

	CUSTOMER:	api nòva energia	Document No.:	
	LOCATION:	FALCONARA (ITALY)	539341-A-700-HR-0350	
	PROJECT:	<i>PROGETTO LNG – Falconara M.ma</i>	Rev. A01	Pag. 1
		<b>Salpem Energy Services</b>		ALLEGATO 2 CLORO – ACQUA FREDDA

# PROGETTO LNG Falconara M.ma

## STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE

### Allegato 2

#### MODELLO DISPERSIONE SCARICO ACQUA FREDDA E CLORO

MAGGIO 2008

	CUSTOMER:	api nòva energia	Document No.:	
	LOCATION:	FALCONARA (ITALY)	539341-A-700-HR-0350	
	PROJECT:	<i>PROGETTO LNG – Falconara M.ma</i>	Rev. A01	Pag. 2
	 <b>Salpem Energy Services</b>		ALLEGATO 2 CLORO – ACQUA FREDDA	

## INDICE

1.	<b>SCOPO DEL LAVORO</b>	<b>3</b>
2.	<b>RIFERIMENTI</b>	<b>3</b>
2.1.	Documenti di progetto	3
2.2.	Bibliografia	3
3.	<b>RIASSUNTO E CONCLUSIONI</b>	<b>4</b>
4.	<b>DATI BASE</b>	<b>5</b>
5.	<b>METODOLOGIA</b>	<b>6</b>
5.1.	Caratteristiche di uno scarico	6
5.2.	Strumenti di Analisi	10
5.3.	<b>DOMINIO DI CALCOLO</b>	11
5.4.	<b>CONDIZIONI INIZIALI E AL CONTORNO</b>	11
5.5	<b>SIMULAZIONE DI UNO SCARICO IN AMBIENTE TIDALE</b>	12

	CUSTOMER:	<b>api nòva energia</b>	Document No.:	
	LOCATION:	FALCONARA (ITALY)	539341-A-700-HR-0350	
	PROJECT:	<b>PROGETTO LNG – Falconara M.ma</b>	Rev. A01	Pag. 3
	 <b>Salpem Energy Services</b>		ALLEGATO 2 CLORO – ACQUA FREDDA	

## 1. SCOPO DEL LAVORO

Lo scopo dell'analisi è la definizione del decadimento termico e dell'andamento degli inquinanti delle acque di scarico, per il progetto **api nòva energia** LNG di Falconara.

## 2. RIFERIMENTI

### 2.1. DOCUMENTI DI PROGETTO

/1/ Snamprogetti, "Brenda Fano Pipeline-Metocean Design Data" doc. No. SPC. LF-E-71501.

### 2.2. BIBLIOGRAFIA

/2/ Patankar S.,V. (1980) "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow". Hemisphere Publishing Corporation.

/3/ Spalding D.B. (1980) "Mathematical modelling of Fluid Mechanics, Heat Transfer and Chemical Reaction processes: a lecture course." Imperial College CFDU report HTS/80/1.

/4/ Tsuchiya M., Murakami S., Mochida A., Kondo K. & Ishida Y., 'Development of a new k-e model for flow and pressure fields around bluff body', J.Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 67 & 68, 169-182, 1997.

	CUSTOMER:	api nòva energia	Document No.:	
	LOCATION:	FALCONARA (ITALY)	539341-A-700-HR-0350	
	PROJECT:	<i>PROGETTO LNG – Falconara M.ma</i>	Rev. A01	Pag. 4
	 		ALLEGATO 2 CLORO – ACQUA FREDDA	

### 3. RIASSUNTO E CONCLUSIONI

Nell'analisi è stato simulato uno scarico termico inclinato di 30°, posto a 7 m sotto il livello del mare, ad una profondità di 30 m (vedi Figura 3/1).

La portata dello scarico è di 16400 m<sup>3</sup>/h (i.e. velocità di efflusso pari a ~2.6 m/s considerando un diametro di 1.5 m).

La temperatura di uscita è di 5° C in un ambiente a 11° C. La concentrazione di cloro nello scarico è pari a 100 µg/l.

Le simulazioni numeriche sono state effettuate con il modello PHOENICS, considerando condizioni di corrente di marea. Il segnale di marea è stato descritto con una sinusoide, considerando un'ampiezza di 0.07 m/s, ampiezza caratteristica dell'area di studio, come indicato dalla Ref. /1/. Sono state simulate un totale di 18 ore (i.e. un ciclo e mezzo di marea).

Gli effetti di dispersione primaria e secondaria dello scarico determinano una rapida attenuazione della concentrazione di cloro e una contestuale attenuazione del delta termico tra lo scarico e l'ambiente. La densità dello scarico superiore a quella ambiente determina un confinamento della concentrazione di cloro in prossimità del fondo, con valori di Cloro pari a 2 µg/l a 1.6 Km di distanza dallo scarico, concentrazioni di 4 µg/l fino ad 1 Km e 20 µg/l a meno di 200 m. L'area perturbata non si estende però per tutta la colonna d'acqua fino alla superficie, restando sempre confinata al di sotto di 1 µg/l nei primi 10 metri sotto il livello del mare.

Per quanto riguarda, invece, l'andamento della temperatura, lo scarico viene immesso nel corpo recettore con una differenza rispetto alla temperatura ambiente di 6°C, ma già nei primi metri, grazie alla diluizione primaria si registrano scarti termici di soli 2°C, a 50-60 m dal punto di immissione. Oltre i 100 m di distanza il decremento di temperatura si assesta sotto gli 0.5 °C.

La Figura 5.5/1 descrive l'andamento di concentrazione del Cloro per differenti fasi del ciclo di marea, considerando una sezione trasversale lungo l'asse y dello scarico, localizzato a x=6000 m. Le curve evidenziate in verde rappresentano le isolinee dei 4 µg/l, mentre le rosse sono quelle dei 2 µg/l.

La Figura 5.5/2 descrive analogamente l'andamento della temperatura.

Da notare che, vicino al punto di immissione la concentrazione di inquinante ed il delta di temperatura sono più alti al fondo, piuttosto che nel resto della colonna d'acqua, coerentemente con quanto indicato sopra relativamente alla densità dell'efflusso.

	CUSTOMER:	api nòva energia	Document No.:	
	LOCATION:	FALCONARA (ITALY)	539341-A-700-HR-0350	
	PROJECT:	PROGETTO LNG – Falconara M.ma	Rev. A01	Pag. 5
	 Salpem Energy Services		ALLEGATO 2 CLORO – ACQUA FREDDA	

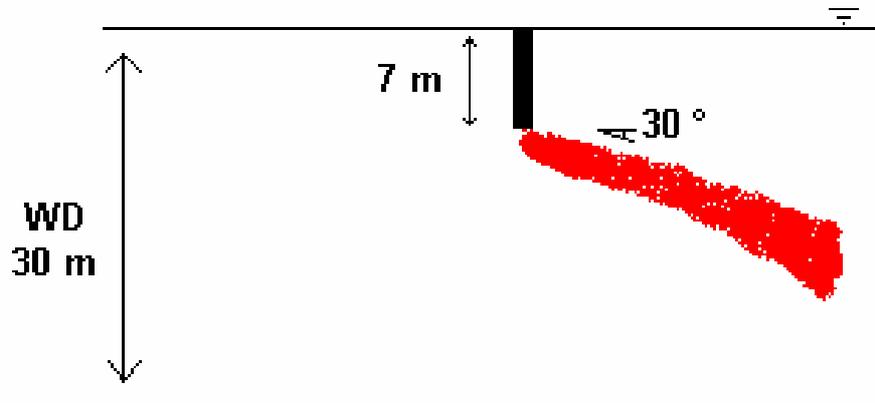


Figura 3/1- Schema dello scarico considerato

#### 4. DATI BASE

I dati di base usati per l'analisi possono essere così riassunti:

##### Quantità totale di acqua trattata:

Portata 16400 m<sup>3</sup>/h

##### Contenuto di inquinanti:

Cl 100 µg/l

##### Caratteristiche dello scarico:

Diametro	1.5 m
Velocità	2.6 m/s
Profondità del mare nel punto di immissione	30 m
Inclinazione (rispetto all'orizzontale)	30° verso il fondo
Temperatura	5°C
ΔT° rispetto all'acqua di mare	6°C

	CUSTOMER:	api nòva energia	Document No.:	
	LOCATION:	FALCONARA (ITALY)	539341-A-700-HR-0350	
	PROJECT:	<i>PROGETTO LNG – Falconara M.ma</i>	Rev. A01	Pag. 6
	 <b>Salpem Energy Services</b>		ALLEGATO 2 CLORO – ACQUA FREDDA	

## 5. METODOLOGIA

### 5.1. CARATTERISTICHE DI UNO SCARICO

La dispersione in mare degli effluenti liquidi degli impianti industriali è uno dei principali problemi per la tutela dell'ambiente del corpo idrico recettore.

In particolare, è fondamentale evitare che gli inquinanti presenti negli scarichi raggiungano aree sensibili, come riserve, parchi naturali o aree soggette ad intensa attività di pesca, mantenendo le concentrazioni al di sotto di valori considerati dannosi per la salute umana e dell'ambiente.

La soluzione comunemente adottata è quella di scaricare le acque trattate tramite condotte sottomarine, in modo da ottenere un tipo di scarico a jet, ed approfittare della conseguente diluizione.

Tale diluizione è principalmente dovuta al mescolamento con il corpo idrico recettore, tramite due processi distinti:

- una diluizione primaria dovuta ai fenomeni di intrappolamento delle acque ambientali e alla turbolenza dello scarico, che determina una diluizione degli inquinanti e una riduzione del delta termico;
- una diluizione secondaria dovuta al regime turbolento dell'ambiente recettore.

La turbolenza indotta dall'immissione dello scarico è di gran lunga maggiore rispetto a quella naturale del corpo recettore e, di conseguenza, la diluizione primaria è molto più efficiente della secondaria.

La diluizione primaria interessa la zona più prossima allo scarico e determina un decremento di concentrazione degli inquinanti di alcuni ordini di grandezza; la diluizione secondaria, invece, agisce su grandi distanze portando a concentrazioni quasi costanti di inquinanti per parecchie centinaia di metri. Pertanto, per ottenere una diluizione efficiente, è fondamentale progettare adeguatamente le caratteristiche dello scarico in modo da ottimizzarne la diluizione primaria.

Uno scarico turbolento può essere schematizzato in quattro differenti regioni (Figura 5.1/1):

- una regione centrale, dove le caratteristiche iniziali dello scarico si conservano;
- una regione di transizione con turbolenza crescente;
- una regione a turbolenza completamente sviluppata;
- una regione finale con velocità di scarico che decresce molto rapidamente lungo l'asse del jet.

La regione centrale si estende dalla fine della condotta di scarico fino a  $6.5 \div 8$  volte il diametro di tale condotta. La sua ampiezza decresce con la distanza dal punto di immissione fino a ridursi a zero, mentre la velocità del jet è costante e uguale a quella di scarico. Nella regione di transizione, i

	CUSTOMER:	api nòva energia	Document No.:	
	LOCATION:	FALCONARA (ITALY)	539341-A-700-HR-0350	
	PROJECT:	<i>PROGETTO LNG – Falconara M.ma</i>	Rev. A01	Pag. 7
	 <b>Salpem Energy Services</b>		ALLEGATO 2 CLORO – ACQUA FREDDA	

processi turbolenti, dovuti alla differenza di velocità tra scarico e ambiente, determinano l'intrappolamento dell'acqua del corpo recettore dentro lo scarico. La regione di transizione circonda la regione centrale e come questa si estende per  $6.5 \div 8$  volte il diametro della condotta. A differenza della regione centrale, però, la sua ampiezza aumenta allontanandosi dal punto di immissione e la velocità diminuisce con la distanza dall'asse del jet fino ad uguagliare la velocità dell'ambiente ai confini della regione.

La terza regione, caratterizzata da turbolenza completamente sviluppata, si estende dal limite delle due regioni precedenti fino a circa 100 volte il diametro della condotta di scarico. In questa regione, l'ampiezza del jet aumenta allontanandosi dallo scarico, a causa del ruolo di trappola del corpo idrico recettore. Per scarichi sommersi e circolari, è stata ricavata la seguente legge empirica:

$$b = 0.076 d$$

dove  $b$  è la metà dell'ampiezza del jet e  $d$  è la distanza dal punto di immissione.

La velocità di scarico lungo l'asse diminuisce con la distanza dall'origine seguendo la legge empirica:

$$V = \frac{6.4D}{d} V_o$$

dove  $D$  è il diametro della condotta e  $V_o$  è la velocità iniziale di scarico.

La turbolenza di un jet dipende dal valore assunto dal numero di Reynolds

$$Re = \frac{V_o D}{\nu}$$

dove  $\nu$  è la viscosità cinematica dell'acqua. Per valori di  $Re$  maggiori di 3000 il jet è completamente turbolento, per valori minori di 500 si passa a condizioni di flusso laminare che si espande e si diluisce molto lentamente. Per valori intermedi la turbolenza non è completamente sviluppata e lo scarico è poco efficiente dal punto di vista della diluizione.

Uno scarico in un corpo stagnante ha un'asse di propagazione rettilineo e una geometria molto semplice, ma questo è un caso limite che si verifica molto raramente in natura, soprattutto nell'ambiente marino. In presenza di una corrente ambientale in direzione trasversale al jet, infatti, l'asse dello scarico si flette lungo la direzione della corrente e l'interazione che ne scaturisce è molto complessa per la continua variazione del rapporto tra velocità del jet e velocità della corrente ambientale Figura 5.1/2.

	CUSTOMER:	api nova energia	Document No.:	
	LOCATION:	FALCONARA (ITALY)	539341-A-700-HR-0350	
	PROJECT:	PROGETTO LNG – Falconara M.ma	Rev. A01	Pag. 8
	 Salpem Energy Services		ALLEGATO 2 CLORO – ACQUA FREDDA	

Un ulteriore aspetto da prendere in considerazione è legato alle condizioni ambientali che generalmente non si mantengono stazionarie, ma sono caratterizzate da direzione ed intensità di corrente variabili nel tempo, con conseguente ampliamento dell'area interessata dalla presenza di inquinanti.

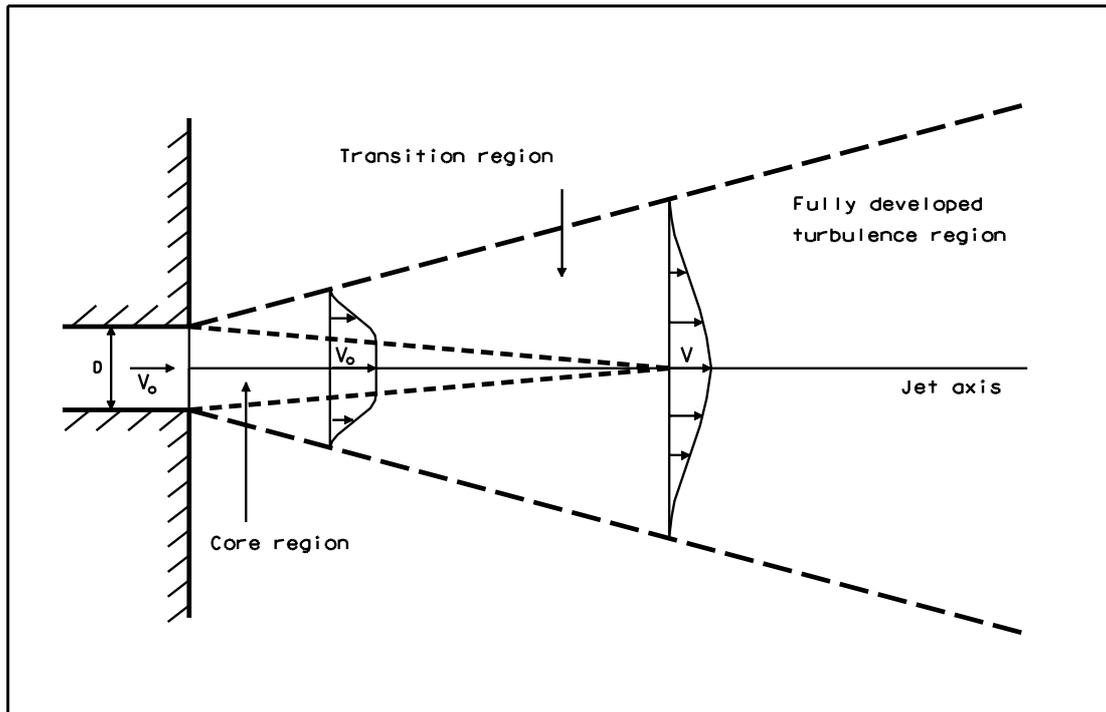
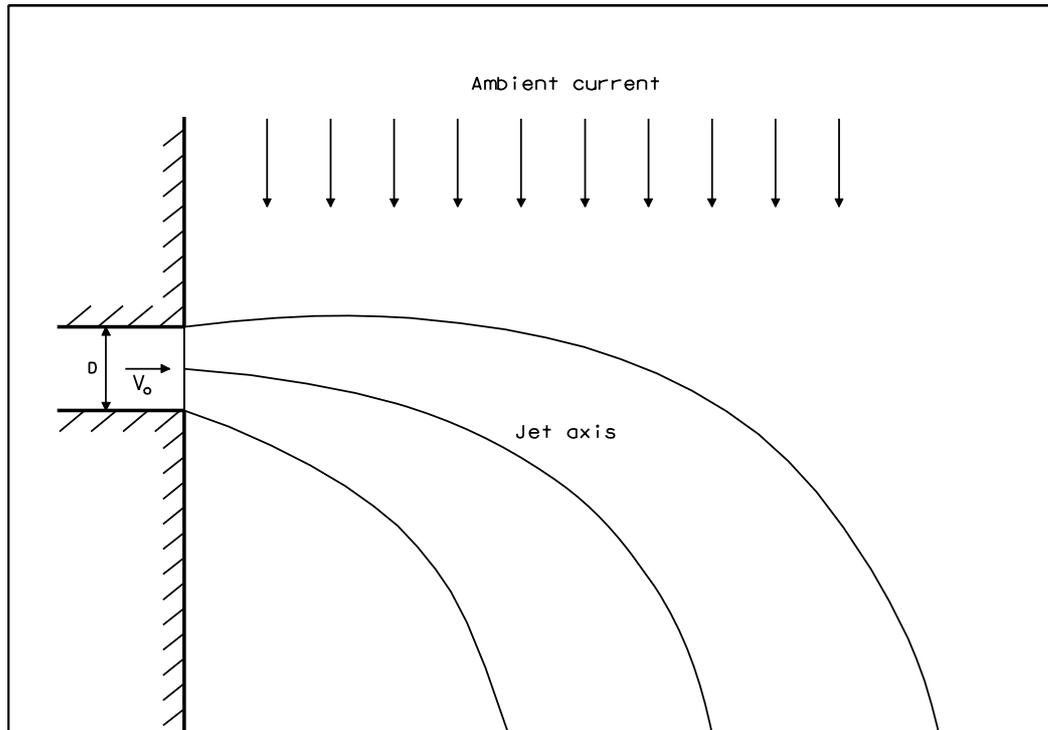


Figura 5.1/1– Schema di uno scarico sommerso

	CUSTOMER:	api nòva energia	Document No.:	
	LOCATION:	FALCONARA (ITALY)	539341-A-700-HR-0350	
	PROJECT:	PROGETTO LNG – Falconara M.ma	Rev. A01	Pag. 9
		Salpem Energy Services	ALLEGATO 2 CLORO – ACQUA FREDDA	



**Figura 5.1/2 – Traiettoria di uno scarico in presenza di corrente ambientale**

Due differenti aspetti andrebbero valutati nella determinazione delle caratteristiche di uno scarico:

- l'estensione dell'area interessata da concentrazioni significative di inquinanti;
- l'estensione dell'area dove una condizione di elevato stress sul fondo potrebbe determinare erosione e danni permanenti alla biocenosi bentonica.

	CUSTOMER:	api nòva energia	Document No.:	
	LOCATION:	FALCONARA (ITALY)	539341-A-700-HR-0350	
	PROJECT:	PROGETTO LNG – Falconara M.ma	Rev. A01	Pag. 10
	 Salpem Energy Services		ALLEGATO 2 CLORO – ACQUA FREDDA	

## 5.2. STRUMENTI DI ANALISI

L'analisi delle diverse condizioni di scarico è stata condotta utilizzando il modello PHOENICS. PHOENICS è composto da un insieme di codici per la simulazione numerica di un flusso fluido e degli scambi di calore. È uno strumento molto flessibile e può simulare situazioni disparate come:

- Geometrie tridimensionali;
- Coordinate cartesiane, polari cilindriche o body-fitted;
- Condizioni transienti (i.e. variabili nel tempo) o stazionarie (i.e. costanti);
- Regimi laminari o turbolenti;
- Sistemi con una o più fasi;
- Reazioni chimiche, combustioni o radiazione;
- Flussi subsonici, transonici o supersonici;
- Mezzi porosi;
- Contorni variabili.

PHOENICS risolve condizioni di flusso che possono essere descritte da equazioni differenziali tipo:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla(\rho\phi\mathbf{v}) - \nabla(\Gamma_{\phi}\nabla\phi) = S_{\phi} \quad (1)$$

| transiente | | convezione | | diffusione | | termine sorgente |

dove

- $\phi$  è la variabile dipendente
- $\rho$  è la densità del mezzo
- $\mathbf{v}$  è il vettore velocità
- $\Gamma_{\phi}$  è il coefficiente di diffusione
- $S_{\phi}$  è il termine sorgente (es. il gradiente di pressione set  $\phi$  è una componente di velocità)

Per  $\phi=1$  l'eq.(1) si riduce all'equazione di continuità.

Per l'integrazione numerica dell'eq.(1) PHOENICS applica il metodo dei volumi finiti (Patankar, 1980 Ref. /2/; Spalding, 1980 Ref. /3/ and /4/), con le variabili scalari definite al centro delle celle computazionali, mentre i vettori vengono definiti sulle facce di tali celle.

Queste equazioni differenziali vanno integrate con condizioni al contorno e leggi che descrivono le proprietà fisiche del dominio. Per una trattazione più dettagliata sulle condizioni considerate nel presente studio, si rimanda ai successivi Paragrafi 5.3 e 5.4

Per descrivere la geometria 3-D sono state scelte delle coordinate Cartesiane ed è stato adottato un modello  $K - \varepsilon$  per descrivere la turbolenza. La differenza di temperatura  $\Delta T^{\circ}$  tra scarico e ambiente è stata assunta pari a  $6^{\circ}$ , come indicato dai dati a disposizione. E' stata presa in considerazione anche la conseguente differenza di densità.

	CUSTOMER:	api nòva energia	Document No.:	
	LOCATION:	FALCONARA (ITALY)	539341-A-700-HR-0350	
	PROJECT:	<i>PROGETTO LNG – Falconara M.ma</i>	Rev. A01	Pag. 11
	 <b>Salpem Energy Services</b>		ALLEGATO 2 CLORO – ACQUA FREDDA	

### 5.3. DOMINIO DI CALCOLO

E' stato scelto un dominio di 12 Km x 100 m con profondità d'acqua pari a 30 m, tale da evitare instabilità fisiche e numeriche ai contorni.

PHOENICS ha girato con una griglia 3-D cartesiana, caratterizzata da 2001 celle lungo la direzione X, 11 lungo Y e 30 lungo la verticale Z. La dimensione delle maglie è stata scelta variabile lungo il piano orizzontale, con una definizione più fitta vicino allo scarico. Lungo la verticale il passo è regolare e pari ad 1 m.

Per migliorare l'accuratezza nel descrivere la geometria esistente è stato attivato il metodo PARSOL, talvolta meglio conosciuto come tecnica "cut-cell". In questo metodo, infatti, le aree e i volumi delle celle sono calcolati con un maggior grado di accuratezza, e le equazioni sono modificate per tener conto delle possibili condizioni di non-ortogonalità.

### 5.4. CONDIZIONI INIZIALI E AL CONTORNO

Al contorno, è stata applicata la condizione di Neumann ( $df/dn=0$ ).

Una condizione di flusso nullo è stata considerata al fondo, con una rugosità pari 0.01 m.

Per essere più realistici e conservativi, la simulazione è stata condotta assumendo condizioni di corrente caratteristiche di un ciclo mareale. Infatti, in tali condizioni, a differenza di condizioni stazionarie, il cambiamento di direzione della corrente determina un riflusso dell'inquinante precedentemente immesso in mare, con potenziale incremento della concentrazione. La marea nell'Adriatico è piuttosto ridotta: il segnale di marea è stato descritto da una sinusoide con un'ampiezza di circa 0.07 m, come descritto dalla Ref. /1/.

E' stato simulato un periodo di 18 h (i.e. un ciclo e mezzo di marea).

	CUSTOMER:	api nòva energia	Document No.:	
	LOCATION:	FALCONARA (ITALY)	539341-A-700-HR-0350	
	PROJECT:	PROGETTO LNG – Falconara M.ma	Rev. A01	Pag. 12
	 Salpem Energy Services		ALLEGATO 2 CLORO – ACQUA FREDDA	

## 5.5 SIMULAZIONE DI UNO SCARICO IN AMBIENTE TIDALE

Considerando uno scarico di 16400 m<sup>3</sup>/h da una condotta di diametro pari a 1.5 m (i.e. velocità di scarico di ~2.6 m/s) è stata valutata la dispersione di inquinanti. Il dominio è interessato da un segnale di marea di ampiezza 0.07 m/s. Correnti più intense avrebbero determinato una maggiore diluizione secondaria, con una estensione dell'area perturbata, ma una riduzione dei massimi di concentrazione. Inoltre, in condizioni di marea, gli inquinanti sono continuamente riportati indietro, verso il punto di immissione dal ciclo di marea inverso, con possibili fenomeni di accumulo e potenziale incremento dei massimi di concentrazione. Di conseguenza, la simulazione risulta essere più conservativa rispetto al caso stazionario.

E' stato simulato un periodo di 18 h (i.e. un ciclo e mezzo di marea).

La dispersione di inquinanti è stata descritta per mezzo di sezioni trasversali lungo l'asse y dello scarico. Sono stati presentati solo i risultati relativi alle ultime 6 ore di simulazione (i.e. l'ultima metà del ciclo di marea). Le 6 ore precedenti avrebbero condotto a risultati simmetrici. In tutte le figure, lo scarico è localizzato in corrispondenza di x=6000 m (i.e. nel mezzo del dominio in x, lungo 12 km).

Le seguenti conclusioni possono essere dedotte:

- Il flusso di Cloro e di acqua fredda è confinato dalla presenza del fondale e perde velocemente le proprie caratteristiche e la concentrazione di inquinante allontanandosi dal punto di efflusso;
- A causa della densità dello scarico superiore alla densità ambiente, le più alte concentrazioni si registrano al fondo, con valori di Cloro pari a 2 µg/l a 1.6 Km di distanza dallo scarico, concentrazioni di 4 µg/l fino ad 1 Km e 20 µg/l a meno di 200 m. L'area perturbata non si estende per tutta la colonna d'acqua fino alla superficie: nei primi 10 metri sotto il livello del mare la concentrazione di cloro è minore di 1 µg/l;
- Per quanto riguarda, invece, l'andamento della temperatura, lo scarico viene immesso nel corpo recettore con un valore iniziale di 5°C, ossia con una differenza rispetto alla temperatura ambiente di 6°C, ma già nei primi metri, grazie alla diluizione primaria si registrano scarti termici di soli 2°C, a 50-60 m dal punto di immissione. Oltre i 100 m di distanza il decremento di temperatura si assesta sotto gli 0.5 °C;
- Vicino al punto di immissione la concentrazione di inquinante ed il decremento di temperatura sono più alti al fondo, piuttosto che nel resto della colonna d'acqua, coerentemente con il tipo di scarico considerato e con la sua densità (acqua fredda e clorata più pesante dell'acqua circostante).

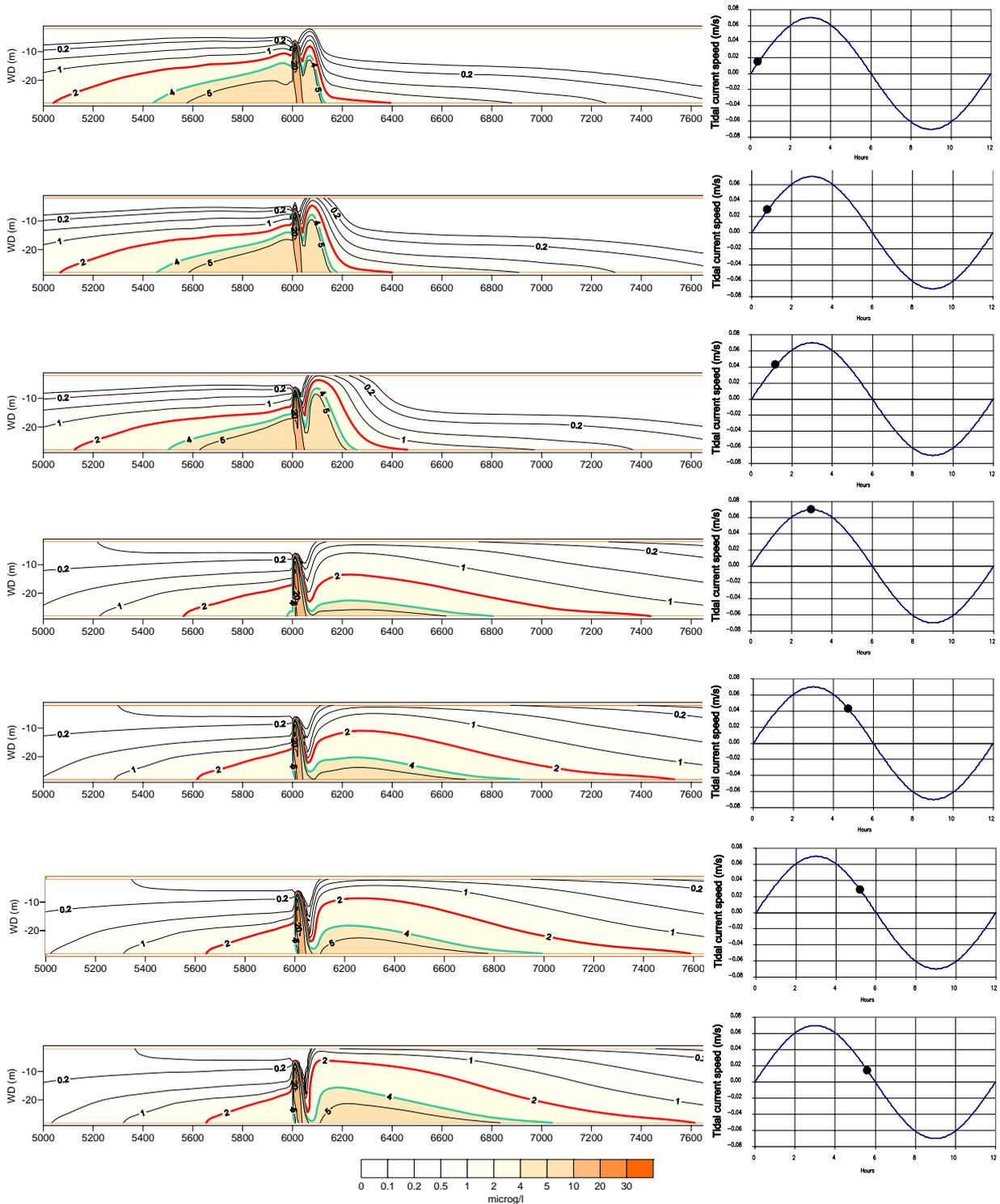
La Figura 5.5/1 descrive l'andamento di concentrazione del Cloro per differenti fasi del ciclo di marea, considerando una sezione trasversale lungo l'asse y dello scarico, localizzato a x=6000 m.

	CUSTOMER:	api nòva energia	Document No.:	
	LOCATION:	FALCONARA (ITALY)	539341-A-700-HR-0350	
	PROJECT:	<i>PROGETTO LNG – Falconara M.ma</i>	Rev. A01	Pag. 13
		<b>Salpem Energy Services</b>	ALLEGATO 2 CLORO – ACQUA FREDDA	

Le curve evidenziate in verde rappresentano le isolinee dei 4 µg/l, mentre le rosse sono quelle dei 2 µg/l.

La La Figura 5.5/2 descrive analogamente l'andamento della temperatura.

Da sottolineare che la dispersione del Cloro e della temperatura segue molto bene l'andamento del ciclo di marea, registrando un accumulo iniziale a sinistra dello scarico, dovuto alle precedenti 6 ore di ciclo, in cui la direzione del flusso era diretta verso x minori. Coerentemente, durante i successivi step, il plume si sposta progressivamente verso x crescenti.



**Figura 5.5/1 – Isolinee di concentrazione (a sinistra) e corrispondenti fasi tidali (destra). Scarico a x=6000 m.**

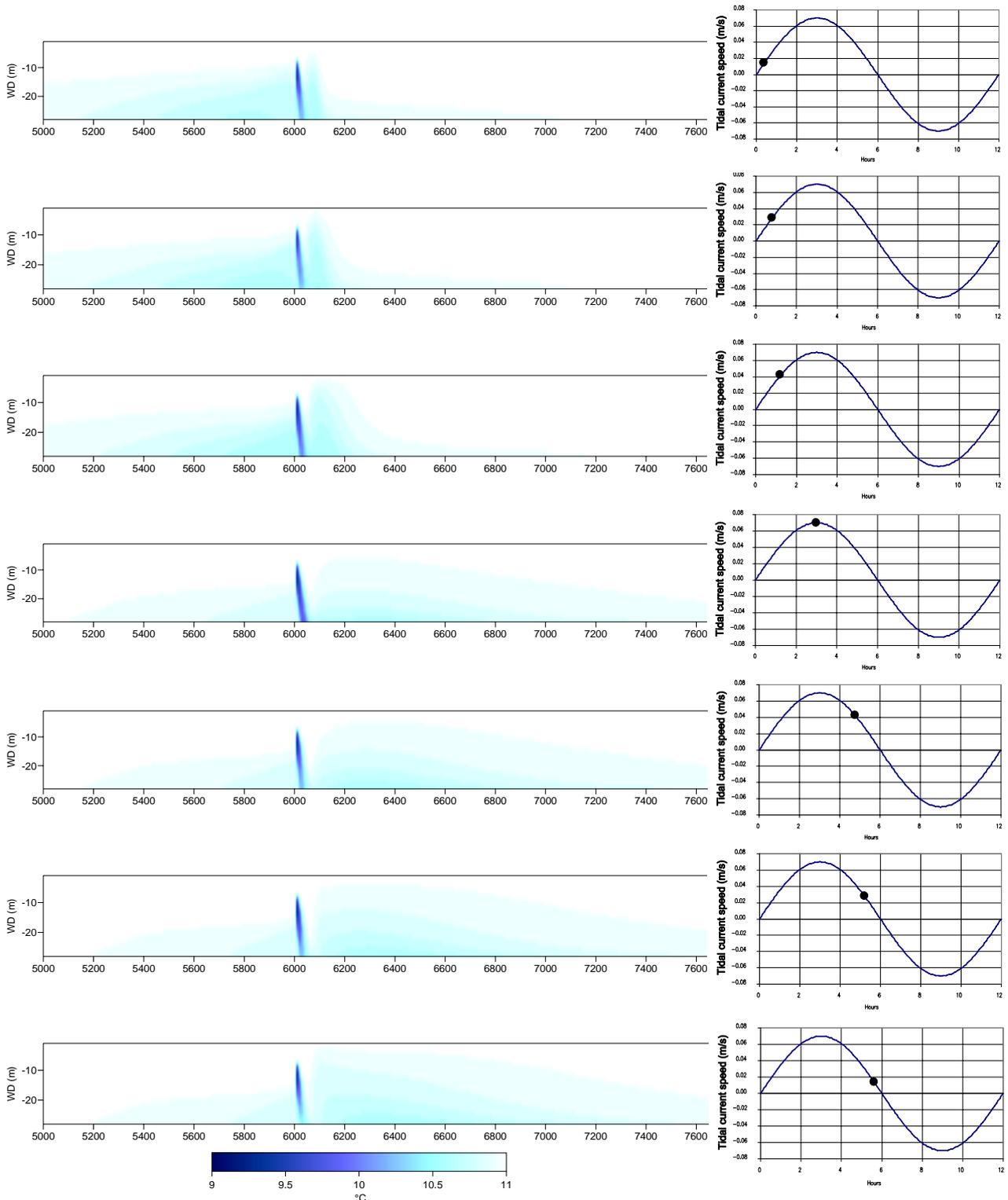


Figura 5.5/2–Isolinee di temperatura (a sinistra) e corrispondenti fasi tidali (destra). Scarico a x=6000 m.