

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITÀ RAVENNA (RA)	000-CI-E-72232	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 1 di 8	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-1402-72232

EMERGENZA GAS
Incremento di capacità di rigassificazione (DL 17 Maggio 2022, n. 50)
FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti

MODELLAZIONI NUMERICHE E VERIFICHE SPERIMENTALI CON MODELLI IN
SCALA IN VASCA IN RELAZIONE ALLA VERIFICA DI OTTEMPERANZA
DELLA PRESCRIZIONE N. 25 DEL DECRETO N.1/2024

Riscontro alla Nota prot. n. CG 27/06/2025.0000064.U
del 27/06/2025 della Regione Emilia-Romagna

0	Emissione per informazione	M. Del Bianco F. Capozzi	L. Nardi	P. Russo	07.07.2025
Rev.	Descrizione	Elaborato	Verificato	Approvato Autorizzato	Data

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITÀ RAVENNA (RA)	000-CI-E-72232	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 2 di 8	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-1402-72232

INDICE

1	SCOPO DEL DOCUMENTO	3
2	RISPOSTE ALLE OSSERVAZIONI	4
2.1	Osservazione n. 1	4
2.2	Osservazione n. 2	5
2.3	Osservazione n. 3	6
2.4	Osservazione n. 4	7
2.5	Osservazione n. 5	7
2.6	Osservazione n. 6	8

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITÀ RAVENNA (RA)	000-CI-E-72232	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 3 di 8	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-1402-72232

1 SCOPO DEL DOCUMENTO

Lo scopo del presente documento è quello di rispondere alle osservazioni ricevute dalla Regione Emilia-Romagna, in data 27/06/2025 con nota prot. n. CG 27/06/2025.0000064.U, avente per oggetto la “valutazione relazione di sintesi dei modelli fisici 2D e 3D riportante i risultati delle modellazioni numeriche e delle verifiche sperimentali con modelli in scala in vasca in relazione alla verifica di ottemperanza della prescrizione n. 25 del Decreto n.1/2024”.

Nel proseguo del documento saranno quindi fornite le risposte alle osservazioni formulate che, per praticità di lettura, sono riportate integralmente di seguito:

1. motivare la scelta di adottare i dati ERA5 per la modellazione numerica con il software SWAN;
2. motivare la scelta del valore 3.3 per il peak enhancement factor utilizzato nella definizione dello spettro analitico (JONSWAP), poi impiegato nelle prove di laboratorio;
3. fornire dettagli relativi allo studio statistico degli eventi estremi, che ha determinato le altezze significative spettrali per i tempi di ritorno fissati;
4. fornire dettagli sulle condizioni al contorno utilizzate per il modello numerico spettrale (SWAN);
5. dare indicazioni sulla correzione applicata ai dati ERA5 in merito alla sottostima dell'altezza significativa spettrale;
6. nel testo si fa riferimento anche al documento “Definizione delle condizioni ondametrichhe estreme” (rif. doc. 000-ZA-E-17097 e successiva modifica rif. doc. 000-ZA-E-17226), nel quale non sono rintracciabili informazioni sugli spettri utilizzati.

In ultimo, con riferimento alla considerazione relativa all’esecuzione dei rilievi batimetrici, richiesti dalla condizione ambientale n. 16 iv, par. 5.2 del Verbale della CdS di cui al Decreto autorizzativo n. 3 del 07 novembre 2022 nonché il successivo Decreto n.1 del 06 febbraio 2024, si conferma che i rilievi batimetrici saranno estesi anche alle aree di fondale prossime alla diga, al fine di verificare eventuali fenomeni di scalzamento al piede della diga stessa.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITÀ RAVENNA (RA)	000-CI-E-72232	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 4 di 8	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-1402-72232

2 RISPOSTE ALLE OSSERVAZIONI

2.1 Osservazione n. 1

Testo dell'osservazione

“Motivare la scelta di adottare i dati ERA5 per la modellazione numerica con il software SWAN”.

Riscontro

I dati in ricostruzione forniti da Copernicus ERA5 rappresentano una valida ed esaustiva risorsa per la definizione delle condizioni di moto ondoso che caratterizzano un paraggio al largo, specialmente dove la disponibilità di misure dirette risulta limitata sia spazialmente che temporalmente.

ERA5, sviluppato dal Centro Europeo per le Previsioni Meteorologiche a Medio Termine (ECMWF), fornisce una ricostruzione modellistica dello stato del mare ad alta risoluzione spaziale ($\sim 0.25^\circ$) e temporale (oraria), fornendo parametri chiave come il vento a quota +10 m e i parametri del moto ondoso (altezza significativa delle onde, direzione, periodo, ecc.). Questi dati sono derivati da un'integrazione tra modelli numerici avanzati e osservazioni reali (satellitari, boe, ecc.), offrendo una ricostruzione coerente e di lungo termine (per il progetto sono stati acquistati i dati dal 1979 al 2021), ideale per analisi climatologiche, statistiche e definizione degli stati di mare (vento e onda) più significativi.

Nel caso specifico del Mar Adriatico, bacino semi-chiuso, l'accurata rappresentazione del vento – principale forzante nella generazione e propagazione del moto ondoso – è determinante anche per valutare le azioni sulle navi all'ormeggio e in manovra. ERA5 garantisce accuratezza, risoluzione e disponibilità temporale per supportare analisi statistiche e simulazioni numeriche.

Nel caso in esame l'utilizzo di ERA5 ha quindi consentito:

- una copertura completa di 43 anni in assenza di misure locali;
- una caratterizzazione accurata delle condizioni meteo-marine contestuali di vento e moto ondoso;
- la possibilità di analizzare eventi estremi passati e tendenze a lungo termine e di effettuare analisi statistiche su un campione di dati molto numeroso;
- la definizione di condizioni al contorno e forzanti per modelli di propagazione verso il sito di interesse per la definizione delle condizioni locali (ad es. SWAN: propagazione diretta spettrale con generazione, MEROPE: propagazione inversa spettrale).

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITÀ RAVENNA (RA)	000-CI-E-72232	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 5 di 8	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-1402-72232

I dati ERA5 sono stati confrontati con le misure della boa ondometrica RON al largo di Ancona e con le misure della boa ondometrica ARPAE Nausicaa di Cesenatico, posta su fondali di circa 10 m.

Il confronto con i dati della boa RON di Ancona ha consentito una calibrazione per le onde estreme a largo del sito in esame (vedasi riscontro al punto 5).

Le misure della boa di Cesenatico risultano maggiormente influenzate dall'effetto schermo del Conero e dalla ridotta profondità. Pertanto, sono state utilizzate per un confronto di tipo qualitativo con i dati di moto ondoso propagati mediante modelli numerici in corrispondenza del terminale a una profondità di 14 m.

2.2 Osservazione n. 2

Testo dell'osservazione

“Motivare la scelta del valore 3.3 per il peak enhancement factor utilizzato nella definizione dello spettro analitico (JONSWAP), poi impiegato nelle prove di laboratorio.”

Riscontro

Nell'ambito della modellazione spettrale del moto ondoso, lo spettro JONSWAP è ampiamente utilizzato per descrivere stati di mare in fase di generazione (onde di mare vivo), tipici di bacini semi-chiusi o limitati come il Mar Adriatico.

L'impiego di $\gamma = 3.3$ rappresenta una scelta consolidata nella letteratura scientifica e tecnica, particolarmente indicata per applicazioni ingegneristiche, in quanto:

- riflette condizioni tipiche di contesti con generazione del mare limitata dal fetch;
- corrisponde al valore mediano osservato nella campagna JONSWAP originale nel Mare del Nord, un ambiente con caratteristiche meteo-oceanografiche comparabili a quelle del Mediterraneo;
- è comunemente utilizzato come valore standard nei modelli numerici (es. SWAN, WAVEWATCH III) e nella modellazione fisica in assenza di dati spettrali calibrati localmente;
- fornisce una rappresentazione realistica della forma dello spettro in situazioni in cui è necessario bilanciare accuratezza fisica e la modellazione numerica, come richiesto in numerosi studi ingegneristici (es. progettazione di opere marittime, valutazione delle azioni del moto ondoso...).
- In conclusione, l'adozione di $\gamma = 3.3$ consente una rappresentazione coerente con la natura del moto ondoso limitato dall'estensione del fetch nel Mar Adriatico, risultando adatta per condurre simulazioni di propagazione in un contesto ingegneristico. Sulla base di tali considerazioni il coefficiente è stato adottato anche per le simulazioni con il modello fisico.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITÀ RAVENNA (RA)	000-CI-E-72232	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 6 di 8	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-1402-72232

2.3 Osservazione n. 3

Testo dell'osservazione

“Fornire dettagli relativi allo studio statistico degli eventi estremi, che ha determinato le altezze significative spettrali per i tempi di ritorno fissati.”

Riscontro

Si riporta a seguire una breve descrizione dell'analisi statistica degli eventi estremi di moto ondoso al largo di Ravenna illustrata nello Studio Meteomarino rif. doc. n. 000-ZA-E-17075.

L'analisi è stata condotta seguendo la metodologia proposta da Goda, considerata uno standard di riferimento nel campo dell'ingegneria marittima per la valutazione degli eventi estremi.

È stato adottato l'approccio POT (Peaks Over Threshold) applicato al campione di valori estremi di altezza d'onda significativa (H_s) estratti dal dataset ERA5, opportunamente calibrato sulla base del confronto con le misure della boa RON di Ancona (vedi risposta al punto 5).

L'analisi si è articolata secondo i seguenti passaggi principali:

Selezione degli eventi estremi: sono stati individuati i picchi di H_s (valori di culmine delle mareggiate), per stati di mare che superano una prefissata soglia (1 m) per una durata minima di 12 ore garantendo indipendenza statistica tra i dati. Un evento di mareggiata termina quando l' H_s scende sotto la soglia o cambia bruscamente la direzione del moto ondoso.

Omogeneità del campione: gli eventi sono stati suddivisi in due settori direzionali principali, per tenere conto della genesi meteorologica: Grecale (0°N – 90°N) e Scirocco (90°N – 160°N).

Scelta della soglia (censura): per ciascun settore, la soglia del metodo P.O.T. è stata scelta in modo da includere tra 2 e 5 eventi all'anno, come raccomandato da Goda. Ponendo una soglia pari a $H_s = 2.7$ m, sono stati individuati in totale circa 160 eventi estremi per il settore di grecale. Al fine di ottenere un numero di dati rappresentativo per il settore di scirocco è stata adottata una soglia inferiore, $H_s = 1.9$ m.

Distribuzioni statistiche adottate: i dati selezionati sono stati analizzati con due distribuzioni di probabilità: i) la distribuzione di Weibull a tre parametri, con diversi valori del parametro di forma (il valore $k=1$ si è rivelato il migliore), ii) la distribuzione di Gumbel.

I parametri delle distribuzioni (A , B , k) sono stati stimati tramite metodo dei minimi quadrati, dopo aver ordinato il campione e calcolato la frequenza campionaria di non superamento.

Utilizzando la funzione di probabilità sono stati infine stimati i valori di H_s per prefissati tempi di ritorno $T_r = 2, 10, 25, 50, 100$ anni.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITÀ RAVENNA (RA)	000-CI-E-72232	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 7 di 8	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-1402-72232

2.4 Osservazione n. 4

Testo dell'osservazione

“Fornire dettagli sulle condizioni al contorno utilizzate per il modello numerico spettrale SWAN.”

Riscontro

Nelle simulazioni effettuate con il modello SWAN, anche se non esplicitamente riportato nel testo, è stato imposto come condizione al contorno uno spettro di tipo JONSWAP ($\gamma = 3.3$) con dispersione direzionale di 30°, definito a partire dai parametri del moto ondoso H_s , T_p e Dir per ciascuno scenario di simulazione.

Le condizioni al contorno (definite sulla base dei dati ERA5 calibrati) sono state applicate lungo il margine Est della griglia di calcolo principale esposto al mare aperto e per un tratto di 7,5 km nella porzione più esterna dei margini Nord e Sud, in modo da tenere conto dello schermo naturale nei confronti del moto ondoso esercitato da Punta Maestra e dal delta del Po a Nord, e dalle coste della regione Marche a Sud.

2.5 Osservazione n. 5

Testo dell'osservazione

“Dare indicazioni sulla correzione applicata ai dati ERA5 in merito alla sottostima dell'altezza significativa spettrale.”

Riscontro

Si riporta a seguire una descrizione sintetica della metodologia applicata per la correzione dei dati ERA5 così come illustrato nello Studio Meteomarino rif. doc. n. 000-ZA-E-17075.

I dati ondametrici ricostruiti in ri-analisi dai principali centri meteorologici sono soggetti a errori sistematici dovuti principalmente alla ricostruzione dei campi di vento. Tali errori, sebbene poco rilevanti per le condizioni medie, possono influenzare in modo significativo la stima degli eventi estremi, fondamentali per il dimensionamento delle opere marittime.

Per questo motivo, è importante confrontare i dati di ri-analisi ERA5 con misure dirette per valutare l'eventuale necessità di una calibrazione. Nel caso in esame, il confronto è stato condotto tra i dati ERA5 e quelli misurati dalla boa ondametrica di Ancona (RON/ISPRA), operativa dal 1999.

È stato selezionato il punto di griglia ERA5 più vicino alla posizione della boa per effettuare il confronto nel periodo 1999–2022. Sono stati applicati due approcci: il confronto sincrono e quello asincrono. Il confronto sincrono valuta l'errore tra dati ricostruiti e misurati nello stesso istante, mettendo in luce l'eventuale sottostima sistematica. Il confronto asincrono, invece, si

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22199	UNITA' 000
	LOCALITÀ RAVENNA (RA)	000-CI-E-72232	
	PROGETTO / IMPIANTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Fg. 8 di 8	Rev. 0

Rif. T.EN Italy Solutions: 201064C-055-RT-1402-72232

concentra sui valori al colmo delle mareggiate, accettando lievi disallineamenti temporali, per valutare l'accuratezza delle altezze significative (H_s) al colmo delle mareggiate.

Il confronto, effettuato su circa 50 mareggiate, ha evidenziato un buon accordo direzionale tra dati misurati e ricostruiti, ma una sistematica sottostima di H_s nei dati ERA5. Applicando una regressione vincolata all'origine ($HERA5 = B \cdot HBOA$), è stato calcolato un coefficiente $B = 0,85$. Ne deriva un coefficiente di calibrazione ($B-1$) pari a 1,17, da applicare ai dati ERA5 in condizioni estreme.

Verificato che il punto ERA5 al largo di Ravenna ($44.5^\circ N - 12.5^\circ E$) appartiene alla stessa area di generazione delle onde si è assunto che i colmi delle mareggiate siano affetti da un simile errore. Pertanto si è applicato anche a questo punto il medesimo coefficiente di calibrazione.

2.6 Osservazione n. 6

Testo dell'osservazione

“Nel testo si fa riferimento anche al documento “Definizione delle condizioni ondametrichie estreme” (rif. doc. 000-ZA-E-17097 e successiva modifica rif. doc. 000-ZA-E-17226), nel quale non sono rintracciabili informazioni sugli spettri utilizzati.”

Riscontro

Nelle simulazioni effettuate con il modello SWAN per la definizione delle condizioni ondametrichie estreme in prossimità delle opere, anche se non esplicitamente riportato nel testo, sono stati presi in esame spettri di tipo JONSWAP ($\gamma = 3.3$) con dispersione direzionale di 30° . Per ciascuno scenario di simulazione lo spettro applicato al contorno è stato definito a partire dai parametri del moto ondoso H_s , T_p e Dir .