora alla sorgente $|p(\mathbf{x}_S)|$ è necessariamente maggiore di quella nei punti lontano da essa $|p(\mathbf{x})|$, cosicché il logaritmo che rappresenta TL è sempre maggiore di zero. Coerentemente, la quantità SL è sempre maggiore della quantità SPL in punti diversi dalla posizione della sorgente. A partire dal valore di $SPL(\mathbf{x})$ ottenuto mediante le misure acquisite dall'idrofono, sarà sufficiente applicare la relazione

$$SL = SPL(\mathbf{x}) + TL(\mathbf{x} - \mathbf{x}_S)$$

per poter ottenere il livello sonoro di sorgente SL.

Come premesso, il calcolo di TL necessita di un metodo che costruisca $p(\mathbf{x})$ a partire da $p(\mathbf{x}_S)$, in modo che le fluttuazioni di pressione siano espresse l'una in funzione dell'altra; *rigorosamente* questo "metodo" sarebbe la scrittura della EOS, un'equazione differenziale alle derivate parziali molto difficile da gestire per uno scenario realistico marino: perciò, si fa ricorso a una *teoria semplificata* equivalente alla EOS in opportune condizioni, ossia un *modello di propagazione acustica* (MPA). Il MPA adottato nello studio è il modello BELLHOP, descritto nel Capitolo 2.3. Nel Capitolo 2.2 riportiamo la metodologia per un metodo semplificato e conservativo allo stesso tempo, che permette di calcolare il valore di SL cumulato su tutto lo spettro di frequenze.

Capitolo 2.2 – Metodo semplificato per SL Cumulato

La sorgente durante gli allibi è una multisorgente derivante dal rumore generato da Terminale, rimorchiatori e nave metaniera, che emettono rumore a frequenze predominanti diverse. Per tale motivo si parla di "sorgente equivalente". Per questo, ha senso riferirsi sia alla SL "cumulativa", cioè complessiva, distribuita su tutte le molte frequenze d'emissione; sia alla $SL(f)$ "per banda di frequenza", che misura l'energia acustica emessa attorno ad una specifica frequenza f . Le due grandezze non sono fisicamente indipendenti, visto il segnale "totale" contiene tutte le sue componenti in frequenza, ma rappresentano informazioni complementari nella nostra strategia di monitoraggio e trattamento dei dati.

Il calcolo della SL cumulativa fornisce una misura cautelativa di tutta la potenza acustica emessa dalla sorgente: verificheremo che questo valore sia ben al di sotto dei livelli di barotrauma TTS e PTS (soglie come da tabelle delle linee guida ISPRa [6], così da essere certi che le emissioni acustiche che stiamo sorvegliando siano, già alla loro sorgente, incapaci di nuocere alle specie di interesse.

Il calcolo della TL, in ogni caso, è fatto mediante un modello di propagazione acustica nel mare, inteso come una guida d'onda meccanica: così come consentono di simulare il campo acustico nei vari punti dello spazio a partire dalla conoscenza delle caratteristiche della sorgente e del mezzo, i modelli acustici consentono di conoscere "a ritroso" la SL a partire dalle misure di rumore effettuate in un certo punto noto, e le condizioni del mezzo.

Quando si vuol calcolare la TL cumulativa, si usa una formula molto approssimativa, ma anche efficace, in cui il suono è una sovrapposizione di onde cilindriche e sferiche. Si ha [7]:

$$TL(r, z) = 15 \log_{10} \left(\frac{d}{1\text{m}} \right);$$

la distanza d fra la sorgente ed il ricevitore è costruita come:

$$d = \sqrt{r^2 + (z_R - z_S)^2},$$

detta r la distanza fra l'idrofono e la verticale della sorgente, z_R la profondità dell'idrofono e z_S quella della sorgente. In questo studio si assume $z_S = -15$ m. Possiamo in questa maniera ricavare la SL cumulativa mediante la conoscenza delle TL e degli SPL.

A proposito della formula semicilindrica, appare anche chiaro che, in essa comparando soltanto la distanza fra sorgente e ricevitore, non vi è traccia della dipendenza della velocità del suono nel mezzo dal punto, visto che in effetti è rigorosamente valida solo per un mezzo perfettamente omogeneo, in cui il suono non subisca gradienti di rifrazione: ciò preclude, fra l'altro, la possibilità di evidenziare l'effetto della presenza/assenza del termoclino superficiale utilizzando questa formula, che va presa solo come dispensatrice di un ordine di grandezza della SL dato l'SPL.

Capitolo 2.3. Il modello BELLHOP e il calcolo di TL

L'analisi del Source level ad una data frequenza $SL(f)$ presentata in questo capitolo verrà utilizzata per effettuare un opportuno confronto con i valori limiti di disturbo comportamentale FBR (limiti soglia delle prime risposte comportamentali delle linee guida ISPRA [6]).

Il calcolo, della $SL(f)$ verrà fatto specificamente per una serie di frequenze dello spettro in terze d'ottava (Figura 7), in modo da perseguire due risultati: da una parte, tentare una possibile identificazione della sorgente della specifica componente di Fourier, o della sua maggior parte, avvalendosi delle informazioni di letteratura delle frequenze di emissione delle singole sorgenti (Terminale, Rimorchiatori e nave di appoggio) dall'altra, considerando lo specifico gruppo funzionale di cetacei (LFC, MFC, HFC), nel cui spettro uditivo cade la frequenza in esame, confrontare la $SL(f)$ con le soglie FBR, ed eventualmente verificare a quale distanza dalla sorgente stessa il risultante $SPL(f)$ scende sotto la soglia di prima risposta comportamentale in esame.

Conseguentemente alla definizione di SL cumulativa e frequenza-specifica, la TL viene calcolata in modo diverso a seconda che serva per mettere in relazione SL ed SPL "cumulativi", oppure pertinente ad una particolare componente monofrequenza (per cui useremo il simbolo $TL(f)$, con riferimento alla particolare banda di frequenza f). La versione monofrequenza della precedente relazione fra SL, TL ed SPL è:

$$SL(f) = PSD(f) + TL(f).$$

Il calcolo della TL è fatto mediante un modello di propagazione acustica nel mare, così come spiegato nel Capitolo 2.1, inteso come una guida d'onda meccanica: la cosa matematicamente interessante della trattazione dei segnali monofrequenza è che essi sono facilmente trattabili, se questa frequenza è opportunamente elevata (se cioè la lunghezza d'onda associata è molto minore delle scale di variabilità del mezzo stesso), come propagazioni *radiali*, perciò trattabili con codici che nominalmente integrano equazioni differenziali ordinarie anziché le equazioni alle derivate parziali che descriverebbero esattamente il fenomeno ondulatorio.

Il modello di propagazione radiale che qui si utilizza è il *modello BELLHOP*, realizzato da M. Porter, e reso disponibile dalla "Heat, Light, and Sound Research, Inc." alla comunità scientifica. Il modello è introdotto in letteratura, per esempio, in [3]; un manuale di BELLHOP è scaricabile da [4]. Il modello BELLHOP fa parte di una più ampia famiglia di modelli idroacustici, dovuti sempre al gruppo di ricerca di Porter, e riuniti nell'"Acoustic Toolbox" scaricabile alla pagina web [5].

Nel modello adottato il mare è una guida d'onda confinante superiormente con l'aria ed inferiormente con il fondale. Questi due "confini" (su cui saranno date le $cond.\partial$) potrebbero essere tutt'altro che piani e paralleli, tant'è che il BELLHOP ammette una altimetria ed una batimetria non banale da includere nelle $cond.\partial$; nelle operazioni pratiche, causa anche le semplificazioni imposte dalla strumentazione di supporto utilizzata, *la superficie del mare deve essere piatta, mentre il fondo del mare ha una batimetria semplificata, ma ispirata a quella reale*. Come detto nel Capitolo 2.1, oltre alle $cond.\partial$ occorre, per legare $p(\mathbf{x})$ a $p(\mathbf{x}_s)$ determinando $TL(\mathbf{x})$, la conoscenza dell'indice di rifrazione acustico n nel mezzo: questa sarà data dalla conoscenza della *velocità del suono nel mare*, indicata come c_s , misurata mediante la sonda CTD nelle stazioni in cui si acquisiscono le misure di rumore.

I raggi acustici con cui nel modello BELLHOP si descrivono le onde sonore sono punto per punto perpendicolari al fronte d'onda; essi si dipartono dalla sorgente e, incurvandosi come dettato dal gradiente spaziale di c_s , fino a rimbalzare nei punti di discontinuità spaziale di tale velocità (ai confini della guida d'onda, cioè, al passaggio fra acqua ed aria, o fra acqua e fondo marino), raggiungono le posizioni \mathbf{x} , dove determinano il campo acustico $p(\mathbf{x})$. I raggi acustici sono caratterizzati, oltre che dalla direzione iniziale che si diparte dalla sorgente, anche dalla frequenza: infatti, si arriva alla rappresentazione radiale risolvendo l'equazione d'onda sonora mediante scomposizione in onde piane di Fourier del campo p stesso, e a ogni fronte d'onda di frequenza assegnata si fa corrispondere un raggio la cui dinamica nel mezzo *dipende* dalla frequenza della componente che quel raggio approssima. Così, dalla sorgente il modello BELLHOP fa partire molti raggi sonori di geometria e frequenza diversa, che finiscono per interferire nel punto \mathbf{x} a cui si è interessati determinando $p(\mathbf{x})$.

Nella schematizzazione adottata per l'utilizzo del modello BELLHOP si calcola la propagazione dell'onda in uno spazio "cilindrico", fatto di piani verticali passanti per la verticale di \mathbf{x}_s , ogni punto dei quali è rappresentato da una coppia di coordinate z , la

profondità, ed r , la distanza dalla verticale della sorgente stessa. Il campo acustico può essere calcolato su ciascun piano verticale. Le stazioni di misura durante il monitoraggio “stand alone” sono orientate sulle direttrici Sud-Nord ed Est-Ovest, per cui si individuano quattro semipiani su cui calcolare $p(r,z)$: verso Sud, verso Nord, verso Est e verso Ovest, con l’asse delle z sulla verticale della sorgente. Inoltre, lungo ciascuna delle quattro direttrici giacciono diverse stazioni, tipicamente a 100 m, 1 km, e 10 km dalla sorgente, ragion per cui la sonda che misura la velocità del suono $c_s(r,z)$ riporterà, per esempio, queste misure con $r = 100$ m, 1 km, , 10 km.

Anche se, in linea di principio, la velocità del suono dipende sia da r che da z , come $c_s(r,z)$, nell’uso del modello BELLHOP ci si accontenta di usare una c_s , e quindi un indice di rifrazione sonoro, dipendente dalla sola profondità, come $c_s(z)$: per ciascuna stazione di misurazione, si considererà che il “semipiano cardinale” che la contiene sia caratterizzato da un unico profilo $c_s(z)$ risultante dalle misure effettuate in quella stazione stessa.

Tale profilo viene utilizzato dal modello BELLHOP come la velocità del suono sul semipiano cardinale contenente la stazione in esame; con esso, il BELLHOP traccia i raggi acustici che collegano la posizione della sorgente $(r, z) = (0, z_s)$ a un certo numero di “ricevitori” immaginari, che costituiscono una vera griglia, più o meno fitta a seconda delle impostazioni regolabili dall’utente, di posizioni (r, z) sul semipiano stesso.

Quando si conducono le campagne di monitoraggio del rumore durante l’allibio di metaniera, grandi o *small scale*, l’imbarcazione si manterrà invece a 4 n.m. dal Terminale in una posizione sola, scelta in modo da ottimizzare l’ascolto del rumore della nave in arrivo o in partenza, e questa posizione non necessariamente giacerà su un semipiano cardinale.

Tracciati i raggi acustici, il modello “si ricorda” che quelle traiettorie sono semplicemente un modo di rappresentare il suono, e quindi “mette in campo” la *natura ondulatoria* di quest’ultimo per calcolare il campo $p(r,z)$ in tutte le posizioni del piano: il BELLHOP è capace di calcolare $p(r,z)$ sotto diverse ipotesi, selezionabili dall’utente, che rappresentano diversi gradi di approssimazione della *natura ondulatoria del suono* mediante i raggi.

Anzitutto, i raggi *interferiscono*, visto che rappresentano fronti d’onda; si possono scegliere diversi tipi di interferenza, ed in particolare si sceglie un’ipotesi di *interferenza incoerente*: questo serve a tener conto della rifrazione molto complicata che la superficie del mare, fittamente ondata, produce sui raggi che riflette verso il basso, dando un effetto diffrattivo locale. Si potrebbe obiettare che quando la rugosità della superficie dovuta al moto ondoso è sufficientemente importante, su scale spaziali confrontabili con la lunghezza d’onda del suono, la stessa rappresentazione radiale entra in crisi a livello teorico; ciò è vero, ma tale condizione fisica corrisponderebbe a una condizione di mare impraticabile per le misure con l’idrofono in uso.

Un’ulteriore ipotesi che avvicina la descrizione radiale a quello che avremmo con onde sonore “vere” è l’uso di *fasci* anziché di raggi: cioè, l’energia sonora viene immaginata distribuita attorno al raggio, invece che concentrata tutta sulla traiettoria unidimensionale del raggio; attorno al raggio calcolato dal BELLHOP, si immagina un profilo Gaussiano di distribuzione dell’energia sonora (*Gaussian beam approximation*), e questo evita che i calcoli producano artificiose quantità “infinite” nelle regioni cosiddette caustiche.

Per ogni semipiano su cui interessa calcolare $p(r,z)$, il modello BELLHOP può restituire direttamente $TL(r,z)$, una volta che siano assegnati:

- la profondità z_s a cui giace la sorgente (di solito, 10 m o 15 m);
- la batimetria lungo il semipiano verticale contenente sorgente e ricevitore;
- la frequenza a cui riferiamo i raggi calcolati dal BELLHOP: nel caso del monitoraggio “stand alone” si sceglie $f = 12$ kHz come frequenza a cui l’emissione del Terminale massimamente si discosta dal rumore di fondo; nel caso del monitoraggio degli allibi, si ripete il calcolo per una collezione di frequenze presumibilmente rappresentative delle varie sorgenti che costituiscono il sistema (metaniera, Terminale e rimorchiatori);
- Il tipo di somma (interferenza) delle onde acustiche (raggi) che si opera per calcolare il campo acustico locale, che nella presente applicazione si fa in maniera *incoerente*: questo tiene conto della rugosità della superficie marina data dal moto ondoso, come prima accennato.

Dopo che il modello BELLHOP ha calcolato $TL(f)$, per ogni osservazione SL sarà possibile determinare il source level come $SL(f) = SPL(f) + TL(f)$; avendosi diverse osservazioni, avremo in principio un SL per ciascuna osservazione, e potremo restituire il dato calcolando SL come “media” su queste osservazioni e attribuendo alla standard deviation dell’insieme di osservazioni il ruolo di incertezza sull’ SL calcolato. Si estende questa media, e il calcolo di questa incertezza, a osservazioni entro le quali la SL si presume mantenersi costante: quindi, entro i minuti di osservazione di una stessa stazione, nel caso del monitoraggio “stand alone”; entro i circa 10 minuti di osservazione di una stessa “fase”, nel caso del monitoraggio dell’allibio.

Come esempio concreto dell'uso del modello BELLHOP possiamo considerare l'osservazione da idrofono citata nei Capitoli 1.1 ed 1.2: utilizzando la batimetria del semipiano meridionale, possiamo calcolare il campo $TL(r, z)$ come in Figura 8; restringendosi, poi, alla profondità di 10 m, otteniamo la $TL(r, 10\text{ m})$ di cui in Figura 9.

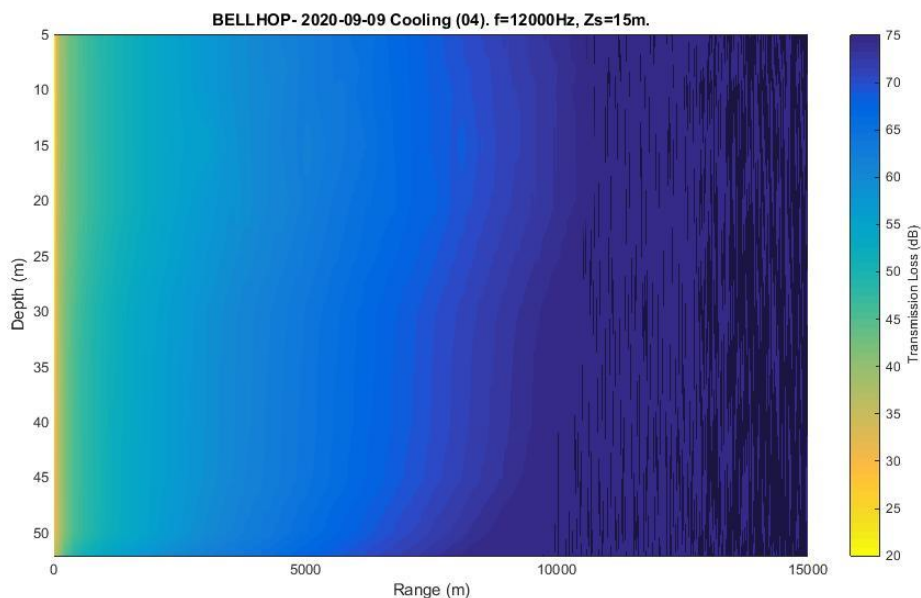


Figura 8 - il campo di transmission loss $TL(r, z)$ per ricavare il SL dalle misure dell'idrofono citate, come esempio, in § 0.

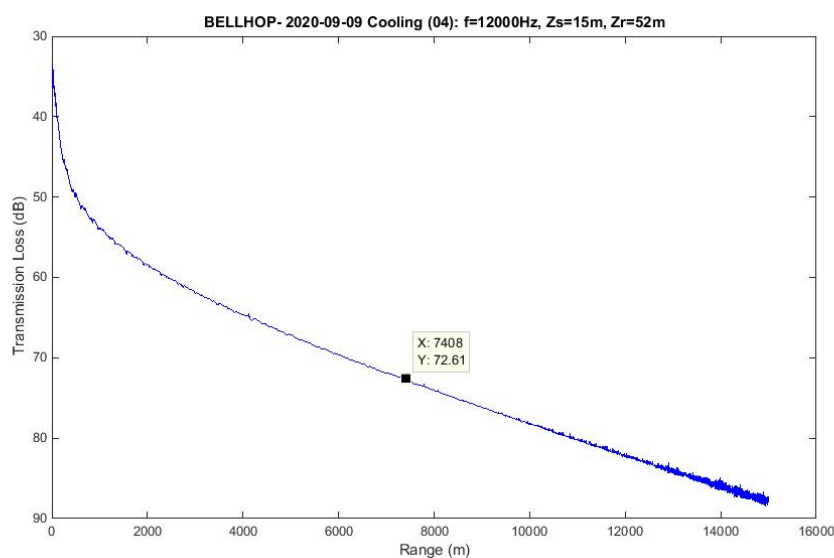


Figura 9 - La TL di cui in a 10 m di profondità.

Capitolo 2.3.1 Condizioni Oceanografiche

All'utilizzo del modello BELLHOP è necessaria la conoscenza delle *condizioni oceanografiche* del mezzo, che vengono descritte mediante la dipendenza della velocità del suono nell'acqua c_s dalla profondità z , così come misurata dalla sonda CTD durante l'acquisizione dei dati di idrofono. Tali misure della sonda sono riportate a titolo di esempio nella **Errore. L'origine riferimento non è**

stata trovata., definite rispetto al moto della metaniera e alle attività correlate di Allibo. Le fasi sono “Avvicinamento”, Affiancamento (manovra ed attracco), “Allibo” (Raffreddamento-Discarica-Maximum Rate di discarica) ed “Allontanamento”, nella stessa campagna in cui sono state prese le misure descritte nei Capitoli 1.1 ed 1.2.

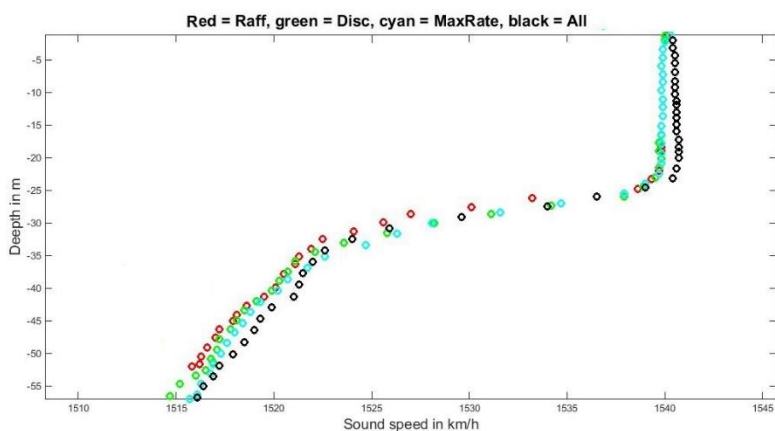


Figura 10 - Dipendenza della velocità del suono nell'acqua nelle di Raffreddamento (traccia in rosso), di Discarica (traccia in verde), di Maximum Rate (traccia ciano) e di Allontanamento (traccia nera).

Riferimenti

1. Documento Principale: *Piano di monitoraggio generale per il terminale FSRU-Toscana*.
2. *Valutazione del rumore sottomarino durante le fasi di allibo di una metaniera al terminale FSRU Toscana – Registrazione e analisi del rumore prodotto* (Maggio 2020).
3. Michael B. Porter, *Beam tracing for two- and three-dimensional problems in ocean acoustics*, The Journal of the Acoustical Society of America 146, 2016 (2019); doi: 10.1121/1.5125262.
4. Michael B. Porter, *The BELLHOP Manual and User's Guide: PRELIMINARY DRAFT*, scaricabile presso il sito web: <http://oalib.hlsresearch.com/Rays/>.
5. “Acoustic Toolbox”, pagina web: <http://oalib.hlsresearch.com/AcousticsToolbox/>.
6. Borsani J.F., Farchi C. (2011) “Linee guida per lo studio e la regolamentazione del rumore di origine antropica introdotto in mare e nelle acque interne”, ISPRA, Parte seconda, pp. 9-10.
7. “Venis Cruise 2.0 - Nuovo Terminal Crociere di Venezia, Bocca di Lido - Approfondimenti sulla Componente Rumore”. Doc. No. 14-1316-H16, Rev. 0 - Febbraio 2016, Duferco Italia Holding S.p.A., Brescia, Italia, DP Consulting S.r.l. Treviso, Italia