



Industrial and Environmental
Fluid-Dynamic Research
Group
DICA, University of Trieste

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università di Trieste, Piazzale Europa 1, 34127 Trieste

Centrale a ciclo combinato, alimentata a gas naturale, nel porto industriale di Trieste:

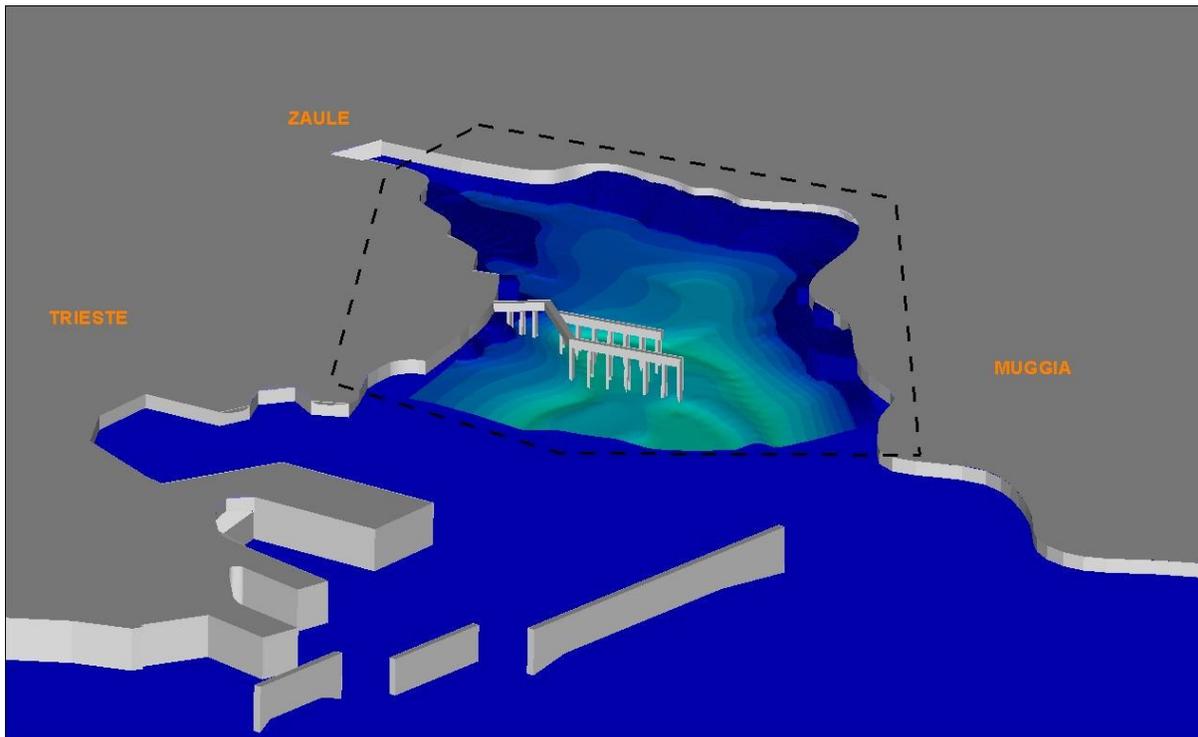
SIMULAZIONE TERMO-FLUIDODINAMICA DEL PRELIEVO-UTILIZZO-SCARICO DELL'ACQUA DI MARE PER SISTEMA DI RAFFREDDAMENTO DI UNA CENTRALE ELETTRICA SITA IN ZONA INDUSTRIALE DI TRIESTE E ASSISTENZA TECNICA IN FASE ISTRUTTORIA

RELAZIONE CONCLUSIVA

Data: 30 Marzo 2009

Studio eseguito per MEDEA DEVELOPMENT S.A.

da IE-Fluids, Coordinato dal Prof. Ing. Vincenzo Armenio, DICA, Università di Trieste



INDICE

Premessa.....	pag. 3
1. INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA.....	4
1.1 Elementi di rilievo nella baia di Muggia.....	5
1.2 Forzanti meteo-marine.....	8
2. CARATTERISTICHE DI EMISSIONE DEL GETTO TERMICO.....	13
3. IL MODELLO MATEMATICO.....	15
4. DESCRIZIONE DELLE SIMULAZIONI NUMERICHE ED ANALISI RISULTATI.....	17
4.1 Caso 1: analisi delle caratteristiche di dispersione del getto termico con differenti valori di temperatura e portata volumetrica: condizione invernale e assenza di vento.....	19
4.2 Caso 2: analisi delle caratteristiche di dispersione del getto termico con salto termico $\Delta T=8^{\circ}\text{C}$: condizione invernale, vento da SW con velocità $U_{10}=5\text{ m/s}$	27
4.3 Caso 3: analisi delle caratteristiche di dispersione del getto termico con salto termico $\Delta T=8^{\circ}\text{C}$: condizione estiva, vento da SW con velocità $U_{10}=5\text{ m/s}$	32
4.4 Caso 4: analisi delle caratteristiche di dispersione del getto con salto termico $\Delta T=3.4^{\circ}\text{C}$ (caso a regime, con possibile integrazione tra gli impianti insistenti nell'area, esistenti e attesi): condizione invernale, assenza di vento.....	39
5. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE.....	43
6. BIBLIOGRAFIA.....	51

Premessa

Il presente elaborato si inserisce nell'ambito della documentazione tecnica di supporto allo Studio di Impatto Ambientale della centrale a ciclo combinato di potenza pari a 400 MW da ubicarsi nell'area del Porto industriale di Trieste, proposta dalla Lucchini Energia nel quadro delle iniziative promosse per la riconversione produttiva dello stabilimento siderurgico esistente ("Ferriera di Servola").

Scopo principale del lavoro è stato quello di verificare la compatibilità del possibile utilizzo dell'acqua di mare per il raffreddamento dell'impianto con i limiti imposti dalla normativa di settore. In tal senso i dati base di progetto per lo sviluppo dello studio hanno previsto la definizione di alcuni "punti chiave", nell'ottica della minimizzazione dell'impatto ambientale dell'opera, ovvero della massima economia nell'utilizzo delle risorse, e più in generale di una razionalizzazione delle infrastrutture da realizzare in ambito portuale.

Tra i possibili scenari, sono stati considerati quelli potenzialmente più gravosi ai fini dell'impatto ambientale, sia nei riguardi delle condizioni meteo-marine che in quelli di progetto dell'opera stessa. La scelta degli scenari ha seguito un principio di conservatività piuttosto che di rappresentatività.

La presente relazione si compone di differenti sezioni:

Nella sezione 1 si fornisce dapprima un inquadramento del problema nei riguardi del sito previsto per l'insediamento della centrale, in termini di analisi delle caratteristiche fisiche del sito stesso e delle caratteristiche meteo-marine.

Nella sezione 2 si fornisce una descrizione delle scelte progettuali che sono state effettuate nella direzione dell'integrazione delle infrastrutture presenti o previste in sito ai fini della riduzione dell'impatto ambientale delle opere sul territorio.

La sezione 3 contiene una breve descrizione del modello numerico utilizzato.

La sezione 4 contiene una descrizione delle simulazioni numeriche effettuate insieme ad una discussione dei risultati ottenuti.

La sezione 5 riporta una sintesi conclusiva dello studio.

1. INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA

Come da progetto, la centrale a ciclo combinato di potenza pari a 400 MW prevede un sistema di raffreddamento mediante circolazione di acqua marina, opportunamente trattata con cloro in qualità di agente biocida, che viene immessa nell'impianto mediante un'opera di presa, viene trasportata mediante condotte nella zona di scambio termico ed infine viene riportata in mare attraverso una zona di restituzione. Tale restituzione avviene ad una temperatura superiore a quella del bacino idrico.

Il presente studio si propone di valutare le caratteristiche di dispersione della portata termica in uscita alla restituzione. Come sarà descritto con dettaglio nel seguito, le caratteristiche di dispersione del getto termico saranno valutate negli scenari più gravosi ai fini delle caratteristiche di impatto ambientale ed al fine di verificare la compatibilità della configurazione progettuale ipotizzata nei riguardi della normativa vigente.

L'area che sarà presa in considerazione è quella di influenza del pennacchio termico, considerando quindi gran parte della baia di Muggia con la sua attuale morfologia ed includendo le opere antropiche.

La normativa richiede che le caratteristiche del pennacchio termico siano tali che: l'aumento della temperatura dell'acqua sia non superiore a 3 °C in corrispondenza di un arco di circonferenza di raggio pari a 1000 metri a partire dal punto di emissione; la temperatura dell'acqua allo scarico non superi i 35 °C.

In figura 1 è riportata un'immagine da satellite dell'intera Baia di Muggia. Nella figura stessa è indicato con cerchio rosso il punto dove è previsto l'insediamento della centrale termica.

In senso orario e partendo da ovest si trova il sistema di tre dighe "Luigi Rizzo", che chiude la baia sul versante NW proteggendola da correnti e onde provenienti dalla parte più esterna del Golfo di Trieste. A N si trova il Porto Commerciale di Trieste con i suoi tre moli principali e banchine, e a seguire, ci sono i tratti di costa occupati dallo "Scalo Legnami" e dall'Impianto Siderurgico della Ferriera, adiacente alla centrale termica CET-Servola. Proseguendo in senso orario verso SE si hanno i pontili dell'oleodotto transalpino SIOT e la zona industriale di Zaule. Immediatamente a sinistra dell'area cerchiata in rosso sono previsti, rispettivamente, l'insediamento dell'impianto di rigassificazione Gas-Natural e alla sua destra, adiacente allo stesso, l'insediamento della nuova centrale elettrica, oggetto del presente studio. Alle spalle dei due impianti previsti sulla costa, si trova l'impianto di Termovalorizzazione Rifiuti della società Acegas-APS. A destra dello stesso si trova il Canale Industriale. Proseguendo verso ESE, a destra e in basso rispetto al canale

navigabile (figura 1) sono presenti rispettivamente i corsi d'acqua del torrente Rosandra e del Rio Ospio, i quali apportano acqua dolce (leggera) all'interno della baia, acqua che, date le caratteristiche di galleggiamento positive, tende a risalire e distribuirsi sulla superficie marina nella zona orientale della baia.

Sul versante sud della baia si trova Muggia e più ad ovest, i moli di Porto San Rocco e la parte di costa che poi continua fuori dalla baia fino a Punta Sottile. Il "Canale Sud" indica il tratto di mare compreso tra la diga più lunga e la costa sud antistante ad essa e costituisce il principale ingresso alla baia.

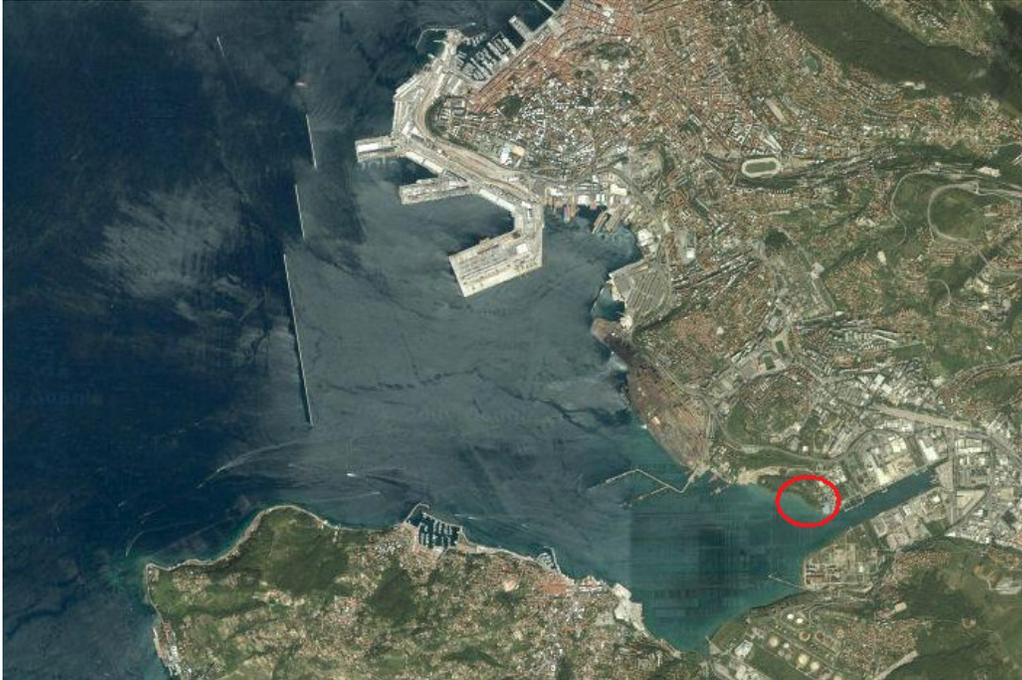


Figura 1: Immagine satellitare della Baia di Muggia. Cerchiata in rosso l'area del previsto insediamento della centrale termica (immagine da Google map).

1.1 Elementi di rilievo nella baia di Muggia

L'analisi del sito di interesse considera l'ambiente naturale della Baia di Muggia nella sua coesistenza con le opere antropiche quali dighe, moli, banchine, interrimenti ed eventuali altre opere presenti.

Fino alla fine del XVII secolo la parte più interna della baia, ovvero la Valle di Zaule, era meno allungata in direzione est-ovest verso il mare ed aveva una superficie maggiore, le cui rive erano quasi interamente occupate da saline. Il successivo sviluppo del Porto Commerciale di Trieste nel XIX secolo ha comportato diverse opere di drenaggio in tutta l'area (usata, tra l'altro, anche come discarica) riducendo quindi progressivamente la profondità della baia davanti a Servola e Zaule. La massima profondità raggiunta nella baia è di 21 metri (nel canale sud, ricavato per permettere

l'ingresso a navi di grande tonnellaggio), mentre essa è di circa 10 metri nella zona centrale. Nella zona antistante i previsti impianti di rigassificazione e la centrale termica la profondità del bacino è dell'ordine dei 12-16 metri. Le carte batimetriche utilizzate nel presente studio sono state fornite dagli Uffici Tecnici dell'Autorità Portuale di Trieste. Documenti più recenti [1] riportano una profondità maggiore nella zona nella quale si prevede il posizionamento della sezione di scarico dell'acqua trattata dall'impianto Gas Natural. Comunque per coerenza con la documentazione disponibile e per una maggiore conservatività nello sviluppo dell'analisi (come sarà discusso successivamente) si preferisce utilizzare i dati forniti dall'Autorità Portuale di Trieste.

La conformazione della baia stessa, molto allungata secondo l'asse E-W e abbastanza ridotta lungo quello N-S, non permette intense circolazioni di correnti e forti fenomeni di mescolamento a causa della ridotta distanza di fetch di un eventuale vento forzante (nel seguito si discuteranno separatamente i vari casi di vento).

Grande importanza ricopre il sistema delle tre dighe che chiudono il lato occidentale della baia. La loro funzione è quella di protezione da correnti e onde marine, in modo da facilitare le operazioni di traffico navale all'interno della baia. Tuttavia, dal punto di vista idrodinamico la presenza di tali barriere porta ad una forte limitazione del ricambio d'acqua, essendo il canale sud e gli spazi tra una diga e l'altra le uniche vie di comunicazione con il resto del Golfo di Trieste.

Le pile dei pontili dell'oleodotto transalpino della Siot possono soltanto marginalmente ridurre la circolazione della corrente tra il tratto di mare antistante Servola e quello di Zaule. Per questo motivo, la loro presenza non sarà considerata nella simulazione numerica.

I corsi d'acqua del Rio Ospio e del torrente Rosandra presentano il loro tratto finale nella Valle di Zaule [2,3]. Il Rio Ospio è un piccolo corso d'acqua che nasce a pochi chilometri dal confine di Stato, in territorio sloveno. Esso raccoglie sia acque carsiche (soprattutto della Grotta di Ospio), sia acque di ruscellamento che nascono da sorgenti su terreni flyschoidi e sfocia nelle vicinanze di Muggia dopo aver percorso circa 8 km in direzione E-W. Dai dati di letteratura si può stimare una portata media annua dell'ordine di $0.51 \text{ m}^3/\text{s}$.

La Val Rosandra accoglie il corso medio del torrente Rosandra, precisamente dalla cascata di Botazzo a Bagnoli; in questo percorso le acque del torrente attraversano a monte i calcari dell'altipiano di S.Servolo, mentre più a valle incontrano prima i terreni marnoso-arenacei e poi detriti di falda costituiti perlopiù da pietrisco calcareo; infine il corso d'acqua sfocia nella piana alluvionale di Zaule. Non si posseggono dati continuativi di portata; sporadiche misure riportate indicano portate medie di alcune decine di litri al secondo.



Le portate di tali corsi d'acqua sono di entità molto piccola. Comunque la loro presenza tende a mitigare l'effetto riscaldante fornito da un getto di acqua a temperatura elevata immesso nello specchio d'acqua antistante la zona di Zaule per le seguenti ragioni:

- L'acqua dei corsi d'acqua è dolce e mediamente a temperatura più bassa di quella del bacino ricevente. Tale acqua dolce, non appena si immette nel bacino di acqua salata, tende a risalire rapidamente verso gli strati superficiali a causa del galleggiamento positivo ed a disperdersi in superficie.

- L'acqua calda emessa in corrispondenza della sezione di restituzione di un impianto di raffreddamento è più leggera dell'acqua del bacino idrico e, indipendentemente dalla profondità della sezione di emissione, tende a risalire rapidamente verso l'alto ed a disperdersi in corrispondenza della superficie.

Si evince che, nei riguardi delle caratteristiche di galleggiamento, il getto termico emesso in corrispondenza della sezione di restituzione ha una dinamica simile agli efflussi di acqua dolce e fredda proveniente dai corsi d'acqua (si noti che il galleggiamento positivo dovuto alla differenza di salinità è superiore al contributo negativo al galleggiamento dovuto al salto di temperatura tra acqua dei corsi d'acqua e acqua del bacino). Ne segue che il getto termico ha una elevata probabilità di incontrarsi e mescolarsi con le correnti di acqua dolce provenienti dai torrenti in corrispondenza degli strati superficiali del bacino e ciò comporta una indubbia mitigazione della temperatura del getto termico. Tenere conto di tali portate di acqua dolce nella simulazione numerica è senz'altro possibile. Comunque dato che le portate variano nei periodi dell'anno e sono dipendenti dalle condizioni meteorologiche (eventi temporaleschi o periodi di pioggia), ed inoltre considerato che non si hanno misure dettagliate di tali portate, si avrebbe una concreta possibilità di stimare il loro contributo in maniera poco accurata. Per questa ragione e ai fini di una analisi che operi in condizioni conservative, nelle simulazioni numeriche non viene considerato l'effetto mitigante della risalita dell'acqua dolce e fredda dei due torrenti nella zona di Zaule.

All'interno della baia di Muggia è presente l'impianto di raffreddamento della centrale elettrica CET-Servola. L'impianto preleva una portata di acqua marina tramite una stazione di pompaggio posta sulla costa ad un centinaio di metri a NW rispetto ai pontili della Siot e restituisce tale portata trattata con cloro con un incremento di temperatura dell'ordine di 6°C rispetto al bacino idrico in un punto di restituzione posto a circa 100 metri a NW rispetto alla sezione di presa, in corrispondenza del sito in cui è insediato l'impianto siderurgico Ferriera di Servola.

Studi eseguiti recentemente da differenti autori hanno mostrato che il getto termico tende a disperdersi nella zona antistante la Ferriera nella zona nord-occidentale della Baia di Muggia, perdendo rapidamente il proprio carico termico. Quindi risulta poco probabile che l'acqua calda

proveniente da tale sezione di restituzione possa interagire con quella proveniente dalla sezione di restituzione della nuova centrale termica, posta, come discusso, nella zona di Zaule, a sud-est rispetto a quella di CET-Servola e al di là dei pontili della Siot.

1.2 Forzanti meteo-marine

Le correnti marine nel Golfo di Trieste sono di debole intensità. Valori tipici sono di 0.10 m/s nella parte orientale, mentre all'interno della baia di Muggia si scende a valori non superiori ai 0.05 m/s. In generale le correnti superficiali e quelle profonde hanno versi opposti, orario per le prime ed antiorario per le seconde come rappresentato in figura 2.

La marea astronomica a Trieste è di tipo prevalentemente semidiurno: si verificano cioè comunemente due alte e due basse maree al giorno. Le escursioni massime vengono riscontrate in fase di luna nuova e di luna piena, quando sole, luna e terra sono pressoché allineati. Durante le quadrature (primo ed ultimo quarto di luna) le escursioni sono minime e la marea tende a diventare diurna. Le ampiezze di marea nel mar Mediterraneo sono di norma non superiori ai 20 cm, ma la forma e le dimensioni del bacino Adriatico sono tali per cui l'onda di marea raggiunge a Trieste l'ampiezza massima di 81 cm.



Figura 2: Andamento orientativo delle correnti medie nel Golfo di Trieste: strato superficiale in giallo, orario; strato di fondo in verde, antiorario.

L'alta marea sale verso N lungo la costa orientale dell'Adriatico, passa per il Golfo di Trieste e ritorna a sud lungo la costa italiana, completando il giro in poco più di dodici ore, avendo una velocità media di circa 150 km/h. La velocità di propagazione dipende dalla profondità del bacino: su fondali di 20 m, come nel Golfo di Trieste, la velocità è di circa 50 km/h, mentre per fondali più bassi decresce. Quindi la marea sale e scende quasi simultaneamente in tutto il golfo di Trieste e nella baia di Muggia. Le maree generano una corrente che fa spostare l'acqua nel bacino secondo un moto oscillatorio.

Le correnti di marea sono poco efficienti al fine del ricambio di acqua nel golfo (e a maggior ragione nella baia di Muggia) in quanto si limitano a spostare semplicemente avanti e indietro di alcune centinaia di metri la stessa massa d'acqua ogni sei ore. Comunque, nei riguardi delle caratteristiche di dispersione di un getto termico, la presenza di correnti e maree tende ad incrementare la diluizione del getto all'interno del bacino idrico. Infatti le correnti di marea in un bacino poco profondo generano uno strato limite turbolento di fondo, oscillante con un periodo pari a quello della marea stessa. Tale strato limite turbolento incrementa le caratteristiche di mescolamento verticale ed orizzontale di massa, quantità di moto e temperatura lungo la colonna d'acqua [4]. Per semplicità di analisi le correnti di marea non sono considerate nella simulazione numerica. Ciò permette di operare in condizioni conservative, in quanto non viene considerato l'ulteriore effetto di diluizione del getto termico associato alla presenza della marea.

La posizione delle dighe sul lato occidentale della baia praticamente annulla l'ingresso del moto ondoso all'interno della baia e quindi, a causa del ridottissimo fetch presente in qualunque condizione di vento, all'interno della baia non si sviluppa moto ondoso significativo.

La forzante più influente nei riguardi della circolazione dell'acqua nella baia di Muggia risulta essere l'azione del vento sulla superficie marina, come mostrato in [5]. In particolare, l'azione del vento produce:

- turbolenza meccanica e conseguente mescolamento degli strati superficiali;
- circolazione verticale delle masse d'acqua nei bacini chiusi o semichiusi.

Per descrivere il regime dei venti nell'area di interesse si analizzeranno i dati di velocità e direzione registrati durante il periodo di alcuni anni e riportati in [6]. I diagrammi polari riportati nelle figure 3 e 4 rappresentano la durata annuale del vento secondo le 16 direzioni convenzionali di provenienza (N, NNE, NE, ..., NNW). La statistica è stata calcolata utilizzando i dati orari registrati dalla stazione DST (Dipartimento Scienze della Terra) di Trieste durante l'ultimo decennio normale 1991-2000. Si nota che la direzione di scorrimento locale del vento è individuata dall'angolo compreso tra l'asse

N e la rispettiva colonna, mentre il verso è da intendersi dalla periferia verso il centro del diagramma.

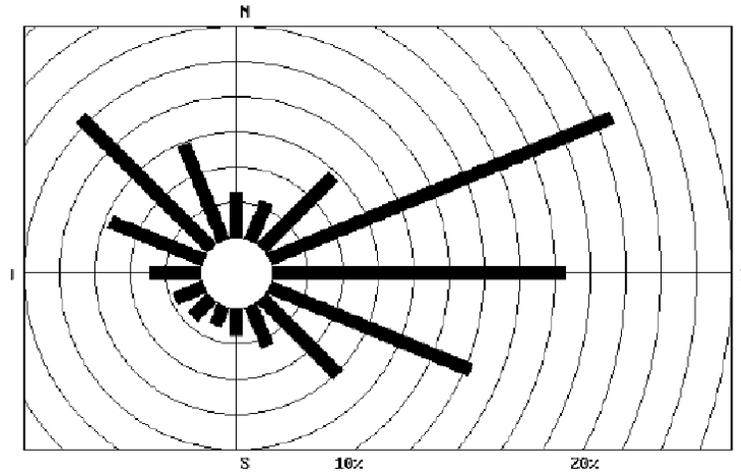


Figura 3: Diagramma polare della durata percentuale del vento nell'area di Trieste su un anno (dati da [5,6]).

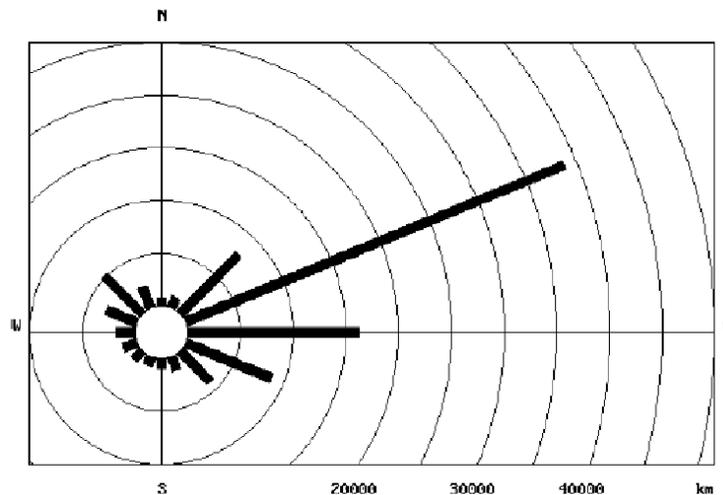


Figura 4: Diagramma polare del percorso medio effettuato dal vento su un anno (dati da [5,6]).

Si osserva che il vento dominante è quello proveniente da ENE, Bora, con una frequenza di accadimento pari a 21% (77 giorni all'anno) ed un percorso di quasi 40000 km/anno. Rilevanti anche i venti provenienti da E e ESE, sia come probabilità di accadimento che come intensità. Sono di rilevanza minore i casi di Maestrale (NW) e Scirocco (SE, ESE) con durate percentuali annuali di circa 10% e 12% e percorsi medi annuali di 1000 e 1400 km rispettivamente. Frequenza minore hanno gli altri venti, in particolare quelli provenienti dal quadrante sud-occidentale.

L'analisi dei dati meteorologici mostra che i venti provenienti dai quadranti orientali costituiscono le forzanti più rilevanti all'interno della baia di Muggia, sia in termini di frequenza che di intensità. Comunque bisogna osservare che ai fini del presente studio gli eventi provenienti dai quadranti orientali hanno una rilevanza secondaria per una serie di ragioni che vengono elencate:

- essi sono venti prevalentemente freddi e di intensità moderata-forte. La loro bassa temperatura tende a favorire la dispersione di temperatura e quindi a raffreddare rapidamente gli strati marini superficiali;
- la forte intensità unita al raffreddamento superficiale tendono a favorire un rapido mescolamento verticale della colonna d'acqua e quindi ad abbattere l'accumulo di temperatura negli strati superficiali.

Diverso è il discorso per i venti provenienti dai quadranti occidentali ed in particolare per il vento di Libeccio (SW). Tale vento ha intensità a regime di brezza e mediamente temperatura relativamente elevata. Conseguentemente, il raffreddamento degli strati superficiali è limitato così come il mescolamento dovuto alla turbolenza meccanica. I campi termici superficiali di conseguenza tendono ad essere trasportati a grande distanza dal punto di emissione con scarse caratteristiche di mescolamento.

Il vento di Libeccio ha rilevanza nel presente studio anche a causa della conformazione del bacino idrico antistante l'area di Zaule. Tale vento infatti tende a trasportare ed accumulare l'acqua calda verso la costa nord-orientale, in corrispondenza della zona prevista per l'insediamento dell'impianto ed eventualmente nella zona del canale navigabile. Conseguentemente, nonostante la scarsa probabilità di accadimento, tale condizione di vento rappresenta, tra le possibili forzanti meteorologiche, quella a maggiore impatto da un punto di vista ambientale.

Riguardo alle condizioni di stratificazione termica del bacino idrico, dati storici ampiamente riportati in letteratura mostrano chiaramente che nel periodo invernale la colonna di fluido è a temperatura costante e quindi si ha assenza di stratificazione termica. Per contro, nel periodo estivo, ed in particolare nel mese di luglio, la baia di Muggia è caratterizzata dalla presenza di una rilevante stratificazione termica. Da notare che, mentre un evento di Bora durante la stagione estiva procura un sensibile raffreddamento (sino a 4°C) dello strato superficiale dovuto al mescolamento verticale prodotto dal vento, con conseguente risalita di acqua dagli strati di fondo più freddi, un evento di Libeccio ha un effetto molto meno importante nei riguardi della distruzione del termoclino. In figura 5 sono rappresentati i due profili verticali di temperatura tipici nelle acque del golfo di Trieste, nel caso invernale (linea blu con simboli pieni) e in quello estivo (linea rossa con simboli vuoti)

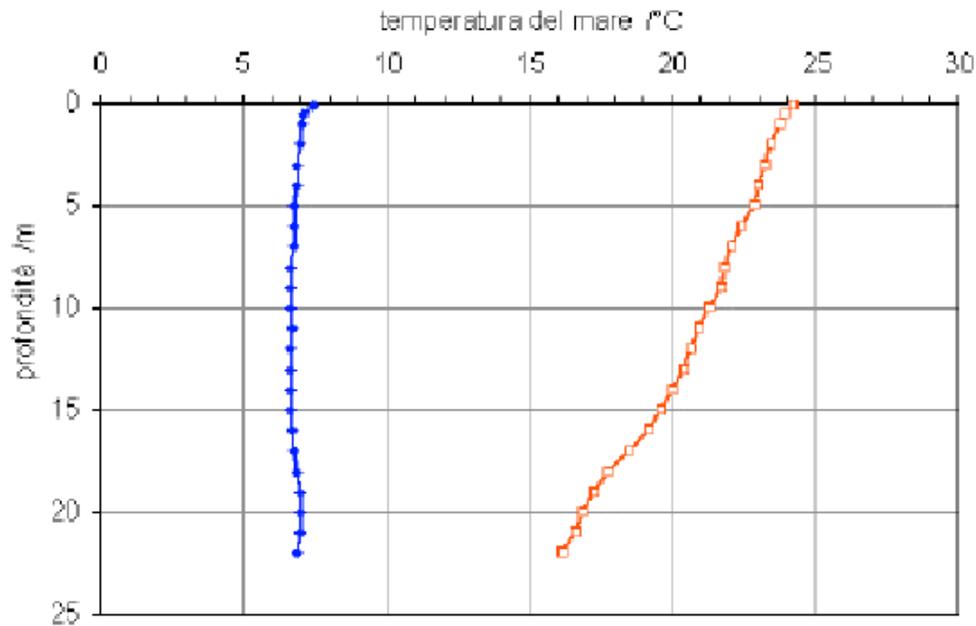


Figura 5: Profilo verticale della temperatura del mare nel Golfo di Trieste in febbraio (linea blu con simboli pieni) ed in luglio (linea rossa con simboli vuoti) (dati da [5,6]).

Per sintetizzare, i dati di letteratura mostrano che:

- all'interno della baia di Muggia, il mescolamento delle acque è principalmente associato ai regimi di venti presenti nella zona ed in maniera trascurabile ai regimi di correnti e maree associati alle dinamiche della parte del golfo di Trieste esterna alle dighe;
- i venti provenienti dai quadranti orientali hanno una elevata probabilità di accadimento ed intensità maggiore rispetto ai venti provenienti dai quadranti occidentali;
- le caratteristiche di temperatura ed intensità dei venti provenienti dai quadranti orientali è tale da provocare un forte mescolamento degli strati superficiali e quindi a smorzare considerevolmente l'incremento di temperatura associato alla presenza del getto termico. Al contrario, il vento proveniente da SW (Libeccio), nonostante abbia una probabilità di accadimento molto bassa, date le proprie caratteristiche intrinseche di intensità e temperatura e data l'orografia dell'area ed il sito di insediamento della centrale termica, potrebbe produrre un accumulo di acqua calda nella parte nord-orientale della baia, nella zona di Zaule;
- la presenza dei due corsi d'acqua, che insistono sull'area di Zaule, mitiga l'effetto di riscaldamento degli strati d'acqua superficiali dovuto alla risalita del getto termico;
- La presenza della marea astronomica tende da una parte a produrre una oscillazione della massa d'acqua nella baia e dall'altra a sviluppare uno strato limite sul fondale marino. Tali effetti contribuiscono alla diluzione del getto termico.

Le conclusioni riportate in questa sezione sono state utilizzate nel presente studio per selezionare una serie di condizioni e scenari che risultino i più gravosi possibili nei riguardi dell'impatto del getto termico sull'ambiente circostante.

2. CARATTERISTICHE DI EMISSIONE DEL GETTO TERMICO

Scopo principale dello studio è stato quello di verificare la compatibilità del possibile utilizzo dell'acqua di mare per il raffreddamento dell'impianto con i limiti imposti dalla normativa di settore. In tal senso i dati base di progetto per lo sviluppo dello studio hanno previsto la definizione di alcuni "punti chiave", nell'ottica della minimizzazione dell'impatto ambientale dell'opera, ovvero della massima economia nell'utilizzo delle risorse e, più in generale, di una razionalizzazione delle infrastrutture da realizzare in ambito portuale:

- ri-utilizzo dell'acqua di mare, già trattata e raffreddata di circa 4°C, eventualmente resa disponibile dalla possibile presenza del terminale di rigassificazione, con la stessa portata massima prevista (32,000 m³/h);
- utilizzo delle infrastrutture di presa e scarico dell'acqua di mare già asservite a tale impianto, nella medesima configurazione da questo adottata e con le medesime caratteristiche dimensionali.

Tale razionalizzazione permette:

- di minimizzare il numero di opere di presa e restituzione da costruire nel sito;
- di minimizzare la quantità di cloro da immettere nei circuiti di raffreddamento (per la centrale) e riscaldamento (per il rigassificatore);
- di minimizzare i salti termici in corrispondenza della sezione di restituzione.

Per il funzionamento della sezione di raffreddamento dell'impianto con acqua di mare, i calcoli di progetto, tenuto conto dei limiti imposti dalla normativa vigente, hanno identificato l'intervallo ottimale di variabilità del binomio portata/salto termico:

- a) portata pari a 25,500 m³/h e salto termico pari a 8°C;
- b) portata pari a 34,000 m³/h e salto termico pari a 6°C.

Pertanto lo studio è stato sviluppato a partire dal confronto dei due casi limite a) e b) sopra menzionati, identificando, nel confronto diretto degli scenari da essi individuati, il caso più

conservativo in termini di impatto ambientale, ovvero di impatto sulle acque della baia di Muggia, ed applicando a questo i successivi scenari di simulazione correlati alle condizioni meteorologiche di riferimento, anch'esse scelte sulla base di un criterio di conservatività piuttosto che di rappresentatività.

In altre parole lo studio è stato sviluppato attraverso l'analisi di scenari operativi susseguenti, individuati selezionando di volta in volta quello più conservativo in termini di impatto sulle acque, nell'ottica di una verifica delle condizioni di rilascio del getto termico rispettosa anche del principio di "precauzione" e comunque sviluppata con ampi margini di sicurezza in termini di risultati del modello di elaborazione. A tale proposito è utile sottolineare che la condizione di riferimento definita *stand-alone*, ovvero di funzionamento della sola centrale termoelettrica, rappresenta anch'essa uno scenario conservativo. Infatti la configurazione di progetto prescelta, fondata sul possibile riutilizzo dell'acqua di mare del rigassificatore e delle infrastrutture di presa e scarico della stessa, è logicamente correlata alle possibili sinergie/compensazioni ambientali realizzabili mediante l'interconnessione dei diversi impianti produttivi, anche in ragione delle specifiche caratteristiche dei singoli processi produttivi (raffreddamento dell'acqua di processo per il rigassificatore e, viceversa, riscaldamento per la centrale termoelettrica). A ciò va aggiunta la considerazione, non secondaria, del diverso profilo di funzionamento, che vedrebbe la centrale lavorare, in linea generale, un numero di ore all'anno sensibilmente inferiore a quello del terminale di rigassificazione (da 4,000 a 6,000 ore/anno vs. minimo 7,500 ore/anno) e dunque in condizioni di generale disponibilità dell'acqua utilizzata dall'impianto gnl Gas Natural.

La condizione a regime, poi, è riferibile ad uno scenario di interconnessione tra gli impianti nel quale si inserisce, per quanto noto dalla documentazione pubblicata nell'ambito della procedura di V.I.A. in corso per il terminale di rigassificazione, anche il termovalorizzatore esistente gestito da AcegasAps (figura 6) al quale si ipotizza, cautelativamente ai fini delle valutazioni in questione, essere destinata una quota parte della portata di acqua di mare (4,000 m³/h) già utilizzata dal terminale gnl [7], portata che subirebbe un salto termico di +8°C nella sezione di restituzione dell'impianto di raffreddamento del termovalorizzatore.

La configurazione di progetto della sezione di raffreddamento della centrale, ottenuta come differenza tra la massima disponibile (32,000 m³/h) e quella destinata al termovalorizzatore (4,000 m³/h) si colloca, opportunamente, all'interno dell'intervallo indicato in precedenza e, pertanto, garantisce ampi margini di sicurezza nelle valutazioni dei risultati dei casi limite analizzati.

Per completezza di informazione ed anche allo scopo di illustrare i possibili benefici di un sistema di interconnessione tra i diversi siti produttivi come quello sopra descritto, lo studio ha infine sviluppato un'analisi dello scenario a regime, ovvero con una piena interconnessione tra i circuiti di processo. Questo nell'assunto che la restituzione del flusso di acqua di mare utilizzata sia

realizzata a valle di un processo di mescolamento in apposite vasche e, dunque, in un'unica soluzione con portata pari, naturalmente, a quella massima prelevata (32,000 m³/h) e salto termico pari alla temperatura di mescolamento finale (3.4°C), anche in tal caso nelle condizioni meteorologiche ritenute più conservative dal punto di vista dell'impatto ambientale.

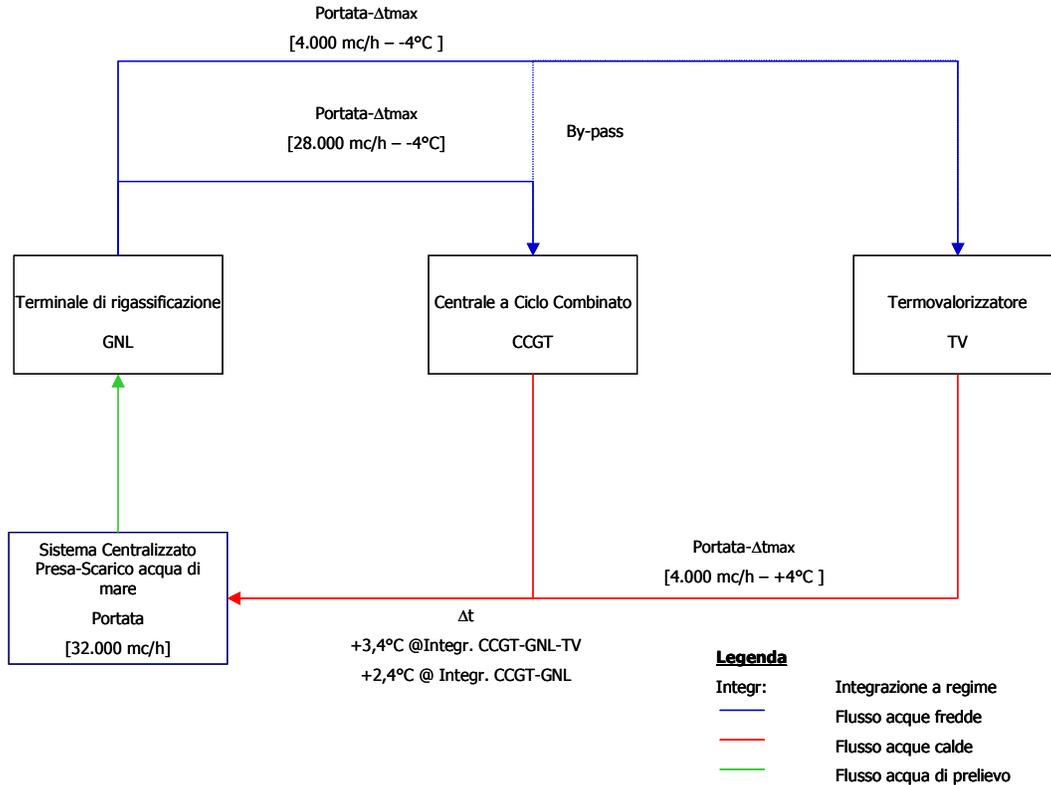


Figura 6: Schema indicativo della possibile interconnessione a regime tra i diversi impianti industriali (esistenti e attesi) nell'area del porto industriale di Trieste.

3. IL MODELLO MATEMATICO

Le simulazioni numeriche sono state effettuate con il modello numerico LES-COAST.

Tale modello rappresenta lo stato dell'arte nell'ambito dello studio di fenomeni di mescolamento per problemi costieri ed è stato sviluppato recentemente nell'ambito di un progetto di collaborazione tra il gruppo di ricerca IE-Fluids (DICA, Università di Trieste) ed il Dipartimento Tutela Acque Interne e Marine dell'ISPRA (ex APAT).

Il modello risolve le equazioni tridimensionali e non stazionarie del moto, del calore e delle concentrazioni disciolte di un flusso di Boussinesq utilizzando una formulazione curvilinea delle equazioni stesse [8]. Le complessità geometriche, come la batimetria, la linea di costa, le opere antropiche, sono gestite in maniera accurata ed efficiente per mezzo di un uso combinato di coordinate curvilinee ed inserimento di contorni immersi, modellati attraverso la 'Immersed

Boundaries Methodology' (IBM) [9]. Il mescolamento turbolento di quantità di moto, temperatura e concentrazione di specie dissolte è modellato mediante la tecnica Large-Eddy Simulation (LES). Nelle simulazioni LES, le scale grandi del moto, energetiche ed anisotrope sono riprodotte direttamente mediante una simulazione non-stazionaria e tridimensionale, mentre le scale del moto al di sotto dell'intervallo di griglia utilizzato sono parametrizzate attraverso un modello di sottogriglia.

Date le caratteristiche fortemente anisotrope dei problemi costieri, caratterizzati tipicamente da lunghezze scala orizzontali di un paio di ordini di grandezza maggiori della lunghezza scala verticale, il modello LES-COAST fa uso di un modello di sottogriglia a due viscosità, una per la direzione orizzontale ed una per la direzione verticale. Le due viscosità turbolente sono calcolate utilizzando la formulazione di Smagorinsky.

Il modello numerico è stato ampiamente validato ed utilizzato per lo studio della dinamica di efflusso del fiume Tevere, per lo studio della dinamica delle acque nella baia di Muggia e per attività di consulenza riguardo allo studio dell'evoluzione del getto termico di acque di raffreddamento della centrale a ciclo combinato CET-Servola. Una descrizione del modello ed esempi di applicazione sono riportati in [10].

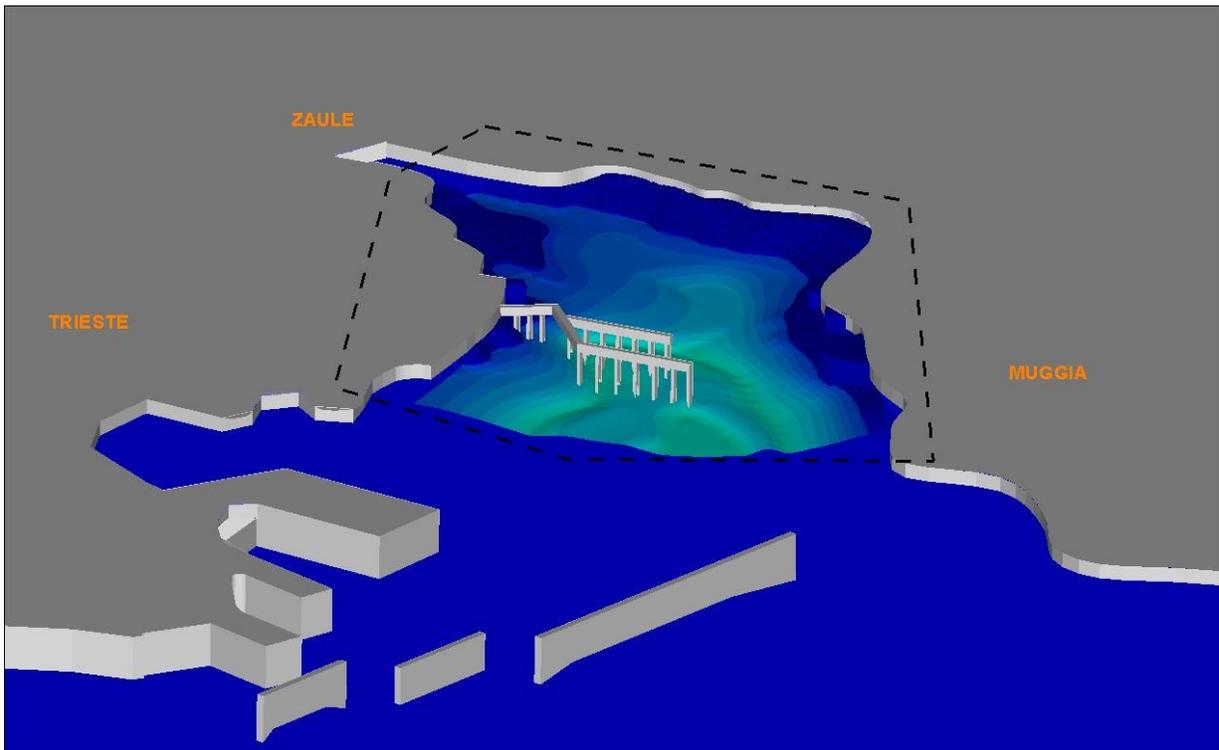


Figura 7: Vista tridimensionale della riproduzione dei contorni del bacino della baia di Muggia. Le simulazioni numeriche sono state effettuate sul dominio contenuto all'interno del perimetro tratteggiato. Si noti che ai fini della simulazione numerica non sono stati considerati i pontili della Siot, in quanto appoggiati su pile che non modificano le caratteristiche di circolazione nella baia.

4. DESCRIZIONE DELLE SIMULAZIONI NUMERICHE ED ANALISI RISULTATI

In questa sezione vengono riportati i risultati delle simulazioni numeriche. La discussione segue il percorso logico/operativo utilizzato nello studio, considerando dapprima differenti configurazioni possibili, e quindi, scelta la più conservativa tra queste, proseguendo con scenari e condizioni operative successive. Questo modo di procedere ha permesso di selezionare di volta in volta le condizioni più gravose nei riguardi dell'impatto del getto termico in mare.

In tutte le simulazioni numeriche le portate di ingresso/uscita in corrispondenza delle due sezioni presa/restituzione sono state discretizzate mediante il posizionamento di un numero sufficiente di punti griglia in corrispondenza delle due sezioni, al fine di ottenere caratteristiche idrodinamiche realistiche sia del getto in corrispondenza della sezione di restituzione che della corrente in ingresso alla presa.

In tutte le simulazioni numeriche non è stata considerata la diffusione del cloro aggiunto nell'acqua di processo come elemento biocida. La dinamica del cloro verrebbe modellata considerando una ulteriore equazione di advezione-diffusione per uno scalare passivo (concentrazione del cloro stesso) nel modello numerico LES-COAST. La diffusione del cloro non è stata studiata, in quanto la base di partenza del presente studio è l'utilizzo dell'acqua di processo prevista dall'impianto di rigassificazione Gas Natural, non è quindi prevista una ulteriore immissione di cloro nelle acque del bacino. Lo studio della diffusione del cloro effettuato in [1] mostra che la massima concentrazione registrata nella baia è di circa 10 volte inferiore al valore massimo prescritto dalla normativa. Nelle condizioni del presente studio, il getto termico di acqua calda risale in superficie e si distribuisce rapidamente in corrispondenza degli strati superficiali (come sarà mostrato in dettaglio nel seguito), con un tasso di dispersione più elevato di quello del getto di acqua fredda studiato in [1]. Ne segue che le concentrazioni di cloro massime sono attese essere dello stesso ordine di grandezza, o anche inferiori, rispetto a quelle ottenute in [1].

E' stata considerata una sezione di presa posizionata come nel progetto dell'impianto Gas-Natural (coordinate U.T.M.- 33: 405.625 E, 5,051.662 N). La sezione è stata considerata con una geometria rettangolare equivalente, di lunghezza pari a 10,5 metri e di altezza pari a 1 metro, con il lato superiore posto ad una profondità di 0.5 metri dal l.m.m. ed il lato inferiore posto ad una profondità di 1.5 metri dal l.m.m. Da notare che, ai fini della idrodinamica del richiamo di acqua alla presa, non è determinante la forma della sezione, quanto la velocità media del flusso in ingresso e il posizionamento verticale della sezione stessa.

La sezione di restituzione (emissione) dell'acqua di processo è stata posta in corrispondenza di quella di progetto dell'impianto di rigassificazione Gas-Natural, (coordinate U.T.M. – 33: 405.200 E,



5,051.317 N) ad una distanza di circa 500 metri dalla parte della costa dove si prevede l'insediamento sia della Centrale Termica che dell'impianto di rigassificazione Gas Natural. La sezione di emissione è stata posta ad una profondità di circa 12 metri, basata sulle carte batimetriche disponibili per la zona (rese disponibili dall'Autorità Portuale di Trieste). Sulla base delle carte utilizzate, la sezione è stata posta ad una profondità inferiore rispetto a quanto fatto nello studio [1]. Comunque è importante sottolineare che:

- nei riguardi della dinamica di un getto di acqua a temperatura superiore rispetto a quella del bacino ricevente, la distribuzione spaziale delle linee batimetriche del fondale riveste una importanza secondaria, in quanto il getto tende a risalire rapidamente e la sua dinamica è governata dalle differenze di temperatura rispetto alle acque del bacino ricevente e dalla circolazione all'interno della colonna d'acqua e degli strati superficiali;
- il considerare una profondità inferiore rispetto a quella prevista nel progetto permette di operare in condizioni conservative. Infatti una maggiore profondità di emissione del getto termico permette una maggiore diluizione del getto stesso e, in conseguenza, una temperatura inferiore in corrispondenza della superficie marina. In altre parole una minore profondità di emissione comporta una maggiore portata termica in corrispondenza della superficie libera del mare.

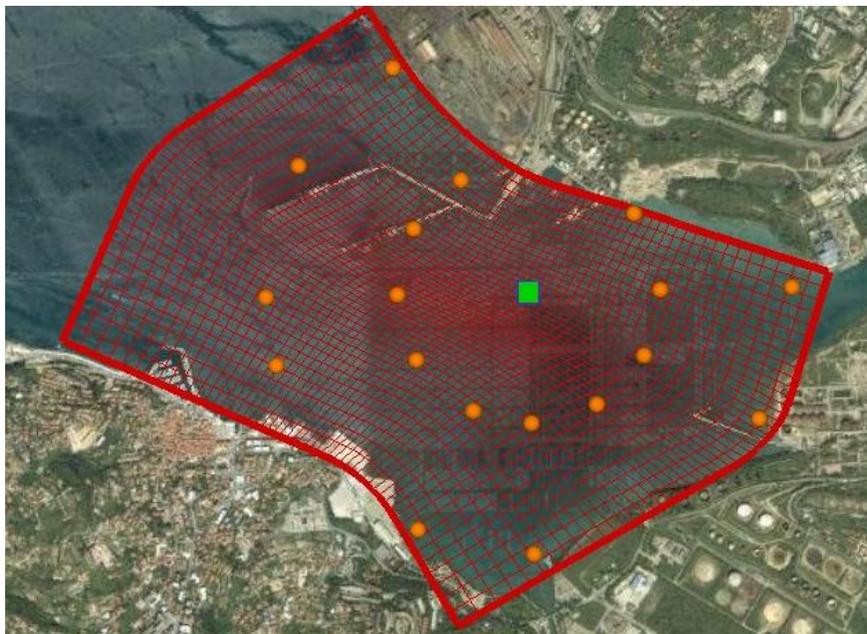


Figura 8: Immagine satellitare della Baia di Muggia (da google map). Il piano della griglia di calcolo in corrispondenza della superficie marina e dettagli della griglia stessa per la simulazione idrodinamica sono riportati con linee rosse. Per chiarezza di visualizzazione è riportato un sottoinsieme delle linee di griglia. Il quadrato verde denota la posizione della sezione di emissione. I punti di colore arancione indicano il posizionamento delle sonde numeriche (ad un raggio di 500 metri ed un raggio di 1000 metri rispettivamente) alle quali è stato registrato l'andamento temporale del sovrizzo termico.

4.1 Caso 1: analisi delle caratteristiche di dispersione del getto termico con differenti valori di temperatura e portata volumetrica: condizione invernale e assenza di vento

Le prime simulazioni numeriche sono state effettuate considerando, a parità di flusso termico (pari a 204,000 °C m³/h) le due condizioni estreme di funzionamento, rispettivamente una portata pari a 25,500 m³/h e salto termico pari a 8°C ed una portata pari a 34,000 m³/h e salto termico pari a 6°C. Per tali condizioni sono state effettuate simulazioni numeriche considerando il seguente scenario:

- condizione invernale, consistente in temperatura dell'acqua costante all'interno del bacino;
- assenza di portate di acqua dolce dai torrenti Rosandra e Rio Ospio. Come discusso in precedenza le portate dei due corsi d'acqua, per quanto di entità ridotte, tendono a mitigare l'effetto di riscaldamento superficiale delle acque;
- assenza di vento. In queste condizioni è assente il mescolamento superficiale indotto dalla turbolenza e quindi drasticamente ridotti i fenomeni di mitigazione e redistribuzione dell'incremento di temperatura lungo la verticale;
- forzante fornita dalla forza di Coriolis, la quale, su una evoluzione del getto dell'ordine della decina di ore, tende a trasportare all'interno della baia il campo di temperatura;
- condizione di funzionamento *stand-alone*, consistente in una fuoriuscita dell'intera portata termica necessaria a raffreddare la centrale a ciclo combinato, senza considerare l'eventuale riduzione di temperatura di emissione associata al funzionamento del rigassificatore.

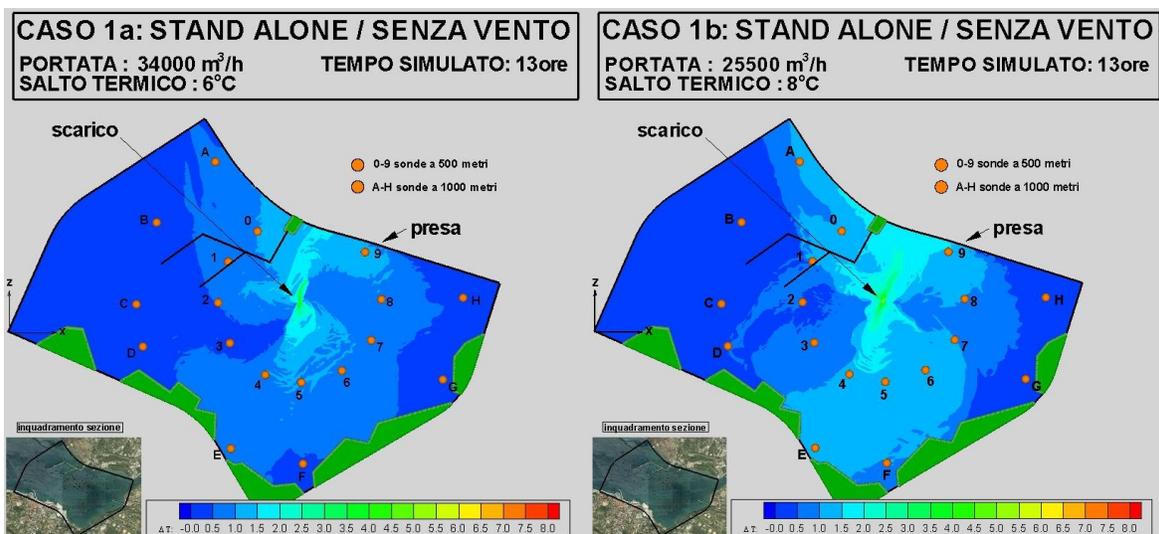


Figura 9: Mappa della temperatura istantanea superficiale ad un tempo di 13 ore dall'emissione. Condizione invernale, assenza di vento: a) pannello di sinistra, caso $\Delta T=6^{\circ}\text{C}$; b) pannello di destra, caso $\Delta T=8^{\circ}\text{C}$.

Le simulazioni sono state effettuate considerando il dominio tridimensionale compreso nell'area tratteggiata di figura 7. In figura 8 si riporta una sezione orizzontale e si mostra l'area della baia considerata nella simulazione. Si può osservare che non è stata considerata la presenza del canale navigabile in quanto il suo apporto è stato considerato trascurabile nella dinamica del getto termico all'interno della baia. La bontà di tale scelta è stata verificata a posteriori, mediante il monitoraggio dell'andamento nel tempo della temperatura nella zona del bacino antistante il canale.

Sono state considerate un totale di 3,317,760 celle di calcolo, con 432 celle nella direzione NW-SE, 384 celle nella direzione SW-NE e 20 celle nella direzione verticale. Il sistema di riferimento ha l'asse x in direzione W-E, l'asse z in direzione S-N e l'asse y verticale verso l'alto. L'origine del sistema di riferimento è posta nel vertice posto più a sinistra nel dominio di calcolo (figura 8) sul fondo del bacino. La spaziatura delle celle di calcolo in direzione NW-SE è compresa nell'intervallo di valori 4.4 – 8.5 metri, nella direzione SW-NE nell'intervallo 2.6 – 9.4 metri e nella direzione verticale nell'intervallo 0.40 – 0.90 metri.

Riguardo alla forza di Coriolis, sono state considerate sia la componente verticale, che la componente orizzontale (effetto della latitudine), quest'ultima nota in letteratura per essere responsabile di mescolamento verticale in campi di moto sostanzialmente tridimensionali [11, 12].

Queste prime simulazioni sono state eseguite per un tempo pari a 13 ore a partire dall'emissione. L'analisi del sovrizzo di temperatura alle sonde mostra che tale tempo non è sufficiente per il raggiungimento di una condizione asintotica stazionaria, condizione alla quale la circolazione ha raggiunto uno stato di regime e non si producono ulteriori incrementi di temperatura. Comunque, tale tempo è stato stimato essere sufficiente per una analisi comparativa tra le due condizioni di emissione, per quantificare quale delle due risulti più gravosa ai fini dell'impatto del getto sulla temperatura dell'acqua nel bacino idrico. Una volta effettuata tale stima, la simulazione relativa alla condizione più gravosa è stata portata avanti nel tempo fino al raggiungimento di condizioni stazionarie.

Le figure 9a e 9b riportano una vista istantanea della distribuzione spaziale della temperatura in corrispondenza della superficie libera del bacino nei due casi considerati. Figura 9 (così come figura 8) riporta (in arancio) le posizioni di sonde numeriche di temperatura poste rispettivamente a distanza di 500 e 1000 metri dal punto di emissione. Le sonde misurano il sovrizzo termico rispetto alla temperatura iniziale del bacino.

Da notare che le caratteristiche di galleggiamento del getto sono tali che, in ogni caso, i valori massimi di temperatura ad una certa distanza dal getto, sono registrati in corrispondenza della superficie libera del bacino stesso.

Si osserva che una volta risalito in superficie, in entrambi i casi il getto tende a diffondersi seguendo un percorso traslatorio-rotatorio a causa della forza di Coriolis e a disperdere rapidamente il proprio carico termico lungo le direzioni orizzontali.

Figura 9 mostra anche che la distribuzione di temperatura superficiale non esibisce una simmetria assiale in corrispondenza della superficie marina e che il getto appare trasportato lungo due chiazze separate, una che si propaga verso N ed una, opposta che si propaga verso S. Una analisi dettagliata del campo di moto (non riportata nella presente relazione ma disponibile su richiesta) ha mostrato che questo fenomeno è dovuto al regime di circolazione nella zona a NNE della baia che si forma da una parte a causa della corrente di ingresso alla sezione di presa, che tende a richiamare acqua dagli strati a profondità intermedia del bacino, e dall'altra a causa del getto emesso alla sezione di scarico. Tale circolazione di acqua crea un vortice ad asse verticale di larga scala e di debole intensità in corrispondenza della zona dove sono posizionate le sonde 7 e 8, vortice che inibisce il trasporto della chiazza verso la zona del canale navigabile.

L'andamento temporale dell'incremento di temperatura registrato dalle sonde è riportato nelle figure 10 e 11 rispettivamente per il caso $\Delta T=6^\circ\text{C}$ e per il caso $\Delta T=8^\circ\text{C}$.

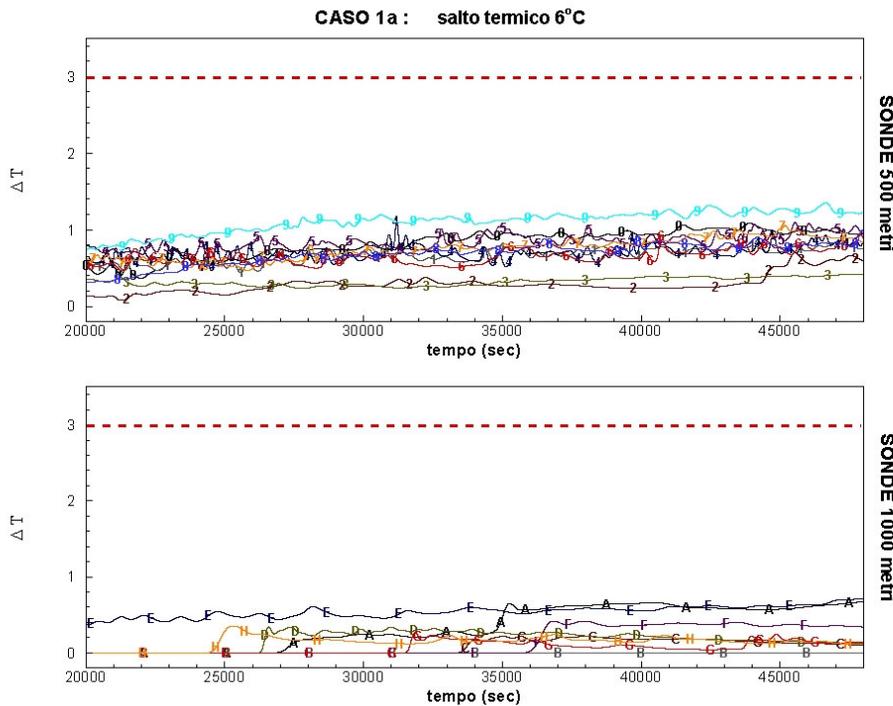


Figura 10: Andamento dell'incremento di temperatura registrato dalla sonde numeriche durante 13 ore di evoluzione temporale del getto: pannello superiore, sonde a 500 metri dall'emissione; pannello inferiore, sonde a 1000 metri di distanza. Caso $\Delta T=6^\circ\text{C}$, condizione invernale, assenza di vento. I grafici riportano in linea tratteggiata rossa il limite di normativa pari a 3°C a 1000 metri di sovrizzo termico.

Si osserva che i valori registrati sono in ogni caso ben inferiori a 3°C a 1000 metri prescritti dalla normativa. In particolare si osserva che già a 500 metri dal punto di emissione il sovrizzo termico è notevolmente inferiore a 3°C. L'andamento dell'incremento di temperatura alle sonde mostra che il caso $\Delta T=8^\circ\text{C}$ risulta lievemente più impegnativo rispetto al caso $\Delta T=6^\circ\text{C}$, nei riguardi del trasporto orizzontale di temperatura.

A partire dai risultati ottenuti a questa fase si è deciso di focalizzare l'attenzione sul caso $\Delta T=8^\circ\text{C}$ in quanto lievemente più gravoso rispetto all'altro caso e quindi di continuare tale simulazione fino al raggiungimento di un tempo di emissione pari a 24 ore, alla quale sono state osservate condizioni stazionarie dei campi di temperatura.

In figura 12 è riportata, ad un tempo di emissione pari a 24 ore, una vista istantanea della distribuzione di temperatura sulla superficie marina. Si osserva una dinamica simile a quanto mostrato precedentemente al tempo di emissione di 13 ore (figura 9b), cioè che gli incrementi di temperatura, così come i gradienti termici, risultano fortemente ridotti già a breve distanza (entro i primi 500 metri) dal punto corrispondente alla sezione di emissione.

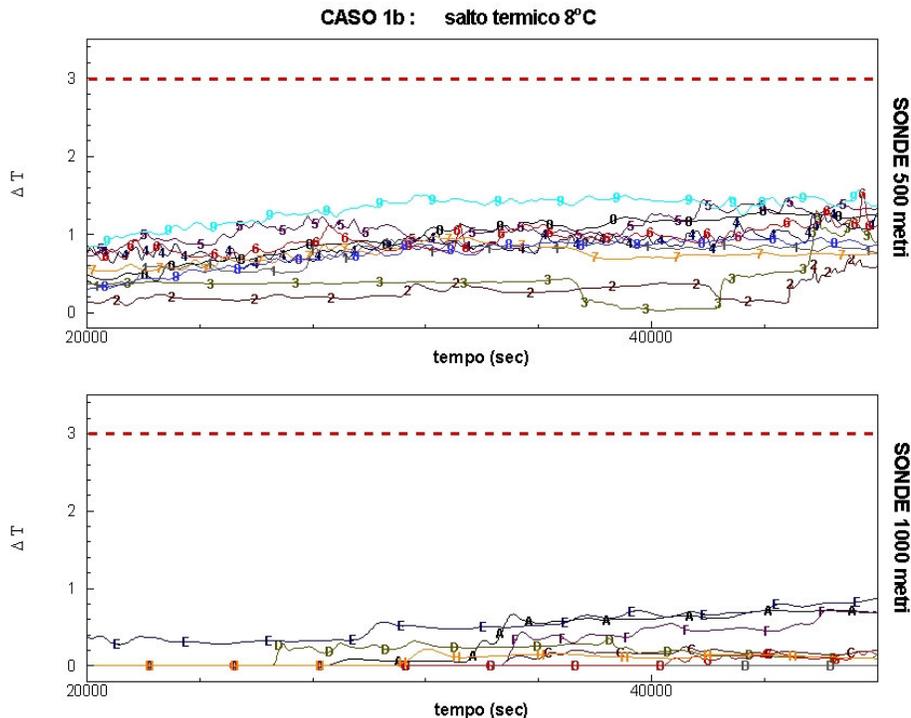


Figura 11: Andamento dell'incremento di temperatura registrato dalle sonde numeriche durante 13 ore di evoluzione temporale del getto: pannello superiore, sonde a 500 metri dall'emissione; pannello inferiore, sonde a 1000 metri dall'emissione. Caso $\Delta T=8^\circ\text{C}$, condizione invernale, assenza di vento. I grafici riportano in linea tratteggiata rossa il limite di normativa pari a 3°C a 1000 metri di sovrizzo termico.

Figura 13 riporta il sovrizzo termico in corrispondenza di una sezione curvilinea verticale passante per il centro della sezione di emissione (linea rossa del pannello in alto a destra della figura). La figura mostra chiaramente la dinamica del getto termico. In particolare, esso risale rapidamente mantenendo gran parte del carico termico fino alla superficie libera. Una volta raggiunta la superficie, il getto termico, durante la propria evoluzione orizzontale, si mantiene confinato nei primi metri al di sotto della superficie ed evolve generando onde interne di gravità [13]. Tali onde si generano tra strati di fluido a densità diversa quando un fluido più leggero (per esempio acqua calda) si trova su un fluido più pesante (per esempio acqua fredda). E' noto che le onde interne sono in grado di trasferire energia cinetica e quantità di moto lungo la colonna di fluido, ma non trasferiscono massa e temperatura. Tale dinamica è tipica di condizioni di stratificazione stabile, condizione che si manifesta in questo caso a causa della distribuzione superficiale di uno strato di acqua a temperatura superiore rispetto all'acqua degli strati più profondi.

Figura 14 mostra i profili verticali del sovrizzo termico in corrispondenza delle sonde ad un tempo pari a 24 ore dall'inizio dell'emissione. Si osserva che la temperatura del bacino è influenzata dalla presenza del getto termico nei primi 5 metri di profondità. A 500 metri dalla sezione di emissione l'incremento massimo di temperatura registrato è di circa 1.8°C in corrispondenza della superficie e tale incremento decresce rapidamente già ad un metro di profondità. A 1000 metri dall'emissione il salto termico appare ridotto, con valori massimi dell'ordine di 1.2°C. In corrispondenza della sonda E, posta nella zona SSE della baia, si osserva un approfondimento dello strato termico. Tale fenomeno è dovuto al downwelling provocato dalla corrente superficiale che impatta sulla linea di costa. Tale approfondimento rimane comunque limitato entro i primi 5 metri di profondità.

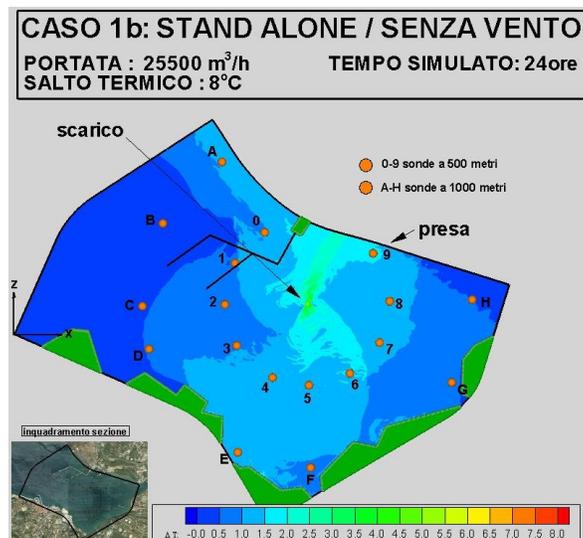


Figura 12: Distribuzione spaziale istantanea del sovrizzo termico in corrispondenza della superficie libera del mare a 24 ore dall'inizio dell'emissione. Caso $\Delta T=8^{\circ}\text{C}$, condizione invernale, assenza di vento.

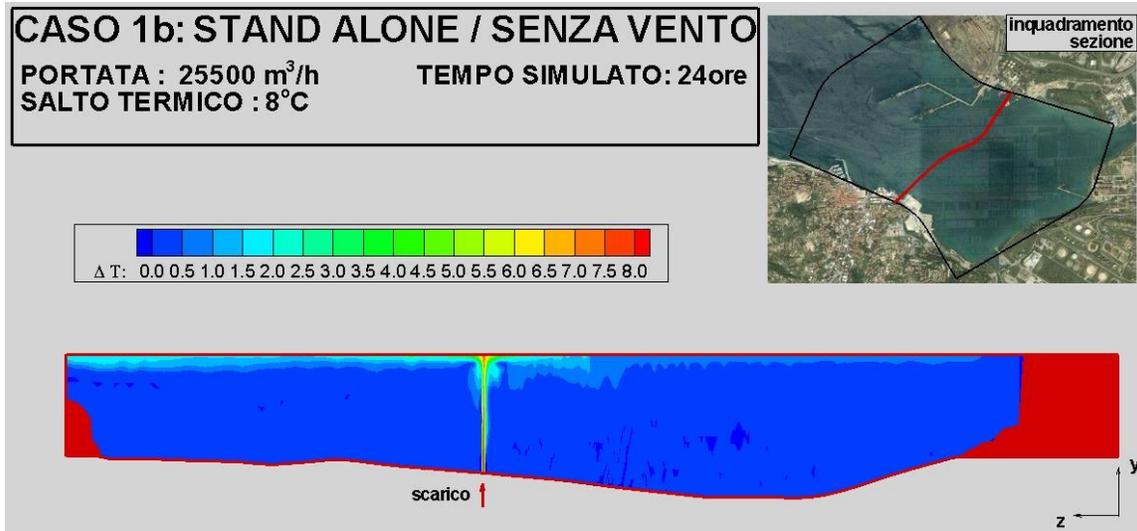


Figura 13: Distribuzione spaziale istantanea del sovrizzo termico su una sezione verticale passante per il centro della sezione di emissione ed evidenziata dalla linea rossa del pannello in alto a destra. Tempo pari 24 ore dall'inizio dell'emissione. Caso $\Delta T=8^{\circ}\text{C}$, condizione invernale, assenza di vento.

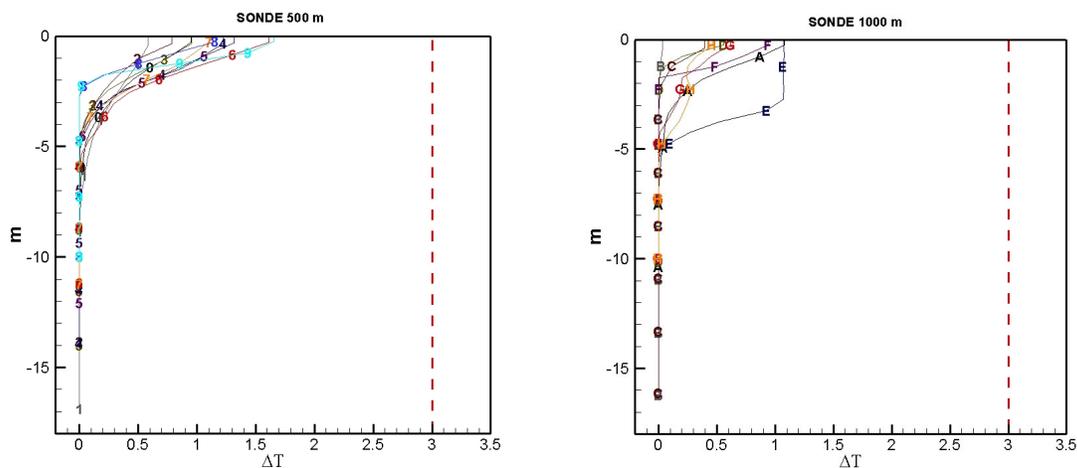


Figura 14: Profili verticali istantanei del salto termico in corrispondenza delle sonde al tempo $t=24\text{h}$. Caso $\Delta T=8^{\circ}\text{C}$, condizione invernale, assenza di vento.

L'andamento temporale dell'incremento di temperatura alle sonde, per un tempo di evoluzione pari a 24 ore è riportato in figura 15. Si osserva che sia a 1000 metri di distanza dal getto che già a 500 metri, l'aumento di temperatura nel bacino, in superficie, è ben inferiore al valore limite di 3 gradi a 1000 metri prescritto dalla normativa.

L'evoluzione spazio-temporale del getto è mostrata in dettaglio in due film riportati in allegato alla presente relazione tecnica. Il film TEMPERATURA_SURF_8_INV_NOVENTO.avi riporta l'evoluzione dell'incremento di temperatura in superficie, mentre il film

TEMPERATURA_VERT_8_INV_NOVENTO.avi riporta l'evoluzione dell'incremento di temperatura in corrispondenza di una sezione verticale passante per il centro della sezione di emissione (figura 13).

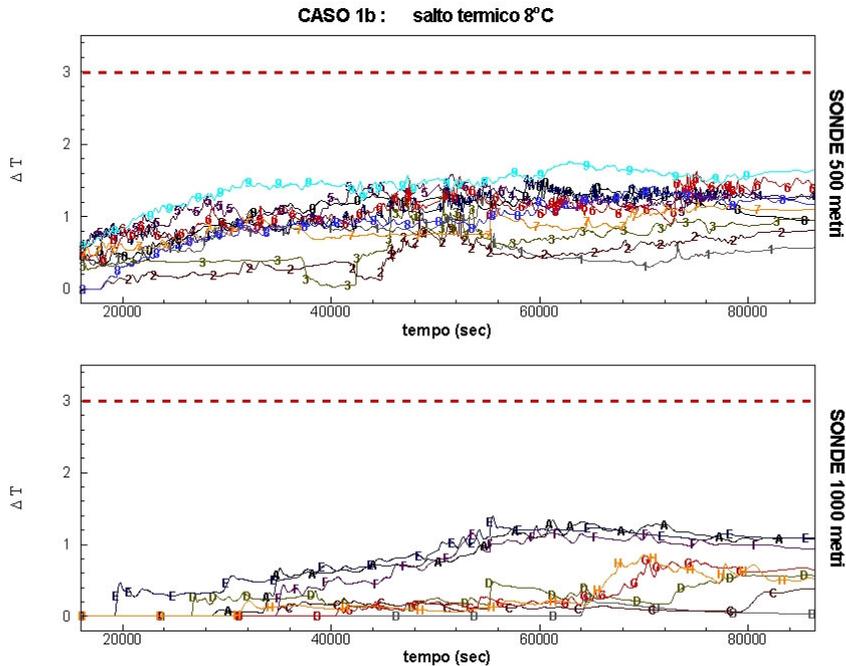


Figura 15: Andamento dell'incremento di temperatura registrato dalle sonde numeriche durante l'evoluzione temporale del getto in 24 ore: pannello superiore, sonde a 500 metri dall'emissione; pannello inferiore, sonde a 1000 metri dall'emissione. Caso $\Delta T=8^{\circ}\text{C}$, condizione invernale, assenza di vento. I grafici riportano in linea tratteggiata rossa il limite di normativa pari a 3°C a 1000 metri di sovrizzo termico.

Riassumendo, i risultati mostrano che per le condizioni geometriche e idrodinamiche di emissione considerate nel presente paragrafo, nelle condizioni invernali (assenza di stratificazione termica nella colonna d'acqua) e in condizioni di calma di vento:

- a parità di portata termica, una condizione di emissione con un salto di temperatura pari a 8°C costituisce una condizione lievemente più gravosa rispetto al caso di salto termico pari a 6°C ;
- la dinamica del getto è tale che esso risale rapidamente in superficie e ivi tende a disperdere rapidamente il carico termico durante la propria evoluzione spaziale (principalmente lungo i piani orizzontali);
- la distribuzione del getto in corrispondenza della superficie non presenta una simmetria assiale, a causa del regime di correnti che si instaura nella parte nord orientale della baia;

- l'incremento massimo di temperatura registrato dalle sonde numeriche è pari a 1.8°C a 500 metri di distanza dalla sezione di emissione e non superiore a 1.2°C a 1000 metri dalla sezione di emissione;
- il sovrizzo termico rimane confinato nei primi metri al di sotto della superficie marina. L'effetto è praticamente assente ad una profondità superiore ai 5 metri;
- non si osservano significativi incrementi di temperatura dell'acqua in corrispondenza della sezione di ingresso del canale navigabile;

Da osservare che i risultati ottenuti in questa fase sono conservativi in quanto:

- 1) non è stato considerato l'apporto di acqua dolce dai torrenti Rio Osopo e Rosandra, apporto che tenderebbe a mitigare il sovrizzo termico in corrispondenza della superficie marina;
- 2) non è stato considerato l'effetto delle maree, le quali contribuiscono alla diluizione del getto termico;
- 3) i valori di salto termico considerati nel presente studio alla sezione di emissione sono stimati per eccesso, in quanto durante il trasferimento lungo i 500 metri di condotta, dalla linea di costa alla sezione di emissione, fenomeni di scambio termico, tenderebbero a disperdere parte del salto termico lungo la condotta prima dell'emissione;
- 4) le simulazioni non hanno considerato l'ulteriore raffreddamento delle acque superficiali dovute a fenomeni di scambio termico tra la superficie marina e l'atmosfera;
- 5) le simulazioni hanno considerato una profondità di emissione pari a 12 metri, come dalle carte batimetriche fornite dagli Uffici Tecnici dell'Autorità Portuale di Trieste. Nel caso in cui la sezione di emissione fosse posta ad una profondità superiore come riportato in [1], la maggiore profondità permetterebbe al getto termico di perdere ulteriore carico termico durante la risalita lungo la colonna d'acqua.

Sulla base dei risultati ottenuti a questa fase, lo studio è proseguito considerando un nuovo scenario nel quale si considera l'azione del vento sul trasporto di temperatura. La simulazione numerica ed i risultati sono descritti in dettaglio nel prossimo paragrafo.

4.2 Caso 2: analisi delle caratteristiche di dispersione del getto termico con salto termico $\Delta T=8^\circ\text{C}$: condizione invernale, vento da SW con velocità $U_{10}=5\text{ m/s}$

Come osservato nel paragrafo 1.2, i venti provenienti dai quadranti orientali, più probabili e più intensi di quelli provenienti dai quadranti occidentali, tendono a disperdere più facilmente la temperatura superficiale sia per le caratteristiche orografiche del sito che per fenomeni fluidodinamici di turbolenza meccanica e scambio termico superficiale. Tali effetti sono stati mostrati e quantificati in maniera rigorosa nello studio di un problema simile eseguito recentemente da IE-Fluids.

Questa simulazione viene effettuata considerando la condizione più gravosa tra quelle possibili nel caso di forzante fornita dall'azione del vento sulla superficie marina, condizione che consiste in una brezza proveniente da SW. Come osservato nel paragrafo 1.2, tale condizione ha una probabilità di accadimento molto bassa. Riguardo all'intensità del vento è stato scelto un valore di velocità rappresentativo dei regimi di brezza, pari a 5 m/s a 10 metri di altezza dal l.m.m. Questa forzante tenderà a trasportare il campo di temperatura superficiale verso terra nella zona di Zaule e quindi potrebbe provocare un accumulo di acqua a temperatura elevata in tale zona, in particolare in corrispondenza del sito di insediamento dell'impianto e del canale navigabile.

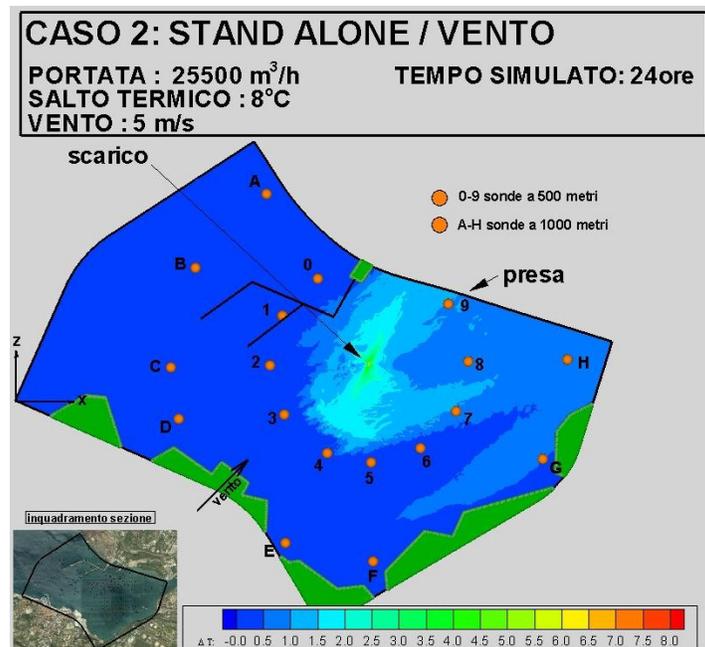


Figura 16: Distribuzione spaziale istantanea dell'incremento di temperatura in corrispondenza della superficie libera del mare a 24 ore dall'inizio dell'azione del vento. Caso $\Delta T=8^\circ\text{C}$, condizione invernale, vento da SW.

La simulazione è stata effettuata considerando la griglia di calcolo del caso precedente. Come condizione iniziale si è partiti dalla condizione di emissione dopo 15 ore del caso in assenza di vento per un salto di temperatura all'emissione pari a $\Delta T=8^{\circ}\text{C}$. Tale scelta è dovuta al fatto che già dopo 15 ore (54,000 s) il campo di moto è sufficientemente sviluppato, come si può osservare dall'analisi di figura 15. Comunque l'effetto del vento modifica sostanzialmente la dinamica del getto e quindi la simulazione è stata seguita per un tempo pari a 24 ore a partire dall'inizio dell'azione del vento stesso. Il tempo totale di simulazione, a partire dall'emissione, è stato pari a 39 ore.

Ai fini di effettuare lo studio in condizioni conservative, nella simulazione viene considerata l'azione meccanica fornita dallo sforzo tangenziale dovuto al vento sulla superficie del mare, mentre non si considerano i fenomeni di convezione forzata, cioè lo scambio termico superficiale con il connesso raffreddamento della superficie marina associata alla presenza del vento.

Figura 16 riporta la distribuzione spaziale dell'incremento di temperatura in corrispondenza della superficie marina all'istante finale della simulazione (24 ore a partire dall'azione del vento). Si osserva una forte asimmetria nella distribuzione di temperatura, dovuta al fatto che il vento tende a trasportare da SW verso NE le chiazze termiche superficiali. Le zone W e SW della baia risultano quindi praticamente non influenzate dalla presenza del getto termico, mentre le zone caratterizzate dalla presenza di sovrariscaldamento termico sono relegate nella parte E e NE della baia (a destra nella figura 16). Figura 16 mostra anche che la parte della baia nella quale si osserva un apprezzabile aumento di temperatura è limitato alla zona immediatamente adiacente al punto di emissione, contenuta entro i primi 300 metri di raggio. La figura mostra anche che gli incrementi di temperatura e i gradienti termici in corrispondenza dell'ingresso al canale navigabile risultano di scarsa entità.

Figura 17 riporta la distribuzione spaziale dell'incremento di temperatura al tempo $t=24\text{h}$ in corrispondenza di una sezione curvilinea verticale passante per il centro della sezione di emissione. La sezione è evidenziata dalla linea rossa nel pannello in alto a destra della figura 17. Si osserva chiaramente come, rispetto al caso precedente (si veda figura 13), l'azione del vento tende a indebolire il termoclino che si sviluppa al di sotto della superficie libera (cioè a ridurre i gradienti verticali di temperatura) e quindi a ridurre la temperatura delle acque in superficie. Da notare che nel caso reale c'è da aspettarsi una ulteriore riduzione di temperatura a causa dei fenomeni di scambio termico (convezione forzata) tra superficie marina e atmosfera, fenomeno non considerato nelle simulazioni numeriche.

In figura 18 sono riportati i profili verticali istantanei dell'incremento di temperatura in corrispondenza delle sonde al tempo di 24 ore.

Un confronto tra figura 14 e figura 18 mostra che l'azione del vento tende a ridurre l'incremento di temperatura alla superficie marina rispetto al caso in assenza di vento. A 500 metri dal punto di emissione, il massimo incremento di temperatura è di circa 1.3°C, di circa 0.5°C inferiore al caso senza vento e in corrispondenza della sonda 9 si osserva un fenomeno di downwelling, fenomeno che tende ad approfondire lo strato caratterizzato da incremento di temperatura uniformando il profilo stesso lungo la verticale. Tale uniformizzazione rende l'incremento di temperatura di entità molto modesta.

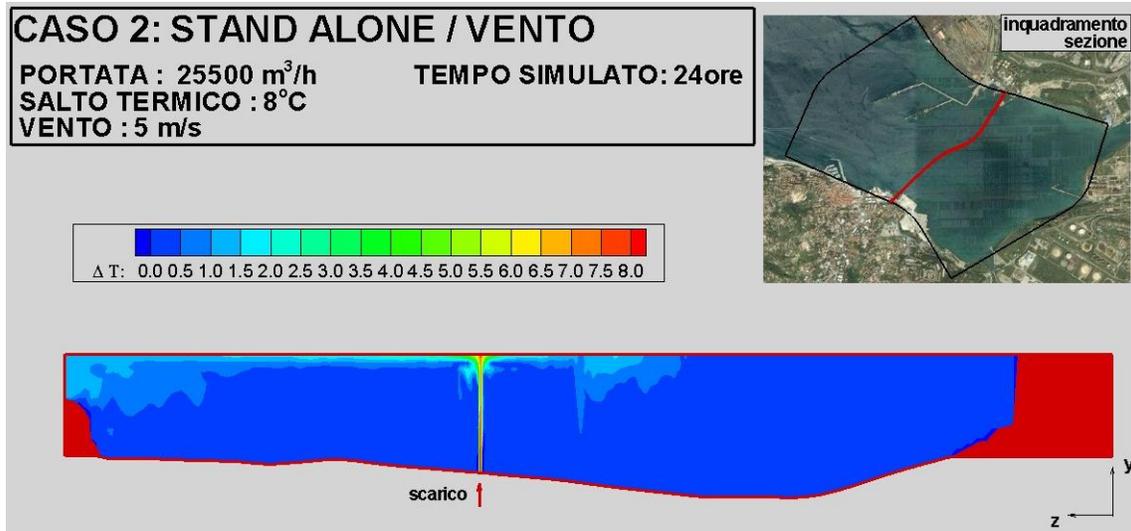


Figura 17: Distribuzione spaziale istantanea dell'incremento di temperatura in corrispondenza di una sezione verticale passante per il centro della sezione di emissione ed evidenziata dalla linea rossa del pannello in alto a destra. Tempo pari 24 ore dall'inizio dell'azione del vento.

Caso $\Delta T=8^\circ\text{C}$, condizione invernale, vento da SW.

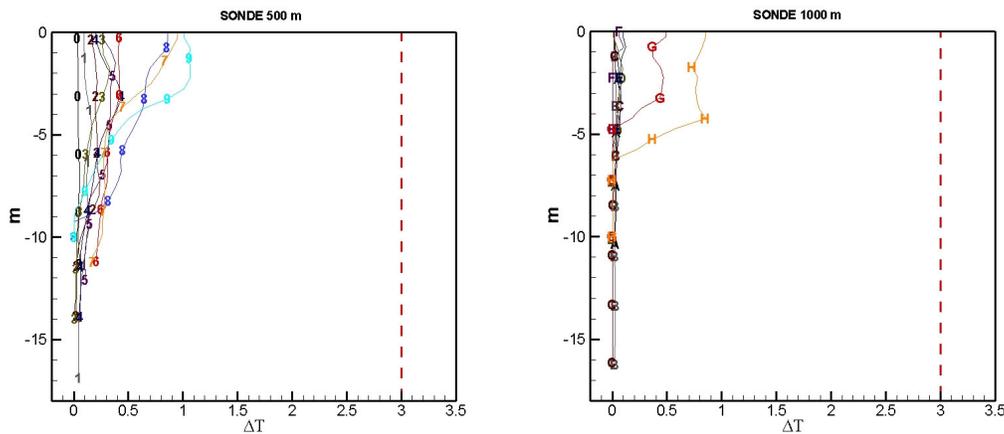


Figura 18: Profili verticali istantanei del salto termico in corrispondenza delle sonde al tempo $t=24\text{h}$. Caso $\Delta T=8^\circ\text{C}$, condizione invernale con vento da SW.

A 1000 metri dal punto di emissione si osserva un fenomeno di downwelling in corrispondenza della sonda H, nella zona a NE della Baia, a causa dell'azione combinata del vento e della linea di costa. Il fenomeno di downwelling porta il termoclino ad una profondità tra i 5 e i 6 metri in corrispondenza della sonda H, anche se il sovrizzo termico è inferiore 1°C. Alla sonda G si osserva un approfondimento dello strato termico a causa della corrente litoranea di ritorno osservabile in figura 16. A questa posizione il termoclino si trova ad una profondità di circa 4 metri con un incremento massimo di temperatura di circa 0.5°C. Nella parte W e SW della baia, le sonde non registrano valori apprezzabili di incremento di temperatura, dato che il trasporto orizzontale fornito dal vento ha spostato la chiazza termica verso NE.

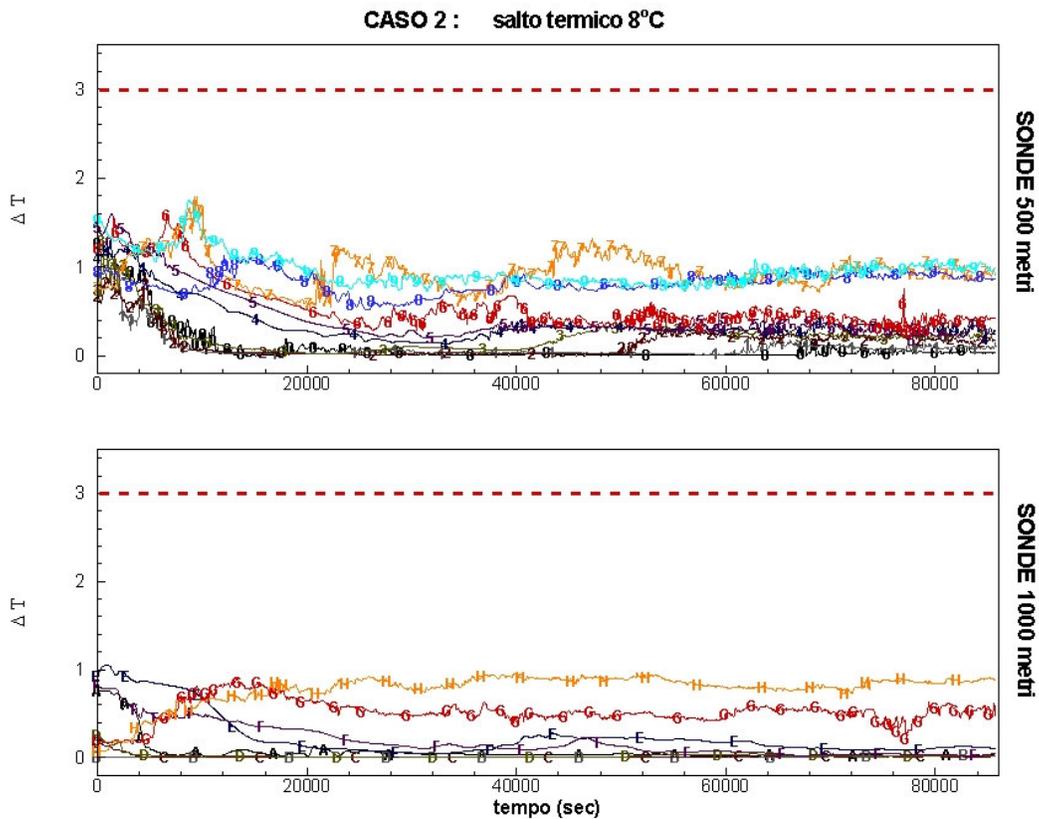


Figura 19: Andamento dell'incremento di temperatura registrato dalle sonde numeriche durante l'evoluzione temporale del getto in 24 ore: pannello superiore, sonde a 500 metri dall'emissione; pannello inferiore, sonde a 1000 metri dall'emissione. Caso $\Delta T=8$ gradi, condizione invernale, vento da SW. I grafici riportano in linea tratteggiata rossa il limite di normativa pari a 3°C a 1000 metri di sovrizzo termico.

L'andamento nel tempo dell'incremento di temperatura registrato alle sonde è riportato in figura 19. Riguardo alle sonde a 500 metri, si osserva una generale riduzione della temperatura superficiale rispetto al caso senza vento. Solamente in corrispondenza della sonda 7, posizionata sottovento rispetto al punto di emissione, si osserva un aumento di temperatura rispetto al caso senza vento, dovuto all'azione di trasporto delle chiazze termiche dovute al vento ed al fatto che alla distanza di

500 metri, alla posizione della sonda 7 è più importante il fenomeno di trasporto orizzontale rispetto a quello di mescolamento verticale del campo termico. D'altra parte, ad una distanza di 1000 metri, il mescolamento verticale è dominante rispetto al trasporto orizzontale e si osserva una generale riduzione del sovrizzo termico in corrispondenza di tutte le sonde.

L'evoluzione spazio-temporale del getto è mostrata in dettaglio in due film riportati in allegato alla presente relazione tecnica. Il film TEMPERATURA_SURF_8_INV_VENTO.avi riporta l'evoluzione del sovrizzo di temperatura in superficie, mentre il film TEMPERATURA_VERT_8_INV_VENTO.avi riporta l'evoluzione del sovrizzo di temperatura in corrispondenza di una sezione verticale passante per il centro della sezione di emissione (sezione di figura 17).

Riassumendo, i risultati mostrano che per le condizioni geometriche e idrodinamiche di emissione considerate nel presente paragrafo, nelle condizioni invernali (assenza di stratificazione termica nella colonna d'acqua) e nelle condizioni più gravose riguardo all'effetto del vento sul trasporto e mescolamento superficiale del campo di temperatura:

- l'incremento massimo di temperatura registrato dalle sonde numeriche è inferiore a 1.3°C a 500 metri di distanza dalla sezione di emissione e non superiore a 1°C a 1000 metri dalla sezione di emissione;
- l'incremento di temperatura rimane confinato nei primi metri al di sotto della superficie marina. L'effetto è praticamente assente ad una profondità maggiore di 5 metri;
- l'azione del vento, unito alla presenza della linea di costa provoca un approfondimento (downwelling) dello strato superficiale di acqua calda, unito ad una riduzione dell'incremento di temperatura. Tale inspessimento si manifesta in corrispondenza della zona di Zaule. Comunque, anche in tale condizione non si osservano significativi incrementi di temperatura dell'acqua in corrispondenza della sezione di ingresso del canale navigabile;

Da osservare che i risultati ottenuti in questa fase sono conservativi in quanto:

- 1) non è stato considerato l'apporto di acqua dolce dai torrenti Rio Ospio e Rosandra, apporto che tenderebbe a mitigare il sovrizzo termico in corrispondenza della superficie marina;
- 2) non è stato considerato l'effetto delle maree, le quali contribuiscono alla diluzione del getto termico;
- 3) i valori di salto termico considerati nel presente studio alla sezione di emissione sono stimati per eccesso, in quanto durante il trasferimento lungo i 500 metri di condotta, dalla linea di costa alla

sezione di emissione, fenomeni di scambio termico, tenderebbero a disperdere parte del salto termico lungo la condotta prima dell'emissione;

4) le simulazioni non hanno considerato l'ulteriore raffreddamento delle acque superficiali dovute a fenomeni di convezione forzata tra la superficie marina e l'atmosfera;

5) le simulazioni hanno considerato una profondità di emissione pari a 12 metri, come dalle carte batimetriche fornite dagli Uffici Tecnici dell'Autorità Portuale di Trieste. Nel caso in cui la sezione di emissione fosse posta ad una profondità superiore come riportato in [1], la maggiore profondità permetterebbe al getto termico di perdere ulteriore carico termico durante la risalita lungo la colonna d'acqua.

Sulla base dei risultati ottenuti a questa fase dello studio è stato considerato un ulteriore scenario. E' stata effettuata una nuova simulazione che considera condizioni estive. In condizioni estive la presenza di un forte termoclino (zona dove si manifestano significativi gradienti verticali di temperatura) e di acqua calda in superficie potrebbe ridurre le condizioni di scambio termico e provocare un considerevole aumento della temperatura dell'acqua marina. Inoltre, sulla base dei risultati delle simulazioni effettuate a questa fase, è stato considerato il caso di vento da SW, al fine di verificare se l'azione combinata di stratificazione termica e vento possano produrre accumulo di acqua calda nella zona di Zaule. La simulazione è descritta in dettaglio nel prossimo paragrafo.

4.3 Caso 3: analisi delle caratteristiche di dispersione del getto termico con salto termico $\Delta T=8^{\circ}\text{C}$: condizione estiva, vento da SW con velocità $U_{10}=5\text{ m/s}$

Tale situazione è simile alla precedente riguardo alle caratteristiche di emissione (caso *stand-alone*) e le forzanti (azione del vento e forza di Coriolis). La differenza sostanziale con il caso 2 sta nel fatto che la colonna d'acqua nel bacino non si trova a temperatura costante, bensì in condizioni di stratificazione stabile. Il profilo di temperatura considerato nella simulazione è quello relativo al mese di luglio, il quale, sulla base dei dati di letteratura, appare il più gravoso nei confronti della stabilità idrodinamica della colonna d'acqua [3]. La presente simulazione è stringente nei riguardi dei limiti prescritti dalla normativa, i quali richiedono, come ulteriore vincolo, che la temperatura assoluta all'emissione sia non superiore a 35°C .

La simulazione numerica è stata impostata considerando la griglia di calcolo dei casi precedenti, una condizione iniziale corrispondente ad un campo di velocità indotto dal getto alla sezione di emissione e dalla corrente di presa, profili di temperatura come da figura 5 (linea rossa), e l'azione

del vento sulla superficie marina, come già considerata nel caso 2 discusso sopra. La simulazione è stata effettuata per un tempo di emissione e di azione del vento pari a 24 ore.

Nell'analisi dei dati, per questa condizione sono stati considerati sia gli incrementi termici che le temperature assolute, in quanto il campo termico di base non è costante ma varia con la profondità. Nelle simulazioni, la temperatura all'emissione è stata considerata di 8°C superiore al valore della stessa alla presa. Per ragioni di conservatività, come nei casi precedenti non sono stati considerati quei fenomeni che tendono a mitigare il campo di temperatura nel bacino.

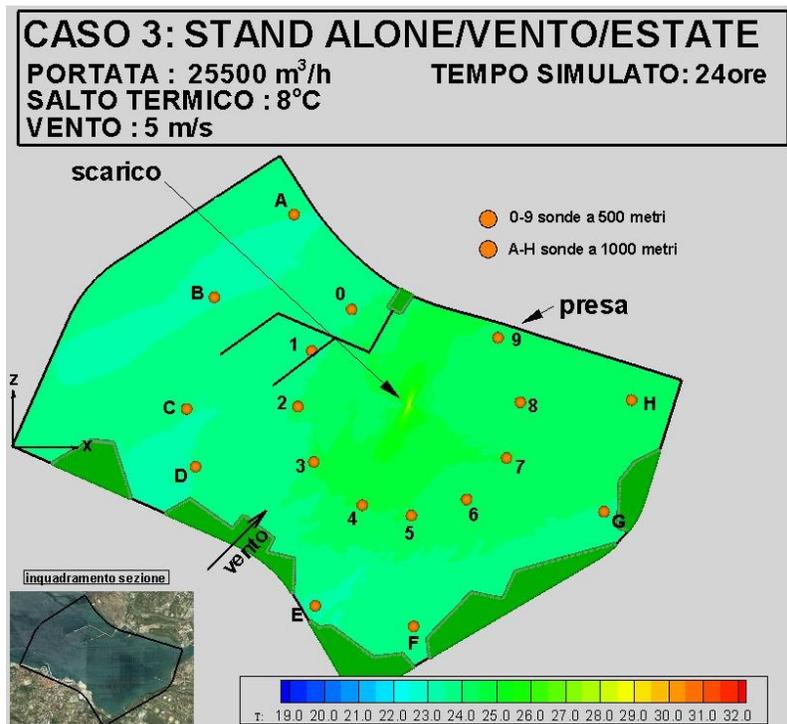


Figura 20: Distribuzione spaziale istantanea della temperatura del mare in corrispondenza della superficie libera a 24 ore dall'inizio dell'azione del vento. Caso $\Delta T=8^{\circ}\text{C}$, condizione estiva, vento da SW.

I risultati delle simulazioni hanno mostrato che nel presente caso il getto di acqua calda tende a risalire più rapidamente verso la superficie marina rispetto al caso invernale e, similmente a quest'ultimo, a distribuirsi lungo le direzioni orizzontali. Ciò si spiega con il fatto che la temperatura dell'acqua in corrispondenza della sezione di presa è di circa 23.8°C, praticamente uguale ai 24°C dello strato più superficiale del mare (si veda linea rossa di figura 5). Quindi, il getto alla sezione di emissione avrà un sovrizzo termico, rispetto alla temperatura superficiale pari a circa 8°C. Inoltre, a causa della stratificazione termica, gli strati profondi del bacino saranno a temperatura più bassa; a 12 metri di profondità, la temperatura è di circa 21°C, mentre il getto termico sarà emesso ad una temperatura di circa 32°C, con un sovrizzo termico, alla sezione di emissione, pari circa a

11°C rispetto all'acqua di mare a 12 metri di profondità. Conseguentemente il getto avrà caratteristiche di galleggiamento positivo superiori rispetto a quelle del caso invernale durante la prima fase di risalita e comparabili a quelle del caso invernale nella fase finale.

In particolare, l'analisi dimensionale mostra che nei fenomeni di convezione [14], una stima della velocità di risalita è fornita dalla seguente relazione:

$$v_b \approx \sqrt{\alpha \Delta T g L} \quad (1)$$

dove con v_b si indica la velocità di risalita del getto, α è il coefficiente di comprimibilità cubica dell'acqua, g l'accelerazione di gravità, L una dimensione scala caratteristica verticale. Il rapporto tra la velocità di risalita del caso estivo rispetto a quella del caso invernale si può quindi stimare con la seguente relazione:

$$\frac{v_b^E}{v_b^I} \approx \sqrt{\frac{\Delta T^E}{\Delta T^I}} = 1.17 \quad (2)$$

dove gli apici 'E' e 'I' si riferiscono rispettivamente alla situazione estiva e invernale. La relazione (2) mostra che nel caso estivo, il getto, almeno durante le prime fasi della risalita, ha una velocità di circa il 17 % superiore a quella del caso invernale.

Figura 20 riporta una mappa spaziale della temperatura dell'acqua sulla superficie marina al tempo finale della simulazione (24h). Si osserva una dinamica simile a quella del caso invernale.

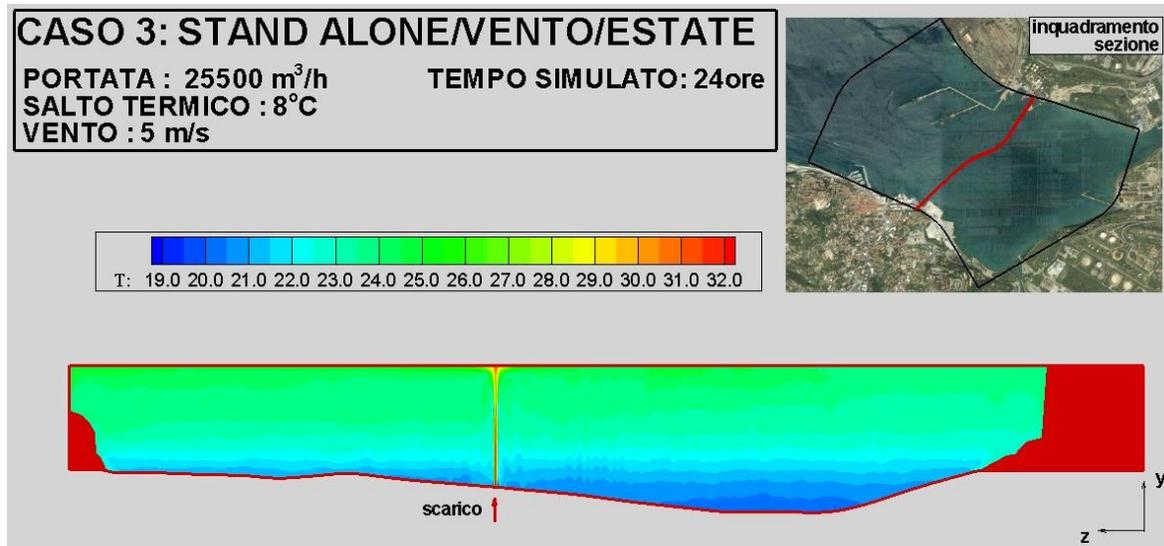


Figura 21: Distribuzione spaziale istantanea della temperatura in corrispondenza di una sezione verticale passante per il centro della sezione di emissione, evidenziata dalla linea rossa del pannello in alto a destra.

Tempo pari 24 ore dall'inizio dell'emissione. Caso $\Delta T=8^\circ\text{C}$, condizione estiva, vento da SW.

L'acqua, come osservato viene prelevata ad una temperatura di circa 24°C e viene quindi emessa alla sezione di scarico ad una temperatura di circa 32°C . In corrispondenza della superficie, al di

sopra del getto tale temperatura viene ridotta a causa del mescolamento del getto lungo la colonna d'acqua. Tale temperatura viene ulteriormente ridotta dal trasporto orizzontale che il getto subisce.

Tale dinamica è osservabile in figura 21, la quale riporta una vista laterale della distribuzione spaziale di temperatura lungo una sezione verticale passante per il centro della sezione di emissione.

Appare chiara la dinamica del getto, il quale risale rapidamente verso la superficie e si spande lungo l'orizzontale in maniera simile a quanto osservato nei casi invernali

La figura 22, che riporta la temperatura dell'acqua registrata al tempo $t=24h$ lungo profili verticali in corrispondenza delle sonde, mostra che l'incremento di temperatura dovuto al getto termico è molto basso. In generale, si osserva che il mescolamento turbolento e la circolazione indotta dal vento tendono a produrre fenomeni di upwelling/downwelling di strati profondi/superficiali di acqua e a provocare un generale raffreddamento della colonna d'acqua. Come conseguenza, in determinate zone del bacino (si vedano per esempio i profili verticali a 500 metri, figura 22 pannello di sinistra) la temperatura dell'acqua in corrispondenza degli strati più profondi tende ad essere inferiore a quella iniziale.

Un lieve incremento di temperatura, non superiore a $1^{\circ}C$ rispetto a quella iniziale nel bacino, si osserva a 500 metri dall'emissione in corrispondenza delle sonde 4-9, dovuta al trasporto degli strati superficiali in direzione NE e alla corrente di ritorno che si sviluppa nella parte E della baia a causa della conformazione del bacino.

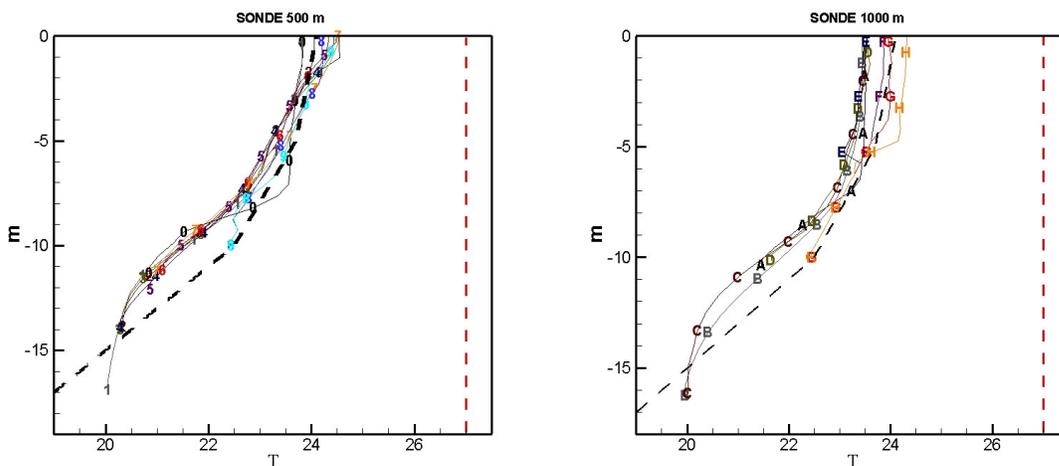


Figura 22: Profili verticali istantanei della temperatura in corrispondenza delle sonde al tempo $t=24h$. Caso $\Delta T=8^{\circ}C$, condizione estiva, vento da SW. La Linea verticale tratteggiata in rosso rappresenta il limite da normativa (sovralzo di $3^{\circ}C$ a 1000 metri dall'emissione). La curve tratteggiate in nero rappresentano il profilo di temperatura nel bacino all'inizio della simulazione.

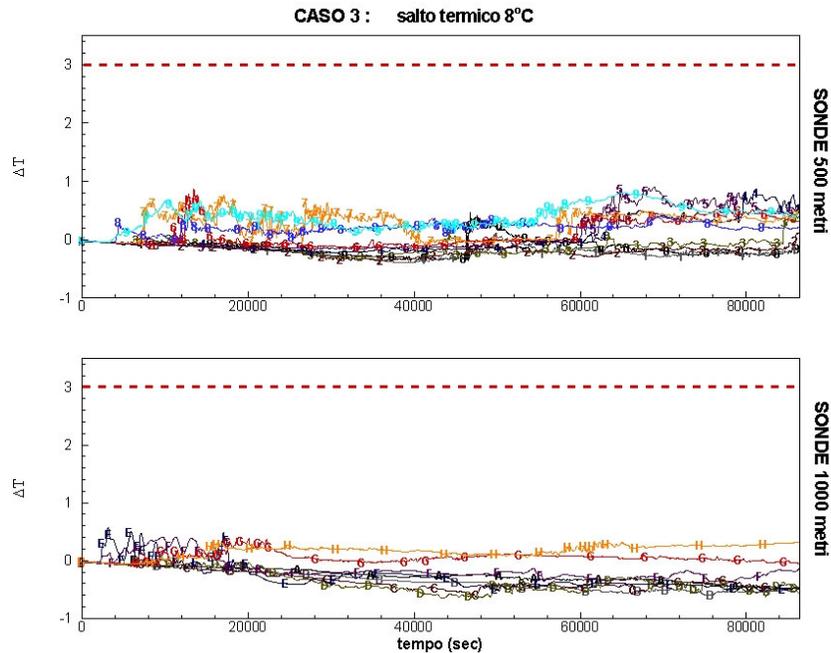


Figura 23: Andamento dell'incremento di temperatura registrato dalle sonde numeriche durante l'evoluzione temporale del getto in 24 ore: pannello superiore, sonde a 500 metri dall'emissione ; pannello inferiore, sonde a 1000 metri dall'emissione. Caso $\Delta T=8^\circ\text{C}$, condizione estiva, vento da SW. I grafici riportano in linea tratteggiata rossa il limite di normativa pari a 3°C a 1000 metri di sovrizzo termico.

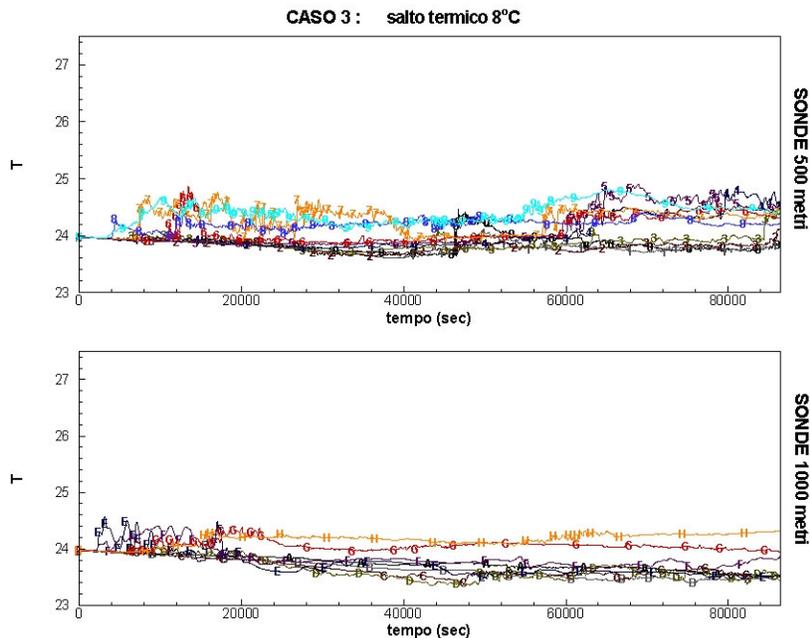


Figura 24: Andamento della temperatura registrato dalle sonde numeriche durante l'evoluzione temporale del getto in 24 ore: pannello superiore, sonde a 500 metri dall'emissione; pannello inferiore, sonde a 1000 metri dall'emissione. Caso $\Delta T=8^\circ\text{C}$, condizione estiva, vento da SW.

Riguardo alle sonde poste a 1000 metri, un incremento massimo di temperatura inferiore a 1 °C, è osservabile in corrispondenza della sonda H posta nella parte ENE della baia. Tale incremento è registrato per i primi 5 metri di profondità.

In figura 23 sono riportati gli andamenti temporali dell'incremento di temperatura dell'acqua registrati dalle sonde numeriche durante le 24 ore di simulazione. Si osserva chiaramente che la temperatura registrata nella zona di emissione del getto termico è sostanzialmente inferiore al valore richiesto dalla normativa e tale temperatura decresce rapidamente all'aumentare della distanza dall'emissione. Alcune delle sonde registrano incrementi negativi, dovuti al fatto che le dinamiche di downwelling di acqua calda e upwelling di acqua fredda associate alla circolazione nel bacino indotta dall'azione del vento tendono a modificare nel tempo il campo di temperatura nel bacino.

In figura 24 sono riportati gli andamenti temporali della temperatura dell'acqua registrati dalle sonde numeriche durante le 24 ore di simulazione. L'analisi combinata delle figure riportate in questo paragrafo mostra che, con il profilo di stratificazione termica tipico del mese di luglio, profilo al quale attiene il valore più elevato di temperatura superficiale nel bacino, la temperatura massima registrata a causa della presenza del getto termico è pari a circa 32 °C, in una zona molto limitata corrispondente al punto di emissione. A 500 metri e a 1000 metri dall'emissione, le temperature registrate in superficie si mantengono inferiori a 25 °C.

L'evoluzione spazio-temporale del getto è mostrata in dettaglio in due film riportati in allegato alla presente relazione tecnica. Il film TEMPERATURA_SURF_8_ESTA_VENTO.avi riporta l'evoluzione della temperatura in superficie, mentre il film TEMPERATURA_VERT_8_ESTA_VENTO.avi riporta l'evoluzione della temperatura in corrispondenza di una sezione verticale passante per il centro della sezione di emissione (sezione di figura 21).

Riassumendo, i risultati mostrano che, per le condizioni geometriche e idrodinamiche di emissione considerate nel presente paragrafo, nelle condizioni estive, caratterizzate da forte stratificazione termica nella colonna d'acqua e nelle condizioni più gravose riguardo all'effetto del vento sul trasporto e mescolamento superficiale del campo di temperatura:

- la temperatura massima osservata nel bacino è pari a 32 °C, in una zona molto limitata in corrispondenza della sezione di emissione. Tale valore è inferiore al limite di 35 °C prescritto dalla normativa;

- il massimo incremento di temperatura registrato dalle sonde numeriche è dell'ordine di 1 °C a 500 metri di distanza dalla sezione di emissione e non superiore a 1 °C a 1000 metri dalla sezione di emissione;
- il sovrizzo termico rimane in gran parte confinato nei primi metri al di sotto della superficie marina. A 500 metri dall'emissione il sovrizzo termico rimane confinato nel primo metro di profondità. A 1000 metri dall'emissione un apprezzabile incremento di temperatura (dell'ordine di 1 °C) è registrato nella parte a ENE della baia con un approfondimento dello strato termico di circa 5 metri.

Da osservare che i risultati ottenuti in questa fase sono conservativi in quanto:

- 1) Non è stato considerato l'apporto di acqua dolce dai torrenti Rio Ospio e dal torrente Rosandra, apporto che tenderebbe a mitigare il sovrizzo termico in corrispondenza della superficie marina.
- 2) Non è stato considerato l'effetto delle maree, le quali contribuiscono alla diluzione del getto termico.
- 3) I valori di salto termico considerati nel presente studio alla sezione di emissione sono stimati per eccesso, in quanto durante il trasferimento lungo i 500 metri di condotta, dalla linea di costa alla sezione di emissione, fenomeni di scambio termico, tenderebbero a disperdere parte del salto termico lungo la condotta prima dell'emissione. Questo è particolarmente vero nel caso estivo a causa del fatto che il salto di temperatura tra il getto e l'acqua marina in corrispondenza del fondo è di circa 11 °C.
- 4) Le simulazioni non hanno considerato l'ulteriore raffreddamento delle acque superficiali dovute a fenomeni di convezione forzata tra la superficie marina e l'atmosfera. Tali fenomeni sono molto intensi nel periodo estivo data l'elevata temperatura dell'acqua in superficie.
- 5) Le simulazioni hanno considerato una profondità di emissione pari a 12 metri, come dalle carte batimetriche fornite dagli Uffici Tecnici dell'Autorità Portuale di Trieste. Nel caso in cui la sezione di emissione fosse posta ad una profondità superiore come riportato in [1], la maggiore profondità permetterebbe al getto termico di perdere ulteriore carico termico durante la risalita lungo la colonna d'acqua.

Le simulazioni condotte a questa fase dello studio hanno considerato una situazione *stand-alone*, nella quale il getto termico emesso alla sezione di scarico porta integralmente il salto di temperatura necessario a raffreddare il ciclo combinato. Come discusso nella Sezione 2 della presente relazione, tale situazione è conservativa ma nella pratica poco probabile. La sezione successiva quindi sarà dedicata a studiare il caso più probabile, consistente in uno scarico parzializzato, corrispondente ad una configurazione di integrazione tra gli impianti (presenti e futuri) che insistono nell'area.

4.4 Caso 4: analisi delle caratteristiche di dispersione del getto con salto termico $\Delta T=3.4^{\circ}\text{C}$ (caso a regime, con possibile integrazione tra gli impianti insistenti nell'area, esistenti e attesi): condizione invernale, assenza di vento

Tale situazione varia rispetto alle precedenti riguardo alle caratteristiche del getto termico, in quanto per il caso di integrazione piena tra gli impianti (presenti e attesi) nel sito, la portata termica di emissione appare notevolmente ridotta. In particolare, a parità di portata volumetrica, pari a $32,000\text{ m}^3/\text{h}$, necessaria al funzionamento dell'impianto della Gas Natural, l'integrazione prevede una temperatura di emissione superiore di 3.4°C rispetto a quella del bacino idrico.

Riguardo alle condizioni meteo-marine, considerando che l'analisi svolta a questa fase ha mostrato che le condizioni più gravose nei riguardi della normativa di settore siano quelle invernali in assenza di vento, tali sono le condizioni considerate per la presente simulazione.

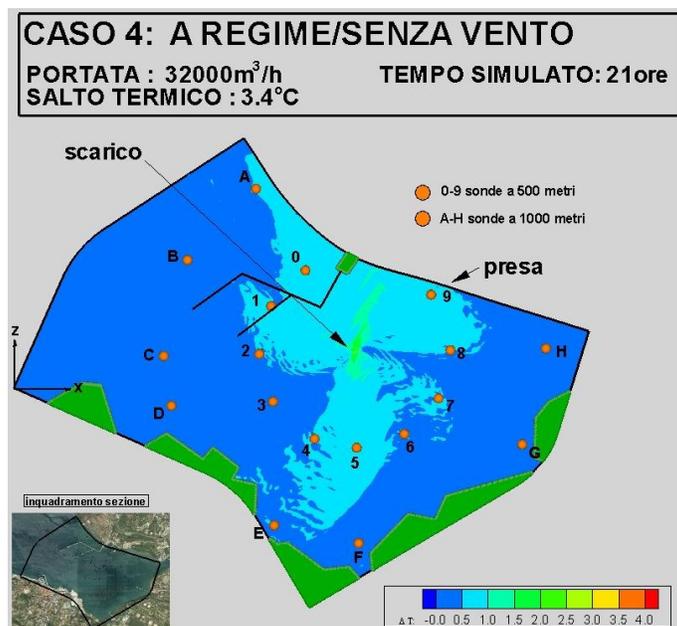


Figura 25: Distribuzione spaziale istantanea dell'incremento di temperatura del mare in corrispondenza della superficie libera a 21 ore dall'inizio dell'emissione. Caso $\Delta T=3.4^{\circ}\text{C}$, condizioni invernali in assenza di vento.

La simulazione numerica è stata impostata considerando la griglia di calcolo dei casi precedenti, una condizione iniziale corrispondente ad un campo di velocità indotto dal getto alla sezione di emissione e dalla corrente di presa, assenza di stratificazione termica e di vento. L'analisi dei risultati durante la simulazione ha mostrato che a causa del ridotto carico termico, condizioni di stazionarietà nell'andamento della temperatura alle sonde sono state raggiunte dopo poche ore di

emissione. Per questa ragione la simulazione è stata effettuata per un tempo di emissione pari a 21 ore.

Per ragioni di conservatività, come nei casi precedenti non sono stati considerati quei fenomeni che tendono a mitigare i gradienti termici in corrispondenza degli strati superficiali del bacino.

I risultati delle simulazioni hanno mostrato che il getto avrà caratteristiche di galleggiamento positivo qualitativamente simili a quelle discusse nel paragrafo 4.1, con valori di incrementi di temperatura decisamente inferiori.

Figura 25 riporta una mappa spaziale della temperatura dell'acqua sulla superficie marina al tempo finale della simulazione (21 ore). Si osserva una dinamica simile a quella del caso invernale. L'acqua viene emessa alla sezione di scarico con un incremento di temperatura pari a 3.4°C . In corrispondenza della superficie, al di sopra del getto tale incremento di temperatura viene ridotto a causa del mescolamento del getto lungo la colonna d'acqua. Tale incremento di temperatura viene ulteriormente ridotto dal trasporto orizzontale che il getto subisce. Nella baia si forma un regime circolatorio che distrugge la simmetria assiale e trasporta il campo di temperatura lungo due macchie: una si propaga verso N e prosegue verso NW quando il getto arriva in corrispondenza della costa nell'area di Zaule. Una si sposta verso S, in direzione della costa di Muggia. Dato il ridotto salto termico iniziale, l'incremento di temperatura osservato sulla superficie appare molto limitato.

La risalita del getto e la sua distribuzione lungo le sezioni verticali sono osservabili in figura 26, la quale riporta una vista laterale della distribuzione spaziale dell'incremento di temperatura lungo un piano curvilineo passante per il centro della sezione di emissione. Un fenomeno di downwelling è osservato nella parte N della baia, in corrispondenza della costa a Zaule.

I profili verticali dell'incremento di temperatura registrato al tempo $t=21\text{h}$ (figura 27) in corrispondenza delle sonde mostrano una dinamica simile a quella osservata nel caso 1 del presente studio (paragrafo 4.1). A 500 metri il valore massimo di incremento di temperatura è pari a circa 0.7°C . Tale valore è osservato solo in corrispondenza della tre sonde 0,5,9. Le sonde 0 e 9 si trovano nel braccio di corrente che risale verso N, la sonda 5 si trova nel braccio opposto. Alla sonda 9 lo strato di acqua calda è molto sottile (circa 1 metro di profondità); in corrispondenza delle sonde 0 e 5 lo spessore dello strato di acqua calda è superiore, ma comunque limitato entro i primi 3 metri di profondità.

A 1000 metri dall'emissione, le sonde A ed E registrano un incremento di temperatura di circa 0.5°C lungo una profondità di circa 3 metri. Tale downwelling è dovuto, come già visto, all'interazione tra la corrente e la linea di costa.

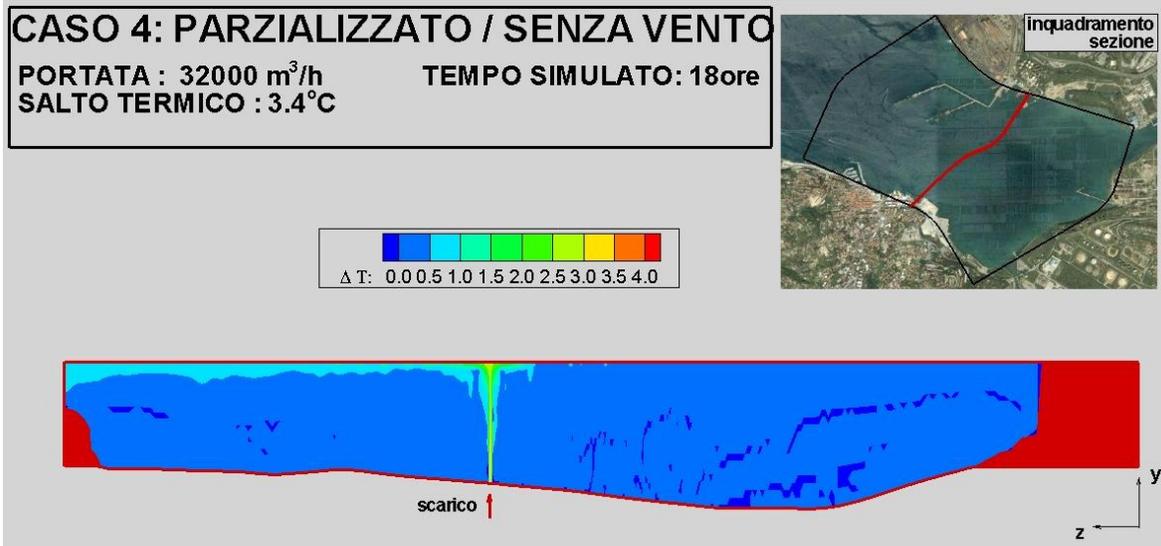


Figura 26: Distribuzione spaziale istantanea dell'incremento di temperatura in corrispondenza una sezione verticale passante per il centro della sezione di emissione ed evidenziata dalla linea rossa del pannello in alto a destra. Tempo pari 21 ore dall'inizio dell'emissione. Caso $\Delta T=3.4^{\circ}\text{C}$, condizione invernale in assenza di vento.

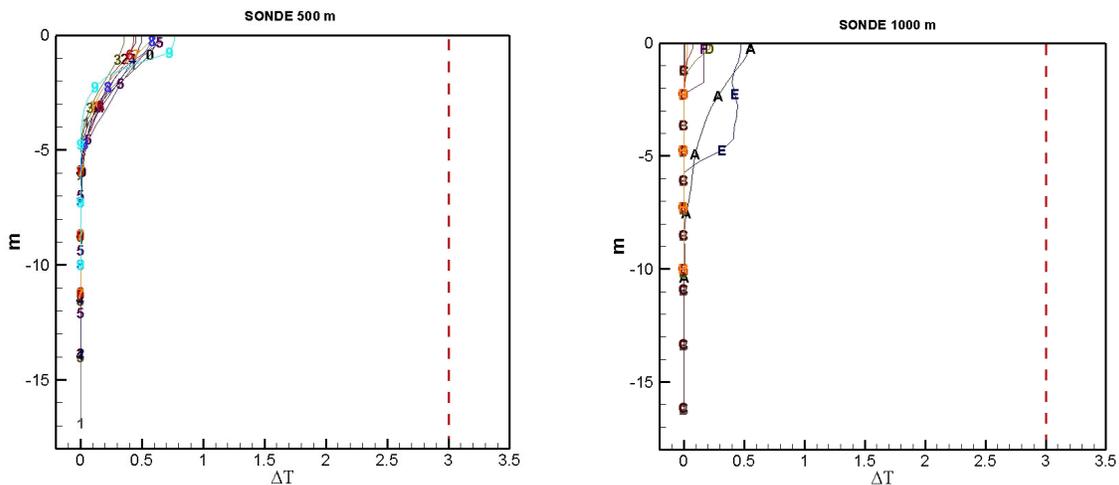


Figura 27: Profili verticali istantanei dell' incremento di temperatura in corrispondenza delle sonde al tempo $t=21\text{h}$. Caso $\Delta T=3.4^{\circ}\text{C}$, condizione invernale in assenza di vento.

Infine, in figura 28 sono riportati gli andamenti temporali della temperatura dell'acqua registrati dalle sonde numeriche durante le 21ore di simulazione. Si osserva chiaramente che l'incremento

di temperatura dovuto all'emissione del getto termico è sostanzialmente inferiore al valore richiesto dalla normativa. In particolare, a 500 metri dall'emissione si registrano valori massimi di sovrizzo termico inferiori a 0.9°C , mentre a 1000 metri si registrano valori massimi di circa 0.5°C .

L'evoluzione spazio-temporale del getto è mostrata in dettaglio in due film riportati in allegato alla presente relazione tecnica. Il film TEMPERATURA_SURF_3.4_INV_NOVENTO.avi riporta l'evoluzione della temperatura in superficie, mentre il film TEMPERATURA_VERT_3.4_INV_NOVENTO.avi riporta l'evoluzione della temperatura su un piano verticale passante per la sezione mediana della sezione di emissione.

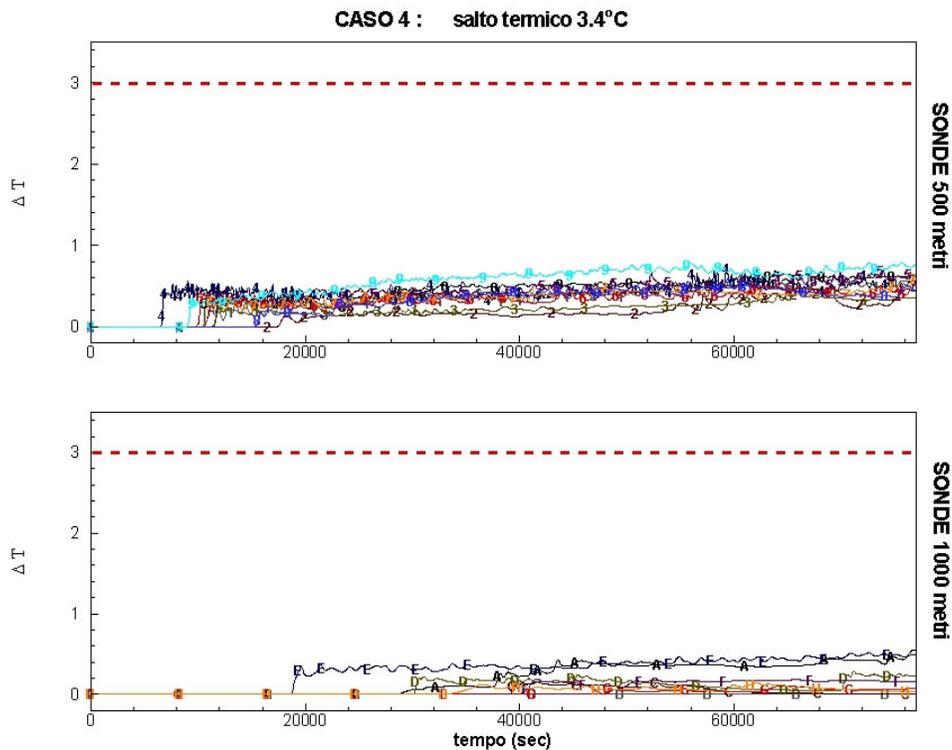


Figura 28: Andamento degli incrementi di temperatura registrati dalle sonde numeriche durante l'evoluzione temporale del getto in 21 ore: pannello superiore, sonde a 500 metri dall'emissione; pannello inferiore, sonde a 1000 metri di distanza. Caso $\Delta T=3.4^{\circ}\text{C}$, condizione invernale, assenza di vento. I grafici riportano in linea tratteggiata rossa il limite di normativa pari a 3°C a 1000 metri di sovrizzo termico.

Riassumendo, i risultati presentati in questo paragrafo della relazione mostrano che a regime, per le condizioni geometriche e idrodinamiche di emissione considerate nel presente paragrafo, nelle condizioni invernali, in assenza di vento:

- il sovrizzo massimo di temperatura registrato dalle sonde numeriche è inferiore a 0.9°C a 500 metri di distanza dalla sezione di emissione e pari a circa 0.5°C a 1000 metri dalla sezione di emissione;
- il sovrizzo termico rimane in gran parte confinato nei primi metri al di sotto della superficie marina. L'effetto è praticamente assente ad una profondità superiore ad 1 metro, tranne in determinate zone, dove il fenomeno di downwelling approfondisce lo strato di acqua calda (fino a circa 3 metri di profondità), con incrementi di temperatura comunque molto limitati e dell'ordine di 0.5°C;
- non si osservano apprezzabili incrementi di temperatura dell'acqua nella parte della baia antistante il canale navigabile.

Da osservare che i risultati ottenuti in questa fase sono conservativi in quanto:

- 1) Non è stato considerato l'apporto di acqua dolce dai torrenti Rio Ospo e Rosandra, apporto che tenderebbe a mitigare il sovrizzo termico in corrispondenza della superficie marina.
- 2) I valori di salto termico considerati nel presente studio alla sezione di emissione sono stimati per eccesso, in quanto durante il trasferimento lungo i 500 metri di condotta, dalla linea di costa alla sezione di emissione, fenomeni di scambio termico, tenderebbero a disperdere parte del salto termico lungo la condotta prima dell'emissione
- 3) Le simulazioni non hanno considerato l'ulteriore raffreddamento delle acque superficiali dovute a fenomeni di scambio termico tra la superficie marina e l'atmosfera.
- 4) Le simulazioni hanno considerato una profondità di emissione pari a 12 metri, come dalle carte batimetriche fornite dagli Uffici Tecnici dell'Autorità Portuale di Trieste. Nel caso in cui la sezione di emissione fosse posta ad una profondità superiore come riportato in [1], la maggiore profondità permetterebbe al getto termico di perdere ulteriore carico termico durante la risalita lungo la colonna d'acqua.

5. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Il presente elaborato si inserisce nell'ambito della documentazione tecnica di supporto allo Studio di Impatto Ambientale della centrale a ciclo combinato di potenza pari a 400 MW da ubicarsi nell'area del Porto industriale di Trieste, proposta dalla Lucchini Energia nel quadro delle iniziative promosse per la riconversione produttiva dello stabilimento siderurgico esistente ("Ferriera di Servola").

Scopo principale del lavoro è stato quello di verificare la compatibilità del possibile utilizzo dell'acqua di mare per il raffreddamento dell'impianto con i limiti imposti dalla normativa di settore.



In tal senso i dati base di progetto per lo sviluppo dello studio hanno previsto la definizione di alcuni “punti chiave”, nell’ottica della minimizzazione dell’impatto ambientale dell’opera, ovvero della massima economia nell’utilizzo delle risorse, e più in generale di una razionalizzazione delle infrastrutture da realizzare in ambito portuale:

- ri-utilizzo dell’acqua di mare, già trattata e raffreddata di circa 4°C, eventualmente resa disponibile dalla possibile presenza del terminale di rigassificazione, con la stessa portata massima prevista (32,000 m³/h);
- utilizzo delle infrastrutture di presa e scarico dell’acqua di mare già asservite a tale impianto, nella medesima configurazione da questo adottata e con le medesime caratteristiche dimensionali;

Per il funzionamento della sezione di raffreddamento dell’impianto con acqua di mare, i calcoli di progetto, tenuto conto dei limiti imposti dalla normativa vigente, hanno identificato l’intervallo ottimale di variabilità del binomio portata/salto termico:

- a) portata pari a 25,500 m³/h e salto termico pari a 8°C;
- b) portata pari a 34,000 m³/h e salto termico pari a 6°C.

Pertanto lo studio è stato sviluppato partendo dal confronto dei due casi limite a) e b) sopra menzionati, identificando, nel confronto diretto degli scenari da essi individuati, il caso più conservativo in termini di impatto ambientale, ovvero di impatto sulle acque della baia di Muggia, ed applicando a questo i successivi scenari di simulazione correlati alle condizioni meteo-climatiche di riferimento, anch’esse scelte sulla base di un criterio di conservatività piuttosto che di rappresentatività.

In altre parole lo studio si è sviluppato attraverso l’analisi di confronti successivi degli scenari operativi individuati, selezionando di volta in volta quello più conservativo in termini di impatto sulle acque, nell’ottica di una verifica delle condizioni di rilascio del getto termico rispettosa anche del principio di “precauzione” e comunque sviluppata con ampi margini di sicurezza in termini di risultati del modello di elaborazione.

A tale proposito è utile sottolineare che la condizione di riferimento definita *stand-alone*, ovvero di funzionamento della sola centrale termoelettrica, rappresenta anch’essa uno scenario conservativo poiché la configurazione di progetto prescelta, fondata sul possibile riutilizzo dell’acqua di mare del

rigassificatore e delle infrastrutture di presa e scarico della stessa, è logicamente correlata alle possibili sinergie/compensazioni ambientali realizzabili mediante l'interconnessione dei diversi impianti produttivi, anche in ragione delle specifiche caratteristiche dei singoli processi produttivi (raffreddamento dell'acqua di processo per il rigassificatore e, viceversa, riscaldamento per la centrale termoelettrica). A ciò va aggiunta la considerazione, non secondaria, del diverso profilo di funzionamento, che vedrebbe la centrale lavorare, in linea generale, un numero di ore all'anno sensibilmente inferiore a quello del terminale di rigassificazione (da 4,000 a 6,000 ore/anno vs. minimo 7,500 ore/anno) e dunque in condizioni di generale disponibilità dell'acqua utilizzata dall'impianto gnl Gas Natural.

La condizione a regime, poi, è riferibile ad uno scenario di interconnessione tra gli impianti nel quale si inserisce, per quanto noto dalla documentazione pubblicata nell'ambito della procedura di V.I.A. in corso per il terminale di rigassificazione, anche il termovalorizzatore esistente gestito da AcegasAps (figura 6) al quale si ipotizza, cautelativamente ai fini delle valutazioni in questione, essere destinata una quota parte della portata di acqua di mare (4,000 m³/h) già utilizzata dal terminale gnl [7], portata che subirebbe un salto termico di +8°C nella sezione di raffreddamento del termovalorizzatore.

La configurazione di progetto della sezione di raffreddamento della centrale, ottenuta come differenza tra la massima disponibile (32,000 m³/h) e quella destinata al termovalorizzatore (4,000 m³/h) si colloca, opportunamente, all'interno dell'intervallo indicato in precedenza e, pertanto, garantisce ampi margini di sicurezza nelle valutazioni dei risultati dei casi limite analizzati.

Per completezza di informazione ed anche allo scopo di illustrare i possibili benefici di un sistema di interconnessione tra i diversi siti produttivi come quello sopra descritto, lo studio ha infine sviluppato un'analisi dello scenario a regime, ovvero con una piena interconnessione tra i circuiti di processo, nell'assunto che la restituzione del flusso di acqua di mare utilizzata sia realizzata a valle di un processo di mescolamento in apposite vasche e, dunque, in un'unica soluzione con portata pari, naturalmente, a quella massima prelevata (32,000 m³/h) e salto termico pari alla temperatura di mescolamento finale (3.4°C), anche in tal caso nelle condizioni meteo-climatiche ritenute più conservative dal punto di vista dell'impatto ambientale.

Una volta identificate le caratteristiche intrinseche del sito, in termini di orografia, batimetrie, opere antropiche, forzanti meteo-marine, sono stati selezionati scenari conservativi per l'analisi della dispersione del getto termico ed in particolare della diffusione spaziale dell'incremento di temperatura.

Ai fini di operare in condizioni conservative, nel modello numerico non sono stati considerati tutti quegli effetti presenti nella realtà, difficili da quantificare e che tendono a mitigare l'incremento della temperatura negli strati superficiali del bacino. In particolare:

- non è stato considerato l'apporto di acqua dolce dai torrenti Rio Ospo e Rosandra, apporto che tenderebbe a mitigare il sopralzo termico in corrispondenza della superficie marina;

- non è stato considerato l'effetto di diluizione associato alla presenza delle maree all'interno della baia;

- i valori di salto termico considerati nel presente studio alla sezione di emissione sono stimati per eccesso, in quanto durante il trasferimento lungo i 500 metri di condotta, dalla linea di costa alla sezione di emissione, fenomeni di scambio termico tenderebbero a disperdere parte del salto termico lungo la condotta prima dell'emissione. Ciò è particolarmente vero nel caso estivo, nel quale il salto di temperatura in corrispondenza del fondo del mare è notevolmente superiore a quello del caso invernale;

- Le simulazioni non hanno considerato l'ulteriore raffreddamento delle acque superficiali dovute a fenomeni di scambio termico tra la superficie marina e l'atmosfera;

- le simulazioni hanno considerato una profondità di emissione pari a 12 metri, come dalle carte batimetriche fornite dagli Uffici Tecnici dell'Autorità Portuale di Trieste. Nel caso in cui la sezione di emissione fosse posta ad una profondità superiore come riportato in [1], la maggiore profondità permetterebbe al getto termico di perdere ulteriore carico termico durante la risalita lungo la colonna d'acqua.

Il primo set di simulazioni ha riguardato l'analisi delle condizioni più gravose tra gli scenari estremi di emissione possibili nel caso *stand-alone*, relativi al valore di progetto di portata termica e ai seguenti valori di portata volumetrica e salto termico :

- portata pari a 25,500 m³/h e salto termico pari a 8 °C;
- portata pari a 34.000 m³/h e salto termico pari a 6 °C.

Le due simulazioni sono state effettuate per il caso invernale (assenza di stratificazione termica nella colonna d'acqua) e assenza di vento. Il moto dell'acqua è quindi governato dalla vena fluida in ingresso nel bacino (emessa alla sezione di scarico), dalla vena in uscita in corrispondenza della sezione di presa e dalla forza di Coriolis che tende a governare il trasporto su una scala spaziale dell'ordine del kilometro e temporale dell'ordine delle decine di ore. Le simulazioni

comparative sono state effettuate per un tempo di emissione pari a 13 ore. Tale intervallo temporale è stato stimato sufficiente ai fini di una analisi comparativa tra le due condizioni di emissione. Una volta stabilita la condizione più gravosa tra le due analizzate, questa è stata portata avanti fino al raggiungimento del tempo di 24 ore a partire dall'emissione. L'analisi dei risultati ha mostrato chiaramente che tale intervallo temporale è sufficiente ad ottenere condizioni termodinamiche stazionarie nel bacino idrico.

Nelle condizioni di emissione dell'acqua di processo effettuata a circa 500 metri dalla costa, utilizzando il sistema di condotte progettate per l'impianto gnl Gas Natural, per le condizioni di portate e salti termici riportate sopra, in condizioni invernali, in assenza di vento, si è osservato che:

- a parità di portata termica, una condizione di emissione con un salto di temperatura pari a 8°C costituisce una condizione lievemente più gravosa rispetto al caso di salto termico pari a 6°C;
- la dinamica del getto è tale che esso risale rapidamente in superficie e ivi tende a disperdere rapidamente il carico termico durante la propria evoluzione spaziale (principalmente lungo i piani orizzontali);
- la distribuzione del getto in corrispondenza della superficie non presenta una simmetria assiale, a causa del regime di circolazioni che si instaura nella baia dovuto alla corrente generata dalla presa e a quella generata dal getto allo scarico;
- l'incremento massimo di temperatura registrato dalle sonde numeriche è pari a 1.8°C a 500 metri di distanza dalla sezione di emissione e non superiore a 1.2°C a 1000 metri dalla sezione di emissione;
- il sovrizzo termico rimane confinato nei primi metri al di sotto della superficie marina. L'effetto è praticamente assente ad una profondità superiore ai 5 metri;
- non si osservano significativi incrementi di temperatura dell'acqua in corrispondenza della sezione di ingresso del canale navigabile;

Lo studio è proseguito considerando nuovi scenari di forzanti meteo-marine per il caso più gravoso, relativo cioè ad un salto termico di 8°C alla sezione di emissione.

E' stata effettuata una nuova simulazione considerando l'azione del vento come ulteriore forzante, per le condizioni invernali. Riguardo alla direzione e intensità del vento, è stata scelta la condizione più impegnativa nei riguardi del trasporto e mescolamento del campo termico superficiale in relazione anche alle caratteristiche orografiche del sito. Specificatamente, è stato osservato che i venti provenienti dai quadranti orientali, sebbene più probabili nel sito di interesse, data la loro direzione di propagazione la loro intensità e temperatura, tendono a disperdere rapidamente e a

mescolare lungo la colonna verticale l'eventuale sovrizzo termico conseguente allo scarico di acqua calda in mare. D'altra parte, condizioni di vento di Libeccio (sud-ovest) a regime di brezza, per quanto presenti nel Golfo di Trieste con una probabilità di molto inferiore rispetto agli altri, a causa delle caratteristiche orografiche del sito, tenderebbero a produrre le condizioni di trasporto e accumulo di temperatura più gravoso, trasportando le chiazze termiche superficiali nella zona a nord-est della baia, in corrispondenza della zona di insediamento dell'impianto e del canale navigabile.

La simulazione numerica è stata quindi effettuata considerando una condizione di brezza ($U_{10}=5$ m/s) proveniente da SW. La simulazione è stata effettuata partendo da una condizione in assenza di vento dopo 15 ore di emissione, e considerando l'azione continuativa del vento per un tempo di 24 ore. Lo sviluppo del campo di temperatura corrispondente quindi ad un tempo totale di 39 ore a partire dall'emissione.

La simulazione ha mostrato che:

- l'incremento massimo di temperatura registrato dalle sonde numeriche è inferiore a 1.3°C a 500 metri di distanza dalla sezione di emissione e non superiore a 1°C a 1000 metri dalla sezione di emissione;
- l'incremento di temperatura rimane confinato nei primi metri al di sotto della superficie marina. L'effetto è praticamente assente ad una profondità maggiore di 5 metri;
- l'azione del vento, unito alla presenza della linea di costa provoca un approfondimento (downwelling) dello strato superficiale di acqua calda, unito ad una riduzione dell'incremento di temperatura. Tale inspessimento si manifesta in corrispondenza della zona di Zaule. Comunque, anche in tale condizione non si osservano significativi incrementi di temperatura dell'acqua in corrispondenza della sezione di ingresso del canale navigabile;

Il confronto tra le simulazioni in assenza e presenza di vento ha mostrato che da una parte il caso in assenza di vento è leggermente peggiorativo nei confronti dell'incremento di temperatura a 1000 metri di distanza dall'emissione, seppure ampiamente al di sotto dei limiti di legge. D'altra parte il caso con vento appare leggermente peggiorativo rispetto al caso senza vento ai fini dell'accumulo e approfondimento dell'acqua calda nella zona a NE della baia, dove è previsto l'insediamento dell'impianto e nella zona antistante il canale navigabile.

Ai fini di verificare se il downwelling (approfondimento o inspessimento dello strato di acqua calda superficiale) del sovrizzo termico possa provocare condizioni critiche anche in condizioni diverse da quelle invernali, è stata effettuata una simulazione numerica che ha considerato le condizioni di

emissione e di vento del caso precedente in uno scenario tipico estivo, considerando condizioni di stabilità termica del bacino idrico tipiche del mese di luglio. La letteratura mostra infatti che la massima stabilità termica nelle acque del golfo di Trieste si manifesta durante il mese di luglio. La simulazione è stata condotta per un tempo pari a 24 ore a partire dall'emissione del getto termico.

I risultati della simulazione mostrano che, per le condizioni geometriche e idrodinamiche di emissione considerate nel presente paragrafo, nelle condizioni estive, caratterizzate da forte stratificazione termica nella colonna d'acqua e nelle condizioni più gravose riguardo all'effetto del vento sul trasporto e mescolamento superficiale del campo di temperatura:

- la temperatura massima osservata nel bacino è pari a 32°C, in una zona molto limitata in corrispondenza alla sezione di emissione. Tale valore è inferiore al limite di 35°C prescritto dalla normativa;
- il massimo sovrizzo di temperatura registrato dalle sonde numeriche è dell'ordine di 1.°C a 500 metri di distanza dalla sezione di emissione e non superiore a 1°C a 1000 metri dalla sezione di emissione;
- Il sovrizzo termico rimane in gran parte confinato nei primi metri al di sotto della superficie marina. A 500 metri dall'emissione il sovrizzo termico rimane confinato nel primo metro di profondità. A 1000 metri dall'emissione un apprezzabile incremento di temperatura (dell'ordine di 1°C) è registrato nella parte a ENE della baia con un approfondimento dello strato termico di circa 5 metri.

Le simulazioni effettuate per il caso *stand-alone*, per il quale si ipotizza lo scenario di emissione più impegnativo tra quelli possibili, scenario comunque poco probabile, mostrano che nelle condizioni meteo-marine più conservative ai fini della valutazione delle caratteristiche di diffusione del getto termico in mare, l'incremento di temperatura delle acque del bacino soddisfa ampiamente alla normativa di settore, la quale richiede un aumento di temperatura delle acque a 1000 metri dal punto di emissione non superiore a 3°C. Anche nel caso estivo, nel quale gli strati superficiali di acqua si trovano a temperatura relativamente elevata, lo studio ha mostrato che la temperatura nel bacino si mantiene ampiamente al di sotto del valore di 35°C, valore massimo ammissibile da normativa.

In definitiva, riguardo al caso da una parte molto conservativo e dall'altra poco probabile, di salto termico pari a 8°C emesso con una portata volumetrica di 25,500 m³/h, i risultati del modello numerico mostrano incrementi massimi di temperatura dell'ordine di 1°C a 1000 metri dal punto di emissione, e dell'ordine di 1.8°C a 500 metri dalla sezione di emissione, e temperatura massima dell'ordine dei 32°C in una zona molto limitata in corrispondenza della sezione di emissione (solo

nelle condizioni estive). Considerato che nelle simulazioni numeriche non sono stati considerati alcuni effetti secondari, i quali tenderebbero a mitigare ulteriormente il salto termico, in conclusione si può affermare che nelle condizioni conservative considerate, il salto termico associato allo scarico dell'acqua di processo all'interno della baia di Muggia è tale da soddisfare ampiamente alla normativa di settore.

Infine è stato considerato il caso di emissione a regime che tenga in considerazione la razionalizzazione e le sinergie tra gli impianti presenti e previsti nel futuro prossimo nella zona di Zaule. Tale razionalizzazione prevede uno scarico di acqua di processo, con una portata di 32.000 m³/h e salto termico pari a 3.4°C, di molto inferiore rispetto al caso *stand-alone* discusso sopra.

Dato che il massimo incremento di temperatura nei casi discussi sopra era stato ottenuto per la condizione invernale in assenza di vento, la simulazione numerica per quest'ultimo scenario è stata effettuata in queste condizioni meteo-climatiche. In questo caso, la simulazione è stata effettuata per un tempo di emissione pari a 21 ore, sufficiente all'ottenimento di condizioni termoidrodinamiche stazionarie. Così come le simulazioni precedenti, anche la presente è stata effettuata senza considerare gli effetti secondari che tenderebbero a mitigare il sovrizzo termico sulla superficie del mare.

I risultati della simulazione numerica hanno mostrato che:

- il massimo sovrizzo di temperatura registrato dalle sonde numeriche è inferiore a 0.9°C a 500 metri di distanza dalla sezione di emissione e pari a circa 0.5°C a 1000 metri dalla sezione di emissione;
- il sovrizzo termico rimane in gran parte confinato nei primi metri al di sotto della superficie marina. L'effetto è praticamente assente ad una profondità superiore ad 1 metro, tranne in determinate zone, dove il fenomeno di downwelling approfondisce lo strato di acqua calda (fino a circa 3 metri di profondità), con incrementi di temperatura comunque molto limitati e dell'ordine di 0.5°C;
- non si osservano apprezzabili incrementi di temperatura dell'acqua nella parte della baia antistante il canale navigabile.

In definitiva, così come il caso *stand-alone*, a maggior ragione il caso a regime, che prevede la razionalizzazione degli impianti presenti e futuri che insistono nell'area, soddisfa ampiamente alla normativa di settore nei riguardi del riscaldamento delle acque all'interno nella zona di Zaule all'interno della baia di Muggia.

6. BIBLIOGRAFIA

[1] DHI, Water & Environment, Studio di diffusione dello scarico dell'acqua di mare dal terminale di rigassificazione di Zaule. Febbraio 2008 (scaricabile dal sito

<http://www.gasnaturalitalia.com/magnoliaPublic/GNItalia/home/leftMenu/gasnaturale/DocumentiSIA.html>)

[2] Agenzia Regionale per la Protezione dell'ambiente del Friuli Venezia Giulia, Rapporto sullo Stato dell'ambiente, Aggiornamento 2002, ARPA FVG.

[3] Brun C., Semeraro R., Test di tracciamento della Fessura del Vento (Val Rosandra, Carso): nuove ipotesi sull'idrogeologia carsica dell'area, "Esplorando", S.Omobono Imagna Terme 28--31 ott. 2005.

[4] Salon S., Armenio V., Crise A., A numerical investigation of the Stokes boundary layer in the turbulent regime, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 570, 253-296, 2007.

[5] Stravisi F., Caratteristiche meteorologiche e climatiche del Golfo di Trieste, Università di Trieste, Dipartimento di Scienze della Terra, 2000.

[6] Stravisi F., La Bora a Trieste, Università di Trieste, Dipartimento di Scienze della Terra, 2000.

[7] Foster Wheeler Iberia, Studio di integrazione del circuito acqua di mare: Gas Natural SDG – Terminale di Rigassificazione del GNL. Marzo 2008 (scaricabile dal sito <http://www.gasnaturalitalia.com/magnoliaPublic/GNItalia/home/leftMenu/gasnaturale/Documenti-SIA.html>)

[8] Armenio V., Piomelli U. A Lagrangian mixed subgrid-scale model in generalized coordinates. Flow Turbulence and Combustion, Vol. 65, 51-81, 2000.

[9] Roman F., Napoli E., Milici B., Armenio V., An improved immersed boundary method for curvilinear grids. In press, Computer & Fluids, 2009.

[10] Armenio V. , Roman F., Large Eddy Simulations of Environmental Shallow Water Coastal Flows, ERCOFTAC Bulletin 78, March 2009.

[11] Coleman, G. N., Ferziger, J. H., and Spalart, P. R. Direct simulation of the stably stratified turbulent ekman layer. Journal of Fluid Mechanics, , Vol. 712, 244-677, 1992.



[12] Salon S., Armenio V., Crise A., A numerical (LES) investigation of a shallow-water, mid-latitude, tidally-driven boundary layer, *Environmental Fluid Mechanics*, in press, 2009.

[13] Kundu P.K., *Fluid Mechanics*, (Chapter 7, Gravity waves, 184-247), Academic Press, 1990.

[14] Rubin H, Atkinson J, *Environmental Fluid Mechanics*, Marcel Dekker Inc., 2001.



Prof. Ing. Vincenzo Armenio
IE-Fluids, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale
Università degli Studi di Trieste
Piazzale Europa 1, 34127 Trieste, Italia