Nave ALFA — rotte a minimo consumo nella corrente di Agulhas

Rapporto tecnico dei risparmi (Step 8–9) · redatto il 17/10/2026 · simulatore `alfasim`

1. Sintesi per l'armatore

Viaggi del 10/10/2026 (partenza 00:00 UTC) con l'ambiente reale Copernicus Marine (correnti, onde, vento). La rotta ottimizzata arriva **alla stessa ora** della rotta originale (Just-in-Time). Prezzo del VLSFO: 876,5 USD/t (Ship & Bunker G20 VLSFO 06/10/2026 (ShipUniverse, 07/10/2026)); fattore CO_2 3,114 t/t (MEPC.364(79)).

Viaggio	Distanza originale	Consumo originale	Consumo ottimizzato	Risparmio (valore nominale)	Stima centrale e banda 90 %	CO_2 evitata	Risparmio economico
Durban → Città del Capo	842 nm	189,9 t	172,8 t	**17,2 t (9,03 %)**	8,57 % (8,43…8,96 %)	53,4 t	15.039 USD
Città del Capo → Durban	821 nm	265,6 t	239,1 t	**26,5 t (9,97 %)**	9,59 % (9,19…9,99 %)	82,5 t	23.214 USD

Il valore nominale usa il fattore di forma misurato dal bacino (k = 0,094), che è l'estremo inferiore dell'intervallo d'incertezza considerato (0,094–0,145): per questo cade al bordo alto della banda. Come stima centrale del risparmio va usata la mediana Monte Carlo; CO_2 e risparmio economico sono calcolati sul valore nominale.

Da dove viene il risparmio (scomposizione, stesso orario d'arrivo):

Viaggio	Percorso più corto nel corridoio (geometria)	Oltre il percorso più corto (correnti e meteo)	Totale S3
Durban → Città del Capo	6,7 %	2,4 %	9,0 %
Città del Capo → Durban	8,9 %	1,0 %	10,0 %

Come leggere questi numeri. La rotta originale usata qui è una rotta di riferimento definita per il progetto (40 km dalla costa verso Città del Capo; verso Durban 40 km a ovest di 23°E e 20 km a est di 25°E, con raccordo graduale; waypoint standard ai capi): è più lunga di 21–31 nm del percorso navigabile più corto nel corridoio. Il guadagno oltre il percorso più corto, dovuto a correnti e meteo, è 1,0–2,4 %: è una stima prudente, perché la rotta ottimizzata è più lunga del percorso più corto e l'effetto netto delle correnti lungo la sua geometria è quindi maggiore. Il resto del risparmio dipende dalla geometria della rotta di partenza. Con la rotta reale della Nave ALFA (RTZ o elenco di waypoint) il confronto va ripetuto: il simulatore la accetta come rotta originale.

I file di rotta per l'ECDIS (RTZ 1.1, validati sullo schema ufficiale) sono nella cartella dei risultati: `NAVE_ALFA_copernicus_W_S3.rtz` (43 waypoint, distanza minima dalla costa del modello fuori dagli accessi ai porti 13,2 km), `NAVE_ALFA_copernicus_E_S3.rtz` (45 waypoint, distanza minima dalla costa del modello fuori dagli accessi ai porti 11,9 km). **Prima del caricamento a bordo le rotte vanno controllate sull'ECDIS con le carte ENC ufficiali**: il modello Copernicus a 1/12° (circa 9 km) non rappresenta secche, isole e promontori più piccoli di una cella.

2. Come è stato quantificato il risparmio

• **Scenario di riferimento (B0)**: rotta originale (di riferimento, vedi sopra) percorsa a velocità sull'acqua costante, scelta per arrivare all'ETA d'orario (17 kn sulla lunghezza della rotta di riferimento; 16,94 kn e 16,93 kn medi sul fondo sulla distanza in tabella), valutata nello stesso ambiente.

• **Scenario di progetto (S3)**: rotta e profilo di velocità ottimizzati nel corridoio di ±60 km attorno alla rotta originale, con lo stesso ETA; eseguiti inseguendo l'orario a ogni waypoint.

• Consumo del solo motore principale (gli ausiliari non cambiano a parità d'orario).

• Prudenza: baseline a velocità costante ottimale (non una baseline penalizzata); curva SFOC IMO che penalizza i bassi carichi; correlazione del bacino SVA (resistenza più alta della formula ITTC 19ª), con correzione totale ΔC_F + C_A costante anche sotto 20 kn.

• Incertezza con Monte Carlo (GUM, Supplemento 1) su fattore di forma, resistenza d'onda sotto 20 kn, area esposta al vento, curva e tolleranza SFOC: mediana e intervallo di copertura al 90 %.

• La struttura (baseline, progetto, prudenza, incertezza) segue i principi della ISO 14064-2; il documento è una stima tecnica riproducibile, **non** una verifica di terza parte accreditata.

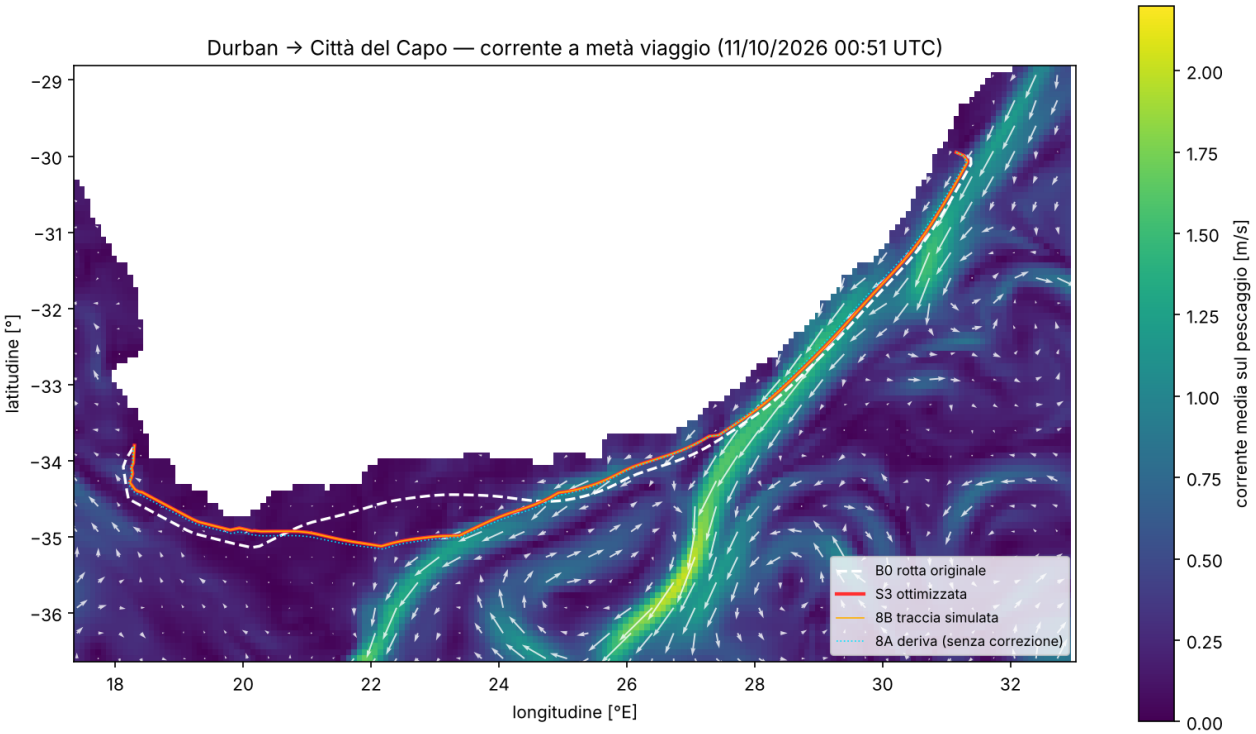
3. Nave ALFA e modello fisico

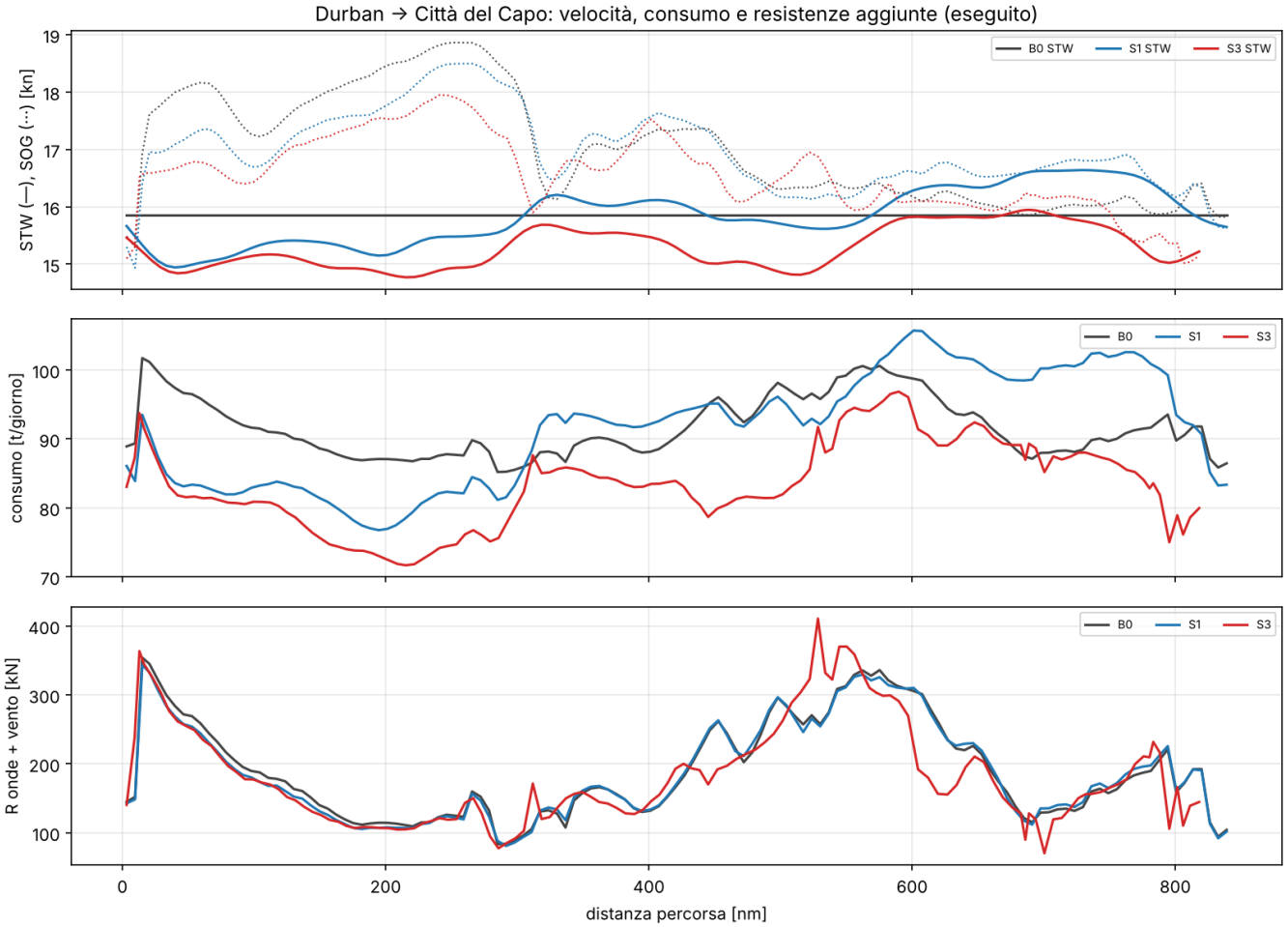
Carena DTC 14 000 TEU (L_pp 355 m, B 51 m, T 14,5 m, ∇ 173 467 m³), elica FPP 5 pale D 8,911 m. Resistenza al vero ITTC-78 dalle prove SVA (el Moctar et al. 2012), elica con correzioni di scala ITTC-78, motore 2T lento con SMCR 89.027 kW a 111 giri/min (metodo MAN), SFOC IMO Fourth GHG Study. Onde: SNNM con spettro ITTC e interazione onda–corrente limitata dal frangimento (con i dati Copernicus l'interazione è già nel modello d'onda e non viene riapplicata); vento: coefficienti ITTC per portacontainer. La fisica è stata ricontrollata da un revisore indipendente e corretta nei punti segnalati. Dettagli e verifiche: documento Step 4 (42 test superati).

4. Risultati per strategia (dati reali Copernicus)

Durban → Città del Capo — ETA 2026-10-12 01:42 UTC

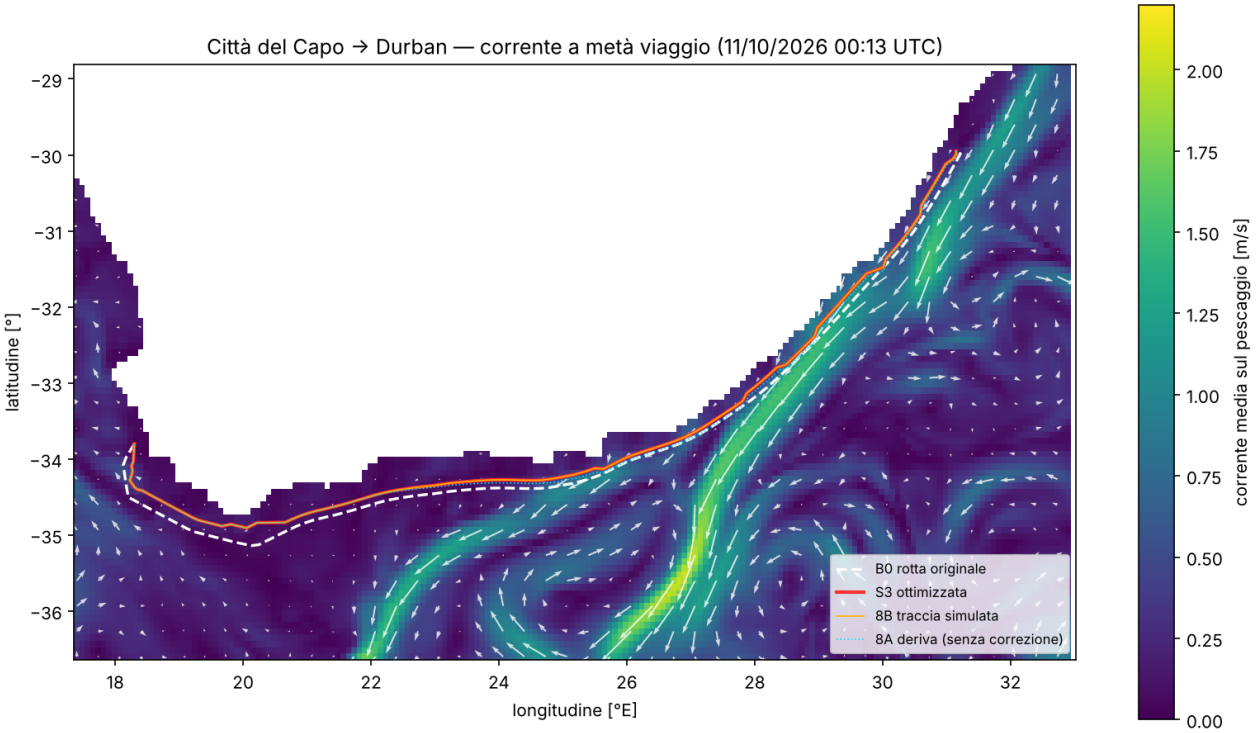
Strategia	Consumo [t]	Risparmio [%]	CO_2 [t]	STW media [kn]	STW min–max [kn]	Distanza [nm]	Arrivo vs ETA [min]
B0 rotta originale (STW costante)	189,9	0,0	591,4	15,9	15,9–15,9	842	0,0
S1 solo profilo di velocità	189,6	0,2	590,3	15,8	14,9–16,6	842	0,0
S2 solo rotta	172,9	8,9	538,5	15,3	15,3–15,3	822	0,0
S3 rotta + profilo di velocità	172,8	9,0	538,0	15,3	14,8–15,9	822	0,0

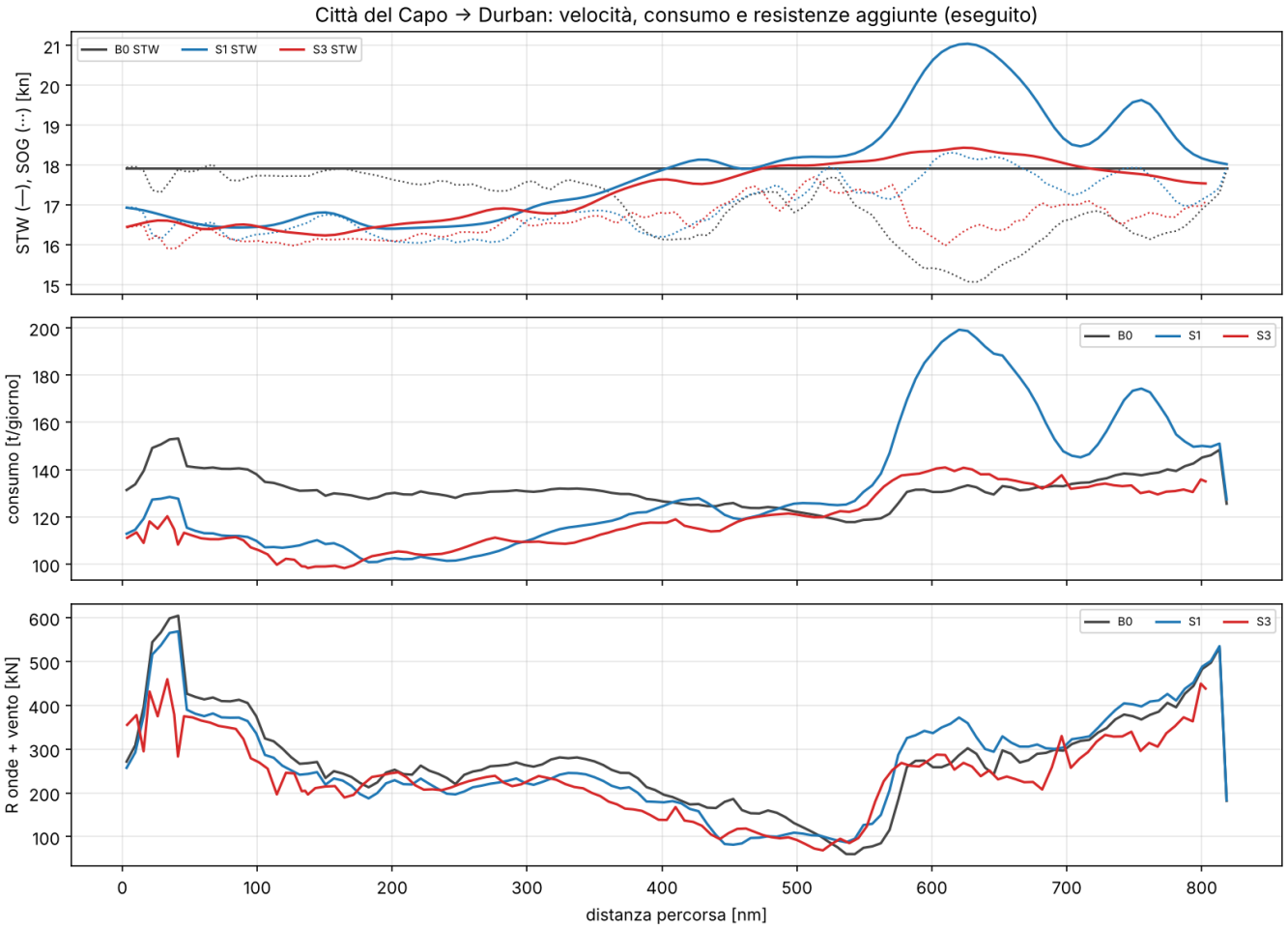




Città del Capo → Durban — ETA 2026-10-12 00:27 UTC

Strategia	Consumo [t]	Risparmio [%]	CO_2 [t]	STW media [kn]	STW min–max [kn]	Distanza [nm]	Arrivo vs ETA [min]
B0 rotta originale (STW costante)	265,6	0,0	827,1	17,9	17,9–17,9	821	0,0
S1 solo profilo di velocità	264,1	0,6	822,4	17,8	16,4–21,0	821	0,0
S2 solo rotta	240,0	9,6	747,3	17,3	17,3–17,3	804	0,0
S3 rotta + profilo di velocità	239,1	10,0	744,7	17,3	16,2–18,4	804	0,0





5. Simulazione dinamica della traversata (Step 8)

Modello MMG a 3 gradi di libertà con corrente, autopilota e regolatore dei giri che insegue l'orario.

Viaggio	Modo	Consumo dinamico [t]	Consumo pianificato [t]	Arrivo vs piano [min]	Errore trasversale RMS / max [m]	Barra RMS [°]
Durban → Città del Capo (Copernicus)	8B track-keeping	174,8	172,8	0,8	83 / 1.009	0,7
Durban → Città del Capo (Copernicus)	8A deriva	175,1	172,8	26,8	3.811 / 6.540	1,7
Città del Capo → Durban (Copernicus)	8B track-keeping	241,5	239,1	-2,7	93 / 1.079	1,1
Città del Capo → Durban (Copernicus)	8A deriva	246,1	239,1	60,0	3.659 / 6.384	2,0
Durban → Città del Capo (sintetico)	8B track-keeping	224,9	221,0	0,0	83 / 1.132	1,8
Durban → Città del Capo (sintetico)	8A deriva	222,1	221,0	4,5	2.706 / 5.676	2,5
Città del Capo → Durban (sintetico)	8B track-keeping	225,5	222,8	-2,7	81 / 1.179	1,1
Città del Capo → Durban (sintetico)	8A deriva	216,3	222,8	-53,7	4.026 / 8.044	2,1

Risparmio con entrambe le rotte simulate dinamicamente (8B): Durban → Città del Capo (Copernicus) 8,8 %; Città del Capo → Durban (Copernicus) 10,1 %.

Risparmio con entrambe le rotte simulate dinamicamente (8B): Durban → Città del Capo (sintetico) 7,8 %; Città del Capo → Durban (sintetico) 26,8 %.

In modo 8A la nave tiene la prua della rotta senza correggere la deriva: l'errore trasversale cresce fino a chilometri e l'orario salta. In modo 8B l'autopilota compensa con l'angolo di scarroccio e l'orario è rispettato; il consumo dinamico include accostate, scarroccio e transitori.

6. Valore dei dati delle navi in mare (scenario sintetico con verità nota)

Oceano sintetico di Agulhas con verità nota; Layer 1 = modello Copernicus degradato (errori di posizione del getto, attenuazione, ritardo); Layer 3 = Layer 1 corretto con l'assimilazione OI dei dati di 12 navi in mare (316 superosservazioni prima della partenza). Ogni piano è eseguito nella verità.

Viaggio	Pianificato con	S1	S2	S3
Durban → Città del Capo	L1	0,7 %	6,7 %	7,6 %
Durban → Città del Capo	L3	0,9 %	7,9 %	8,5 %
Durban → Città del Capo	verità	0,9 %	8,2 %	8,6 %
Città del Capo → Durban	L1	0,4 %	26,9 %	27,0 %
Città del Capo → Durban	L3	0,3 %	26,9 %	27,0 %
Città del Capo → Durban	verità	0,7 %	27,2 %	27,2 %

Verso Città del Capo i dati di flotta recuperano 0,89 punti percentuali di risparmio sui 1,08 disponibili (quota 82 %) tra il solo modello e l'informazione perfetta. Verso Durban la rotta originale sintetica passa nel nucleo del getto contrario: il risparmio (circa 27 %) dipende soprattutto dall'uscire dalla corrente e quasi non dall'informazione, per cui è un caso di prova, non una stima rappresentativa.

7. Ipotesi e limiti

• Resistenza d'onda sotto 20 kn estrapolata (fuori dal campo delle prove): banda inclusa nel Monte Carlo.

• Area frontale esposta al vento non pubblicata per la DTC: 2 000 m² ±20 %.

• Nessun motore commerciale letto copre ~90 MW a ~110 giri/min: motore 2T generico con SFOC IMO.

• t, w, η_R invariati in onda e vento; resistenza da deriva e barra non inclusa nel pianificatore (presente nella simulazione MMG).

• Navigabilità con dati reali: profondità ≥ 15,8 m nel modello Copernicus e ≥ 12 km dal centro della cella di terra più vicina (griglia 1/12°, distanza esatta per punto, controllo sui nodi e lungo gli archi; manca il file di batimetria). Distanza minima effettiva lungo i file RTZ, fuori dalle zone di accesso ai porti (40 km): 13,2 km (S3 W), 23,5 km (B0 W), 11,9 km (S3 E), 16,7 km (B0 E). Controllo finale sulle carte ENC obbligatorio.

• Con i dati reali l'analisi Copernicus è sia l'informazione di pianificazione sia l'ambiente di valutazione: il risparmio è un potenziale con l'informazione migliore disponibile.

• Modello di manovra: parte lineare tarata sulla KCS (stessa tipologia), termini non lineari tarati su un diametro tattico di 3,0 L (KCS 2,74–3,06 L; DTC 3,55 L in acqua bassa); conforme IMO MSC.137(76); mancano prove libere DTC in acqua profonda.

• Limite di coppia del motore a coppia costante (linea 5 MAN), più permissivo della linea 4. Nei piani con dati reali il carico va dal 16 al 51 % di SMCR e la coppia arriva al massimo al 62 % di quella nominale.

• Le carene DTC e KCS sono navi virtuali di riferimento: ogni valore al vero è un'estrapolazione da prove su modello.

8. Riproducibilità

Codice: `05_Codice/nave_alfa_sim` (`scenarios/agulhas_copernicus.py`, `scenarios/agulhas_synthetic.py`, `scenarios/make_outputs.py`, `scenarios/make_report.py`). Dati: `06_Dati`. Formule e fonti: documenti Step 3 e Step 4, bibliografia validata.