

Cliente Enel Produzione S.p.a.

Oggetto Centrale Termoelettrica "Eugenio Montale" di La Spezia
Progetto di sostituzione dell'unità a carbone esistente con nuova unità a gas

Allegato E - Studio di dispersione delle acque di raffreddamento

Ordine A.Q. 8400134283, attivazione N. 3500038648 del 04.04.2019

Note A1300001867 - Lettera di trasmissione B9014186

La parziale riproduzione di questo documento è permessa solo con l'autorizzazione scritta del CESI.

PAD B9014374 (2715816) - USO RISERVATO

N. pagine 64 **N. pagine fuori testo** 0

Data 26/09/2019

Elaborato EMS - Dassie Giuseppe Augusto, EMS - Colombo Daniela, ESC - Boi Laura
B9014374 3800 AUT B9014374 3821 AUT B9014374 2657818 AUT

Verificato EMS - Sala Maurizio, ESC - Pertot Cesare
B9014374 3741 VER B9014374 3840 VER

Approvato ESC - Il Responsabile - Pertot Cesare
B9014374 3840 APP

Indice

1	SOMMARIO	3
2	INTRODUZIONE	7
2.1	Scopo dello studio.....	7
2.2	Articolazione dell'attività.....	11
2.3	Documenti di riferimento.....	11
3	CONDIZIONI DI ANALISI	14
3.1	Considerazioni generali.....	14
3.2	Dati geometrici di impianto.....	14
3.2.1	Caratteristiche dell'opera di scarico.....	14
3.2.2	Caratteristiche dell'opera di presa.....	15
3.2.3	Il pontile Enel.....	15
3.3	Configurazione costiera e batimetria dell'area.....	15
3.4	Dati meteomarini.....	18
3.4.1	Circolazione costiera.....	18
3.4.2	Livello marino.....	19
3.5	Analisi anemologica del sito.....	21
4	MODELLO NUMERICO DI SIMULAZIONE	23
4.1	Cenni sulle caratteristiche del codice TRIMDI ver. 4.0.....	23
4.2	Schema di analisi.....	25
4.2.1	Reticolo di calcolo.....	25
4.2.2	Condizioni al contorno e condizioni iniziali.....	30
4.3	Scenari di calcolo.....	31
5	ANALISI DEI RISULTATI	32
5.1	Premessa.....	32
5.2	Metodo di calcolo del delta termico sull'arco.....	32
5.3	Osservazioni sulla validità delle simulazioni numeriche.....	35
5.4	Scenario 1: config. portuale attuale in calma di vento (inverno).....	37
5.5	Scenario 2: config. portuale attuale con vento da SO (inverno).....	40
5.6	Scenario 3: config. portuale attuale in calma di vento (estate).....	43
5.7	Scenario 4: config. portuale attuale con vento da SO (estate).....	46
5.8	Scenario 5: config. portuale futura in calma di vento (inverno).....	49
5.9	Scenario 6: config. portuale futura con vento da SO (inverno).....	52
5.10	Scenario 7: config. portuale futura in calma di vento (estate).....	55
5.11	Scenario 8: config. portuale futura con vento da SO (estate).....	58
5.12	Valutazioni aggiuntive.....	61
6	CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	63

STORIA DELLE REVISIONI

Numero revisione	Data	Protocollo	Lista delle modifiche e/o dei paragrafi modificati
0	26/09/2019	B9014374	Prima emissione

1 SOMMARIO

La Centrale Termoelettrica Eugenio Montale di La Spezia, ubicata in prossimità del porto di La Spezia nella parte Est della città, si inserisce in un contesto industriale caratterizzato da una pluralità di insediamenti produttivi (Figura 1, Figura 2).

La sezione SP3 a carbone (potenza termica di 1540 MW_t), rientrata in esercizio nel 2001 dopo aver subito una serie di lavori di adeguamento ambientale, è attualmente l'unica unità in esercizio autorizzata.

Il progetto denominato " *Progetto di sostituzione dell'unità a carbone esistente con nuova unità a gas*" prevede il riutilizzo del sito e la costruzione nell'area di impianto di un ciclo combinato, taglia 800 MW_e, in sostituzione dell'unità SP3. Il nuovo gruppo in ciclo combinato si chiamerà La Spezia SP5.

Per arrivare alla realizzazione del nuovo Ciclo Combinato si passerà per una fase intermedia con l'esercizio della sola Turbina a Gas (funzionamento in ciclo aperto OCGT), utilizzando il camino di *by-pass*, con una potenza prodotta di 560 MW_e.

Il nuovo ciclo combinato presenta le caratteristiche tecniche/operative idonee per inserirsi nel contesto energetico nazionale ed europeo, nell'ottica di garantire la continua evoluzione e transizione energetica verso la riduzione della generazione elettrica da fonti maggiormente inquinanti – nell'ottica di traguardare gli obiettivi strategici di decarbonizzazione - e contemperando la salvaguardia strutturale degli equilibri della rete elettrica.

Il criterio guida del progetto di conversione della centrale è quello di preservare il più possibile la struttura impiantistica esistente e riutilizzare gli impianti ausiliari, migliorando le prestazioni ambientali ed incrementando sostanzialmente l'efficienza energetica. Ove possibile, favorire il recupero dei materiali in una logica di economia circolare.

Rispetto alla configurazione attuale autorizzata all'esercizio con decreto di Autorizzazione Integrata Ambientale (A.I.A.) D.M. -2013-0000244 del 6/09/2013, il progetto consentirà di:

- ridurre la potenza termica attuale da circa 1.540 MW_t a circa 1.350 MW_t;
- incrementare la potenza elettrica di produzione (circa 840 MWe¹, contro i 600 MWe attuali), raggiungendo un rendimento elettrico netto superiore al 60%, rispetto all'attuale 39%, riducendo contestualmente le emissioni di CO₂ al 60%;
- ottenere una concentrazione di emissioni in atmosfera di NO_x e CO sensibilmente inferiore ai valori attuali (NO_x ridotti da 180 (al 6% O₂ su base secca), a 10 mg/Nm³ (al 15 % O₂ su base secca), CO che passano da 150 (al 6% O₂ su base secca), a 30 mg/Nm³ (al 15 % O₂ su base secca));
- azzerare le emissioni di SO₂ e polveri.

Nell'ambito di tale progetto Enel ha chiesto a CESI la verifica del rispetto della legislazione vigente in merito alla dispersione delle acque di raffreddamento dei condensatori nel nuovo assetto d'impianto.

In considerazione della recente approvazione del Piano Regolatore del Porto di La Spezia (PRP) vigente ai sensi della L.84/94, la verifica è stata condotta sia nella configurazione portuale attuale, sia in quella futura di totale attuazione delle opere previste nel Piano.

In particolare, l'attuazione del PRP comporterebbe la realizzazione di nuove opere di canalizzazione e di presa a mare delle acque di raffreddamento della centrale termica in corrispondenza del nuovo piazzale previsto tra il Terminal del Golfo ed il molo Enel, oltre che la copertura del diffusore di scarico mediante una struttura poggiata su pali che collegherà il Terminal Ravano e il Terminal del Golfo.

Per rispondere alle richieste di Enel si è dunque provveduto, per la configurazione portuale esistente e per quella in progetto:

- alla discretizzazione dell'area marina dell'intera rada della Spezia,
- alla definizione del campo di moto che si verrebbe a generare per effetto dell'aspirazione e dello scarico, e all'analisi della dispersione della perturbazione termica per la verifica del rispetto dei limiti di legge.

La caratterizzazione ambientale del sito, quella strutturale delle opere di presa/scarico della centrale e quella delle opere portuali previste nel nuovo Piano Regolatore Portuale sono state necessarie per la definizione delle condizioni più critiche sulle quali impostare ed eseguire le simulazioni numeriche di verifica.

L'analisi per la dispersione dello scarico delle acque di raffreddamento nelle condizioni meteomarine caratteristiche del sito è stata condotta attraverso un codice di simulazione numerica in grado di caratterizzare con un dettaglio tridimensionale l'idro-termodinamica dell'area coinvolta. Data la tipologia dello scarico, le simulazioni sono state condotte con il codice tridimensionale TRIMDI (Rif. 1).

Il presente documento descrive le attività complessivamente svolte e i risultati ottenuti.

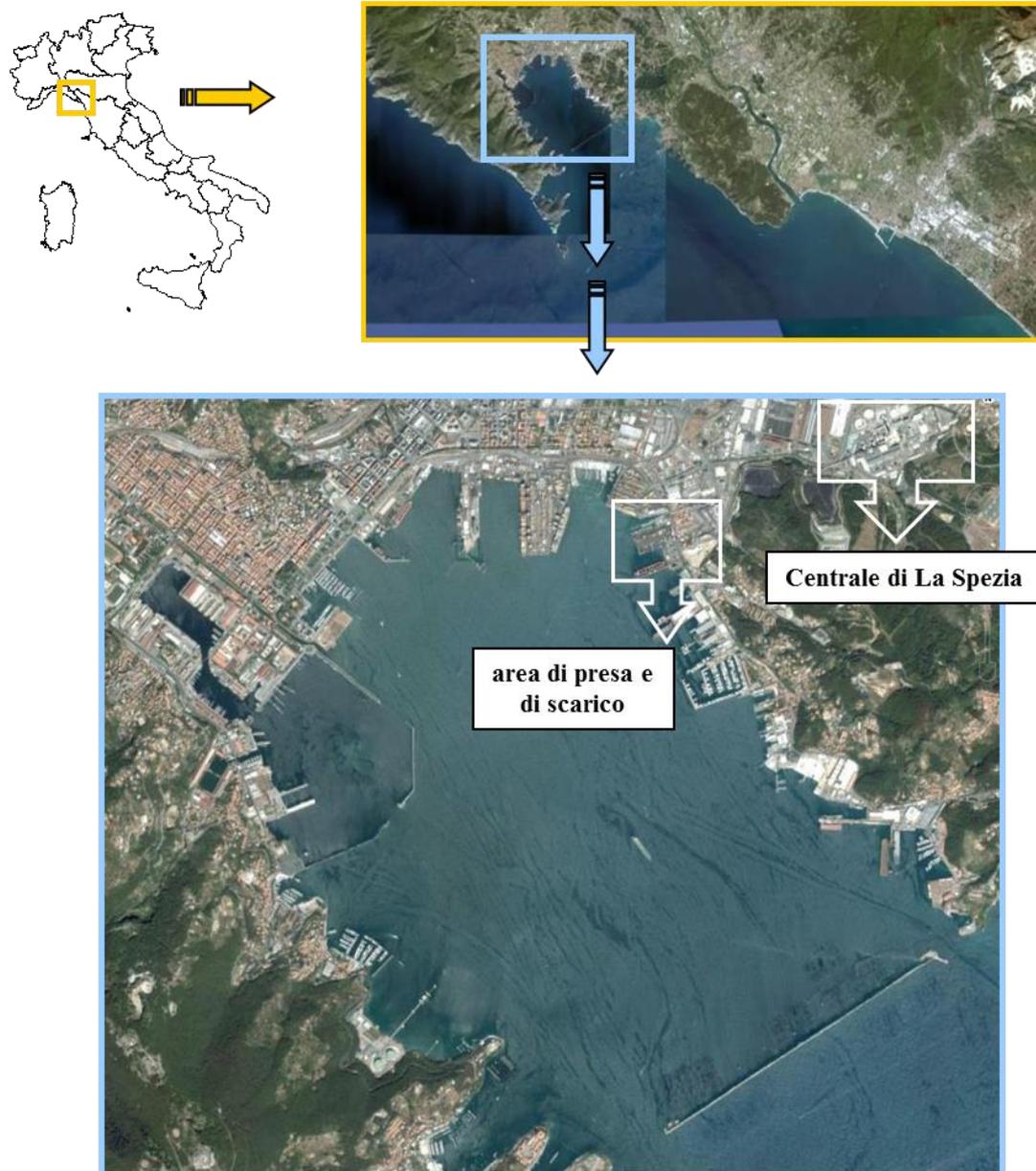


Figura 1 Corografia generale della rada di La Spezia con indicazione dell'area di presa e di scarico delle acque di circolazione della centrale; nella medesima area si colloca anche l'attuale pontile di attracco delle navi a servizio della centrale.

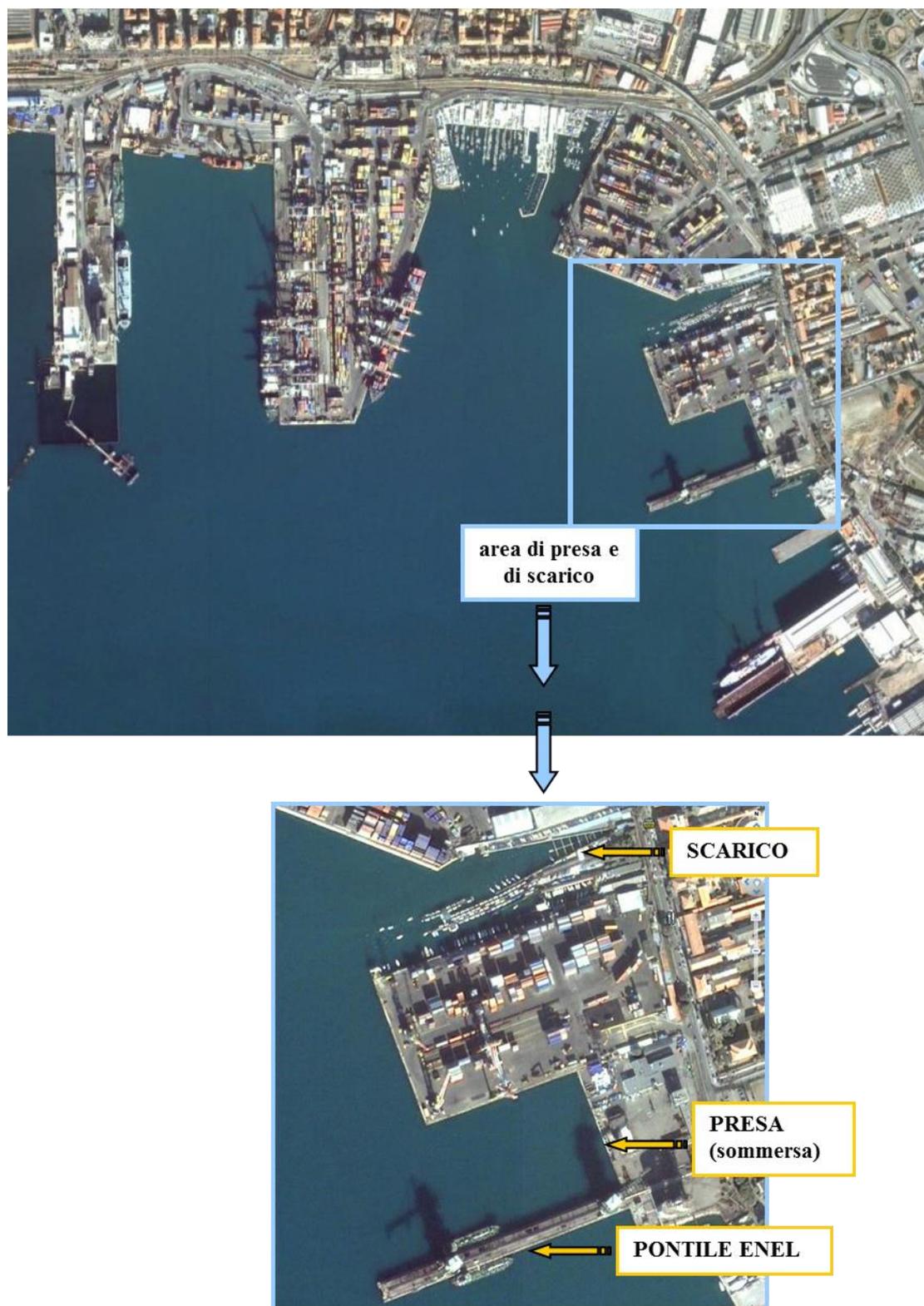


Figura 2 Localizzazione del pontile Enel, del diffusore di scarico e della presa delle acque di circolazione della centrale (profilo di riva 2015 circa).

2 INTRODUZIONE

2.1 Scopo dello studio

Il progetto del nuovo gruppo a ciclo combinato, SP5 in sostituzione dell'esistente gruppo a carbone SP3 della Centrale di La Spezia, che prevede una prima fase con l'esercizio della sola Turbina a Gas (funzionamento in ciclo aperto OCGT), con una potenza prodotta di 560 MW_e e una seconda fase con l'installazione di una turbina a vapore con una ulteriore potenza prodotta di circa 280 MW_e e conseguente chiusura del ciclo (funzionamento in ciclo chiuso CCGT). Il progetto è stato verificato con particolare riferimento alla dispersione nella rada della Spezia delle acque calde generate dal raffreddamento dei condensatori.

Lo studio si propone di determinare le condizioni di circolazione all'interno della rada e di individuare la variazione della configurazione, dell'estensione e della profondità del pennacchio caldo generato dalla restituzione delle acque di raffreddamento necessarie al funzionamento della centrale nel futuro assetto.

In particolare, sono state valutate quelle situazioni che riproducono le condizioni meteomarine e meteorologiche del sito tali da ottenere risultati conservativi (ossia con adeguati margini di sicurezza) riguardo agli obiettivi seguenti:

- verifica del rispetto dei limiti di legge vigenti in merito alla dispersione del pennacchio termico delle acque di raffreddamento;
- verifica della dispersione del pennacchio termico e delle condizioni di flusso esistenti in prossimità delle bocche di presa e di scarico.

Le verifiche sono state eseguite considerando sia l'assetto attuale delle opere portuali in rada, sia la configurazione portuale futura derivante dalla completa attuazione del vigente Piano Regolatore Portuale.

Le figure che seguono illustrano l'evoluzione del profilo di riva intercorsa dagli anni '90 ad oggi e le modifiche previste dal nuovo PRP. In particolare:

- la Figura 3 mostra la situazione riscontrabile nella parte più interna della rada (I, II e III Bacino Portuale) secondo la cartografia nautica degli anni '90 (Rif. 2); il dettaglio in basso a destra mostra l'area del III Bacino Portuale ove si inseriscono la presa (sommersa), lo scarico (diffusore superficiale) della centrale e l'attuale pontile a servizio dell'impianto;
- la Figura 4 illustra, nelle medesime aree, i profili di riva del 2015, quello passato (ricavato dalla cartografia nautica degli anni '90, profilo rosso, da Rif. 2) e quello futuro (da Rif. 3); le campiture ciano e magenta evidenziano le differenze tra i profili;
- in Figura 5 si indicano (cerchi rossi) le principali modifiche al perimetro costiero realizzate nel triennio 2015-2017 nel tratto prossimo alla presa e allo scarico della centrale Enel;
- la Figura 6, infine, presenta le diverse tipologie di banchinamento previste nell'area del diffusore della centrale descritte nella documentazione predisposta dall'AP per la gara di assegnazione dei lavori (Rif. 4).

La tipologia dello scarico e della presa, unitamente alla topografia della costa ed alla conformazione delle opere marittime presenti sul perimetro costiero simulato, sono stati considerati con un dettaglio adeguato agli scopi dello studio.



Figura 3 Corografia generale della rada di La Spezia nelle aree del I, II e III Bacino Portuale secondo quanto ricavabile dalla cartografia nautica degli anni '90; il dettaglio in basso a destra riguarda il III Bacino Portuale ove si collocano le opere di presa e di scarico del circuito di raffreddamento della centrale Enel, oltre all'attuale pontile di attracco delle navi a servizio della stessa (Rif. 2).

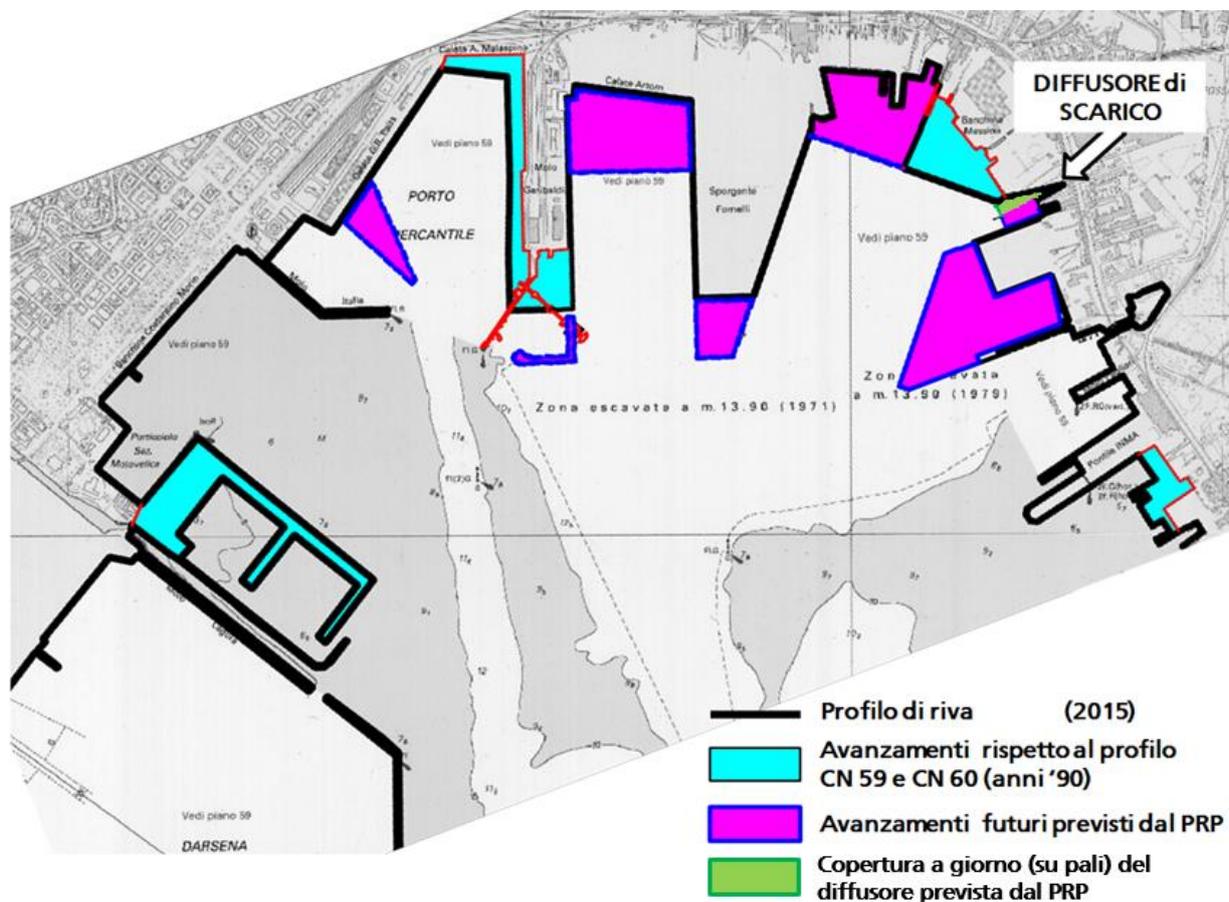


Figura 4 Rada della Spezia, aree del I, II e III Bacino Portuale: profili di riva 2015, passato (ricavabile dalla cartografia nautica degli anni '90, profilo rosso, da Rif. 2) e futuro (da Rif. 3); le campiture ciano, magenta e verde evidenziano le differenze tra i tre profili.

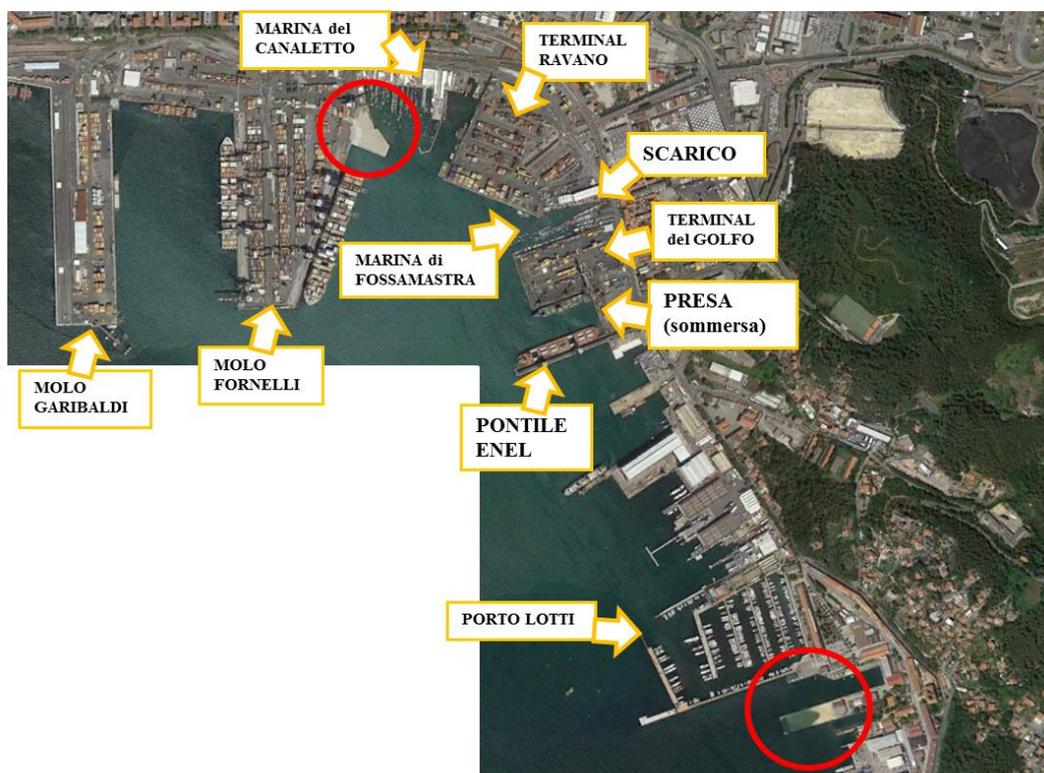


Figura 5 Profilo attuale (2017) del perimetro costiero nel tratto prossimo alla presa e allo scarico della centrale Enel con evidenziate in rosso le modifiche più importanti intercorse nel triennio 2015-17.



Figura 6 Rada della Spezia, area del diffusore di scarico della centrale. Tipologie di banchinamento differenti: a giorno (su travi e su pali, rispettivamente sopra il diffusore e davanti alla soglia di chiusura dello stesso) e con casse di colmata delimitate da palancole (in sponda sinistra al diffusore) (da Rif. 4).

2.2 Articolazione dell'attività

Sulla base delle considerazioni sopra esposte, lo studio è stato articolato nelle fasi distinte di seguito riportate:

1. analisi dei dati disponibili utili alla caratterizzazione ambientale del sito e dello scarico caldo e della presa della centrale localizzati nell'area più interna della rada; da essi è stato definito l'insieme dei parametri ambientali e di esercizio che influenzano il campo idrodinamico e termico; l'analisi è contenuta nel capitolo 3;
2. definizione di un dominio di calcolo per la simulazione con modello tridimensionale che tiene conto della conformazione della rada, della presenza delle opere portuali e di quelle relative allo scarico ed alla presa della centrale, e della zona di mare circostante per una estensione sufficiente a garantire l'instaurarsi di condizioni di equilibrio; sono stati generati complessivamente due reticoli di calcolo relativi, rispettivamente, all'attuale layout portuale e a quello futuro ricavato da quanto contenuto nel nuovo PRP e nella documentazione di gara emessa dall'AP di cui al Rif. 4, oltre che da quanto concordato direttamente da Enel con l'Autorità Portuale in merito alla configurazione del nuovo canale di presa; la descrizione del modello è riportata al capitolo 4;
3. esecuzione delle simulazioni numeriche, analisi ed elaborazione dei risultati ottenuti e stesura del rapporto tecnico conclusivo; la disamina dei risultati delle simulazioni è contenuta nel capitolo 5, mentre le considerazioni conclusive derivanti dallo studio sono oggetto del capitolo 6.

Le analisi per la dispersione dello scarico delle acque di raffreddamento degli impianti nelle condizioni meteomarine caratteristiche del sito sono state condotte attraverso un codice di simulazione numerica in grado di caratterizzare con un dettaglio tridimensionale l'idrodinamica dell'area coinvolta. Data la tipologia dello scarico, le simulazioni sono state condotte con il codice tridimensionale TRIMDI (Rif. 1), le cui principali caratteristiche sono descritte all'interno del capitolo 4.

2.3 Documenti di riferimento

- Rif. 1 AA.VV. – Codice di calcolo TRIMDI ver. 4.0. Manuali di Utenza. – Anno 2010. MTC/CFD_Num/104.09°. b. c.
- Rif. 2 IIM_Carta Nautica della Serie Internazionale, n° 60 INT 3365: "Mar Ligure. Italia. Rada di La Spezia." Scala 1:10.000.
- Rif. 3 Autorità Portuale della Spezia, "*Piano regolatore Portuale Golfo della Spezia. Tav. A.06.b. Ambito 6 e funzioni previste.*"
- Rif. 4 Autorità Portuale della Spezia, "*Elab. 01. Realizzazione banchina a giorno in corrispondenza del diffusore Enel. Progetto Preliminare. Relazione Illustrativa.*"
- Rif. 5 Edisonvolta SpA. Servizio Centrali Termiche, Milano. "*Centrale termoelettrica di la Spezia. Lavori marittimi. Opera di presa e tratto iniziale canale acqua di circolazione. Planimetria generale e profilo.*" Soc. p.AZ. Lavori Costruzioni Idrauliche, 25/5/1961.
- Rif. 6 Enel, Settore Produzione e Trasmissione di Torino. G.I.T. La Spezia "*Opera di scarico per acqua di circolazione.*" N. disegno 10801
- Rif. 7 Edisonvolta SpA. Servizio Centrali Termiche, Milano. "*Centrale termoelettrica di la Spezia. Lavori marittimi. Pontile costituito da elementi in cemento armato costruiti fuori opera e varati in posto. Sezione trasversale, longitudinale e orizzontale di un*"

elemento di 36 m." Progetto esecutivo e costruzione della Soc. p.AZ. Lavori Costruzioni Idrauliche, aggiornamento 20 novembre 1962.

- Rif. 8 Edisonvolta SpA. Servizio Centrali Termiche, Milano. *"Centrale termoelettrica di la Spezia. Lavori marittimi. Pontile costituito da elementi in C.A. costruiti fuori opera e varati in posto. Sezioni trasversali del pontile."* Soc. p.AZ. Lavori Costruzioni Idrauliche, aggiornamento 8 maggio 1961.
- Rif. 9 IIM_Carta Nautica n° 59: "Mar Ligure. Italia. Porto di La Spezia." Scala 1:5.000
- Rif. 10 Consiglio Regionale della Liguria. Deliberazione N° 45 *"Piano Regolatore del Porto di La Spezia ai sensi dell'Articolo 5, comma 4, della legge 28 gennaio 1994 N° 84 (riordino della legislazione in materia portuale) e dell'Articolo 1 della Legge Regionale 12 marzo 2003 N° 9 (procedure per l'approvazione regionale dei piani regolatori portuali e dei progetti di interventi negli ambiti portuali)."* Estratto del processo verbale dell'adunanza del 19 dicembre 2006 (file: Piano Regolatore del Porto della Spezia.pdf)
- Rif. 11 Google Earth: A 3D interface to the planet - <http://earth.google.com>
- Rif. 12 ICRAM (oggi ISPRA) *"Progetto preliminare di bonifica dell'area marina inclusa nella perimetrazione del sito di bonifica di interesse nazionale di Pitelli."* Marzo 2005
- Rif. 13 ENEL *"Rilievi batimetrici eseguiti presso la banchina Molo Enel – Porto della Spezia."* Marzo 2012 (rilievo eseguito da ART SUB srl Lavori marittimi e Subacquei)
- Rif. 14 Autorità Portuale della Spezia. Terminal del Golfo. Progetto di ampliamento del Terminal del Golfo. Progetto Preliminare. Planimetria generale dello stato di fatto (PP D A 008 00 planimetria g.dwg. 12/1/2015)
- Rif. 15 Agate, Guandalini *"Centrale di La Spezia. Studio numerico dell'idrodinamica della rada per l'analisi di possibili soluzioni al problema della presenza di meduse nella zona della presa."* Rapporto CESI Prot. A4518616. Ottobre 2004
- Rif. 16 ARPAL. Caratterizzazione dell'area marina compresa nella perimetrazione del sito di interesse nazionale di Pitelli, per la parte affidata ad ARPAL con DGR n.982 del 10 settembre 2004 che ha integrato e modificato il programma per l'area a mare contenuto nella Delibera della Giunta Regionale n. 1028 del 07.08.03. Relazione finale (Pitellimare_relaz_03_giu_05.pdf)
- Rif. 17 ISPRA, RMN Rete Mareografica Nazionale <http://www.mareografico.it/>
- Rif. 18 V. Bogani, A. Di Monaco, G. Dinelli, A. Leoncini, *"Analisi Termo-Idrodinamica della dispersione di inquinanti in corpi idrici complessi: Applicazione alla foce del Tevere"*, Enel Rassegna Tecnica n.3, 1983
- Rif. 19 E.Ghisolfi, M.Miserocchi, P. Molinaro, *"Validation of a mathematical model for the simulation of the thermal impact of ENEL power plant on natural water bodies."*, rapporto ENEL-DSR-CRIS n. 3872, presentato alla International Conference HYDROSOFT '90, 3-5 Aprile 1990, Lowell U.S.A.
- Rif. 20 A.Borella, M.Cambiaghi, P.Marri, R.Meloni,, M.Miserocchi, R.Nair, M.Tomasino, *"Gulf of La Spezia: An Analysis of the Mechanisms of Water Exchange between the Inner Gulf and the Open Sea"*, Proceedings of the Second International Conference Marina Technology, Southampton (UK), 31 March – 2 April, 1992.
- Rif. 21 Tecplot 360 (2006). Tecplot, Inc. Bellevue, WA
- Rif. 22 DLgs 152/06 e s.m.i., "Norme in materia ambientale", 3 aprile 2006 n.152 (Suppl. ordinario gazz. Uff. n. 88 del 14/04/2006)

- Rif. 23 Metodica APAT_IRSA-CNR "*Metodi analitici per le acque. Volume 1. Sezione 2100_Temperatura*" APAT Manuali e linee guida, 29/2003
- Rif. 24 Notiziario IRSA. "*Metodi analitici per le acque: Metodologie per la determinazione dell'incremento di temperatura nelle acque marine a seguito di sversamenti di scarichi termici.*" n. 4, Ottobre – Dic. 1993
- Rif. 25 ARPAL, Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente Ligure. Documento di cui al Registro Ufficiale 0021168 07/08/2013 11:59 Uscita avente per Oggetto: "*Controllo Temperatura – scarico acque raffreddamento Centrale ENEL – SP. Rilevazione del 26/07/2013*".
- Rif. 26 Regione Liguria. "*Aree destinate alla mitilicoltura - sc.1:5000 - D.G.R. 2216/1996*"
geoportale.regione.liguria.it

3 CONDIZIONI DI ANALISI

3.1 Considerazioni generali

La corretta riproduzione del campo di moto nella rada della Spezia impone la simulazione contemporanea delle forzanti ambientali (vento, corrente, marea, ...) tipiche del sito, della topografia e della batimetria che caratterizzano la configurazione della costa e dei fondali su cui agiscono tali forzanti e della restituzione in rada delle acque di raffreddamento della centrale. Si tratta dunque di un problema particolarmente complesso per il quale diviene essenziale la fase di analisi dei parametri meteomarinari caratteristici e delle condizioni di scarico.

In particolare, i dati necessari all'esecuzione dello studio fanno riferimento alle seguenti tipologie:

- a. dati geometrici di impianto, relativi soprattutto alle opere di scarico e di presa delle acque di circolazione, oltre che all'attuale pontile di attracco delle navi che movimentano il combustibile per la centrale;
- b. dati relativi alla configurazione portuale attuale e futura, per la definizione del profilo costiero emerso, e alla batimetria, per la ricostruzione schematizzata del fondale;
- c. dati marini relativi a temperatura, corrente ambientale e livello del mare;
- d. dati meteorologici, con riferimento particolare alla direzione ed intensità del vento.

3.2 Dati geometrici di impianto

I dati geometrici che interessano ai fini dell'analisi del campo termico e di moto nel tratto di mare interessato dallo studio riguardano essenzialmente le opere di presa e di scarico, entrambe a mare, della centrale. Notevole interesse riveste poi la conoscenza delle eventuali altre opere a mare (moli, pontili, frangiflutti, ecc.) che potrebbero interferire soprattutto con lo scarico delle acque di raffreddamento, particolarmente nel caso in esame in cui lo scarico avviene in un bacino semichiuso. Tra le opere a mare da considerare con particolare attenzione, anche perché interessato da pesanti interventi secondo quanto riportato nel Piano Regolatore Portuale, è il pontile Enel a servizio della centrale.

Le informazioni relative alle caratteristiche costruttive delle opere di presa e di scarico delle acque di circolazione, nonché quelle del pontile Enel sono state fornite da Enel (da Rif. 5 a Rif. 8).

3.2.1 Caratteristiche dell'opera di scarico

L'opera di scarico è realizzata mediante un diffusore a pelo libero situato all'interno del porto di La Spezia tra il Terminal Ravano (in sponda destra) ed il Terminal del Golfo (in sponda sinistra) come mostrato nella Figura 2 e nella Figura 5. L'opera di scarico, lunga 127 m, larga poco meno di 4 m alla sezione iniziale e 40 m a quella di efflusso finale, presenta una profondità di scarico alla sezione *inshore* pari a 5.78 m, mentre l'efflusso alla sezione *offshore* avviene attraverso una soglia con sommità posta 2 m al di sotto del pelo libero (configurazione del diffusore cosiddetta "a becco di flauto").

3.2.2 Caratteristiche dell'opera di presa

L'opera di presa è sommersa e le principali caratteristiche costruttive sono:

- larghezza della bocca di presa pari a 32 m,
- altezza della bocca di presa pari a 6 m,
- profondità minima di presa pari a -3 m,
- profondità massima di presa pari a -9 m,
- area totale dell'opera di presa pari a 192 m².

Più in dettaglio, l'opera di presa è costituita da un totale di 8 bocche di presa, di larghezza pari a 4 m ciascuna, e di altezza pari a 6 m, separate da setti di 40 cm di spessore.

3.2.3 Il pontile Enel

In prossimità dell'opera di presa si colloca il pontile Enel adibito all'ormeggio delle navi carboniere necessarie all'esercizio della centrale termoelettrica; largo 20 m si protende in mare per una lunghezza di 254 m.

Nella sua configurazione attuale, si tratta di una struttura su cassoni prefabbricati in cemento armato pieni, in corrispondenza del tratto di radicamento a terra lungo 20 m e di quello terminale lungo 54 m, e a giorno (su pali) nel tratto intermedio lungo 180 m. La parte a giorno è costituita da cinque moduli di 36 m ciascuno; all'interno di ciascun modulo sono presenti 4 cassoni circolari del diametro di 8.6 m.

I cassoni allineati a formare l'opera sono basati su un riempimento in misto arido posto su aree preventivamente dragate, con un piano di posa a -12.5 m s.l.m.m..

3.3 Configurazione costiera e batimetria dell'area

La rada della Spezia comprende il settore più settentrionale del golfo omonimo, caratterizzato da una valle longitudinale abbastanza profonda orientata da NW verso SE e parzialmente occupata dal mare, appartenente al comprensorio della Riviera di Levante. Più precisamente, la rada di La Spezia si estende da punta S. Teresa ad oriente fino a punta S. Maria ad occidente, ed è chiusa verso il mare aperto da una diga foranea lunga circa 2200 m caratterizzata da due bocche di passaggio una a levante, larga circa 200 m, ed una a ponente di larghezza pressoché doppia; la diga foranea con una profondità media di circa 10 m, delimita a sud l'intero golfo.

I dati raccolti allo scopo di caratterizzare la configurazione costiera e della rada sono principalmente tratti dalla cartografia nautica esistente (Rif. 2 e Rif. 9) opportunamente aggiornata con quanto contenuto nella più recente documentazione tratta dal Nuovo Piano Regolatore Portuale di recente approvazione (Rif. 10). Le foto satellitari tratte da Rif. 11 hanno consentito di aggiornare i profili costieri ricavati dalle fonti precedenti.

La ricostruzione delle quote di fondale è stata realizzata anche con riferimento a:

- rilievo batimetrico (2005) multibeam eseguito da ICRAM (oggi ISPRA) nell'intero golfo nell'ambito della analisi chimiche e tossicologiche necessarie al progetto di bonifica derivato dall'inclusione dell'intero Golfo nel sito di interesse nazionale di Pitelli (Rif. 12);
- rilievo batimetrico di dettaglio (2012) nell'area della banchina Enel (Rif. 13);
- rilievo batimetrico (2015) nell'area di presa/scarico e della banchina Enel (Rif. 14).

Per quanto riguarda la batimetria del golfo si segnala il canale per il transito di navi ad elevato pescaggio tra la bocca di Ponente, il pontile Enel e i moli Fornelli e Garibaldi, dragato ad una profondità minima di circa 14 m (da cartografia nautica) così come la relativa area di manovra.

L'insieme delle informazioni raccolte ha consentito di ricostruire con una buona approssimazione l'intero fondale all'interno e all'esterno della diga foranea facendo uso del modulo di pre - processamento di cui è dotato il codice in uso; la batimetria risultante è riportata in Figura 7.

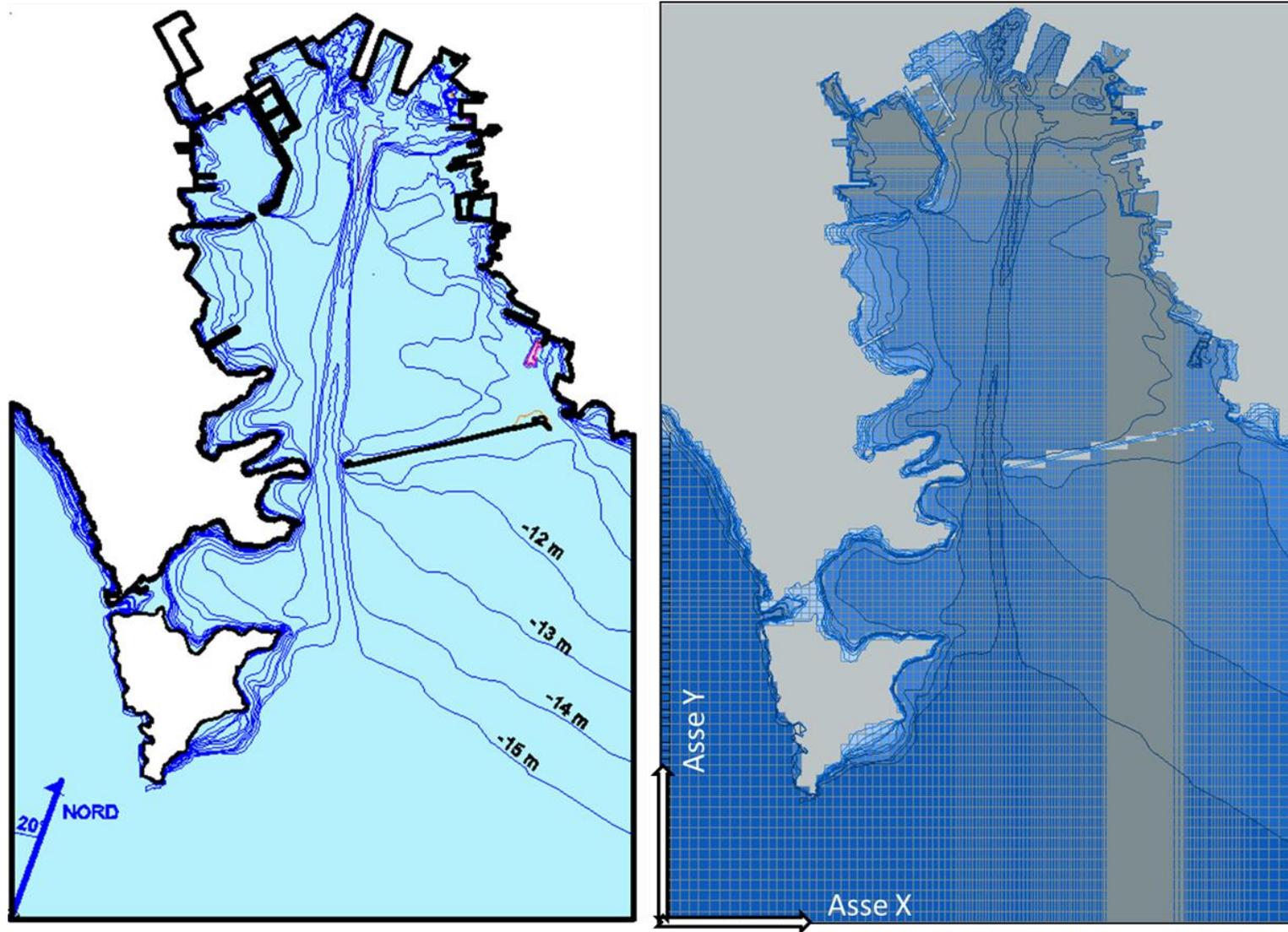


Figura 7 Batimetria attuale (a sinistra) e sua schematizzazione nel modello di calcolo (a destra)

3.4 Dati meteomarini

3.4.1 Circolazione costiera

La circolazione delle correnti all'interno della rada, attraverso le bocche di Ponente e Levante, e all'esterno della diga foranea è schematicamente illustrata in Figura 8 (Rif. 15). Si tratta della sintesi delle misure relative a tre specifiche campagne condotte in periodi stagionali diversi (30 Maggio, 1 Giugno 1989, 29 Agosto, 1 Settembre 1989 e 30 gennaio e 2 febbraio 1990) nell'area di interesse.

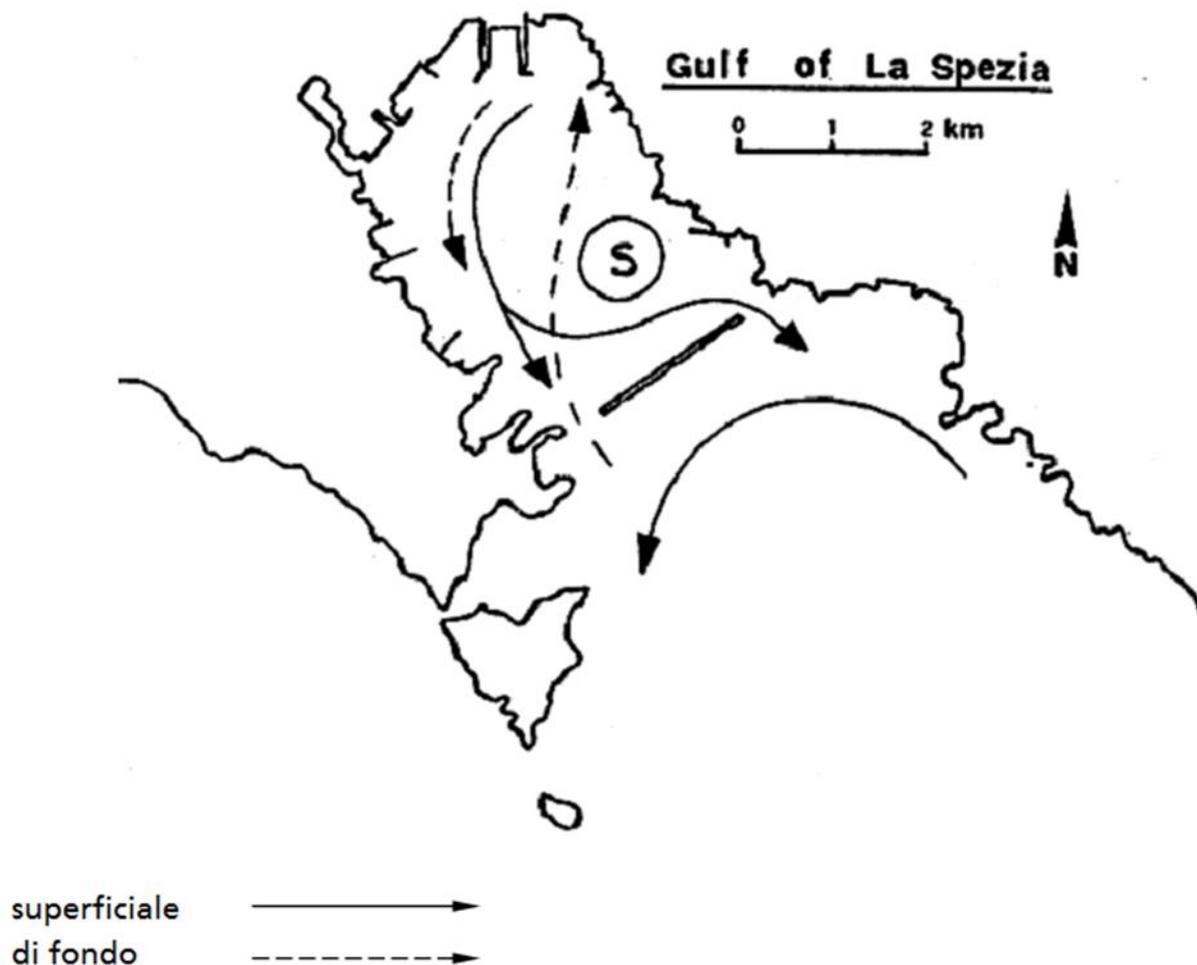


Figura 8 Andamento tipico della circolazione nella rada (Rif. 15)

In corrispondenza della bocca di Levante si individua una corrente ligure-tirrenica, che scorre parallelamente alle coste toscane dirigendosi verso le coste liguri, e che si incunea nella rada inducendo una circolazione ciclonica residua con velocità media di circa 3 cm/s. La circolazione globale risulta di tipo antiorario sia in superficie sia sul fondo. In generale l'acqua tende ad uscire dalle bocche nello strato superficiale e ad entrare nello strato di fondo. Inoltre la corrente profonda che attraversa la rada diagonalmente dalla bocca di Ponente allo scarico della centrale segue il canale di transito delle navi mercantili, scavato alcuni metri al di sotto del fondale naturale.

La zona ("S") rappresentata in figura rappresenta una zona di ristagno, caratterizzata da deboli fenomeni idrodinamici e una bassa salinità.

Indagini più recenti condotte in fase di caratterizzazione dell'area marina compresa nella perimetrazione del sito di interesse nazionale di Pitelli (Rif. 16) confermano le caratteristiche generali dello schema circolatorio nel golfo. In particolare, si richiama l'appartenenza di tale schema al sistema di circolazione generale di tipo ciclonico con masse d'acqua che si muovono prevalentemente in senso antiorario da levante a ponente. La confluenza della corrente tirrenica proveniente da sud e della corrente ligure, che scorre lungo la Corsica, caratterizza la costa ligure orientale come zona di transizione fra il mar Tirreno ed il mar Ligure.

La circolazione all'interno della rada è caratterizzata da un idrodinamismo ridotto. In particolare, si segnala che i processi che regolano il ricambio delle acque al suo interno sono legati alla circolazione residua dovuta all'azione combinata del vento di brezza e dello scarico termico della centrale ENEL, che determina il trasporto dalle zone più interne verso le bocche della diga, ed a componenti attive in vicinanza delle bocche, che favoriscono il rimescolamento delle acque e gli scambi tra rada e mare aperto.

3.4.2 Livello marino

L'andamento del livello marino nell'area del golfo è stato ricavato dai dati di livello idrometrico della stazione di Porto Lotti (Rete Mareografica Nazionale, RMN, Rif. 17). I livelli mostrati in Figura 9 si riferiscono all'anno 2014.

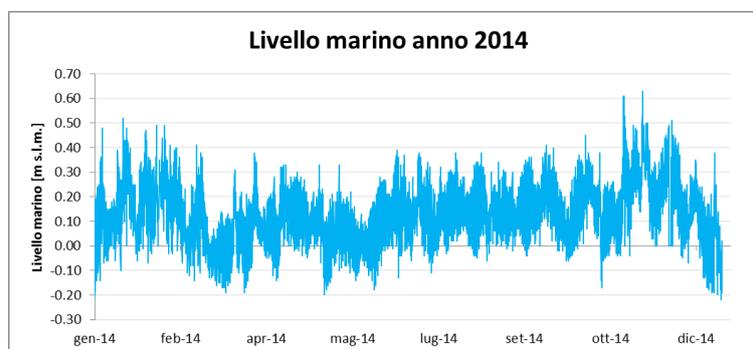


Figura 9 Andamento del livello marino alla stazione (RMN) di Porto Lotti (Rif. 17)

Nel golfo della Spezia la variazione del livello del mare è dovuta principalmente alla sovrapposizione di tre fenomeni: la marea astronomica, la marea meteorologica e le sesse.

La marea astronomica è di tipo prevalentemente semidiurno: si verificano cioè normalmente due alte e due basse maree al giorno. Le oscillazioni del livello riscontrate alla stazione di Porto Lotti evidenziano escursioni generalmente comprese tra -0.2 m e +0.4 m; fa eccezione la condizione raggiunta nel mese di novembre con livello a quota +0.6 m. Esiste anche una periodicità bisettimanale legata alla posizione relativa della luna e del sole. A titolo di esempio si riporta in Figura 10 una tipica escursione di livello nella rada di La Spezia con maree massime (fase di sizigia), comunque contenute, e minime (fasi di quadratura).

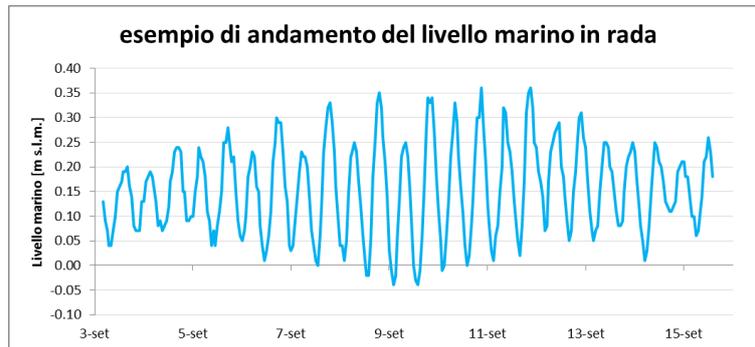


Figura 10 Andamento settimanale del livello marino alla stazione (RMN) di Porto Lotti (Rif. 17)

Le misure hanno inoltre evidenziato che allontanandosi dalle bocche le velocità oscillanti dovute alla sessa diventano meno intense, finché a circa 500 m dalla diga foranea predominano le velocità di corrente dovute al campo di densità ed al vento.

Tutto ciò premesso, ai fini della simulazione si è considerato un livello medio di riferimento pari al livello di medio mare.

3.4.3 Moto ondoso

Scopo delle presenti verifiche è quello di analizzare la situazione in condizioni meteorologiche critiche per le fenomenologie in esame che si accompagnano, generalmente, a condizioni di pressione stabile.

Le condizioni più critiche dal punto di vista della dispersione, infatti, fanno riferimento a venti di intensità moderata o a situazioni di calme di vento, che corrispondono in generale ad un moto ondoso non particolarmente sviluppato.

Nel caso in cui si manifestassero localmente forti variazioni di pressione atmosferica di tipo depressionario ci si troverebbe in presenza di condizioni di burrasca; si verrebbero quindi a creare delle condizioni idrodinamiche estremamente turbolente negli strati superficiali del corpo idrico e, dunque, non riproducibili dai sistemi di equazioni sviluppati ed implementati in questo e in altri simili modelli di calcolo.

Tutto ciò premesso nel presente studio non viene considerata la presenza di moto ondoso, mentre gli effetti delle correnti generate dal moto ondoso all'esterno del golfo sono inclusi nella simulazione di una corrente costiera all'esterno della rada.

3.4.4 Temperatura e salinità dell'acqua di mare

La temperatura misurata in mare presso la stazione di Porto Lotti (Rete Mareografica Nazionale, RMN, Rif. 17) presenta una marcata variabilità stagionale. La Figura 11 illustra l'andamento della temperatura media giornaliera ottenuta dai rilievi della suddetta stazione nel periodo 2011 – 2014.

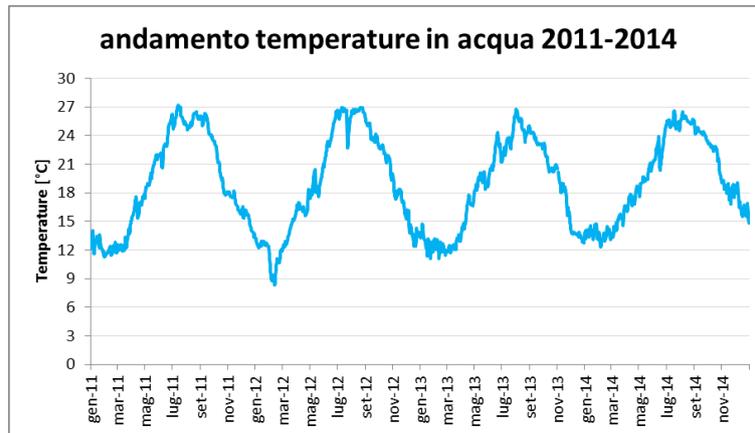


Figura 11 Andamento delle temperature misurate alla stazione (RMN) di Porto Lotti (Rif. 17)

Eccezion fatta per l'inverno 2012, le temperature minime misurate si mantengono intorno al valore di 12°C, con una lieve tendenza all'aumento durante il periodo esaminato. Le temperature massime nel periodo considerato 2011-2014 si mantengono sempre inferiori ai 27°C.

Le temperature complessivamente considerate negli scenari di calcolo hanno riprodotto condizioni invernali (12 °C) ed estive queste ultime, in un'ottica conservativa come spiegato in precedenza, più critiche di quelle misurate nel periodo 2011-2014 esaminato (28 °C).

Per quanto riguarda la salinità si è applicato un valore medio del 37 per mille in accordo con i valori tipici del Mediterraneo riscontrabili anche nel golfo della Spezia.

3.5 Analisi anemologica del sito

La direzione del vento nella rada di La Spezia è fortemente condizionata dalle caratteristiche morfologiche del bacino. L'orografia del golfo è tale che l'effetto del vento non è uniforme su tutta la rada; ciò amplifica la rotazione antioraria delle acque in rada, già sostenuta dal gradiente di densità e dallo scarico della centrale.

Per l'analisi anemologica nell'area oggetto del presente studio si è fatto nuovamente riferimento ai dati meteo della stazione di Porto Lotti (coordinate UTM N: 4882954.810 E: 568924.659), distante circa 1 km dalle opere di presa e di scarico della centrale ENEL.

La stazione meteo, posta in mare, non risente né di effetti orografici né di particolari condizioni locali, e pertanto può essere considerata rappresentativa delle condizioni meteo nell'area del golfo di La Spezia.

Qui di seguito sono riportate le frequenze del vento per ciascun settore di riferimento e le relative velocità medie. L'esame dei dati di intensità e direzione del vento si riferisce agli anni compresi tra il 2011 e il 2014. L'analisi è stata applicata sia considerando l'intero periodo (2011-2014), illustrato in Figura 12 come rosa dei venti, sia distinguendo tra periodo invernale e periodo estivo, come mostrato nei due grafici di Figura 13.

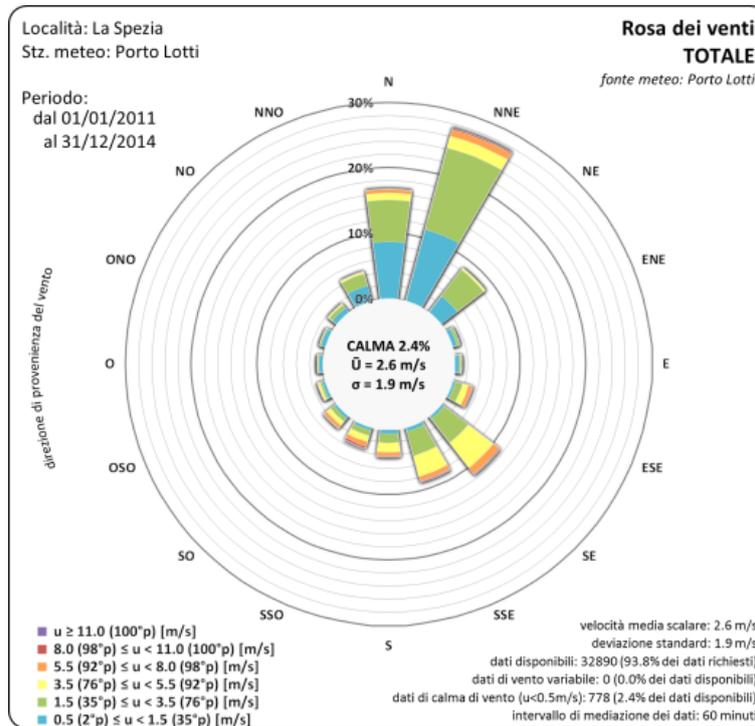


Figura 12 Rosa dei venti della stazione meteo di Porto Lotti (Rif. 17) nel periodo 2011-2014

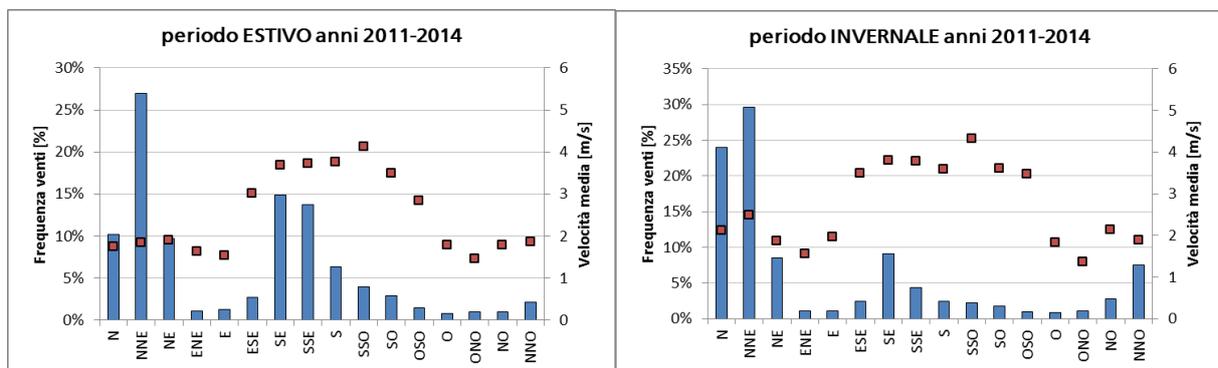


Figura 13 Frequenza relativa e velocità media dei venti misurati a Porto Lotti (Rif. 17) nel periodo estivo e invernale (anni 2011-2014)

I venti sono in prevalenza moderati mentre i periodi di calma di vento sono limitati. Per quanto riguarda l'andamento stagionale, in inverno predominano i venti settentrionali mentre dalla primavera inoltrata in poi il regime anemometrico varia considerevolmente. Analizzando i dati di frequenza del vento per il periodo compreso tra il 2011 e il 2014 è possibile affermare che esiste una prevalenza dei venti provenienti da N-NNE (45%) e SE-SSE (21%). Una condizione molto simile si verifica considerando il solo periodo estivo mentre in quello invernale, come segnalato in precedenza, i contributi dai settori settentrionali sono nettamente predominanti rispetto a quelli meridionali.

Le velocità maggiori si riscontrano nei settori meridionali ed in particolare nel settore SSO, con velocità medie di circa 4 m/s.

4 MODELLO NUMERICO DI SIMULAZIONE

Nel capitolo precedente sono state raccolte e documentate tutte le informazioni utili a definire i parametri che possono influenzare la dispersione termica del pennacchio caldo e che costituiscono l'input del modello di simulazione numerica TRIMDI (codice proprietario CESI).

Nel presente capitolo, dopo alcuni cenni sugli algoritmi matematici utilizzati nel codice, si descrivono le caratteristiche del modello di simulazione numerica, gli scenari scelti per lo studio e le condizioni al contorno applicate.

4.1 Cenni sulle caratteristiche del codice TRIMDI ver. 4.0

Nel seguito si riassumono la teoria e i procedimenti numerici che sono alla base del codice di calcolo TRIMDI, nella recente versione 4.0, sorvolando per brevità su tutti i dettagli matematici per i quali si rimanda a Rif. 1. Il codice TRIMDI, che implementa il modello matematico tridimensionale utilizzato per la simulazione numerica, è adatto per simulare la dispersione del calore (o di inquinanti non reagenti) all'interno di corpi d'acqua a superficie libera (fiumi, laghi, mare, ecc.).

Le ipotesi di base del modello sono le seguenti:

- la distribuzione della pressione in direzione verticale segue la legge idrostatica;
- la densità del fluido ambiente è funzione della temperatura e della salinità. La temperatura è calcolata mediante l'equazione dell'energia interna e la salinità attraverso un'apposita equazione di trasporto. Tali variabili sono attive per il calcolo della componente verticale di velocità. Ai fini del moto nel piano orizzontale la densità è invece considerata costante (approssimazione di Boussinesq).

La componente verticale della velocità non è trascurata, sebbene sia supposta essere piccola rispetto a quelle orizzontali. Questo permette la simulazione della circolazione verticale dovuta al trascinamento orizzontale o ai gradienti di densità.

• Le equazioni rappresentative del modello sono:

- l'equazione di bilancio della massa per fluidi incomprimibili:

$$\nabla \cdot \bar{\mathbf{u}} = 0$$

- l'equazione di bilancio della quantità di moto, scritta in forma vettoriale e mediata nei riguardi delle fluttuazioni turbolente:

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} + \bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla \bar{\mathbf{u}} = -\frac{1}{\rho_0} \nabla I p + \frac{1}{\rho_0} \nabla \tau + \frac{\rho}{\rho_0} \mathbf{g} \bar{k}$$

dove τ è il tensore degli sforzi di Reynolds, ρ_0 la densità media dell'acqua (costante), p la pressione, I la matrice identità e \bar{k} il versore nella direzione verticale;

- per le ipotesi citate l'equazione di bilancio della quantità di moto nella direzione verticale z si riduce all'equazione dell'equilibrio idrostatico:

$$\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\rho}{\rho_0} \mathbf{g} = 0$$

- l'equazione di bilancio della quantità di calore (o di una qualunque altra sostanza disciolta).

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla T = - \frac{1}{\rho_0 c_p} \nabla \cdot \bar{\Phi}$$

in cui si è indicata con $\bar{\Phi}$ il vettore dei flussi turbolenti, con c_p il calore specifico a pressione costante e T è la temperatura dell'acqua.

Il tensore degli sforzi che compare nell'equazione vettoriale della quantità di moto orizzontale viene modellato con l'introduzione di termini viscosi turbolenti; in modo analogo vengono trattati i flussi di calore legati all'agitazione turbolenta che compaiono nell'equazione di bilancio termico.

$$\tau_{i,j} = \rho_0 \nu_e \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right); \quad \Phi_i = \rho_0 c_p \alpha_e \frac{\partial T}{\partial x_i}$$

dove ν_e è la viscosità efficace (molecolare + turbolenta) e α_e la diffusività efficace.

Un semplice modello di turbolenza lega la viscosità e la diffusività turbolente alla velocità locale. Viene inoltre introdotta l'equazione di stato del fluido che fa dipendere la densità dalla temperatura o dalla concentrazione della sostanza disciolta; questo consente di riprodurre i gradienti di densità caratteristici dei moti stratificati.

Le condizioni al contorno, tra cui quella sulla superficie libera rappresentata dalla ben nota condizione cinematica, completano la formulazione matematica. La condizione sulla superficie libera è così descritta:

$$w = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \mathbf{u} \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \mathbf{v} \frac{\partial \zeta}{\partial y}$$

in cui u , v e w sono le tre componenti del vettore $\bar{\mathbf{u}}$ e ζ è l'elevazione della superficie libera.

Per la trattazione numerica delle equazioni, si suddivide la regione di interesse in strati orizzontali mediante piani paralleli al piano x, y . Tutti gli strati hanno spessore costante, indipendente da x, y e dal tempo t , con esclusione dello strato superficiale, che è delimitato superiormente dalla superficie libera. Una prima discretizzazione si ottiene integrando le equazioni di base sull'altezza dei singoli strati e sostituendo, alle variabili in esse contenute, i loro valori medi su tale altezza. Se dunque L è il numero degli strati, le incognite del sistema, funzioni di x, y e t , sono u_k, v_k, w_k (componenti della velocità), T_k (temperatura), p_k (pressione), per $k = 1, \dots, L$ e la funzione $\zeta(x, y, t)$ quota della superficie libera. Le variabili ausiliarie ρ (densità), ν (viscosità turbolenta) e α (diffusività turbolenta) si ottengono poi direttamente dalle variabili principali. Per la soluzione numerica delle equazioni viene adottato uno schema alle differenze finite, che utilizza un sistema di tre griglie nel piano orizzontale sfalsate tra loro (*staggered grid*).

Il metodo di integrazione temporale è del tipo Crank - Nickolson implicito. La non linearità delle equazioni di base conduce ad un sistema di equazioni algebriche non lineari, la cui soluzione rende necessario il ricorso ad un ciclo iterativo interno ad ogni passo temporale.

In particolare, quello adottato nel codice TRIMDI 4.0 è una estensione del metodo SIMPLE (*Semi Implicit Method for Pressure Linked Equation*).

Il modello di turbolenza si basa sul concetto di lunghezza di mescolamento che viene correlata con il passo spaziale locale del reticolo. I valori locali della viscosità e della diffusività, definiti dal modello di turbolenza, vengono poi ridotti in base al grado di stratificazione, misurato dal numero di Richardson locale, utilizzando le note relazioni semiempiriche.

Un ulteriore meccanismo riprodotto dal modello è lo scambio di calore con l'atmosfera attraverso la superficie libera dell'acqua. Questo fenomeno viene rappresentato, in forma linearizzata, per mezzo di un coefficiente di scambio il cui valore è stato oggetto di indagini sia teoriche che sperimentali (condotte proprio nel Golfo della Spezia).

Si precisa infine che il codice tiene conto dell'eventuale ricircolo alla presa dell'acqua di scarico: l'energia termica contenuta nell'acqua, prelevata alla sezione di presa in forma di sovrizzo termico rispetto alla temperatura ambiente imperturbata, viene automaticamente aggiunta all'energia termica rilasciata dallo scarico associato alla presa stessa.

La procedura di simulazione numerica utilizzata nel presente studio è già stata ampiamente utilizzata allo scopo di analizzare problemi connessi a scarichi termici da impianti termoelettrici ed a problemi di idrodinamica complessa, anche in zone portuali. Tra le numerose utilizzazioni del codice si rimanda, in particolare, a quelle di cui al Rif. 18, Rif. 19 e Rif. 20 classificabili come pubblicazioni scientifiche di validazione del codice TRIMDI.

4.2 Schema di analisi

I risultati ottenuti nelle diverse simulazioni numeriche portate a termine sono stati esaminati e valutati attraverso strumenti di post processing (Rif. 21) allo scopo di visualizzare gli andamenti del campo termico e di quello idrodinamico.

4.2.1 Reticolo di calcolo

Il dominio di calcolo illustrato nella sua globalità in Figura 7 (immagine a destra) e in dettaglio nell'area di presa e scarico, in Figura 14, ha un'estensione planimetrica di $6795 \times 9800 \text{ m}^2$, pari a 66.6 km^2 , per una profondità massima limitata a 17 m. La considerazione di profondità maggiori, infatti, avrebbe aggravato i tempi di calcolo senza peraltro apportare alcun beneficio all'accuratezza dell'elaborazione poiché i fenomeni in gioco non intervengono a tali profondità. L'asse Y del dominio di calcolo è inclinato di -20° rispetto al Nord (si veda al riguardo la Figura 7), in maniera tale da mantenerlo parallelo ai profili esterni della presa e del diffusore di scarico.

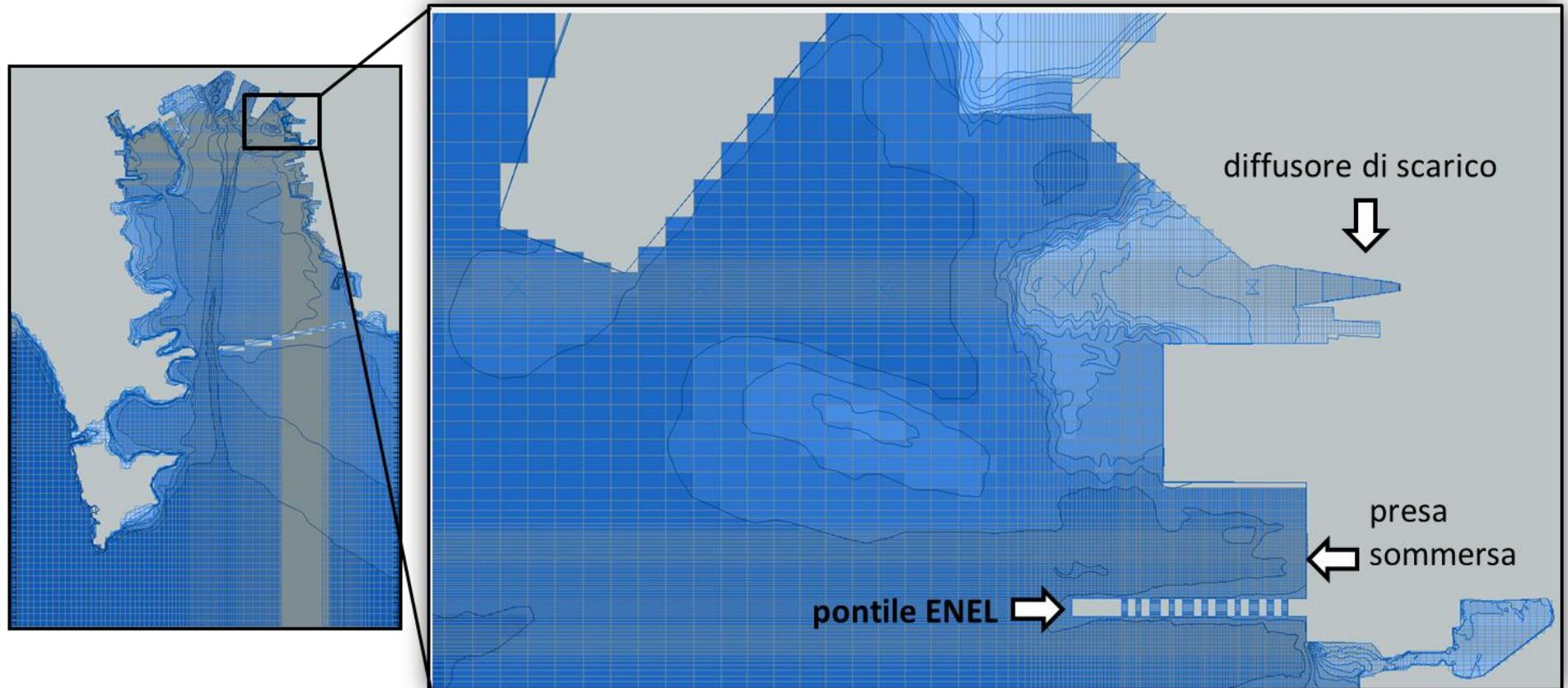


Figura 14 Primo reticolo di calcolo. Dettaglio nell'area della presa (sommersa) e del diffusore di scarico della centrale nella configurazione portuale attuale.

Nella direzione verticale il dominio è stato discretizzato in 15 strati orizzontali sovrapposti, le cui caratteristiche sono riportate nella Figura 15 che illustra, per ciascuno strato, le quote dal fondo e dalla superficie e gli spessori. La figura contrassegna anche gli strati in cui si collocano lo scarico e la presa dell'impianto.

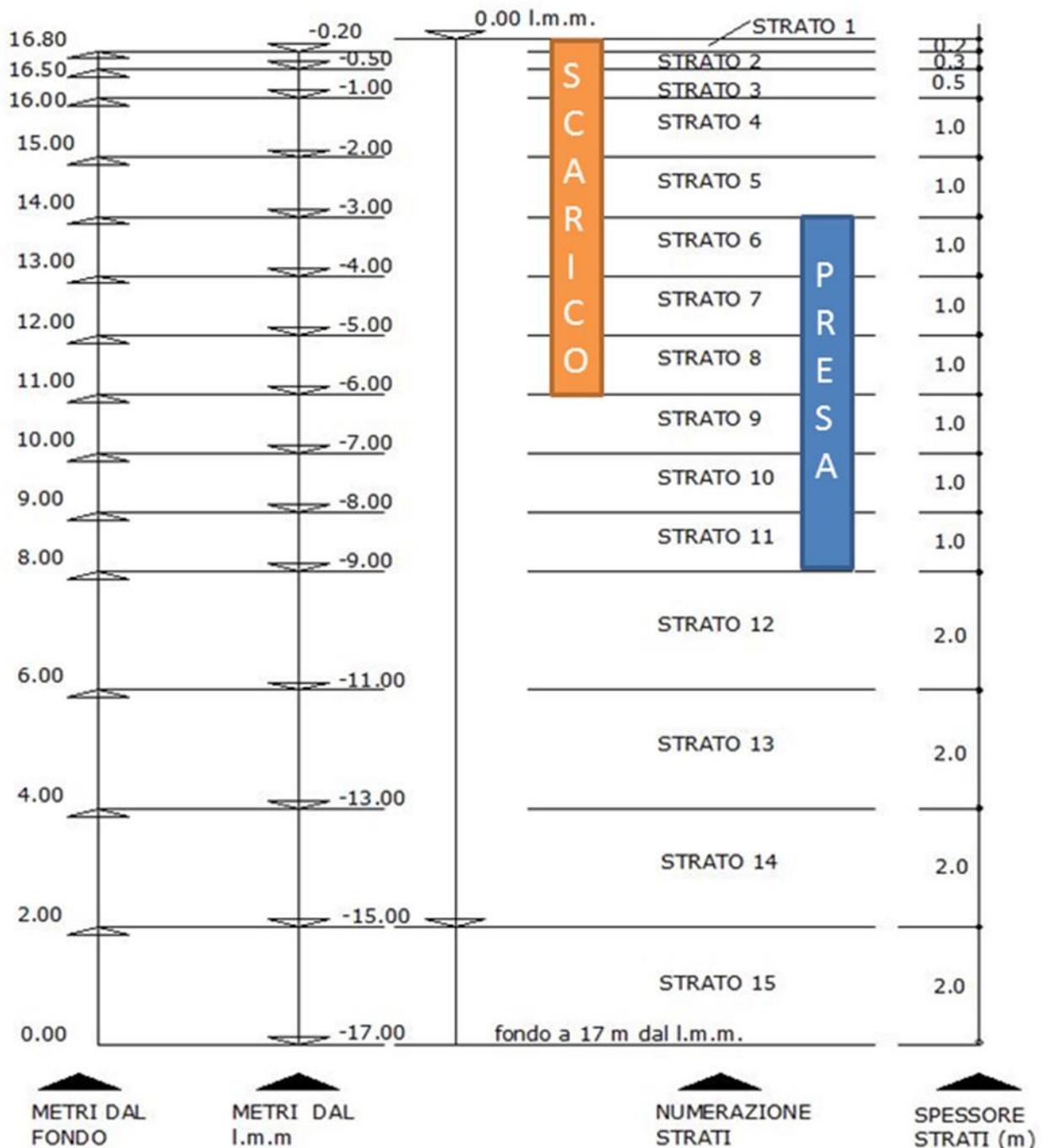


Figura 15 Caratteristiche degli strati verticali del primo dominio di calcolo con localizzazione della presa (sommersa) e dello scarico (diffusore superficiale)

La dimensione dei vari strati in cui è suddiviso il dominio di calcolo in direzione verticale è il risultato di un compromesso che vede, da un lato, la necessità di limitarne il numero per non accrescere eccessivamente i tempi di calcolo, e, dall'altro, la necessità di ottemperare ai seguenti criteri:

- suddividere la zona superficiale in un numero di strati sufficiente a descrivere in dettaglio i maggiori gradienti termici che si verificano in prossimità dello scarico,
- definire ciascuno strato in modo tale da aumentare o diminuire gradualmente l'altezza degli strati adiacenti, cosicché non si presentino forti discontinuità spaziali durante l'elaborazione allo scopo di ottimizzare il calcolo delle variazioni di campo di moto.

Per quanto riguarda la discretizzazione del dominio di calcolo nel piano, nel primo reticolo di calcolo l'area di interesse è stata suddivisa mediante 309 celle in direzione X e 298 celle in direzione Y. Le griglie di calcolo tridimensionali messe a punto sono costituite complessivamente da 1 381 230 celle. Nel conteggio sono incluse celle di terra, di acqua e di contorno; il campo termico e quelli di moto sono calcolati in corrispondenza delle celle di acqua.

Le zone in prossimità dello scarico e della presa sono state discretizzate con celle di piccole dimensioni (fino ad un dettaglio pari ad 2 m x 2 m), mentre, allontanandosi da queste, si sono utilizzate celle di dimensioni gradualmente maggiori.

La simulazione del layout futuro nell'area del diffusore di scarico e, in particolare, la schematizzazione dei pali di sostegno della nuova banchina prevista a copertura dello stesso (Figura 6) ha reso indispensabile un infittimento ulteriore del reticolo di calcolo. Nel progetto è prevista la realizzazione di un impalcato su pali infissi secondo un'orditura regolare di 6.4 m x 5.6 m. I pali saranno in acciaio e avranno un diametro di 800 mm, uno spessore di 12.5 mm e una lunghezza di 35 m (Rif. 4).

La schematizzazione dei pali ha comportato il dimezzamento della dimensione delle celle che hanno dunque assunto la dimensione minima di 1 m x 1 m. Il reticolo di calcolo ha quindi schematizzato l'intera area di calcolo mediante 431 celle in direzione X, 327 celle in direzione Y e 16 strati (uno in più del primo reticolo) per un totale di 2 254 992 celle, comprese, come detto, anche le celle di terra. Il notevole incremento delle celle di calcolo ha prodotto un inevitabile aumento dei tempi di calcolo che ha comportato l'impossibilità di raggiungere la condizione di stazionarietà, in tempi compatibili con quelli dello studio¹.

Il reticolo di calcolo illustrato in Figura 16 è stato invece adottato per le simulazioni eseguite nella configurazione portuale futura, in presenza di tutte le opere previste dal vigente Piano Regolatore Portuale (pali esclusi per quanto sopra detto). Tale reticolo, come quello in configurazione portuale attuale, ha schematizzato l'intera area di calcolo mediante 309 celle in direzione X, 298 celle in direzione Y e 15 strati per un totale di 1381230 celle.

¹ Ciononostante la simulazione parziale degli scenari con questo reticolo di calcolo è stata comunque utile alla definizione dei possibili effetti dei pali e della tombatura in sponda sinistra al diffusore sulla dispersione della perturbazione termica. Si è osservato un allargamento e un leggero approfondimento del pennacchio generati dalla maggiore turbolenza indotta dai pali.

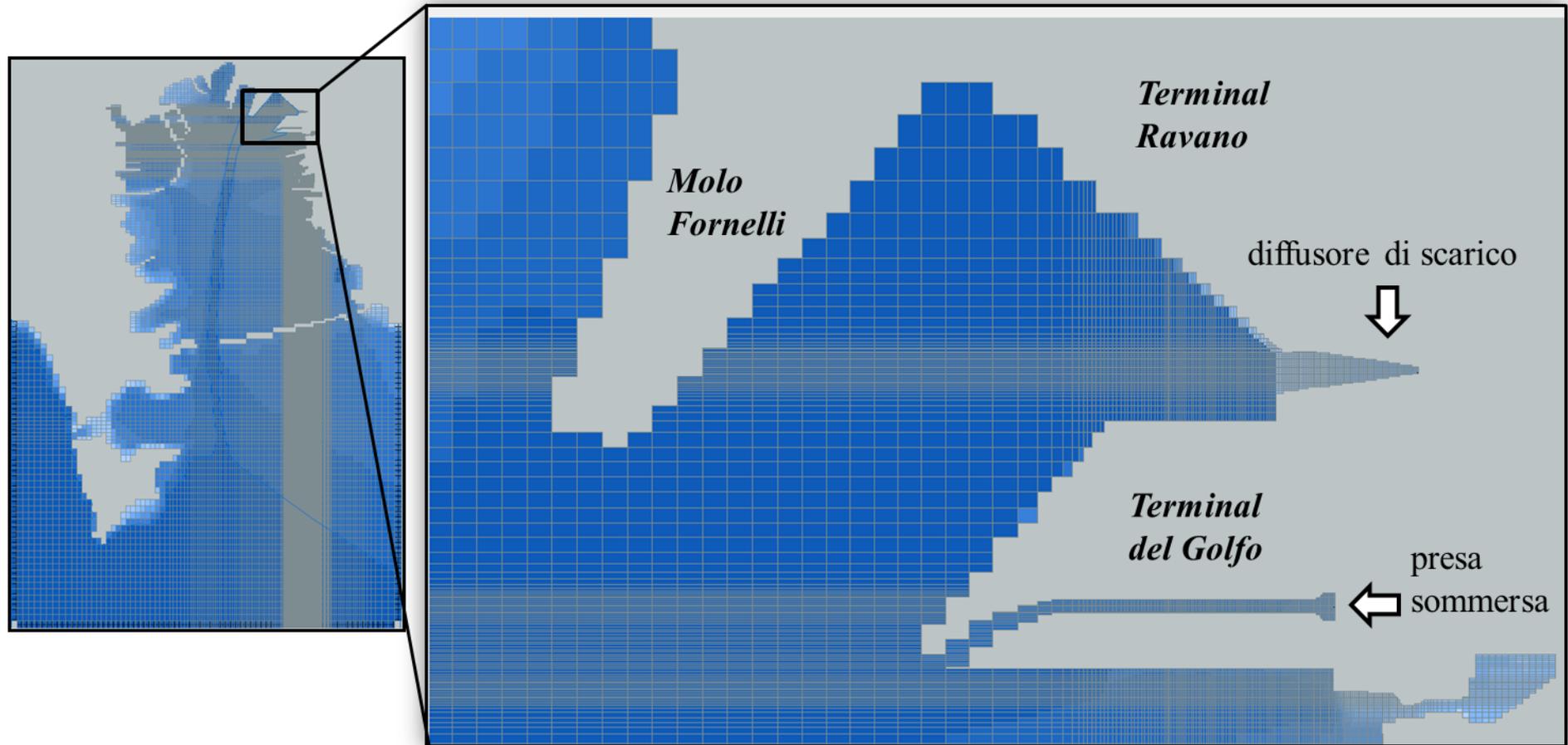


Figura 16 Secondo reticolo di calcolo. Dettaglio nell'area della presa (sommersa) e del diffusore di scarico della centrale nella configurazione portuale futura.

4.2.2 Condizioni al contorno e condizioni iniziali

Il dominio di calcolo è stato considerato sufficientemente esteso per consentire lo sviluppo del pennacchio nell'intorno del punto di scarico coerentemente con le correnti simulate. Le assunzioni al contorno del dominio sono quelle necessarie a far sì che il modello numerico riproduca al meglio le condizioni meteomarine nell'area più direttamente interessata dalla dispersione.

Nel caso specifico ciò ha significato la simulazione della corrente ambientale che, applicata con direzione entrante (diretta verso NO come illustrato nello schema di Figura 17) alle celle di acqua del lato Est del dominio (lato destro), penetra attraverso la Bocca di Levante andando a sommarsi al campo di moto indotto dallo scarico della centrale contribuendo alla circolazione complessiva all'interno della rada. Al modello di simulazione sono state dunque imposte solo le condizioni di corrente al largo esternamente alla rada; le condizioni di flusso alla bocca di Levante ed a quella di Ponente sono determinate nel modello dal bilancio idrodinamico delle masse d'acqua. La temperatura della corrente marina entrante nel dominio è stata assunta pari a quella imperturbata tipica della condizione stagionale considerata.

Sempre con riferimento alle temperature adottate, allo scarico è stata imposta la temperatura dettata dalla condizione di esercizio dell'impianto, mentre alla presa essa è determinata dal bilancio termico dell'acqua aspirata. Il codice, infatti, tiene conto dell'eventuale ricircolo alla presa dell'acqua di scarico: l'energia termica contenuta nell'acqua, prelevata alla sezione di presa in forma di sovrizzo termico rispetto alla temperatura ambiente imperturbata, viene automaticamente aggiunta all'energia termica rilasciata dallo scarico associato alla presa stessa.

Il codice TRIMDI è basato su equazioni valide in regime non stazionario per cui, quando si tratta di riprodurre una situazione stazionaria, questa viene raggiunta simulando un transitorio a partire da una condizione iniziale assegnata. Tale transitorio viene considerato esaurito quando tra un passo temporale e il successivo non sono riscontrabili differenze significative. Ogni simulazione numerica dello studio è stata effettuata partendo da una condizione iniziale di quiete in tutte le celle del reticolo che, all'istante iniziale, sono dunque caratterizzate da velocità nulla e da temperatura uguale a quella ambiente. Ciascuna simulazione è stata quindi fatta proseguire fino a sette giorni di tempo reale in maniera tale da consentire il raggiungimento della condizione di stazionarietà del campo di temperatura e di moto secondo quanto appena descritto.

Ulteriori parametri ambientali sono riassunti qui di seguito:

- il coefficiente di scambio termico con l'atmosfera, che rappresenta la potenza dispersa dal pennacchio termico verso l'atmosfera per ogni grado di sovrizzo termico e per ogni metro quadrato di superficie ($W/m^2 \times ^\circ C$), è stato assunto variabile in funzione dell'intensità media del vento e della temperatura indisturbata del mare;
 - il numero di Prandtl turbolento è stato assunto pari ad 1;
 - la viscosità turbolenta ambientale nel piano orizzontale posta pari a $0.002 m^2/s$;
 - la viscosità turbolenta ambientale in direzione verticale posta pari a $0.002 m^2/s$;
 - il coefficiente della lunghezza di mescolamento assunto pari a 0.07.

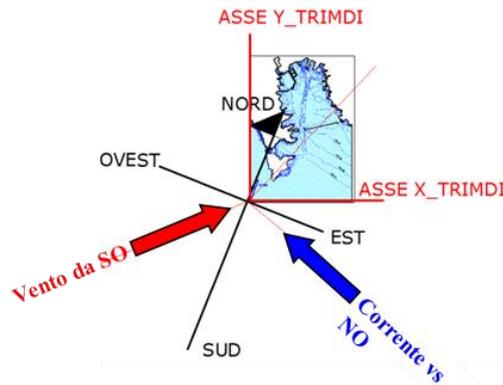


Figura 17 Direzioni del vento e della corrente ambientale complessivamente simulate riferite al Nord geografico e al sistema di riferimento XY del modello di calcolo

4.3 Scenari di calcolo

Gli scenari di calcolo adottati per il presente studio sono derivati dalla combinazione dell'assetto di esercizio della centrale e delle condizioni ambientali più critiche, scelte tra quelle tipiche del sito e descritte al capitolo 3.

Sono state quindi simulate condizioni estive e invernali, in calma di vento e con venti provenienti da SO caratterizzati da intensità compatibili con i risultati dell'analisi anemologica del sito descritta al paragrafo 3.5.

In queste condizioni, tenendo conto delle due diverse configurazioni portuali (attuale e futura) sono stati individuati gli scenari di analisi riassunti nella Tabella 1 che segue; essa contiene anche i valori iniziali dei principali parametri ambientali e meteorologici adottati per ciascuno scenario (le direzioni del vento e della corrente marina sono illustrate anche in Figura 17).

Tutti gli scenari si riferiscono alla condizione di funzionamento normale più gravosa (a pieno carico) del nuovo gruppo CCGT da 840 MW.

Tabella 1 Scenari di calcolo e valori assegnati ai principali parametri ambientali

Scenario N°	Configurazione Portuale	ASSETTO CENTRALE		DATI AMBIENTALI						
		Potenza / Q pompe AC [MW / m ³ /s]	DT presa-scarico [°C]	Stagione	Velocità vento [m/s]	Direzione vento [°]	Velocità corrente [m/s]	Direzione corrente [°]	T acqua iniziale [°C]	Salinità [PSU]
1	attuale	840 / 18.5	5.5	inv	0	CALMA	0.05	NW	12	37
2	attuale	840 / 18.5	5.5	inv	5	SO	0.05	NW	12	37
3	attuale	840 / 18.5	5.5	est	0	CALMA	0.05	NW	28	37
4	attuale	840 / 18.5	5.5	est	5	SO	0.05	NW	28	37
5	futura da PRP	840 / 18.5	5.5	inv	0	CALMA	0.05	NW	12	37
6	futura da PRP	840 / 18.5	5.5	inv	5	SO	0.05	NW	12	37
7	futura da PRP	840 / 18.5	5.5	est	0	CALMA	0.05	NW	28	37
8	futura da PRP	840 / 18.5	5.5	est	5	SO	0.05	NW	28	37

5 ANALISI DEI RISULTATI

5.1 Premessa

I risultati relativi a ciascuno degli scenari considerati nello studio sono stati analizzati sia graficamente sia mediante elaborazioni analitiche per estrarre l'insieme delle informazioni atte a caratterizzare esaurientemente le condizioni di diffusione termica. In particolare, poiché lo scopo dello studio è quello di verificare le caratteristiche di diffusione del pennacchio termico nelle tre dimensioni, viene analizzata con particolare dettaglio l'area della rada della Spezia più interna e dunque più prossima allo scarico e alla presa della centrale.

I risultati di ciascuna simulazione sono illustrati mediante due differenti figure tutte riferite alla situazione riscontrata al termine del periodo di 7 giorni assunto come durata sufficiente a garantire il raggiungimento delle condizioni di stazionarietà. Nello specifico le figure contengono rispettivamente:

- le mappe, estese a tutto il dominio di calcolo, della perturbazione termica superficiale e a 4 m di profondità con indicazione delle linee isoterme quotate a partire dalla temperatura indisturbata iniziale del corpo idrico ricettore; le mappe contengono anche la traccia dei punti di monitoraggio della temperatura sull'arco a 1000 m secondo la normativa vigente; uno schema illustra la direzione della corrente e/o del vento ambientale applicati come condizioni al contorno del singolo scenario;
- le mappe della perturbazione termica riscontrata in due sezioni verticali (piano XZ) posizionate rispettivamente in asse al diffusore di scarico (immagine di sinistra) e alla presa (immagine di destra) della centrale; insieme alla localizzazione in pianta delle due sezioni, anche in questa figura è riportato lo schema riassuntivo delle condizioni al contorno applicate; è infine indicata la posizione del punto di rilascio (NCA) in corrispondenza del quale vige il limite dei 35 °C della temperatura assoluta dell'acqua scaricata. Un grafico mostra la temperatura superficiale misurata ai 16 punti di controllo sull'arco a 1000 m dal punto di scarico NCA.

L'insieme delle mappe consente di fornire, per ciascuno scenario di calcolo, un'indicazione della estensione e della conformazione spaziale della perturbazione termica generata dallo scarico delle acque di raffreddamento della centrale.

5.2 Metodo di calcolo del delta termico sull'arco

La normativa di legge vigente ai fini del rispetto dei limiti termici (Rif. 22, Rif. 23) di immissione in mare prevede un limite massimo di +3 °C di sovrizzo termico rispetto alla temperatura ambientale valutato su un arco di raggio 1000 m a partire dal punto di scarico, oltre al limite assoluto di 35 °C nel punto di scarico stesso.

Il regolamento attuativo (Rif. 23, che ha sostituito il precedente Rif. 24) prevede che tale limite sia verificato in una serie di punti di misura lungo l'arco, a distanza di 5° l'uno dall'altro, attraverso misure di temperatura superficiale dell'acqua di mare. Il valore di incremento termico viene stabilito per differenza tra la temperatura nel punto più caldo e la temperatura di una porzione di corpo idrico non influenzata dallo scarico.

In considerazione della natura chiusa e confinata della rada della Spezia nella zona dello scarico della centrale e della conseguente difficoltà di determinare un'area non perturbata, per la definizione della temperatura di riferimento è consentito dal regolamento attuativo

"assumere come temperatura riferimento (TR) la media delle temperature superficiali (Tm), misurate alla quota di -0,1 m, dei tre punti più freddi del predetto arco aumentata del doppio dello scarto tipo relativo ai suddetti tre punti (Rif. 23)".

Come condiviso nell'ambito del procedimento di rilascio dell'AIA per la centrale, il 29 luglio 2011, durante un incontro tra ARPAL ed ENEL, tenuto conto delle modifiche al profilo della linea di costa occorse in seguito alla definizione dei punti sino ad allora utilizzati, è stata concordata una modifica della posizione del centro arco e dei punti sull'arco a 1000 m. Tale modifica ha trovato applicazione a partire dall'agosto 2011. La Figura 18 mette a confronto le posizioni dei punti di controllo pre e post agosto 2011, mentre la successiva Figura 19 fornisce la posizione e la numerazione dei punti sull'arco attualmente vigente insieme alla posizione del punto indisturbato adottato da ARPAL nei recenti controlli della perturbazione termica in rada.

A tale proposito nel documento di cui al Rif. 25, emesso a seguito del controllo del parametro *temperatura* dello scarico a mare delle acque di raffreddamento della centrale eseguito il 26 luglio 2013, ARPAL precisa di avere utilizzato come punto indisturbato quello storico ubicato a Sud di Porto Lotti (denominato ARPAL in Figura 19 avente coordinate geografiche: LAT 44° 5.531'; LONG 9° 51.723') e sottolinea che il valore di temperatura in esso riscontrato (come media di dieci rilevazioni successive alla profondità di 10 cm) *"è risultato di poco inferiore alla media delle tre temperature dei punti più freddi dell'arco"*.

Ciò conferma che l'adozione delle temperature più fredde dei tre punti dell'arco come riferimento indisturbato costituisce, come affermato anche a livello legislativo, una valida alternativa nel caso di impossibilità oggettiva di identificazione di una porzione acqua realmente indisturbata, circostanza frequente in rada sia, come detto, per le sue caratteristiche fisiche, sia per il consistente traffico di navi di elevato dislocamento presente in quella zona capace di produrre pesanti modifiche alla perturbazione termica indotta dallo scarico caldo della centrale.

Tutto ciò premesso, si precisa che il calcolo del delta termico sull'arco a 1000 m per i diversi scenari di calcolo è stato eseguito nella condizione solitamente adottata da ARPA Liguria durante le verifiche periodiche dello scarico dell'impianto, vale a dire utilizzando come punto freddo indisturbato il punto denominato ARPAL indicato in Figura 19.



Figura 18 Avanzamento del Centro Arco e modifica della posizione e del numero dei punti di controllo sull'arco a 1000 m a partire dall'agosto 2011.



Figura 19 Punti di controllo della temperatura assoluta di 35 °C (NCA) e dell'incremento termico complessivo a 1000 m (dal n° 0 al n° 15) vigenti dall'agosto 2011; il punto per la temperatura fredda indisturbata utilizzato da ARPA Liguria è indicato con la didascalia ARPAL.

5.3 Osservazioni sulla validità delle simulazioni numeriche

La precisione, in termini assoluti, del modello di simulazione adottato per la presente analisi può essere verificata solo confrontandone i risultati con le misure accurate di tutti i parametri ambientali capaci di influenzare le fenomenologie in gioco. E' peraltro impossibile riprodurre mediante il modello numerico tutti i fenomeni capaci di condizionare la dispersione termica, poiché il modello, come già osservato, altro non è che una schematizzazione della realtà e, dunque, una sua semplificazione. Si pensi, per esempio, al transito di imbarcazioni e di navi (anche di grosso tonnellaggio) proprio in corrispondenza delle stazioni di misura sull'arco, capace di modificare grandemente le temperature nei punti di controllo ma, in pratica, impossibile da riprodurre su modello, anche per la natura casuale degli eventi. D'altro canto, è altrettanto difficile poter disporre di campagne di misura così dettagliate da descrivere quantitativamente ogni singolo parametro da cui dipende la diffusione della perturbazione termica indotta dall'impianto.

L'approccio che si utilizza solitamente per l'impostazione delle simulazioni è dunque di natura conservativa e si basa sull'adozione di valori cautelativi per tutti quei parametri di cui non è nota l'esatta entità da misure di campo.

Il confronto tra i risultati delle simulazioni numeriche e l'oggettiva realtà delle misure in campo, benché parziali, è comunque avvenuto ma con riferimento ai valori medi delle temperature calcolate e misurate nei 16 punti dell'arco, separatamente per alcuni scenari estivi ed invernali. L'assetto di impianto adottato per tali scenari di validazione è stato dunque quello attuale con il solo gruppo a carbone funzionante.

La Figura 20 pone a confronto le temperature medie a diverse profondità (superficiale, a -1.5 m e a -3.0 m, in alto, al centro e in basso, rispettivamente) calcolate per 3 scenari invernali e per 2 scenari estivi con i valori medi delle temperature misurate in rada in analoghe condizioni sia ambientali (d'inverno e d'estate, rispettivamente), sia di assetto della centrale (funzionante, come detto, con il solo gruppo a carbone a pieno carico). Per considerare le diverse temperature indisturbate presenti in rada durante le varie campagne, schematicamente riprodotte nel modello con l'adozione di una temperatura di riferimento invernale (12 °C) e di una temperatura di riferimento estiva (25.5 °C), si è proceduto all'adimensionalizzazione delle temperature medie, sia misurate sia calcolate, con la media delle temperature del punto più freddo sull'arco.

Il risultato, illustrato in figura, evidenzia un buon accordo tra i valori medi misurati in campo e quelli calcolati mediante la modellazione numerica. La leggera prevalenza delle temperature medie superficiali calcolate in quasi tutti i sedici punti dell'arco è probabilmente imputabile all'adozione di condizioni ambientali cautelative in mancanza di misure oggettive di alcuni parametri, secondo l'approccio precedentemente descritto.

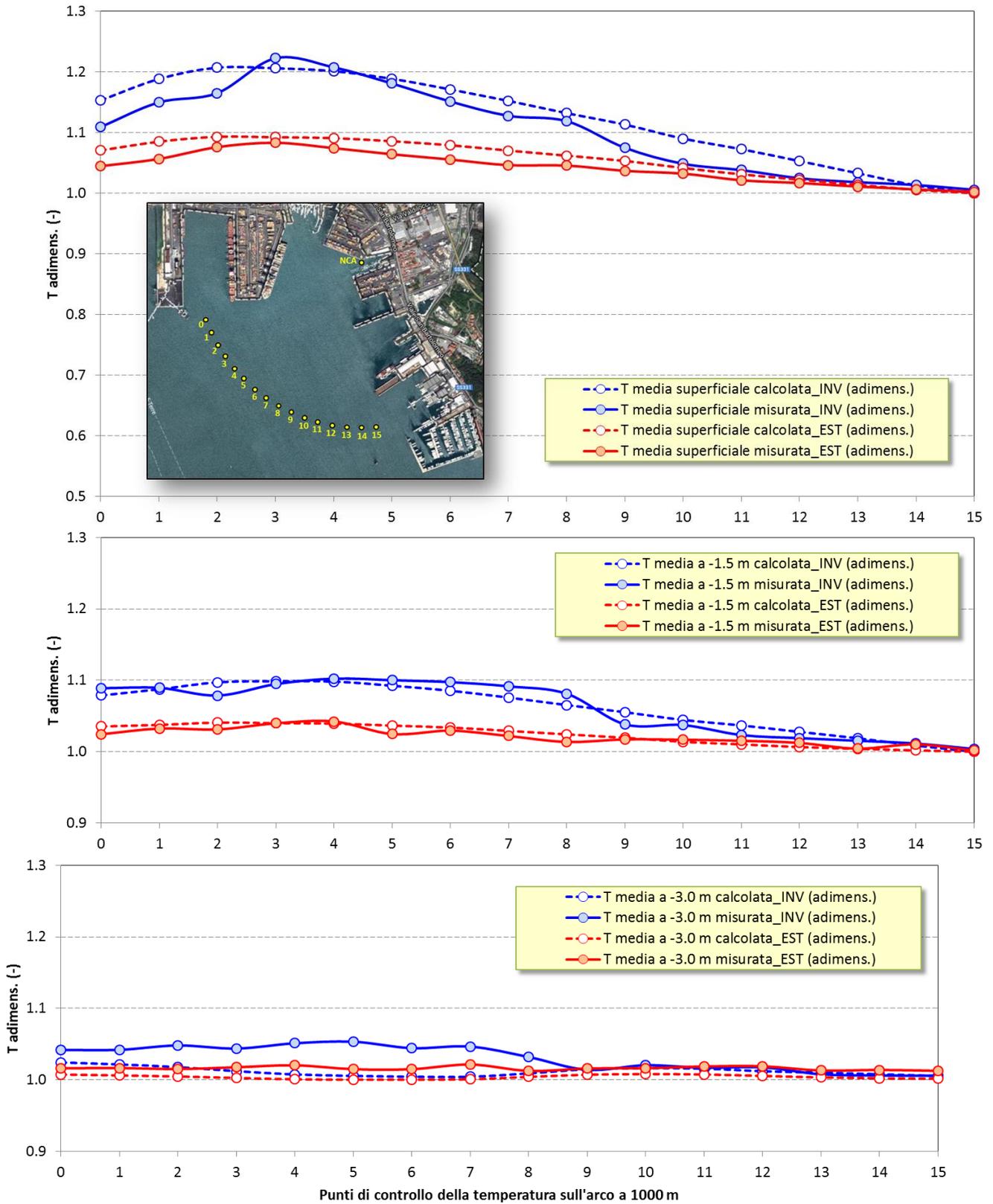


Figura 20 Confronto tra le temperature medie (adimens.) a diverse profondità (superficiali, a -

1.5 m e a -3.0 m) calcolate (linee tratteggiate) e misurate (linee continue) alle stazioni di rilievo sull'arco a 1000 m per le stagioni estive (linee rosse) e invernali (linee blu).

5.4 Scenario 1: config. portuale attuale in calma di vento (inverno)

Lo scenario n° 1 ha simulato le condizioni qui di seguito riassunte relativamente a:

1. *configurazione portuale:*
 - attualmente presente in rada,
2. *assetto d'impianto:*
 - funzionamento a pieno carico del nuovo gruppo CCGT da 840 MW_e; Q pompe AC: 18.5 m³/s,
 - Δ termico allo scarico pari a 5.5 °C.
3. *parametri ambientali:*
 - condizione invernale caratterizzata da calma di vento;
 - $T_{\text{indisturbata}} = 12$ °C assunta come temperatura iniziale costante del corpo idrico ricettore;
 - corrente entrante dal lato Est del dominio di calcolo (diretta verso NO con riferimento alle coordinate geografiche) costante sul profilo verticale e pari a 0.05 m/s.

Lo scenario simula una condizione prevedibilmente critica per le tematiche in oggetto: lo scarico caldo, infatti, a causa dell'assenza di vento di superficie subisce un limitato scambio termico con l'atmosfera.

I risultati della simulazione sono illustrati nelle due figure seguenti che evidenziano chiaramente la prevalenza del campo di moto indotto dallo scarico della centrale (e, sebbene collocata agli strati più profondi, dalla presa) rispetto alla corrente ambientale residua in ingresso al golfo attraverso la bocca di Levante. La sagoma assunta dalle isoterme conferma la prevalenza del campo di moto indotto dallo scarico, specialmente a livello superficiale.

Le discontinuità fisiche del profilo costiero (per esempio i moli) contribuiscono a deviare il pennacchio caldo convogliandolo, in prevalenza, verso la bocca di Ponente.

Per quanto riguarda, invece, la penetrazione in profondità della perturbazione termica è possibile trarre alcune indicazioni di dettaglio nelle aree antistanti scarico e presa, dalla successiva Figura 22.

Considerando l'intero specchio acqueo della rada, la perturbazione appare mediamente esaurita a circa 4 m di profondità; tale condizione sembra confermata anche a livello locale davanti allo scarico e nell'area della presa. Rimane esclusa un'area limitata in corrispondenza del Marina di Fossamastra in sponda destra al diffusore di scarico, dove permane un incremento termico di circa due gradi rispetto alla temperatura indisturbata.

Il delta termico sull'arco a 1000 m, calcolato secondo la vigente normativa e con l'adozione del punto freddo ARPAL, è risultato pari a 2.06 °C, inferiore alla soglia di legge di 3 °C. Il ricircolo alla presa è minimo e pari a 0.27 °C.

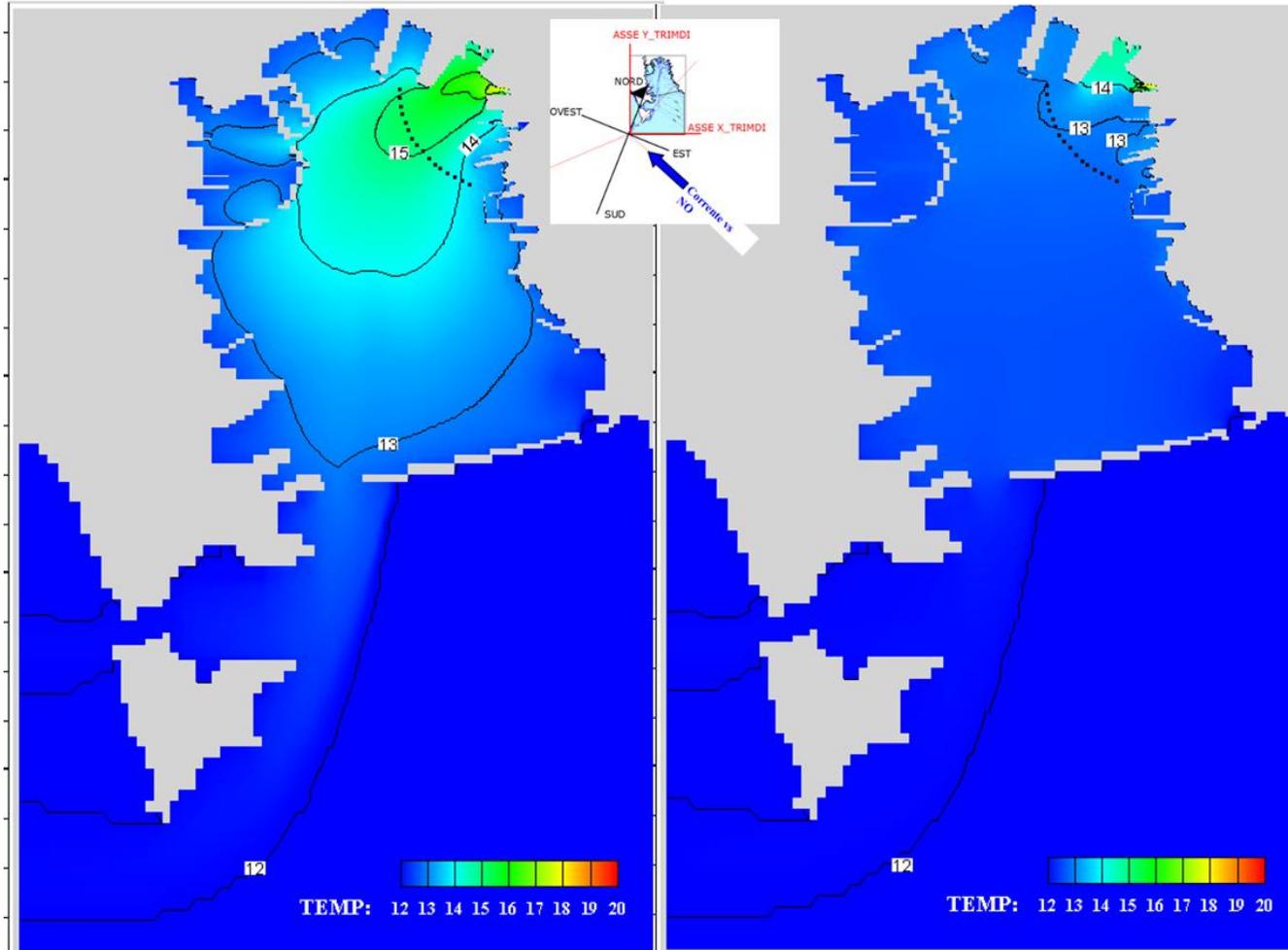
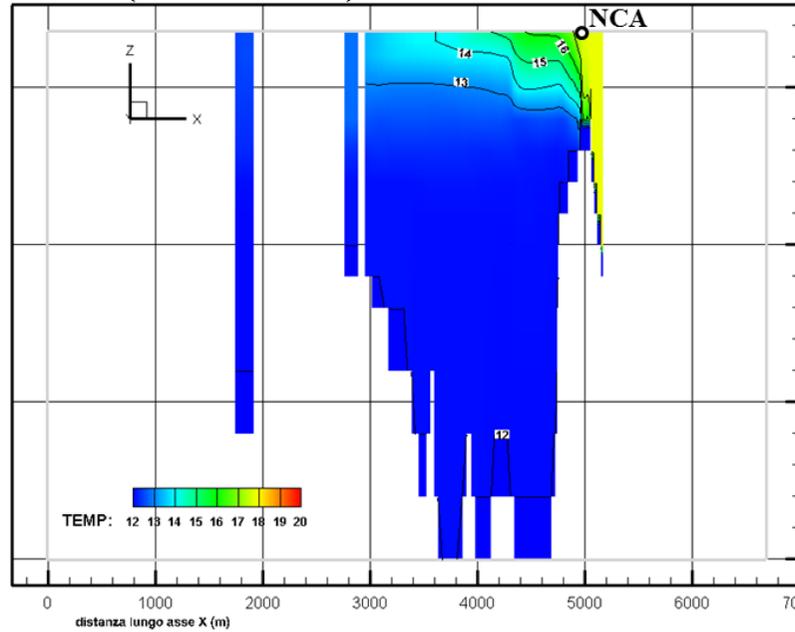


Figura 21 Scenario 1_Configurazione portuale attuale; assetto impianto FUTURO a pieno carico. Campo termico superficiale nell'intero dominio di calcolo, a sinistra, e alla profondità di 4 m, a destra. La temperatura naturale del corpo idrico ricevente è pari a 12°C (inverno) ed è presente una corrente marina di 0.05 m/s diretta verso NO entrante dal lato Est del dominio. Simulazione con calma di vento.

Sezione 1 (in asse allo scarico)



Sezione 2 (in asse alla presa)

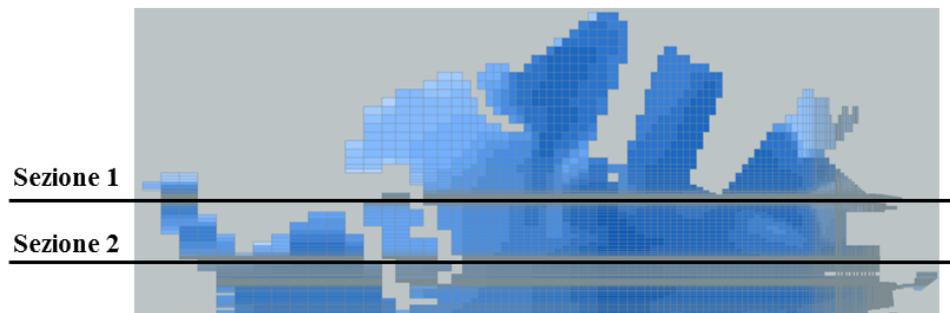
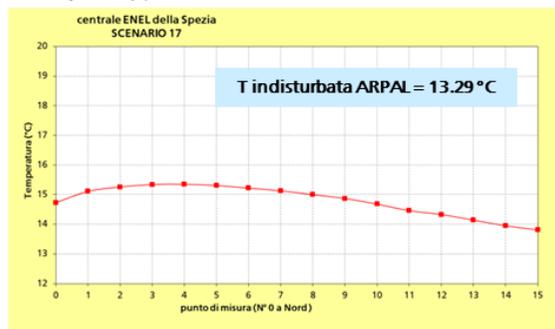
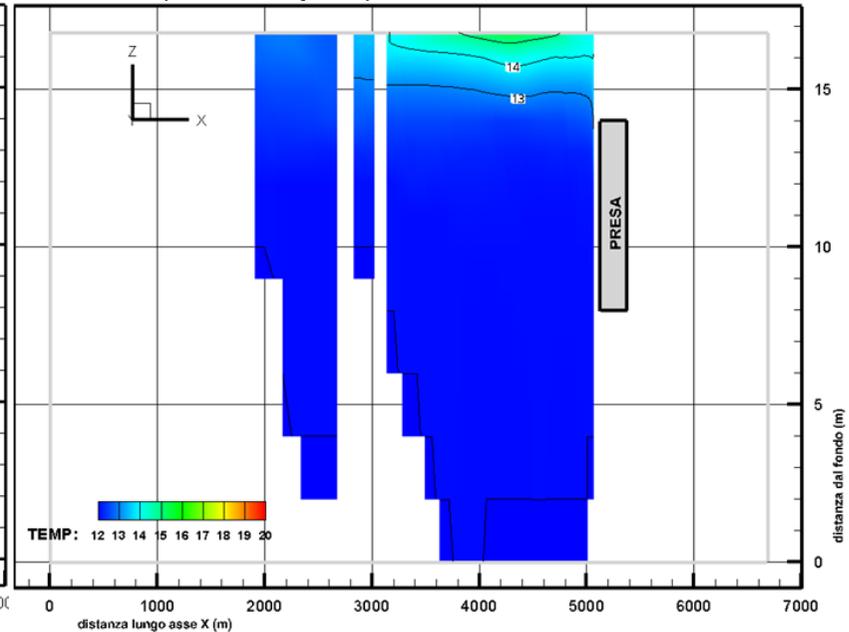


Figura 22 Scenario 1_ Configurazione portuale attuale; assetto impianto FUTURO a pieno carico. Campo termico nelle sezioni verticali allo scarico (a sx) e alla presa (a dx) della centrale. Temperatura superficiale calcolata ai 16 punti dell'arco a 1000 m (in basso a sx)

5.5 Scenario 2: config. portuale attuale con vento da SO (inverno)

Lo scenario n° 2 ha simulato le condizioni qui di seguito riassunte relativamente a:

1. *configurazione portuale:*

- attualmente presente in rada,

2. *assetto d'impianto:*

- funzionamento a pieno carico del nuovo gruppo CCGT da 840 MW; Q pompe AC: 18.5 m³/s,
- Δ termico allo scarico pari a 5.5 °C.

3. *parametri ambientali:*

- condizione invernale caratterizzata da vento di 5 m/s da SO;
- $T_{\text{indisturbata}} = 12$ °C assunta come temperatura iniziale costante del corpo idrico ricettore;
- corrente entrante dal lato Est del dominio di calcolo (diretta verso NO con riferimento alle coordinate geografiche) costante sul profilo verticale e pari a 0.05 m/s.

Lo scenario simula una condizione prevedibilmente critica per le tematiche in oggetto: a causa del vento spirante da SO, che si somma alla corrente ambientale residua, lo scarico caldo potrebbe essere confinato verso l'area di presa (inducendo possibili fenomeni di ricircolo) o in prossimità dei punti di misura sull'arco a 1000 m (creando possibili problemi per quanto concerne il soddisfacimento dei vincoli di legge).

I risultati della simulazione sono illustrati nelle due figure seguenti che evidenziano chiaramente l'effetto di confinamento operato dal vento; a livello superficiale la perturbazione termica indotta dallo scarico interessa un'area della rada decisamente ridotta rispetto a quella del corrispondente scenario senza vento (scenario 1), mentre a 4 m di profondità (a destra in Figura 23) si osserva un'impronta perturbata più ampia conseguenza dell'approfondimento del pennacchio derivante dal suo confinamento verso riva causato dall'azione del vento.

Quest'ultimo aspetto è confermato dalle immagini contenute in Figura 24 che mostrano la maggiore penetrazione in profondità della perturbazione termica nelle aree antistanti scarico e presa; rispetto al corrispondente scenario senza vento (scenario 1) si osserva un deciso aumento del ricircolo termico.

Il delta termico sull'arco a 1000 m, calcolato secondo la vigente normativa e con l'adozione del punto freddo ARPAL, è risultato pari a 2.04 °C, inferiore alla soglia di legge di 3 °C. Il ricircolo alla presa è pari a 1.22 °C.

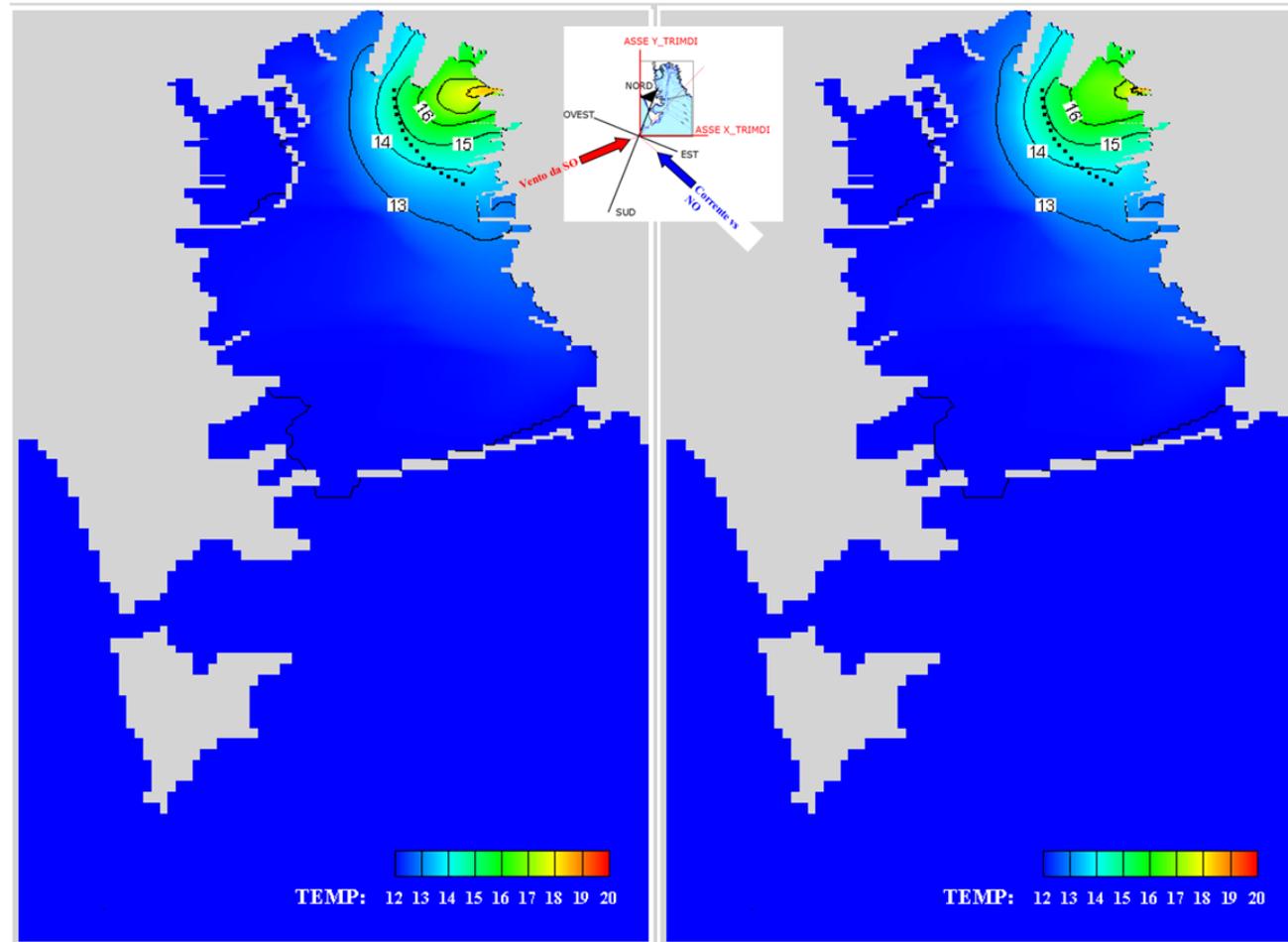
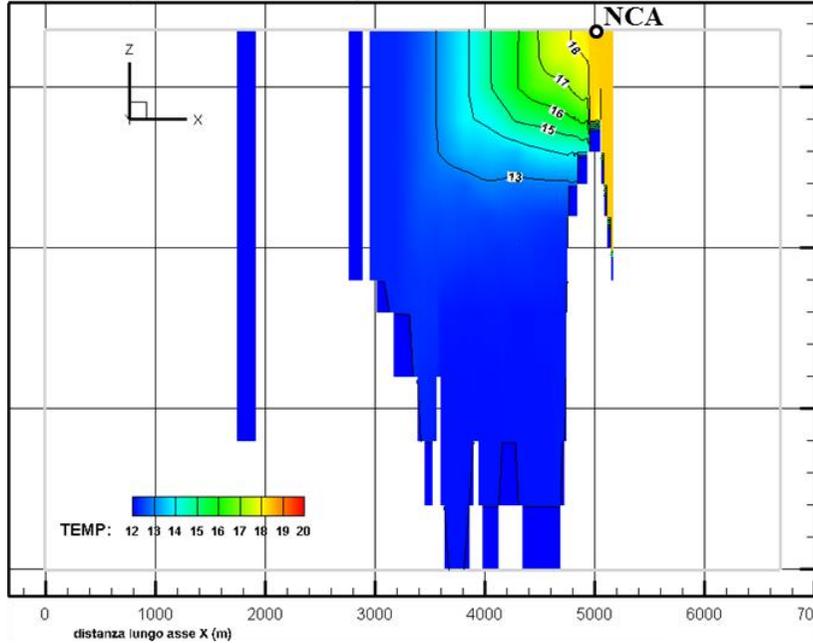


Figura 23 Scenario 2_Configurazione portuale attuale; assetto impianto FUTURO a pieno carico. Campo termico superficiale nell'intero dominio di calcolo, a sinistra, e alla profondità di 4 m, a destra. La temperatura naturale del corpo idrico ricevente è pari a 12°C (inverno) ed è presente una corrente marina di 0.05 m/s diretta verso NO entrante dal lato Est del dominio. Simulazione con vento di 5 m/s da SO.

Sezione 1 (in asse allo scarico)



Sezione 2 (in asse alla presa)

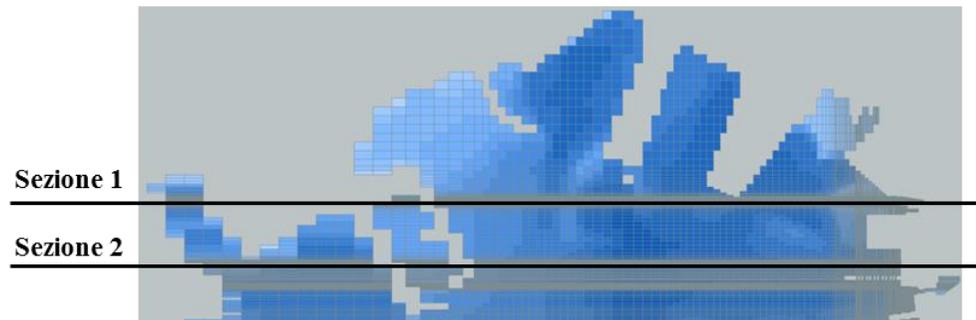
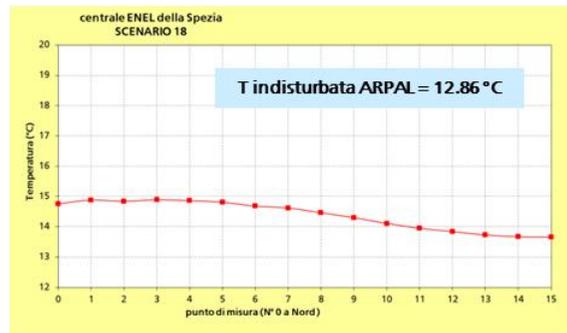
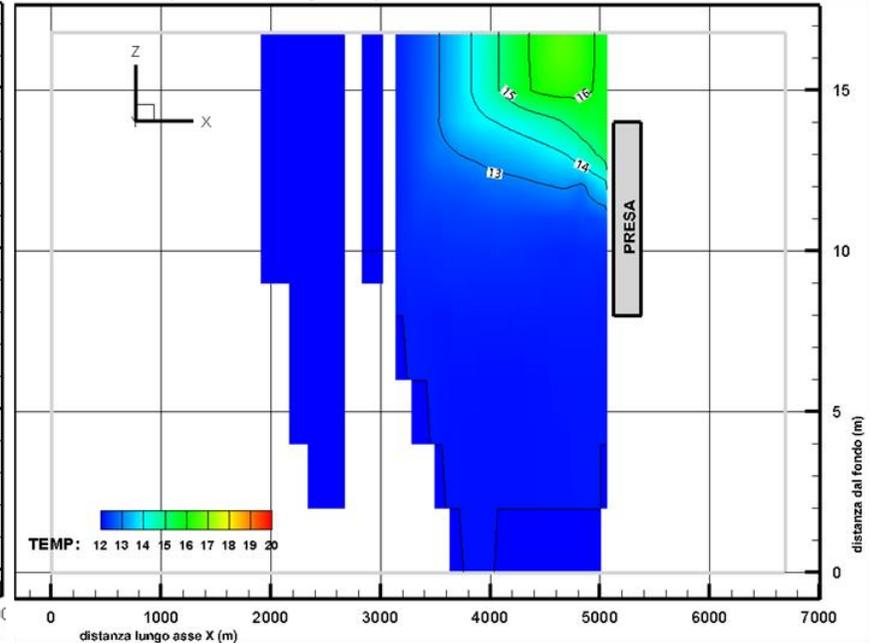


Figura 24 Scenario 2_ Configurazione portuale attuale; assetto impianto FUTURO a pieno carico. Campo termico nelle sezioni verticali allo scarico (a sx) e alla presa (a dx) della centrale. Temperatura superficiale calcolata ai 16 punti dell'arco a 1000 m (in basso a sx)

5.6 Scenario 3: config. portuale attuale in calma di vento (estate)

Lo scenario n° 3 ha simulato le condizioni qui di seguito riassunte relativamente a:

1. *configurazione portuale:*

- attualmente presente in rada,

2. *assetto d'impianto:*

- funzionamento a pieno carico del nuovo gruppo CCGT da 840 MW_e; Q pompe AC: 18.5 m³/s,
- Δ termico allo scarico pari a 5.5 °C.

3. *parametri ambientali:*

- condizione estiva caratterizzata da calma di vento;
- $T_{\text{indisturbata}} = 28$ °C assunta come temperatura iniziale costante del corpo idrico ricettore;
- corrente entrante dal lato Est del dominio di calcolo (diretta verso NO con riferimento alle coordinate geografiche) costante sul profilo verticale e pari a 0.05 m/s.

Lo scenario simula una condizione prevedibilmente critica per le tematiche in oggetto: lo scarico caldo, infatti, a causa dell'assenza di vento di superficie subisce un limitato scambio termico con l'atmosfera.

I risultati della simulazione sono illustrati nelle due figure seguenti che evidenziano chiaramente la prevalenza del campo di moto indotto dallo scarico della centrale (e, sebbene collocata agli strati più profondi, dalla presa) rispetto alla corrente ambientale residua in ingresso al golfo attraverso la bocca di Levante. La sagoma assunta dalle isoterme conferma la prevalenza del campo di moto indotto dallo scarico, specialmente a livello superficiale.

Le discontinuità fisiche del profilo costiero (per esempio i moli, in particolare il molo Fornelli) contribuiscono a deviare il pennacchio caldo convogliandolo, in prevalenza, verso la bocca di Ponente.

Per quanto riguarda, invece, la penetrazione in profondità della perturbazione termica è possibile trarre alcune indicazioni di dettaglio nelle aree antistanti scarico e presa, dalla successiva Figura 26.

Considerando l'intero specchio acqueo della rada, la perturbazione appare mediamente esaurita a circa 4 m di profondità; tale condizione sembra confermata anche a livello locale davanti allo scarico e nell'area della presa. Rimane esclusa un'area limitata in corrispondenza del Marina di Fossamastra in sponda destra al diffusore di scarico, dove permane un incremento termico di circa due gradi rispetto alla temperatura indisturbata.

Il delta termico sull'arco a 1000 m, calcolato secondo la vigente normativa e con l'adozione del punto freddo ARPAL, è risultato pari a 2.2 °C, inferiore alla soglia di legge di 3 °C. Il ricircolo alla presa è minimo e pari a 0.17 °C.

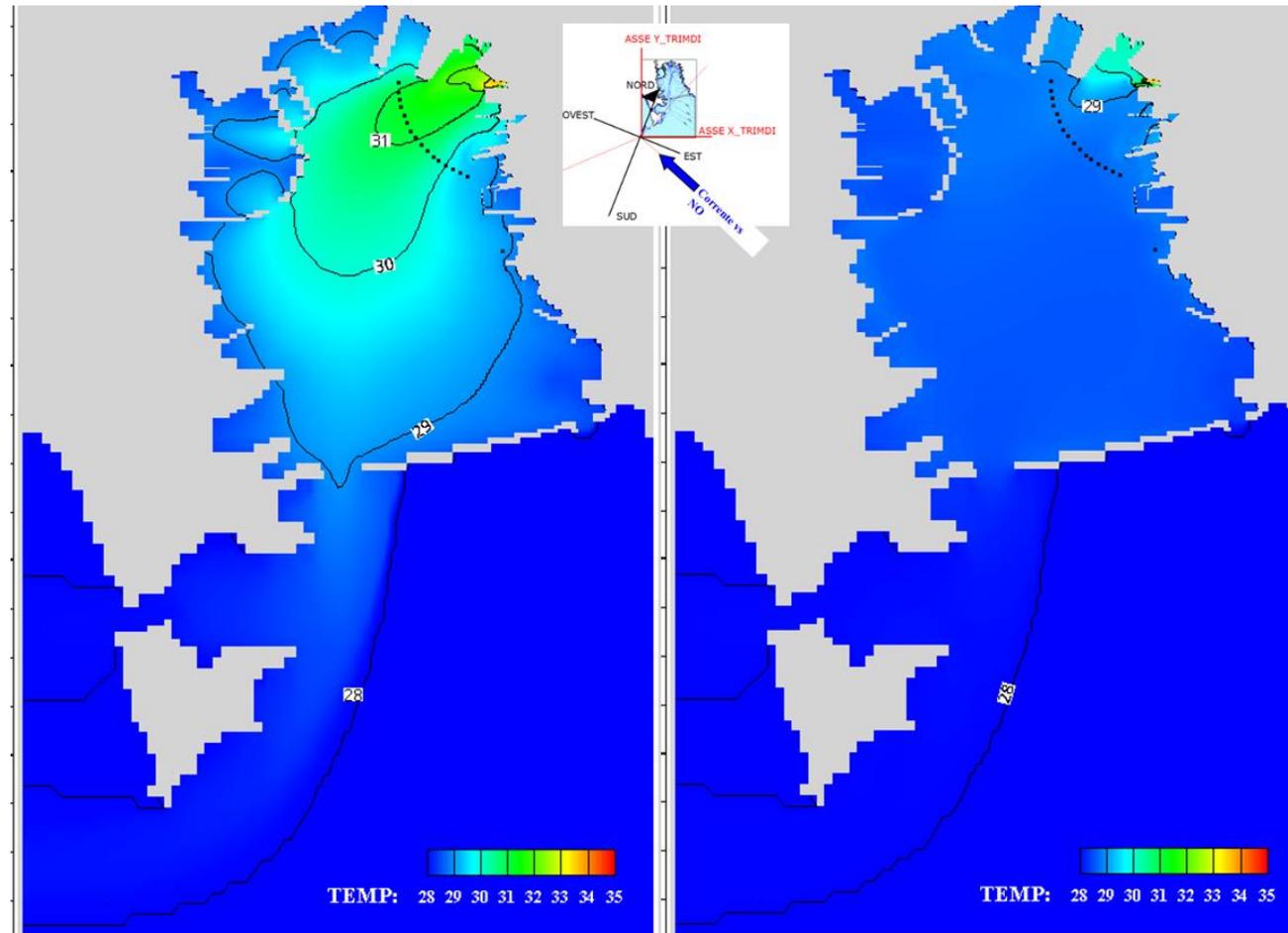
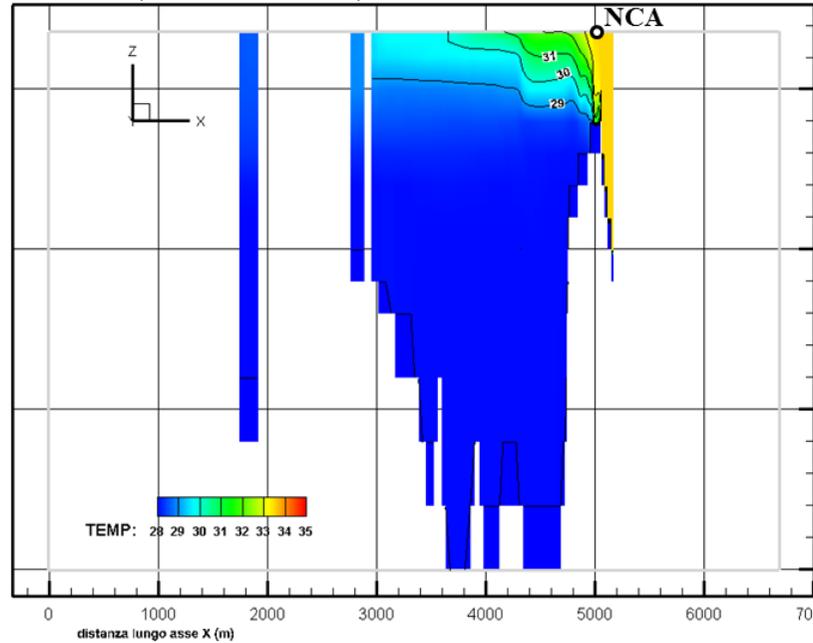


Figura 25 Scenario 3_Configurazione portuale attuale; assetto impianto FUTURO a pieno carico. Campo termico superficiale nell'intero dominio di calcolo, a sinistra, e alla profondità di 4 m, a destra. La temperatura naturale del corpo idrico ricevente è pari a 28°C (estate) ed è presente una corrente marina di 0.05 m/s diretta verso NO entrante dal lato Est del dominio. Simulazione con calma di vento.

Sezione 1 (in asse allo scarico)



Sezione 2 (in asse alla presa)

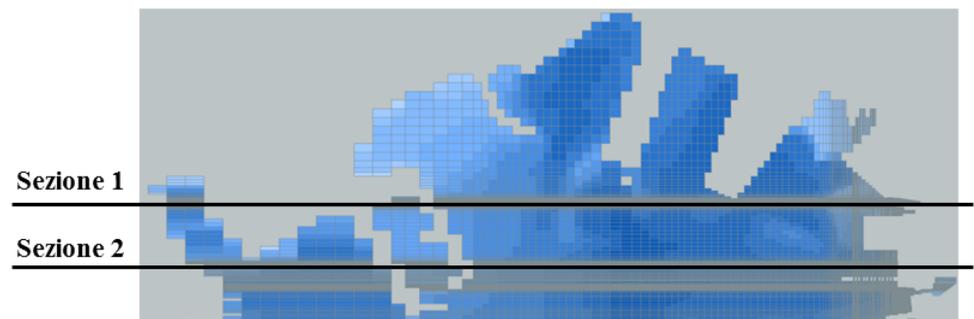
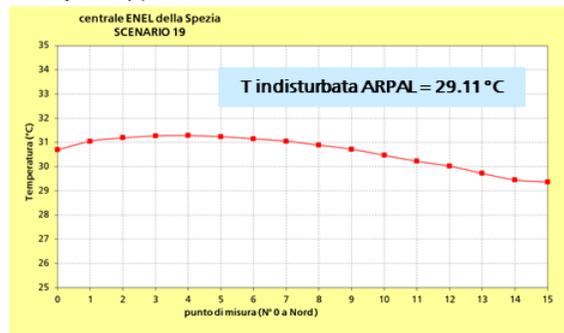
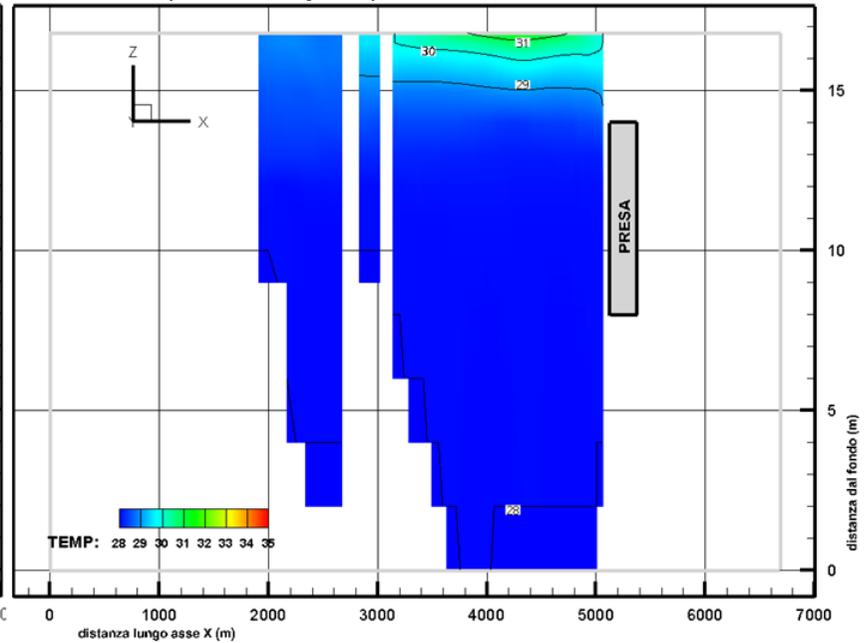


Figura 26 Scenario 3_ Configurazione portuale attuale; assetto impianto FUTURO a pieno carico. Campo termico nelle sezioni verticali allo scarico (a sx) e alla presa (a dx) della centrale. Temperatura superficiale calcolata ai 16 punti dell'arco a 1000 m (in basso a sx)

5.7 Scenario 4: config. portuale attuale con vento da SO (estate)

Lo scenario n° 4 ha simulato le condizioni qui di seguito riassunte relativamente a:

1. *configurazione portuale:*
 - attualmente presente in rada,
2. *assetto d'impianto:*
 - funzionamento a pieno carico del nuovo gruppo CCGT da 840 MW_e; Q pompe AC: 18.5 m³/s;
 - Δ termico allo scarico pari a 5.5 °C.
3. *parametri ambientali:*
 - condizione estiva caratterizzata da vento di 5 m/s da SO;
 - $T_{\text{indisturbata}} = 28$ °C assunta come temperatura iniziale costante del corpo idrico ricettore;
 - corrente entrante dal lato Est del dominio di calcolo (diretta verso NO con riferimento alle coordinate geografiche) costante sul profilo verticale e pari a 0.05 m/s.

Lo scenario simula una condizione prevedibilmente critica per le tematiche in oggetto: a causa del vento spirante da SO, che si somma alla corrente ambientale residua, lo scarico caldo potrebbe essere confinato verso l'area di presa (inducendo possibili fenomeni di ricircolo) o in prossimità dei punti di misura sull'arco a 1000 m (creando possibili problemi per quanto concerne il soddisfacimento dei vincoli di legge).

I risultati della simulazione sono illustrati nelle due figure seguenti che evidenziano chiaramente l'effetto di confinamento operato dal vento; a livello superficiale la perturbazione termica indotta dallo scarico interessa un'area della rada decisamente ridotta rispetto a quella del corrispondente scenario senza vento, mentre a 4 m di profondità (a destra in Figura 27) si osserva un'impronta perturbata più ampia conseguenza dell'approfondimento del pennacchio derivante dal suo confinamento verso riva causato dall'azione del vento.

Quest'ultimo aspetto è confermato dalle immagini contenute in Figura 28 che mostrano la maggiore penetrazione in profondità della perturbazione termica nelle aree antistanti scarico e presa; rispetto al corrispondente scenario senza vento (scenario n. 3) ciò produce sia un aumento del ricircolo termico, sia un minore interessamento dei punti di controllo sull'arco.

Il delta termico sull'arco a 1000 m, calcolato secondo la vigente normativa e con l'adozione del punto freddo ARPAL, è risultato pari a 1.70 °C, inferiore alla soglia di legge di 3 °C. Il ricircolo alla presa è pari a 0.72 °C.

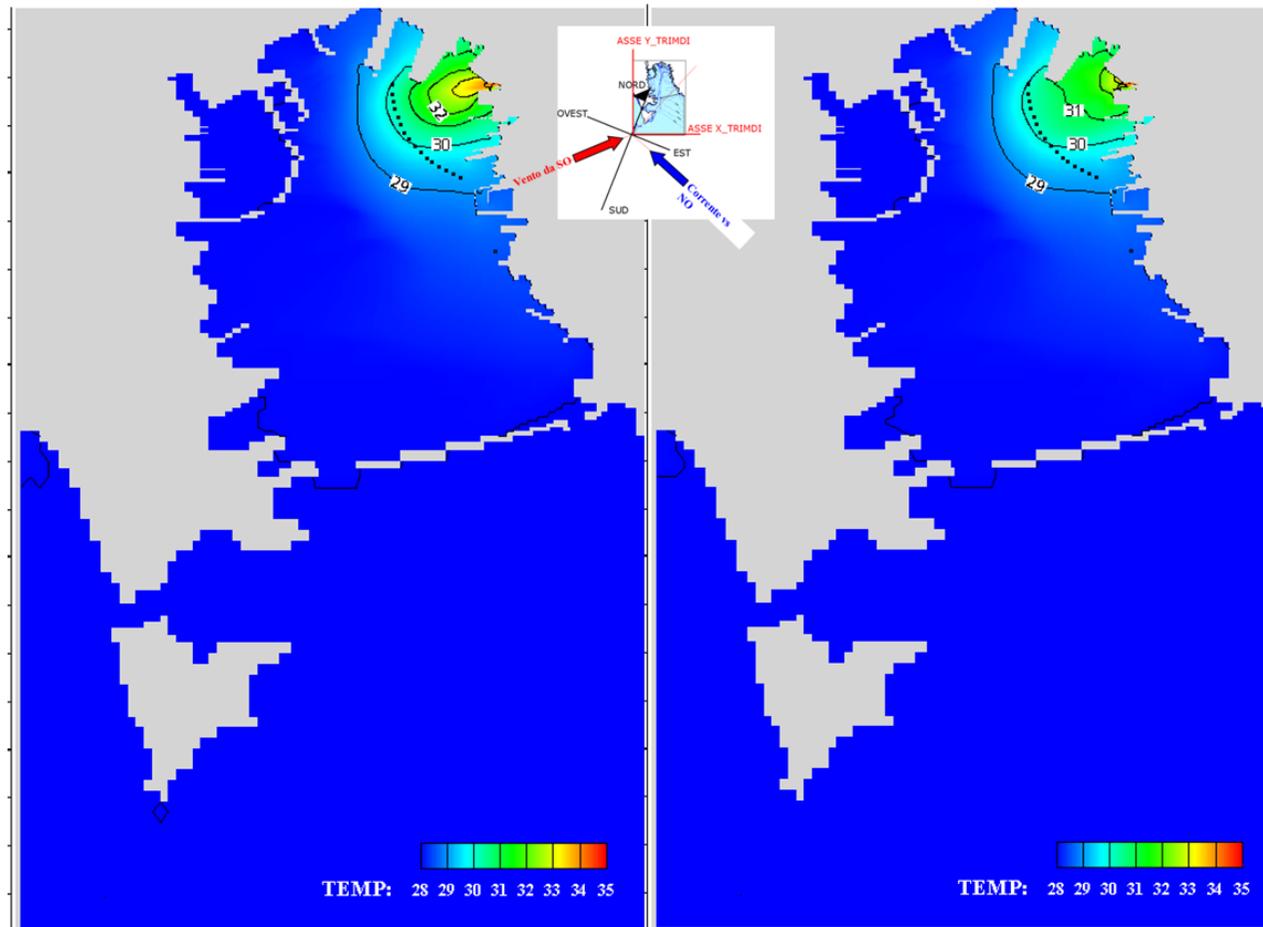


Figura 27 Scenario 4_Configurazione portuale attuale; assetto impianto FUTURO a pieno carico. Campo termico superficiale nell'intero dominio di calcolo, a sinistra, e alla profondità di 4 m, a destra. La temperatura naturale del corpo idrico ricevente è pari a 28°C (estate) ed è presente una corrente marina di 0.05 m/s diretta verso NO entrante dal lato Est del dominio. Simulazione con vento di 5 m/s da SO.

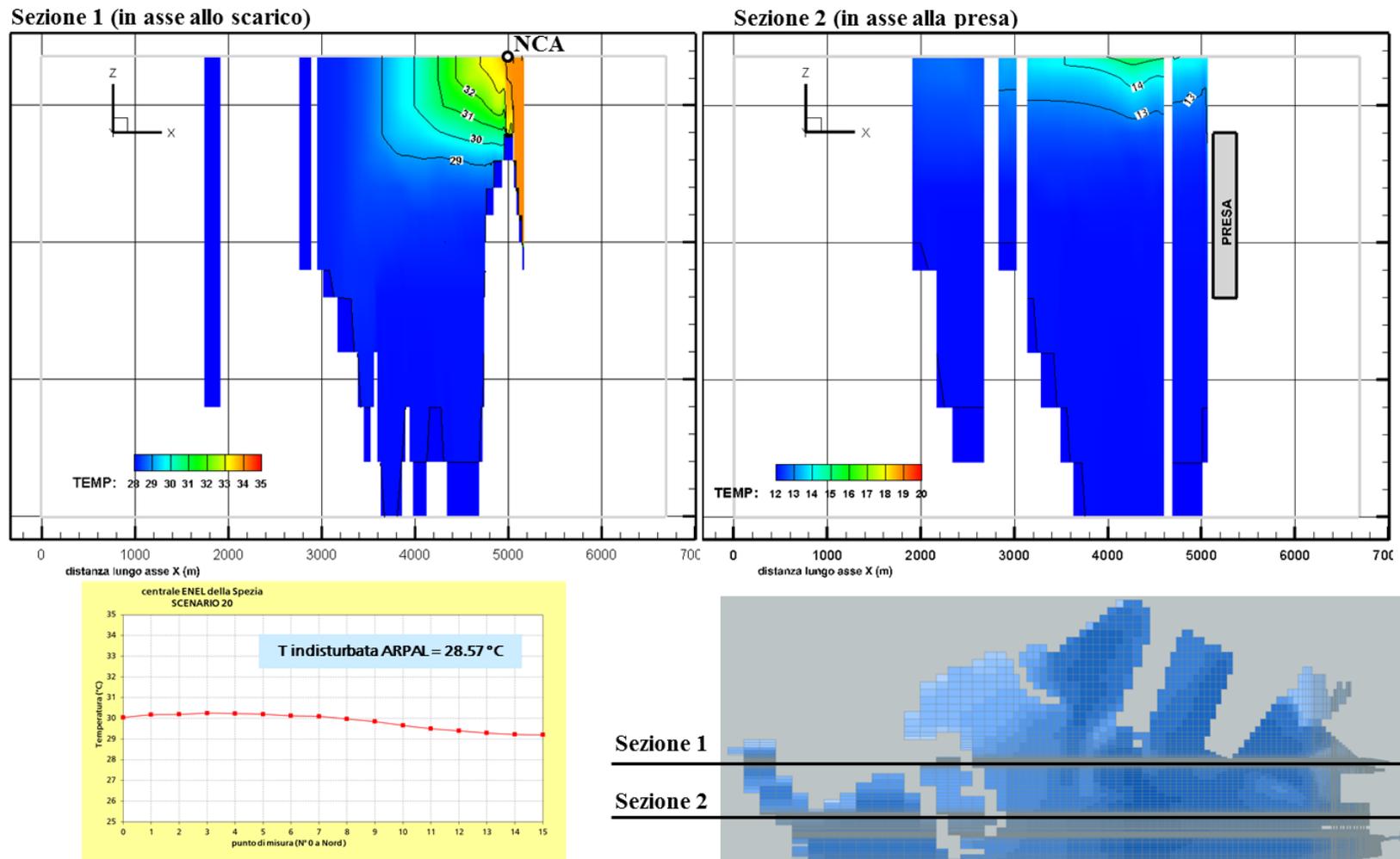


Figura 28 Scenario 4_ Configurazione portuale attuale; assetto impianto FUTURO a pieno carico. Campo termico nelle sezioni verticali allo scarico (a sx) e alla presa (a dx) della centrale. Temperatura superficiale calcolata ai 16 punti dell'arco a 1000 m (in basso a sx)

5.8 Scenario 5: config. portuale futura in calma di vento (inverno)

Lo scenario n° 5 ha simulato le condizioni qui di seguito riassunte relativamente a:

1. *configurazione portuale:*
 - futura (piena attuazione del PRP),
2. *assetto d'impianto:*
 - funzionamento a pieno carico del nuovo gruppo CCGT da 840 MW_e; Q pompe AC: 18.5 m³/s,
 - Δ termico allo scarico pari a 5.5 °C.
3. *parametri ambientali:*
 - condizione invernale caratterizzata da calma di vento;
 - $T_{\text{indisturbata}} = 12$ °C assunta come temperatura iniziale costante del corpo idrico ricettore;
 - corrente entrante dal lato Est del dominio di calcolo (diretta verso NO con riferimento alle coordinate geografiche) costante sul profilo verticale e pari a 0.05 m/s.

Lo scenario simula una condizione prevedibilmente critica per le tematiche in oggetto: lo scarico caldo, infatti, a causa dell'assenza di vento di superficie subisce un limitato scambio termico con l'atmosfera.

I risultati della simulazione sono illustrati nelle due figure seguenti che evidenziano chiaramente la prevalenza del campo di moto indotto dallo scarico della centrale (e, sebbene collocata agli strati più profondi, dalla presa) rispetto alla corrente ambientale residua in ingresso al golfo attraverso la bocca di Levante. La sagoma assunta dalle isoterme conferma la prevalenza del campo di moto indotto dallo scarico, specialmente a livello superficiale. Le discontinuità fisiche del profilo costiero (per esempio i moli) contribuiscono a deviare il pennacchio caldo convogliandolo, in prevalenza, verso la bocca di Ponente.

Per quanto riguarda, invece, la penetrazione in profondità della perturbazione termica è possibile trarre alcune indicazioni di dettaglio nelle aree antistanti scarico e presa, dalla successiva Figura 30.

Considerando l'intero specchio acqueo della rada, la perturbazione appare mediamente esaurita a circa 4 m di profondità; tale condizione sembra confermata anche a livello locale davanti allo scarico e nell'area della presa. Rimane esclusa un'area limitata in corrispondenza del Marina di Fossamastra in sponda destra al diffusore di scarico completamente tombato nel futuro assetto portuale qui simulato, dove permane un incremento termico di circa due gradi rispetto alla temperatura indisturbata. La dinamica della diffusione termica in quell'area è influenzata anche dal prolungamento del molo Fornelli, previsto dal vigente PRP, che costituisce un impedimento al deflusso delle acque di scarico; rispetto al corrispondente scenario n. 1, eseguito nella configurazione portuale attuale, ciò si traduce in un leggero aumento del delta termico a 1000 m e del ricircolo alla presa.

Il delta termico sull'arco a 1000 m, calcolato secondo la vigente normativa e con l'adozione del punto freddo ARPAL, è risultato pari a 2.10 °C, inferiore alla soglia di legge di 3 °C. Il ricircolo alla presa è minimo e pari a 0.38 °C.

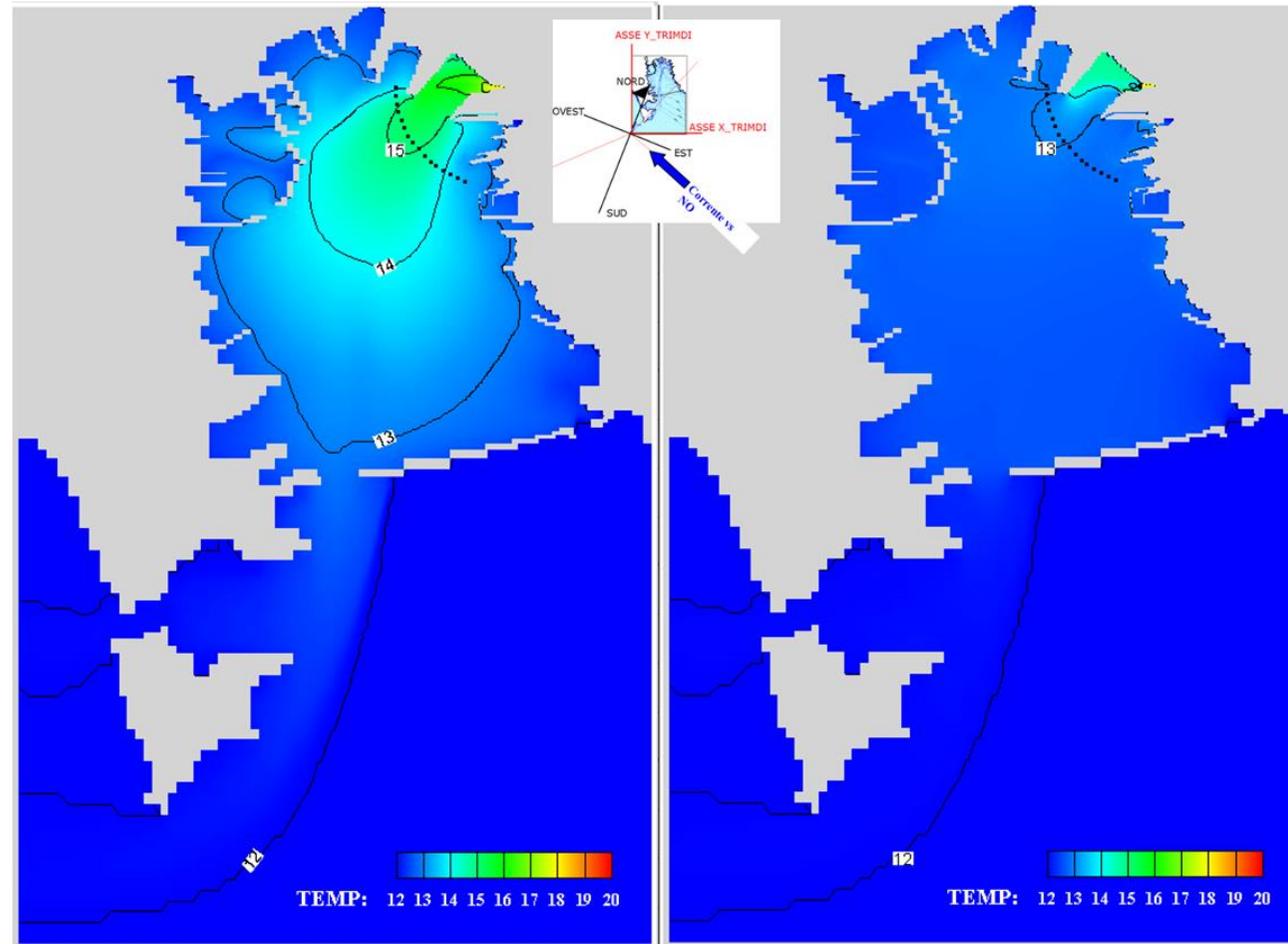
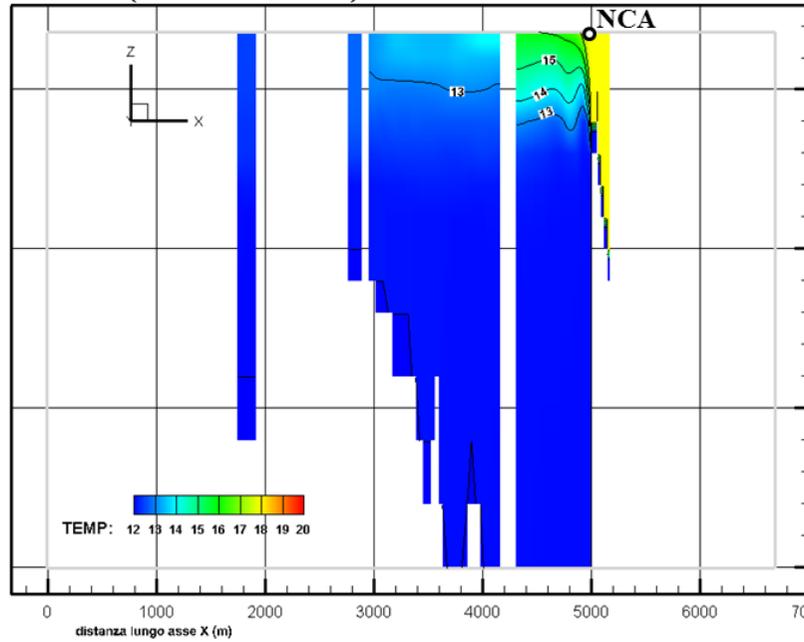
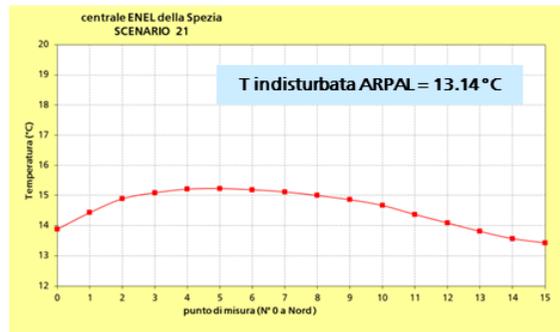
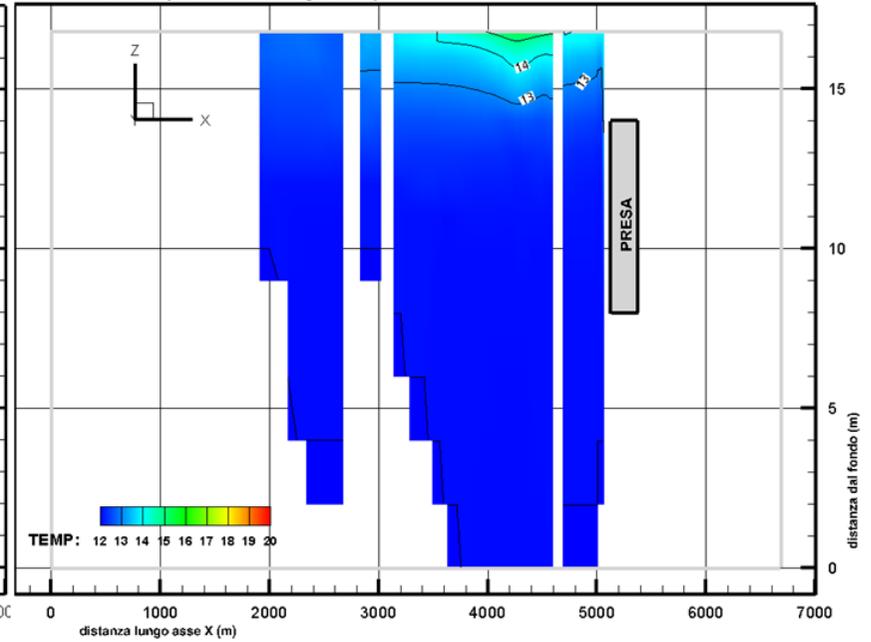


Figura 29 Scenario 5_Configurazione portuale futura; assetto impianto FUTURO a pieno carico. Campo termico superficiale nell'intero dominio di calcolo, a sinistra, e alla profondità di 4 m, a destra. La temperatura naturale del corpo idrico ricevente è pari a 12°C (inverno) ed è presente una corrente marina di 0.05 m/s diretta verso NO entrante dal lato Est del dominio. Simulazione con calma di vento.

Sezione 1 (in asse allo scarico)



Sezione 2 (in asse alla presa)



Sezione 1

Sezione 2

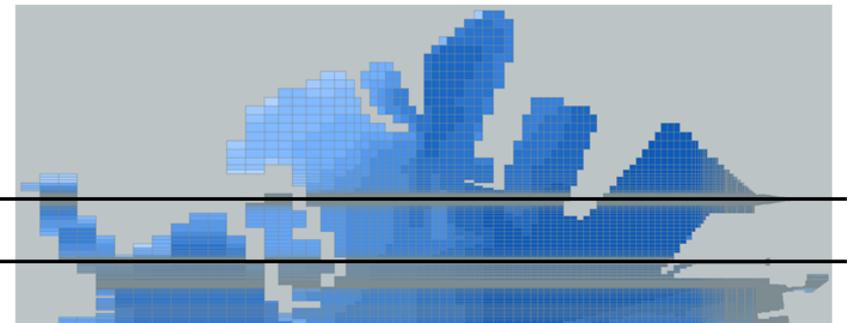


Figura 30 Scenario 5_ Configurazione portuale futura; assetto impianto FUTURO a pieno carico. Campo termico nelle sezioni verticali allo scarico (a sx) e alla presa (a dx) della centrale. Temperatura superficiale calcolata ai 16 punti dell'arco a 1000 m (in basso a sx)

5.9 Scenario 6: config. portuale futura con vento da SO (inverno)

Lo scenario n° 6 ha simulato le condizioni qui di seguito riassunte relativamente a:

1. *configurazione portuale:*
 - futura (piena attuazione del PRP),
2. *assetto d'impianto:*
 - funzionamento a pieno carico del nuovo gruppo CCGT da 840 MW_e; Q pompe AC: 18.5 m³/s,
 - Δ termico allo scarico pari a 5.5 °C.
3. *parametri ambientali:*
 - condizione invernale caratterizzata da vento di 5 m/s da SO;
 - $T_{\text{indisturbata}} = 12$ °C assunta come temperatura iniziale costante del corpo idrico ricettore;
 - corrente entrante dal lato Est del dominio di calcolo (diretta verso NO con riferimento alle coordinate geografiche) costante sul profilo verticale e pari a 0.05 m/s.

Lo scenario simula una condizione prevedibilmente critica per le tematiche in oggetto: a causa del vento spirante da SO, che si somma alla corrente ambientale residua, lo scarico caldo potrebbe essere confinato verso l'area di presa (inducendo possibili fenomeni di ricircolo) o in prossimità dei punti di misura sull'arco a 1000 m (creando possibili problemi per quanto concerne il soddisfacimento dei vincoli di legge).

I risultati della simulazione sono illustrati nelle due figure seguenti che evidenziano chiaramente l'effetto di confinamento operato dal vento; a livello superficiale la perturbazione termica indotta dallo scarico interessa un'area della rada decisamente ridotta rispetto a quella del corrispondente scenario senza vento (n. 5), mentre a 4 m di profondità (a destra in Figura 31) si osserva un'impronta perturbata più ampia conseguenza dell'approfondimento del pennacchio derivante dal suo confinamento verso riva causato dall'azione del vento.

Quest'ultimo aspetto è confermato dalle immagini contenute in Figura 32 che mostrano la maggiore penetrazione in profondità della perturbazione termica nelle aree antistanti scarico e presa; rispetto al corrispondente scenario senza vento (n. 5) ciò produce un deciso aumento del ricircolo termico.

La dinamica della diffusione termica in quell'area è influenzata sia dalla completa tombatura del Marina di Fossamastra, sia dal prolungamento del molo Fornelli, entrambi previsti dal vigente PRP, che producono una riduzione dello specchio acqueo di dispersione della perturbazione termica, la prima, e un impedimento al deflusso delle acque di scarico, il secondo; rispetto al corrispondente scenario n. 2, eseguito nella configurazione portuale attuale, ciò si traduce in un aumento del delta termico a 1000 m e del ricircolo alla presa.

Il delta termico sull'arco a 1000 m, calcolato secondo la vigente normativa e con l'adozione del punto freddo ARPAL, è risultato pari a 2.52 °C, inferiore alla soglia di legge di 3 °C. Il ricircolo alla presa è pari a 1.30 °C.

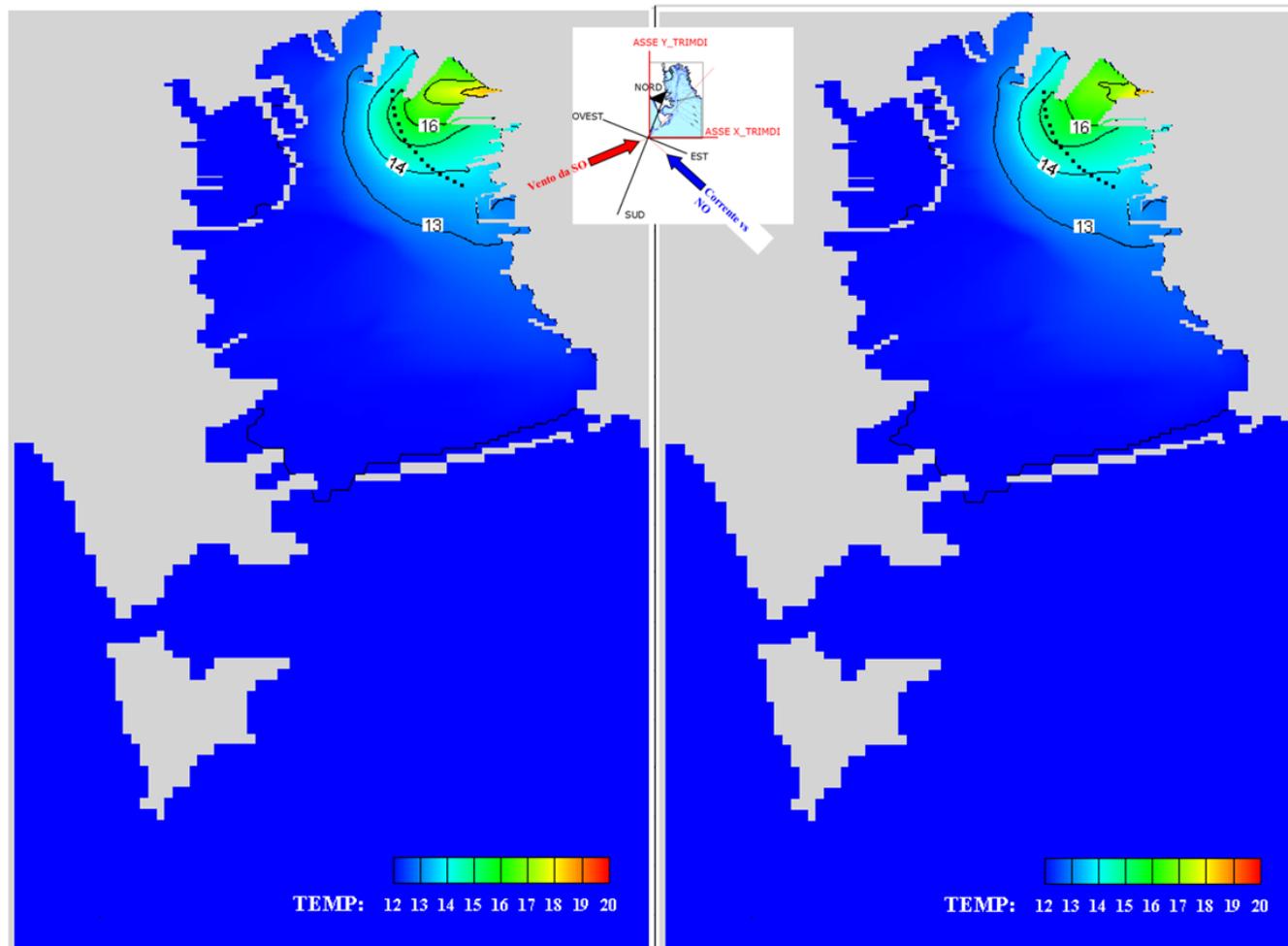


Figura 31 Scenario 6_Configurazione portuale futura; assetto impianto FUTURO a pieno carico. Campo termico superficiale nell'intero dominio di calcolo, a sinistra, e alla profondità di 4 m, a destra. La temperatura naturale del corpo idrico ricevente è pari a 12°C (inverno) ed è presente una corrente marina di 0.05 m/s diretta verso NO entrante dal lato Est del dominio. Simulazione con vento di 5 m/s da SO.

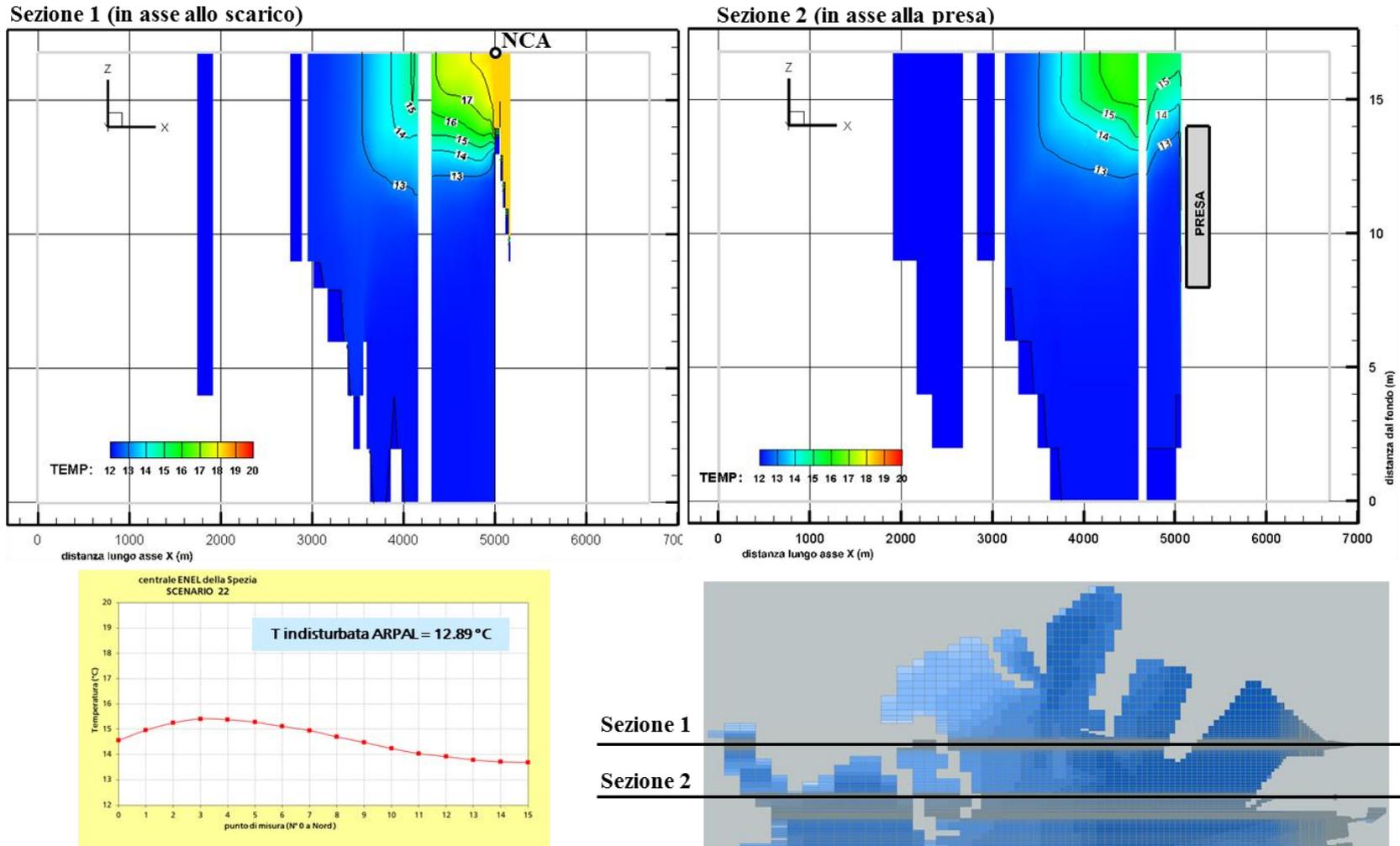


Figura 32 Scenario 6_ Configurazione portuale futura; assetto impianto FUTURO a pieno carico. Campo termico nelle sezioni verticali allo scarico (a sx) e alla presa (a dx) della centrale. Temperatura superficiale calcolata ai 16 punti dell'arco a 1000 m (in basso a sx)

5.10 Scenario 7: config. portuale futura in calma di vento (estate)

Lo scenario n° 7 ha simulato le condizioni qui di seguito riassunte relativamente a:

1. *configurazione portuale:*
 - futura (piena attuazione del PRP),
2. *assetto d'impianto:*
 - funzionamento a pieno carico del nuovo gruppo CCGT da 840 MW_e; Q pompe AC: 18.5 m³/s,
 - Δ termico allo scarico pari a 5.5 °C.
3. *parametri ambientali:*
 - condizione estiva caratterizzata da calma di vento;
 - $T_{\text{indisturbata}} = 28$ °C assunta come temperatura iniziale costante del corpo idrico ricettore;
 - corrente entrante dal lato Est del dominio di calcolo (diretta verso NO con riferimento alle coordinate geografiche) costante sul profilo verticale e pari a 0.05 m/s.

Lo scenario simula una condizione prevedibilmente critica per le tematiche in oggetto: lo scarico caldo, infatti, a causa dell'assenza di vento di superficie subisce un limitato scambio termico con l'atmosfera.

I risultati della simulazione sono illustrati nelle due figure seguenti che evidenziano chiaramente la prevalenza del campo di moto indotto dallo scarico della centrale (e, sebbene collocata agli strati più profondi, dalla presa) rispetto alla corrente ambientale residua in ingresso al golfo attraverso la bocca di Levante. La sagoma assunta dalle isoterme conferma la prevalenza del campo di moto indotto dallo scarico, specialmente a livello superficiale. Le discontinuità fisiche del profilo costiero (per esempio i moli, in particolare il molo Fornelli ulteriormente allungato nella configurazione portuale futura) contribuiscono a deviare il pennacchio caldo convogliandolo, in prevalenza, verso la bocca di Ponente.

Per quanto riguarda, invece, la penetrazione in profondità della perturbazione termica è possibile trarre alcune indicazioni di dettaglio nelle aree antistanti scarico e presa, dalla successiva Figura 34.

Considerando l'intero specchio acqueo della rada, la perturbazione appare mediamente esaurita a circa 4 m di profondità; tale condizione sembra confermata anche a livello locale davanti allo scarico e nell'area della presa. Rimane esclusa un'area limitata in corrispondenza del Marina di Fossamastra in sponda destra al diffusore di scarico completamente tombato nel futuro assetto portuale qui simulato, dove permane un incremento termico di circa un grado rispetto alla temperatura indisturbata. La dinamica della diffusione termica in quell'area è influenzata anche dal prolungamento del molo Fornelli, previsto dal vigente PRP, che costituisce un impedimento al deflusso delle acque di scarico; rispetto al corrispondente scenario n. 3, eseguito nella configurazione portuale attuale, ciò si traduce in un leggero aumento del delta termico a 1000 m e del ricircolo alla presa.

Il delta termico sull'arco a 1000 m, calcolato secondo la vigente normativa e con l'adozione del punto freddo ARPAL, è risultato pari a 2.3 °C, inferiore alla soglia di legge di 3 °C. Il ricircolo alla presa è minimo e pari a 0.33 °C.

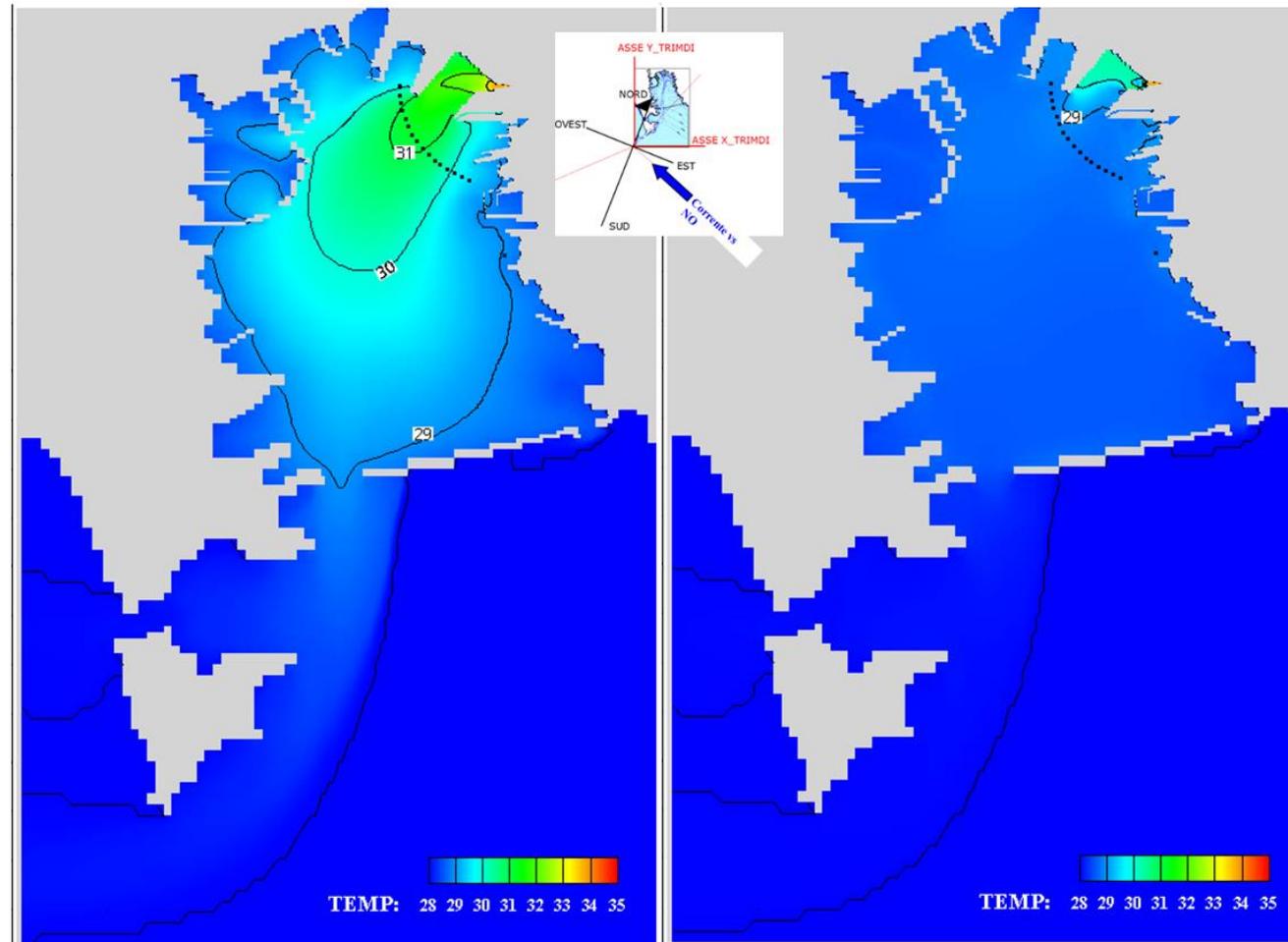
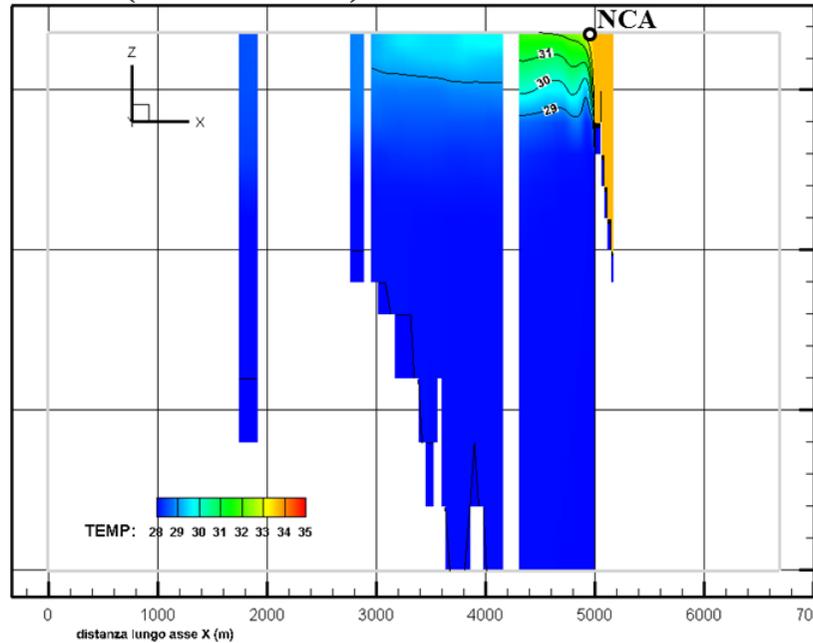


Figura 33 Scenario 7_Configurazione portuale futura; assetto impianto FUTURO a pieno carico. Campo termico superficiale nell'intero dominio di calcolo, a sinistra, e alla profondità di 4 m, a destra. La temperatura naturale del corpo idrico ricevente è pari a 28°C (estate) ed è presente una corrente marina di 0.05 m/s diretta verso NO entrante dal lato Est del dominio. Simulazione con calma di vento.

Sezione 1 (in asse allo scarico)



Sezione 2 (in asse alla presa)

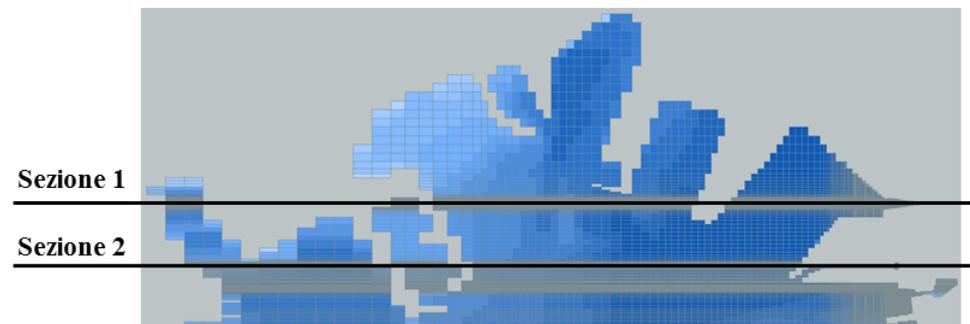
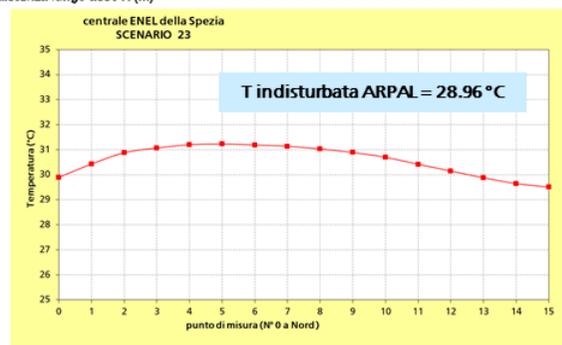
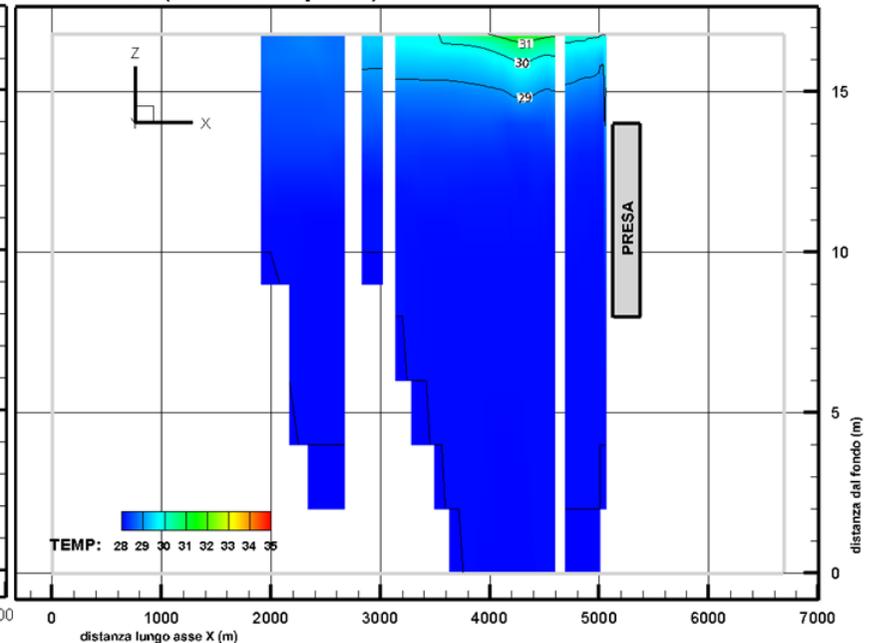


Figura 34 Scenario 7_ Configurazione portuale futura; assetto impianto FUTURO a pieno carico. Campo termico nelle sezioni verticali allo scarico (a sx) e alla presa (a dx) della centrale. Temperatura superficiale calcolata ai 16 punti dell'arco a 1000 m (in basso a sx)

5.11 Scenario 8: config. portuale futura con vento da SO (estate)

Lo scenario n° 8 ha simulato le condizioni qui di seguito riassunte relativamente a:

1. *configurazione portuale:*
 - futura (piena attuazione del PRP),
2. *assetto d'impianto:*
 - funzionamento a pieno carico del nuovo gruppo CCGT da 840 MW_e; Q pompe AC: 18.5 m³/s,
 - Δ termico allo scarico pari a 5.5 °C.
3. *parametri ambientali:*
 - condizione estiva caratterizzata da vento di 5 m/s da SO;
 - $T_{\text{indisturbata}} = 28$ °C assunta come temperatura iniziale costante del corpo idrico ricettore;
 - corrente entrante dal lato Est del dominio di calcolo (diretta verso NO con riferimento alle coordinate geografiche) costante sul profilo verticale e pari a 0.05 m/s.

Lo scenario simula una condizione prevedibilmente critica per le tematiche in oggetto: a causa del vento spirante da SO, che si somma alla corrente ambientale residua, lo scarico caldo potrebbe essere confinato verso l'area di presa (inducendo possibili fenomeni di ricircolo) o in prossimità dei punti di misura sull'arco a 1000 m (creando possibili problemi per quanto concerne il soddisfacimento dei vincoli di legge).

I risultati della simulazione sono illustrati nelle due figure seguenti che evidenziano chiaramente l'effetto di confinamento operato dal vento; a livello superficiale la perturbazione termica indotta dallo scarico interessa un'area della rada decisamente ridotta rispetto a quella del corrispondente scenario senza vento (n. 7), mentre a 4 m di profondità (a destra in Figura 35) si osserva un'impronta perturbata più ampia conseguenza dell'approfondimento del pennacchio derivante dal suo confinamento verso riva causato dall'azione del vento.

Quest'ultimo aspetto è confermato dalle immagini contenute in Figura 36 che mostrano la maggiore penetrazione in profondità della perturbazione termica nelle aree antistanti scarico e presa; rispetto al corrispondente scenario senza vento (n. 7) ciò produce sia un aumento del ricircolo termico, sia un minore interessamento dei punti di controllo sull'arco.

La dinamica della diffusione termica in quell'area è influenzata sia dalla completa tombatura del Marina di Fossamastra, sia dal prolungamento del molo Fornelli, entrambi previsti dal vigente PRP, che producono una riduzione dello specchio acqueo di dispersione della perturbazione termica, la prima, e un impedimento al deflusso delle acque di scarico, il secondo; rispetto al corrispondente scenario n. 4, eseguito nella configurazione portuale attuale, ciò si traduce in un aumento del delta termico a 1000 m e del ricircolo alla presa.

Il delta termico sull'arco a 1000 m, calcolato secondo la vigente normativa e con l'adozione del punto freddo ARPAL, è risultato pari a 2.21 °C, inferiore alla soglia di legge di 3 °C. Il ricircolo alla presa è pari a 0.91 °C.

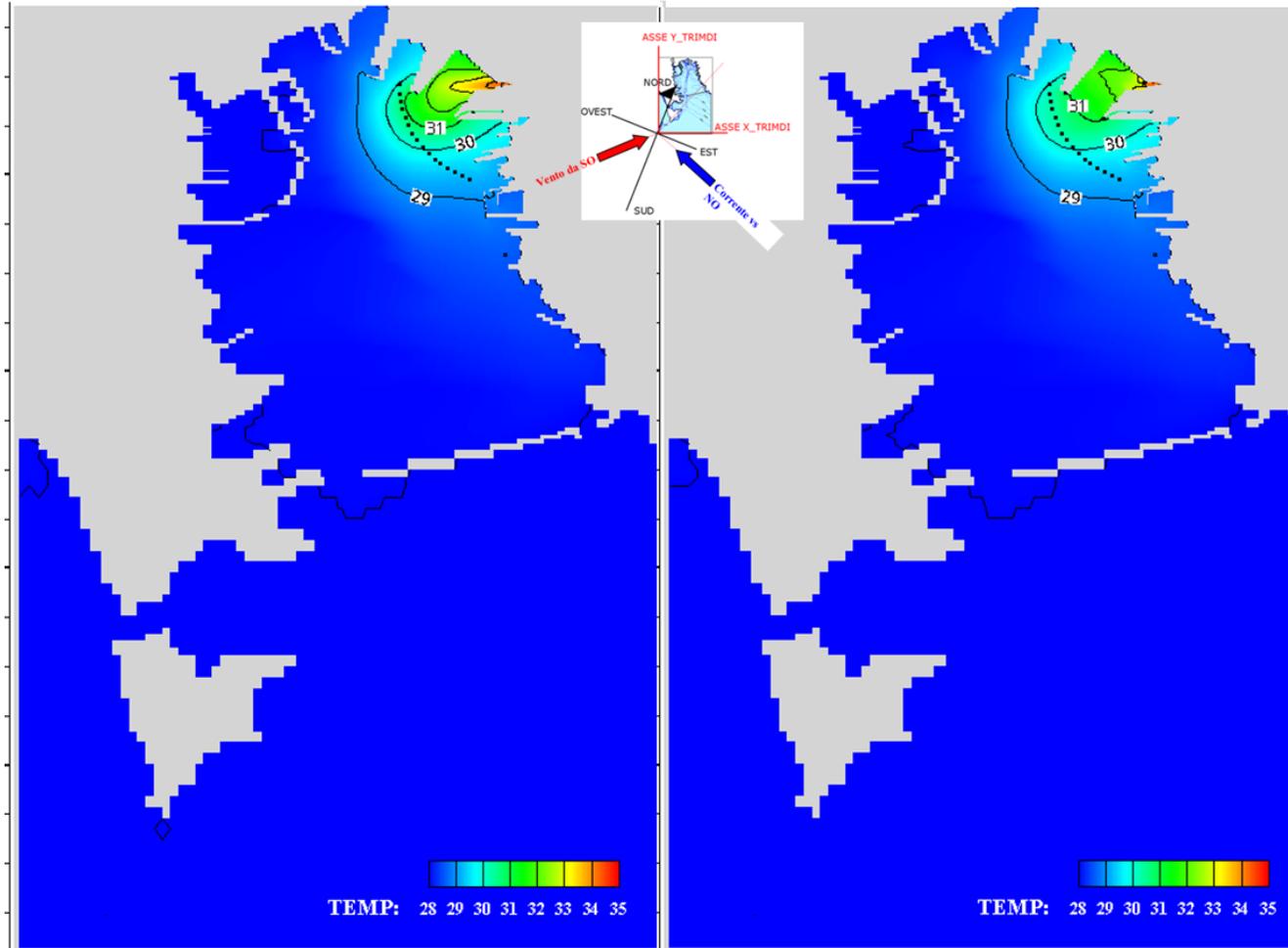


Figura 35 Scenario 8_Configurazione portuale futura; assetto impianto FUTURO a pieno carico. Campo termico superficiale nell'intero dominio di calcolo, a sinistra, e alla profondità di 4 m, a destra. La temperatura naturale del corpo idrico ricevente è pari a 28°C (estate) ed è presente una corrente marina di 0.05 m/s diretta verso NO entrante dal lato Est del dominio. Simulazione con vento di 5 m/s da SO.

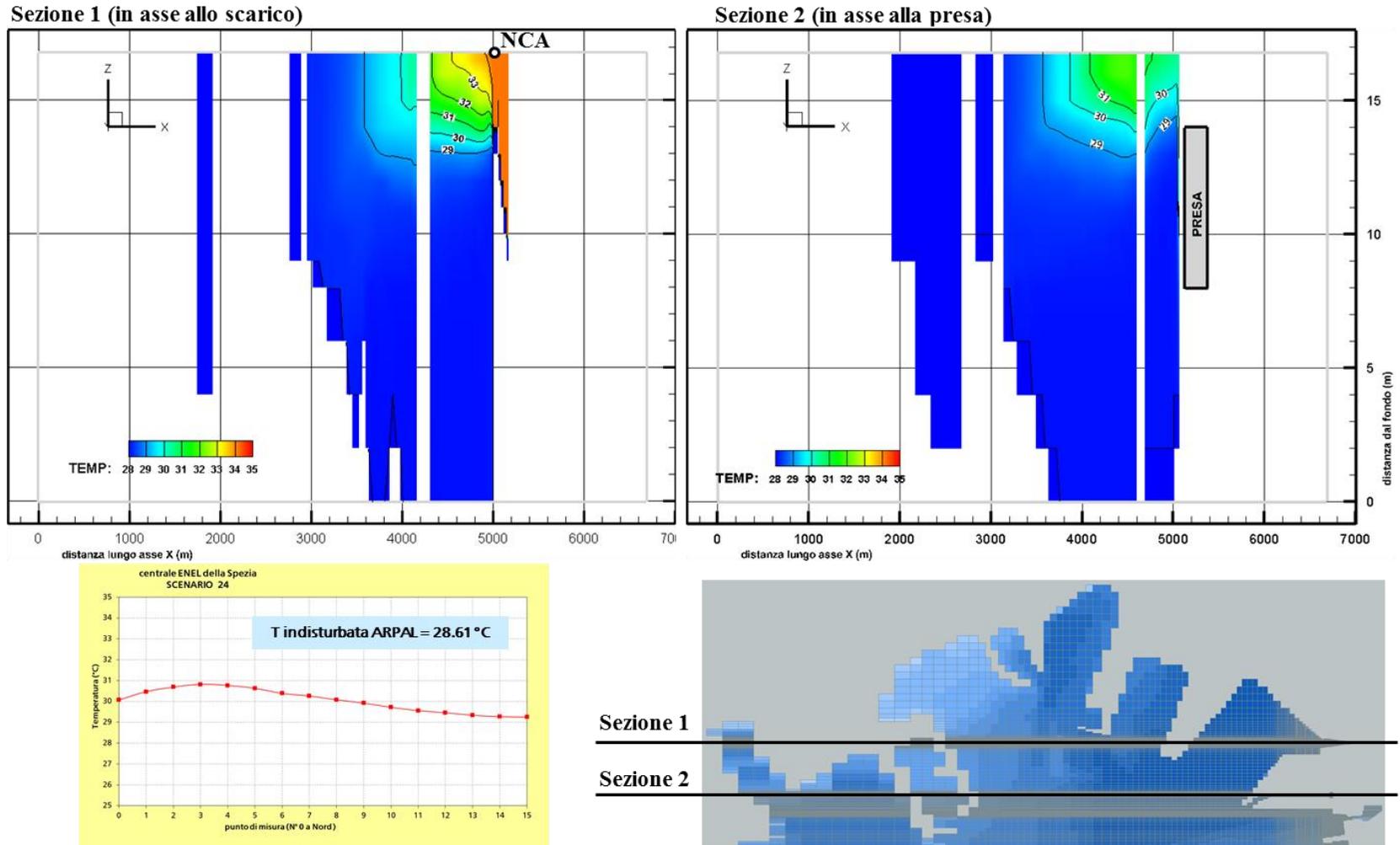


Figura 36 Scenario 8_ Configurazione portuale futura; assetto impianto FUTURO a pieno carico. Campo termico nelle sezioni verticali allo scarico (a sx) e alla presa (a dx) della centrale. Temperatura superficiale calcolata ai 16 punti dell'arco a 1000 m (in basso a sx)

5.12 Valutazioni aggiuntive

In merito ai possibili impatti sulle aree destinate alla molluschicoltura collocate in prossimità della diga foranea Porto della Spezia e nella baia di Portovenere (delibera regionale n. 2216 del luglio 1996, Figura 37), l'esame dei risultati delle simulazioni della dispersione dello scarico caldo della centrale evidenzia in primo luogo un incremento massimo della temperatura superficiale inferiore ad 1 °C in corrispondenza del lato interno di ponente della diga foranea; in secondo luogo, la temperatura riassume rapidamente il valore indisturbato progredendo in profondità tanto da risultare praticamente ripristinata alla distanza di 4 m dal pelo libero.

Inoltre è opportuno sottolineare che le tecniche di allevamento oggi più diffuse, sistema *longline* e sistema neozelandese, prevedono l'installazione di una fune rettilinea detta "trave" che viene ancorata al fondo tramite dei corpi morti e mantenuta ad una profondità di circa 3 m a seconda del sistema, grazie ad una serie di galleggianti installati su di essa. I mitili vengono quindi allevati su corde separate (*reste*, con tecnica *longline*) o su corda continua (*agugliato*, con tecnica neozelandese) fissate opportunamente al trave. Ciò comporta un posizionamento finale dei mitili ad una distanza di oltre 3 m dalla superficie, dunque lontano dall'area in cui si è calcolato il massimo incremento termico, classificabile, peraltro, come contenuto considerando che la bibliografia sull'argomento concorda nel sostenere che i molluschi possono tollerare ampie escursioni termiche (da 0 °C a 30 °C, secondo ARPAV, Area tecnico-scientifica Osservatorio acque di transizione).

Al fine di limitare il deposito del fouling marino nei canali di prelievo e di restituzione acqua mare e nei condensatori, viene dosato ipoclorito di sodio in soluzione. Il dosaggio di questo reagente è limitato a periodi specifici dell'anno (solitamente tra marzo e ottobre). Inoltre, la concentrazione di cloro residuo, monitorato in continuo al punto di scarico attraverso apposita strumentazione, è sempre inferiore al limite di legge di 0.2 mg/l

I precedenti studi condotti da CESI hanno evidenziato che la dimensione planimetrica dell'area interessata dalla perturbazione indotta dallo scarico di acqua trattata con ipoclorito in soluzione si riduce a poche decine di metri nell'intorno dello stesso, con valori di concentrazione che vanno rapidamente esaurendosi anche in direzione verticale. La distanza esistente tra lo scarico della centrale e le aree dedicate alla molluschicoltura prossime alla diga, superiore a 4 km, esclude ragionevolmente la possibilità di un risentimento associato a concentrazioni residue di ipoclorito. Si può quindi concludere che il possibile impatto sulla molluschicoltura dovuto all'utilizzo di ipoclorito di sodio in soluzione sia irrilevante.

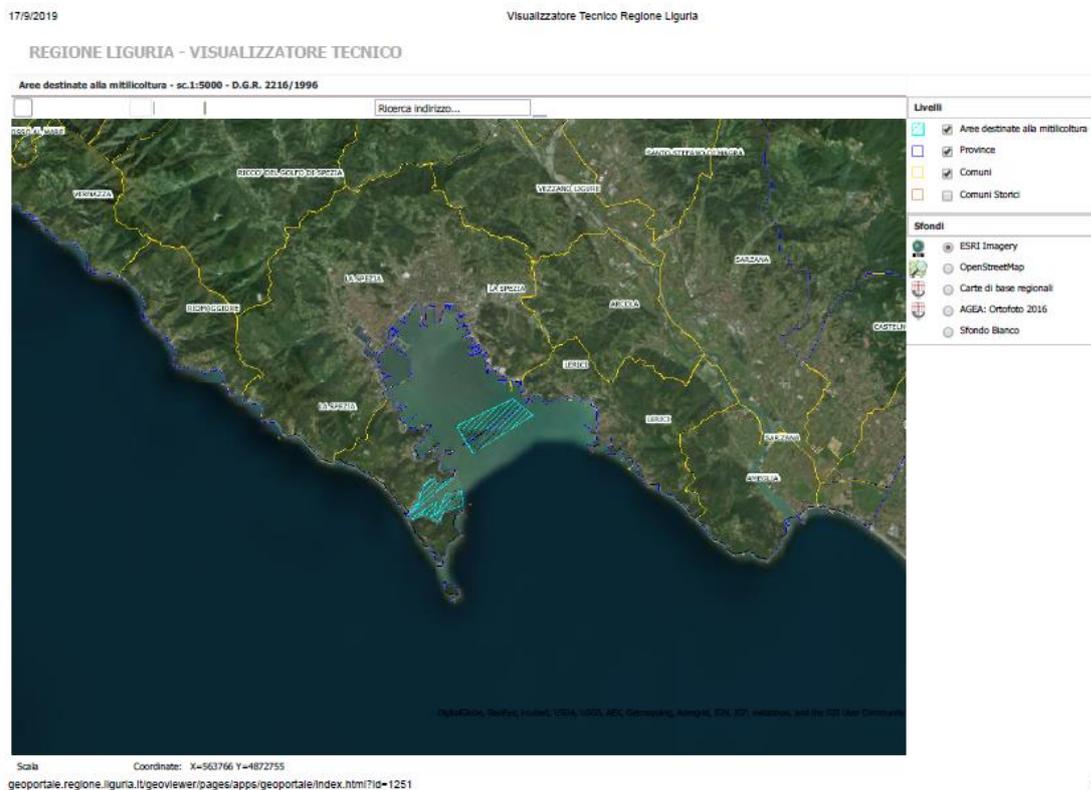


Figura 37 Aree destinate alla mitilicoltura - D.G.R. 2216/1996 (Rif. 26).

6 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Lo studio condotto con l'ausilio del codice TRIMDI e descritto nel presente documento, si è posto come principale obiettivo la valutazione modellistica della dispersione a mare delle acque di raffreddamento della Centrale di La Spezia, con riferimento al futuro assetto dell'impianto caratterizzato dalla nuova unità SP5 a ciclo combinato, taglia 840 MW_e, in sostituzione dell'unità SP3 a carbone attualmente autorizzata all'esercizio con Decreto di Autorizzazione Integrata Ambientale (A.I.A.) D.M. 0000244 del 6/09/2013. Il nuovo CCGT, che verrà realizzato in due fasi (prima fase in ciclo aperto OCGT e seconda fase in ciclo chiuso CCGT), in virtù del miglior rendimento del ciclo combinato, comporterà una riduzione della potenza termica rispetto all'attuale configurazione d'impianto.

La futura unità SP5 è stata considerata funzionante a **pieno carico** con una portata delle pompe delle acque di circolazione pari a quella attuale di 18.5 m³/s.

In tale assetto l'incremento termico delle acque allo scarico in rada è di 5.5 °C.

La suddetta ipotesi di funzionamento è stata verificata in differenti condizioni meteorologiche e marine tipiche del sito, selezionate tra quelle **potenzialmente più critiche** per quanto concerne sia l'accertamento del rispetto dei limiti di legge, sia ai fini del possibile verificarsi di ricircolo alla presa.

In particolare, lo studio ha esaminato le condizioni di **stagioni calde** (temperatura massima estiva pari a 28 °C), e di **stagione fredda** (inverno) entrambe caratterizzate da:

- *calma di vento*, situazione che riduce al minimo lo scambio termico con l'atmosfera;
- *vento da SO*, condizione che tende a confinare il pennacchio nell'area di presa e di scarico, rappresentando quindi una condizione potenzialmente critica sia per le verifiche legislative a 1000 m sia per il possibile instaurarsi di condizioni di ricircolo alla presa.

Ciascuno scenario è stato inoltre caratterizzato dalla simulazione di una corrente marina diretta, all'esterno della rada, verso NO, capace dunque, grazie alla componente che penetra in rada attraverso la Bocca di Levante, di sospingere il pennacchio verso le aree di presa e di scarico della Centrale.

Infine, le suddette combinazioni ambientali e di assetto impianto sono state verificate in due configurazioni portuali:

- configurazione portuale *attuale* ad oggi presente in rada;
- configurazione portuale *futura* che contempla la realizzazione di tutte le opere previste dal vigente Piano Regolatore Portuale di recente approvazione.

La combinazione delle variabili ambientali, di assetto impianto e di configurazione portuale ha corrisposto alla simulazione di 8 scenari di calcolo dettagliati nella Tabella 2 che segue. La tabella, inoltre, contiene i risultati delle 8 simulazioni in termini di incrementi termici sull'arco a 1000 m (penultima colonna) e di entità dei ricircoli alla presa (ultima colonna).

Tabella 2 Scenari di calcolo: parametri ambientali, assetti d'impianto e risultati

Scenario N°	Configur. Portuale	ASSETTO CENTRALE		DATI AMBIENTALI						RISULTATI		
		Potenza / Q pompe AC [MW / m³/s]	DT presa-scarico [°C]	Stagione	Velocità vento [m/s]	Direzione vento [°]	Velocità corrente [m/s]	Direzione corrente [°]	T acqua iniziale [°C]	Salinità [PSU]	DT su arco a 1000 m [°C]	Ricircolo alla presa [°C]
1	attuale	840 / 18.5	5.5	inv	0	CALMA	0.05	NO	12	37	2.06	0.27
2	attuale	840 / 18.5	5.5	inv	5	SO	0.05	NO	12	37	2.04	1.22
3	attuale	840 / 18.5	5.5	est	0	CALMA	0.05	NO	28	37	2.20	0.17
4	attuale	840 / 18.5	5.5	est	5	SO	0.05	NO	28	37	1.70	0.72
5	futura da PRP	840 / 18.5	5.5	inv	0	CALMA	0.05	NO	12	37	2.10	0.38
6	futura da PRP	840 / 18.5	5.5	inv	5	SO	0.05	NO	12	37	2.52	1.30
7	futura da PRP	840 / 18.5	5.5	est	0	CALMA	0.05	NO	28	37	2.30	0.33
8	futura da PRP	840 / 18.5	5.5	est	5	SO	0.05	NO	28	37	2.21	0.91

Nei limiti di affidabilità del modello matematico tridimensionale utilizzato, sulla base dei risultati ottenuti dalla simulazione dei diversi scenari descritti ai precedenti paragrafi cui si rimanda per i necessari approfondimenti, si possono trarre le seguenti considerazioni:

- il futuro assetto a pieno carico simulato per la nuova unità SP5 è sostenibile, ossia consente il rispetto della normativa vigente in merito ai limiti termici di immissione in mare; tale condizione è verificata al variare della configurazione portuale (attuale e futura) e delle condizioni ambientali complessivamente analizzate (stagione calda e fredda, in calma di vento e con vento da SO);
- l'entità del ricircolo alla presa è generalmente rilevante (anche superiore a 1 °C) per gli scenari che hanno riprodotto condizioni con vento da Sud-Ovest in particolare in stagione fredda;
- per le combinazioni analizzate, si è osservato il rispetto del delta termico di 3 °C sull'arco a 1000 m anche nel caso di funzionamento del nuovo impianto nella configurazione portuale futura di completa realizzazione delle opere previste dal vigente Piano Regolatore Portuale.