

RAPPORTO

USO RISERVATO

APPROVATO

C0008598

Cliente Enel Produzione S.p.a.

Oggetto Centrale Termoelettrica "Edoardo Amaldi" di LA CASELLA.
Richiesta estensione portata
Studio Preliminare Ambientale (art.19 D.Lgs 152/2006 e ss.mm.ii.)

Allegato B – Dispersione delle acque di raffreddamento

Ordine Attingimento n. 3500091055 del 07/05/2020

Note Rev. 0 (A1300002516 – Lettera di trasmissione C0008544)

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

N. pagine 41 **N. pagine fuori testo** 0

Data 08/06/2020

Elaborato STC - Dassie Giuseppe Augusto, STC - Colombo Daniela
C0008598 3800 AUT C0008598 3821 AUT

Verificato EDM - Granata Tommaso
C0008598 3744 VER

Approvato EDM - Il Responsabile - Sala Maurizio
C0008598 3741 APP

CESI S.p.A.

Via Rubattino 54
I-20134 Milano - Italy
Tel: +39 02 21251
Fax: +39 02 21255440
e-mail: info@cesi.it
www.cesi.it

Capitale sociale € 8.550.000 interamente versato
C.F. e numero iscrizione Reg. Imprese di Milano 00793580150
P.I. IT00793580150
N. R.E.A. 429222

© Copyright 2020 by CESI. All rights reserved

Pag. 1/41

Indice

1	SOMMARIO	3
2	INTRODUZIONE.....	4
2.1	Scopo dello studio	4
2.2	Articolazione dell'attività	5
	Documenti di riferimento.....	7
3	CONDIZIONI DI ANALISI.....	8
3.1	Considerazioni generali.....	8
3.1.1	Dati geometrici di impianto.....	8
3.1.2	Caratteristiche dell'opera di presa e di scarico	9
3.1.3	Condizioni di esercizio dell'impianto.....	12
3.1.4	Batimetria dell'area.....	12
3.1.5	Livelli e portate del fiume Po.....	15
4	MODELLO NUMERICO DI SIMULAZIONE.....	19
4.1	Equazioni utilizzate e tecniche di soluzione	19
4.2	Definizione del dominio di calcolo	20
4.2.1	Reticolo di calcolo.....	21
4.2.1	Condizioni al contorno e condizioni iniziali	23
5	FASE DI CALIBRAZIONE.....	24
5.1	Metodologia di verifica del rispetto dei limiti di legge.....	24
5.2	Simulazione di alcune campagne di misura	25
6	SCENARI DI CALCOLO	29
6.1	Introduzione	29
6.2	Scenari attuali in funzionamento a pieno carico.....	30
6.2.1	Scenario 1	31
6.2.2	Scenario 2	32
6.2.3	Scenario 3	33
6.2.4	Scenario 4	34
6.3	Scenari futuri in funzionamento a pieno carico	35
6.3.1	Scenario 5	36
6.3.2	Scenario 6	37
6.3.3	Scenario 7	38
6.3.4	Scenario 8	39
7	ANALISI DEI RISULTATI	40
7.1	Scenari attuali in condizioni di funzionamento a pieno carico	40
7.2	Scenari futuri in condizione di funzionamento a pieno carico.....	40
8	CONCLUSIONI	41

STORIA DELLE REVISIONI

Numero revisione	Data	Protocollo	Lista delle modifiche e/o dei paragrafi modificati
0	08/06/2020	C0008598	Prima emissione

1 SOMMARIO

La Centrale Termoelettrica Edoardo Amaldi è ubicata nel Comune di Castel San Giovanni (PC), a circa 4 km dal centro abitato, al confine con il Comune di Sarmato (a circa 3 km dal centro abitato) e a circa 20 km dal Comune di Piacenza, capoluogo provinciale. La centrale si colloca in destra orografica del fiume Po (Figura 1).

L'impianto attuale è costituito da n. 4 unità di produzione uguali, in ciclo combinato, di circa 381 MW_e ciascuna per una potenza elettrica complessiva pari a circa 1524 MW_e. Ciascuna unità è composta da una turbina a vapore e una turbina a gas in configurazione *multi-shaft*, con raffreddamento del condensatore in ciclo aperto attraverso l'utilizzo di acqua del fiume Po.

Enel ha chiesto a CESI la verifica del rispetto della legislazione vigente in merito alla dispersione delle acque di raffreddamento dei condensatori in un nuovo assetto d'impianto considerando la portata delle acque di raffreddamento di 40 m³/s, come in origine, e un incremento termico allo scarico pari a 8.3 °C.

La caratterizzazione ambientale del sito è stata necessaria per la definizione delle condizioni più critiche e/o più probabili su cui impostare ed eseguire le simulazioni numeriche di verifica.

Le analisi per la dispersione dello scarico delle acque di raffreddamento dell'impianto sono state condotte attraverso il codice di calcolo MIKE21 del Danish Hydraulic Institute (DHI) che risolve le equazioni bidimensionali di conservazione della massa, della quantità di moto e dell'energia per il calcolo del campo di moto e della temperatura. Il codice simula la dispersione termica in base a condizioni iniziali e al contorno assegnate spazialmente e temporalmente che definiscono lo scenario di analisi (Rif. 1). La tipologia dello scarico e delle prese, unitamente alla topografia delle sponde, sono stati considerati con un dettaglio sufficiente agli scopi dello studio.

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

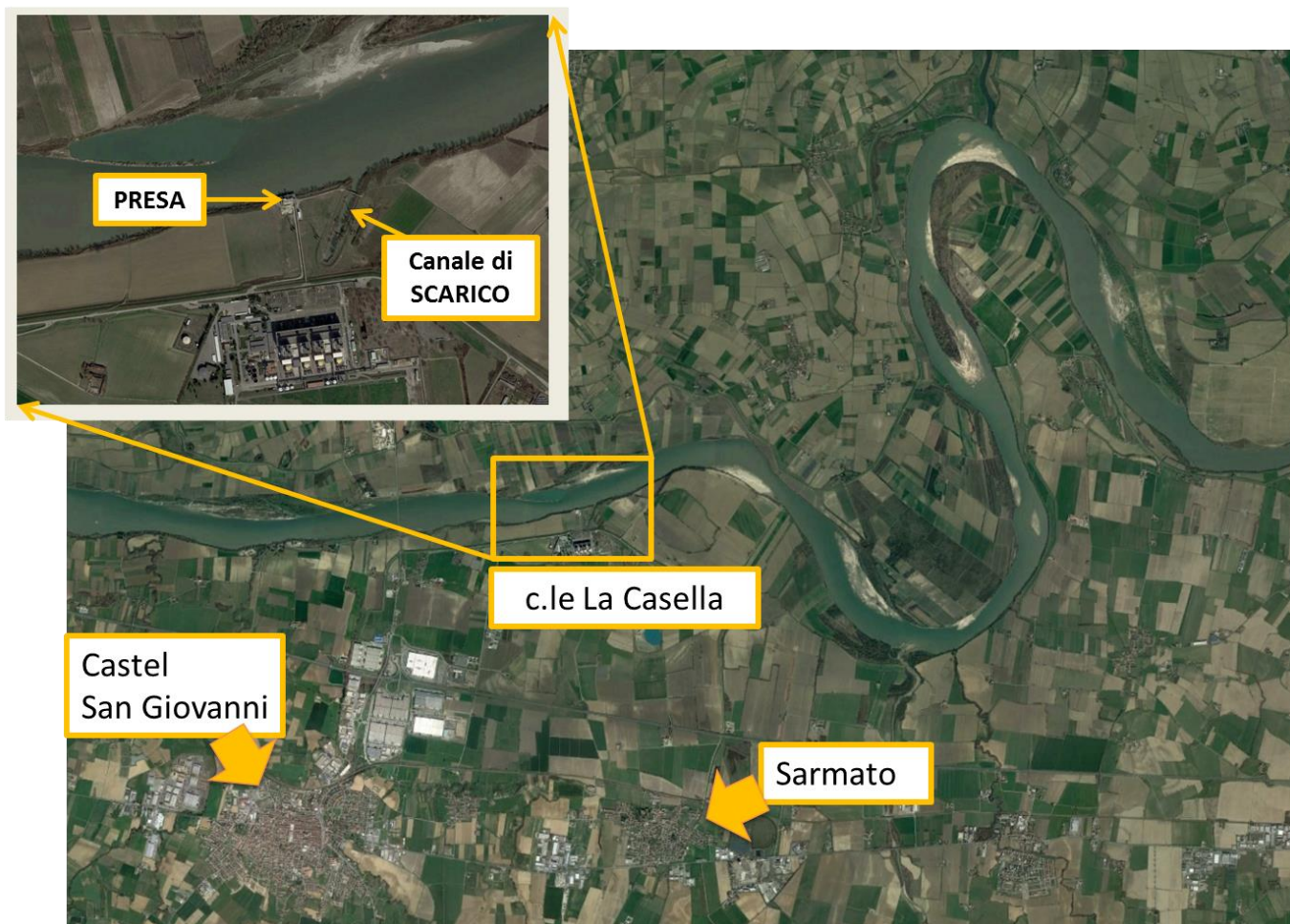


Figura 1 Corografia generale del sito di ubicazione della centrale di La Casella con indicazione dell'area di presa e di scarico delle acque di circolazione della centrale.

2 INTRODUZIONE

2.1 Scopo dello studio

Lo studio ha inteso valutare, mediante l'applicazione di opportuna modellistica numerica, la dispersione termica del pennacchio caldo costituito dalle acque di raffreddamento provenienti dai condensatori e rilasciate all'opera di scarico della centrale termoelettrica di La Casella (Figura 2) nell'assetto futuro di funzionamento.

La centrale termoelettrica di La Casella (Piacenza), di proprietà di Enel Produzione S.p.A., è attualmente costituita da quattro gruppi a ciclo combinato (gruppi 1, 2, 3 e 4) da 381 MW_e. Per il ciclo di condensazione e raffreddamento, l'impianto può utilizzare acqua prelevata dal fiume Po nella misura massima in concessione di 30 m³/s, secondo quanto autorizzato dal Ministero dei Lavori Pubblici fino al 26/06/2054. Più in dettaglio, la Centrale Termoelettrica di La Casella è titolare della Concessione per la derivazione di acqua dal fiume Po n°1680 del 26 giugno 1984 della durata di 70 anni, rilasciata dal Ministero Lavori Pubblici di concerto con il Ministero delle Finanze e del relativo Disciplinare n. 22 del 6 luglio 1982. La concessione prevedeva la derivazione dell'acqua dal fiume Po per 400 moduli totali e una portata massima di 40 m³/s, con obbligo della sua integrale restituzione. Nel 2015 è stata comunicata da parte del proponente la rinuncia alla derivazione di 230 moduli, mantenendo quindi la concessione per

170 moduli e una portata massima di 30 m³/s; detta modifica è stata approvata dalla Giunta Regionale dell'Emilia-Romagna con Determinazione n. 6049 del 18.05.2015. Ad oggi, pertanto, la concessione in essere, autorizza il prelievo di 170 moduli dal fiume Po "da utilizzare per uso industriale a scopo di raffreddamento", con obbligo della sua integrale restituzione.

In considerazione di future nuove condizioni di funzionamento si è reso necessario valutare il rispetto del limite di legge relativamente allo scarico caldo delle acque di raffreddamento nel segmento di fiume Po compreso tra l'opera di presa della centrale ed un tratto, a valle dell'opera di scarico, sufficiente a determinare la dispersione del pennacchio termico conseguente allo scarico.

Le verifiche sono state condotte con riferimento al D. Lgs n° 152/06 e s.m.i. che, nell'allegato 5 alla Parte Terza (Limiti di emissione degli scarichi idrici), punto 1 (Scarichi in corpi d'acqua superficiali), tabella 3 (Valori limite di emissione in acque superficiali e in fognatura), parametro 2 (temperatura), nota 1, recita tra l'altro:

"Per i corsi d'acqua la variazione massima tra temperature medie di qualsiasi sezione del corso d'acqua a monte e a valle del punto di immissione non deve superare i 3 °C. Su almeno metà di qualsiasi sezione a valle tale variazione non deve superare 1 °C."

L'obiettivo dello studio in oggetto è quello di valutare la dispersione termica nel fiume Po tenendo conto del futuro assetto di funzionamento. La verifica è stata eseguita in condizioni di funzionamento dell'impianto a pieno carico nell'assetto attuale e in quello futuro.

Lo studio in oggetto analizza, per gli assetti di esercizio ipotizzati, la dispersione termica della centrale nelle condizioni ambientali (di temperatura, portata e livello del tratto di fiume interessato) caratteristiche del sito e ritenute più probabili e/o più a rischio. L'analisi è stata condotta con il codice di calcolo MIKE21 del Danish Hydraulic Institute (DHI) che risolve le equazioni bidimensionali di conservazione della massa, della quantità di moto e dell'energia per il calcolo del campo di moto e della temperatura. Il codice simula la dispersione termica in base a condizioni iniziali e a condizioni al contorno assegnate spazialmente e temporalmente che definiscono lo scenario di analisi.

Per quanto riguarda le portate ed i livelli del Po da assegnare per le condizioni di monte e valle del modello, essi sono stati dedotti dalle registrazioni di livello/portata alle stazioni di Spessa (circa 9 km a monte dell'impianto), di Piacenza (circa 20 km a valle dell'impianto) e dai valori registrati alla centrale.

2.2 Articolazione dell'attività

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

- raccolta ed analisi dei dati disponibili utili alla caratterizzazione ambientale del sito e dello scarico caldo e della presa della centrale localizzati in sponda destra del fiume Po; da essi è stato definito l'insieme dei parametri ambientali e di esercizio che influenzano il campo idrodinamico e termico; l'analisi è contenuta nel capitolo 3;
- descrizione del codice di calcolo utilizzato e definizione di un reticolo di calcolo di estensione sufficiente a garantire l'instaurarsi di condizioni di equilibrio e che tenga conto della conformazione dell'alveo e delle sponde fluviali, della eventuale presenza di opere in alveo (per esempio pile di ponti) o sulle sponde (pennelli, ecc.) e di quelle relative allo scarico ed alla presa della centrale; la descrizione del modello è riportata al capitolo 4;
- calibrazione del modello, esecuzione delle simulazioni numeriche, analisi ed elaborazione dei risultati ottenuti e stesura del rapporto tecnico conclusivo; la disamina dei risultati delle simulazioni è contenuta nei capitoli 5, 6 e 7, mentre le considerazioni conclusive derivanti dallo studio sono oggetto del capitolo 8.

Le analisi per la dispersione dello scarico delle acque di raffreddamento degli impianti nelle condizioni meteo e ambientali caratteristiche del sito sono state condotte attraverso un codice di simulazione numerica bidimensionale in grado di caratterizzare con sufficiente dettaglio l'idrodinamica dell'area coinvolta. Data la tipologia dello scarico e la natura del problema, le simulazioni sono state condotte con il codice MIKE21 (Rif. 1), le cui principali caratteristiche sono descritte all'interno del capitolo 4.

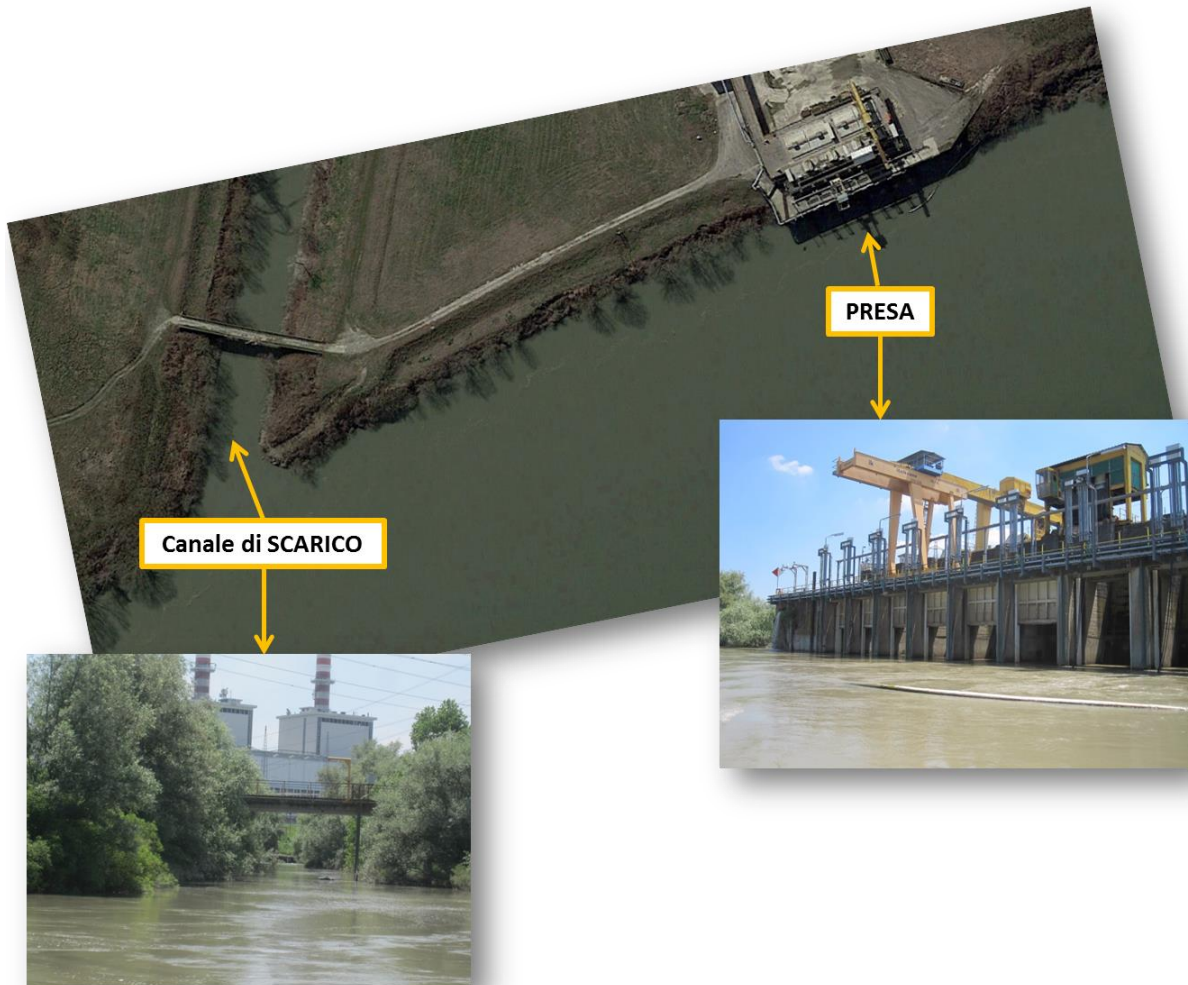


Figura 2 Localizzazione in sponda destra al fiume Po della presa e dello scarico delle acque di circolazione della centrale di La Casella (foto CESI giugno 2018).

Documenti di riferimento

- Rif. 1 MIKE by DHI (2016). "MIKE 21 & MIKE 3 FLOW MODEL FM. Hydrodynamic and Transport Module. Scientific documentation."
- Rif. 2 Enel Engineering and Construction. "La Casella. Planimetria generale d'impianto." N. disegno PBCITC00205.
- Rif. 3 Enel Engineering and Construction. "Impianto La Casella. Modifica opera di presa." N. disegno PBCOP40006.
- Rif. 4 Sito di ARPAEM: https://www.arpae.it/sim/pagine/osservazioni_e_dati
- Rif. 5 Centrale Termoelettrica "Edoardo Amaldi" di La Casella (PC) - "Misure di temperatura per la verifica del rispetto della prescrizione AIA relativa all'incremento di temperatura del corpo idrico ricettore – Estate 2013", Rapporto CESI B3020513, del 19/09/2013
- Rif. 6 Centrale Termoelettrica "Edoardo Amaldi" di La Casella (PC) - "Misure di temperatura per la verifica del rispetto della prescrizione AIA relativa all'incremento di temperatura del corpo idrico ricettore – Inverno 2016", Rapporto CESI B6001286, del 26/01/2016
- Rif. 7 D. Lgs 152/06 e ss.mm.ii., "Norme in materia ambientale", 3 aprile 2006 n.152 (Suppl. ordinario gazz. Uff. n. 88 del 14/04/2006)
- Rif. 8 Metodica APAT_IRSA-CNR "Metodi analitici per le acque. Volume 1. Sezione 2100_Temperatura" APAT Manuali e linee guida, 29/2003

3 CONDIZIONI DI ANALISI

3.1 Considerazioni generali

Lo scarico dell'acqua calda proveniente dai circuiti di raffreddamento delle centrali termoelettriche è tipicamente condizionato dalla conformazione delle opere di restituzione e dalle condizioni idrauliche del sito, oltre che da quelle di esercizio degli impianti. Pertanto, attraverso la raccolta e l'analisi dei dati caratteristici del sito e degli impianti, è necessario individuare le condizioni di simulazione più adatte allo scopo dello studio.

La raccolta e l'analisi dei dati fa dunque riferimento alle seguenti tipologie di:

- dati geometrici di impianto, relativi soprattutto alle opere di presa e di scarico;
- dati riguardanti la configurazione dei corpi idrici, la relativa batimetria e le opere presenti lungo il corpo idrico (tipicamente pile di ponti, pennelli, ecc.);
- dati relativi ai valori di temperatura, portata e livello dei corpi idrici;
- dati di esercizio della centrale, quali potenza, modalità di esercizio e portata di presa/scarico dei circuiti di raffreddamento.

Nel presente capitolo si analizzeranno in dettaglio le diverse tipologie di dati allo scopo di definire correttamente gli scenari di analisi.

3.1.1 *Dati geometrici di impianto*

I dati geometrici che interessano ai fini dell'analisi del campo termico e di moto nel tratto di fiume interessato dallo studio, riguardano essenzialmente le opere di presa e di scarico della centrale illustrate nella precedente Figura 2.

Le informazioni relative alle caratteristiche costruttive delle opere di presa e di scarico delle acque di circolazione sono state fornite da Enel (Rif. 2 e Rif. 3); la Figura 3 che segue ne mostra la localizzazione in pianta (Rif. 2).

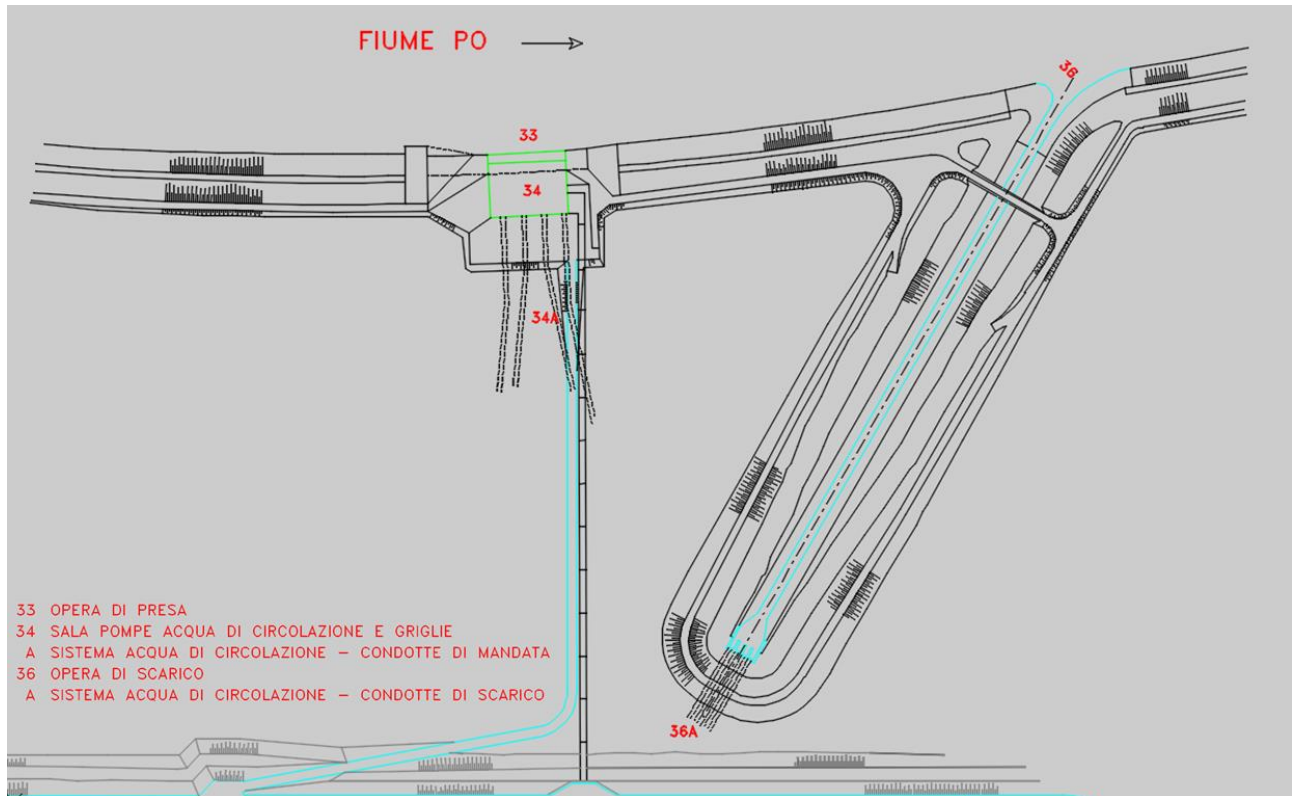


Figura 3 Localizzazione in pianta della presa e del canale di scarico delle acque di circolazione della centrale di La Casella (Rif. 2).

3.1.2 Caratteristiche dell'opera di presa e di scarico

L'acqua prelevata dal fiume Po è impiegata principalmente nei condensatori per il raffreddamento e la condensazione del vapore in uscita dalle turbine a vapore delle unità di produzione; l'acqua di raffreddamento viene quindi restituita direttamente al fiume attraverso un canale di scarico di proprietà di Enel.

Più in dettaglio, l'opera di presa è costituita da un totale di 8 camere di presa, di larghezza pari a 4 m ciascuna e separate da setti di 1.2 m di spessore. La Figura 4 e la Figura 5 mostrano le camere di presa in pianta e in sezione.

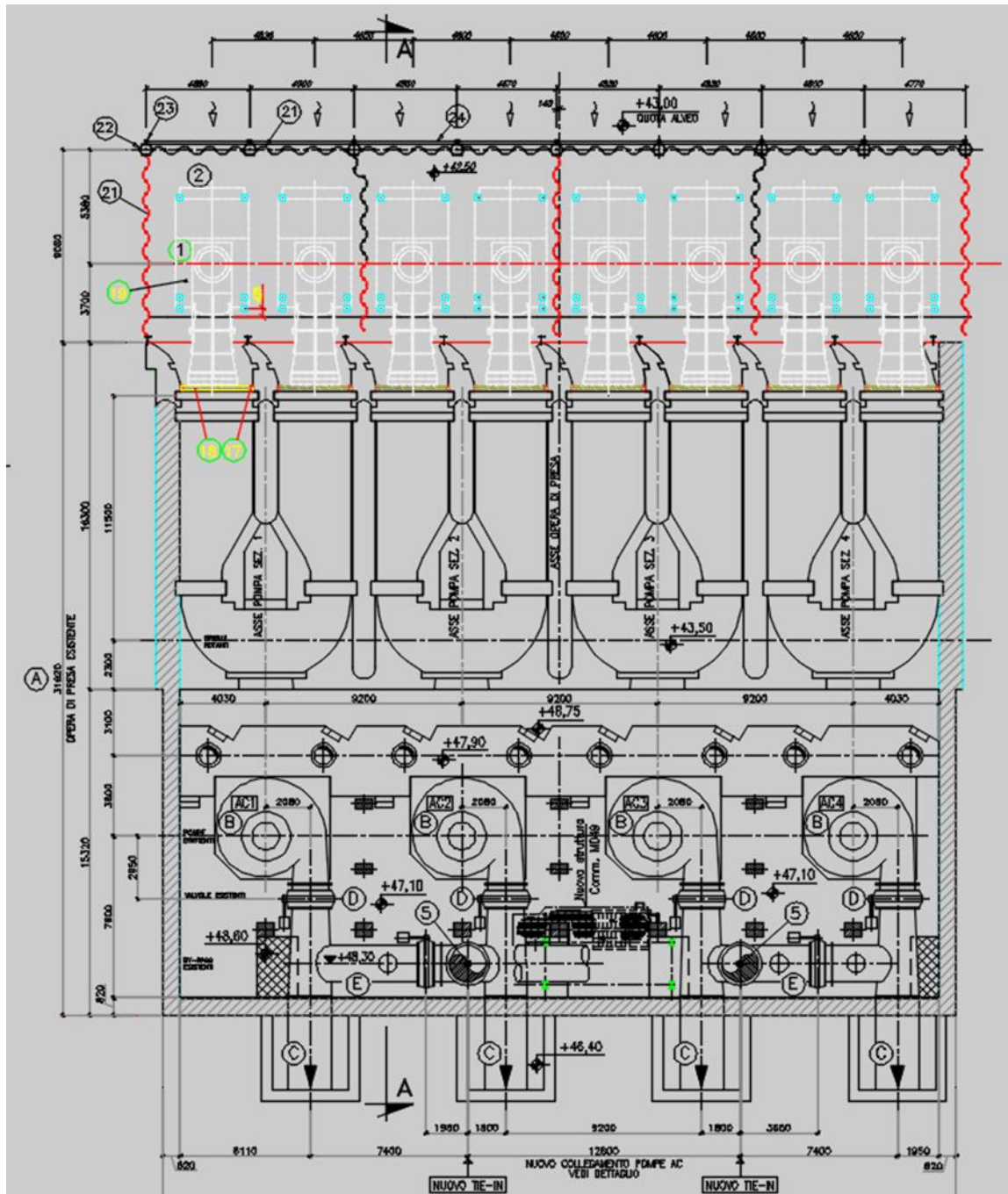


Figura 4 Vista in pianta della presa delle acque di circolazione della centrale di La Casella (Rif. 3).

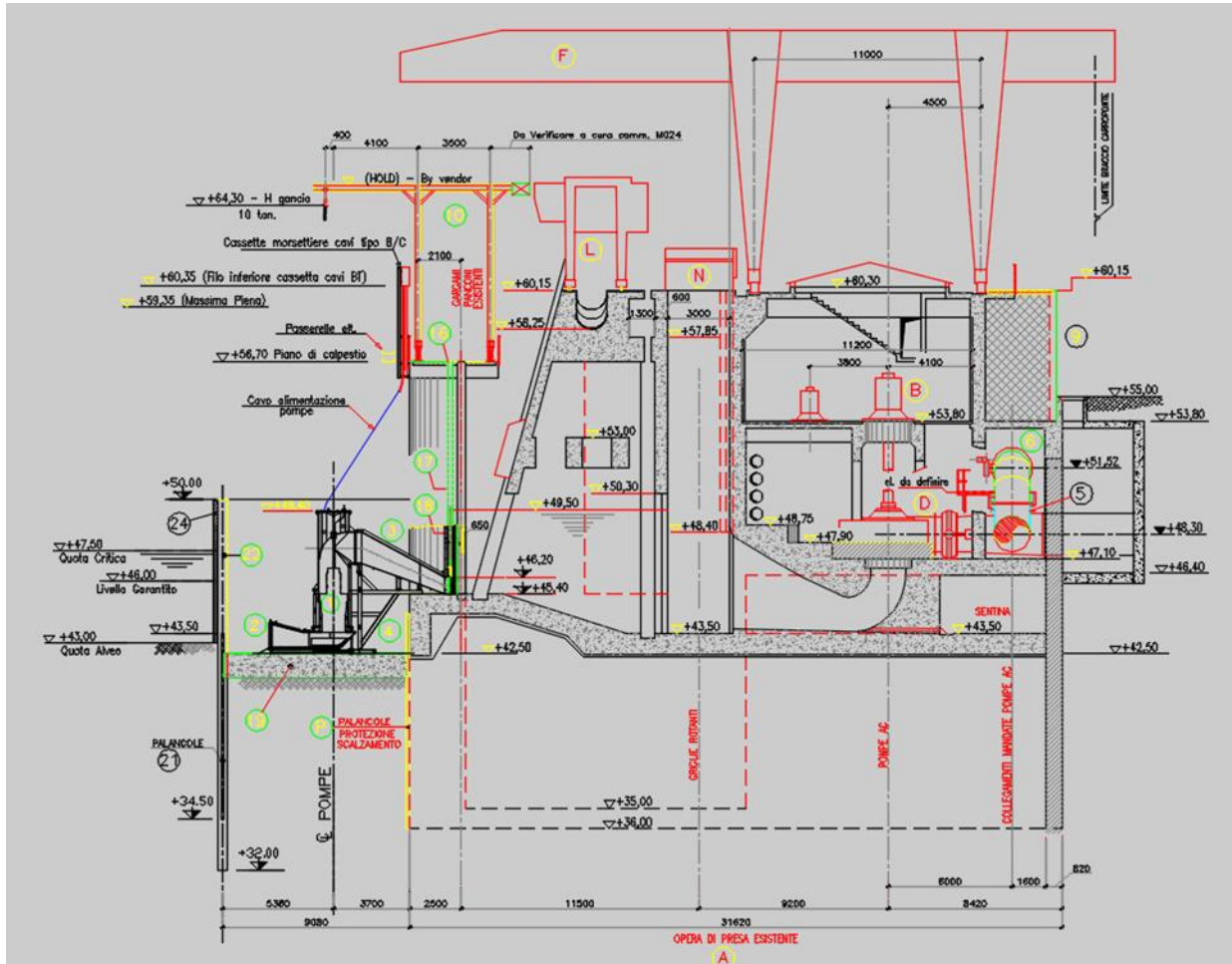


Figura 5 Vista in sezione della presa delle acque di circolazione della centrale di La Casella (Rif. 3).

Il canale di scarico della centrale di La Casella è un canale artificiale di proprietà di Enel, caratterizzato da una sezione trasversale larga 8 m alla base (alla quota di 46 m s.l.m.) e con pendenze delle sponde di 2/1 fino alla quota assoluta di 51.8 m s.l.m., e di 3/2 fino alla successiva quota di 51.8 m s.l.m. Le sponde, originariamente rivestite in pietrame naturale e legno (buzzi), si sono progressivamente ricoperte di vegetazione come rilevabile dalla Figura 6.



Figura 6 Foto della presa e dello scarico della centrale (a sinistra, fonte Enel) e foto di dettaglio del segmento finale di immissione in Po del canale di scarico (a destra; giugno 2018, fonte CESI).

3.1.3 Condizioni di esercizio dell'impianto

Di seguito sono riportate le condizioni di funzionamento a pieno carico del circuito delle acque di raffreddamento della centrale di La Casella nell'assetto attuale e futuro.

ASSETTO ATTUALE CIRCUITO AC IN FUNZIONAMENTO A PIENO CARICO:

- 30 m³/s di portata complessiva delle pompe AC per il circuito di raffreddamento;
- 7 °C di incremento termico dell'acqua prelevata alla presa e restituita al Po.

ASSETTO FUTURO CIRCUITO AC IN FUNZIONAMENTO A PIENO CARICO:

- 40 m³/s di portata complessiva delle pompe AC per il circuito di raffreddamento;
- 8.3°C di incremento termico dell'acqua prelevata alla presa e restituita al Po.

3.1.4 Batimetria dell'area

L'andamento dei fondali nel segmento di fiume Po oggetto della verifica è stato ricavato da un rilievo batimetrico condotto da CESI nelle giornate del 15 e 16 giugno 2018. La Figura 7 mostra le linee di navigazione seguite durante il rilievo batimetrico; il dettaglio in alto a sinistra mostra il percorso di navigazione tenuto nei due chilometri a valle della presa della centrale con transetti trasversali aventi interasse di circa 100 m.

I giorni del rilievo sono coincisi con la fase calante di una piena del fiume (portata del Po superiore a 1500 m³/s) seguita ad un periodo di piogge intense protrattesi per alcuni giorni consecutivi; ciò ha consentito il rilievo di aree che, in condizioni normali, sarebbero state interdette alla navigazione come riscontrabile dalle tracce del percorso in corrispondenza delle isole sabbiose antistanti l'area di presa/scarico.

L'elevato livello del fiume presente nei giorni del rilievo è testimoniato anche dalla tracimazione del pennello, normalmente emerso, esistente davanti all'area di presa e scarico della centrale. Le foto contenute in Figura 8 sono state scattate durante il rilievo e mostrano la tracimazione del pennello per la sua intera lunghezza dal radicamento a terra dello stesso.

Il rilievo di sezioni trasversali così ampie ha consentito di ricostruire l'andamento batimetrico del fondale del segmento di fiume Po analizzato nel presente studio; la batimetria risultante è riportata in Figura 9.



Figura 7 Linee di navigazione del rilievo batimetrico condotto da CESI il 15 giugno (rilievo del segmento di valle, linee blu) e il 16 giugno (rilievo del segmento di monte, linee rosse) 2018.

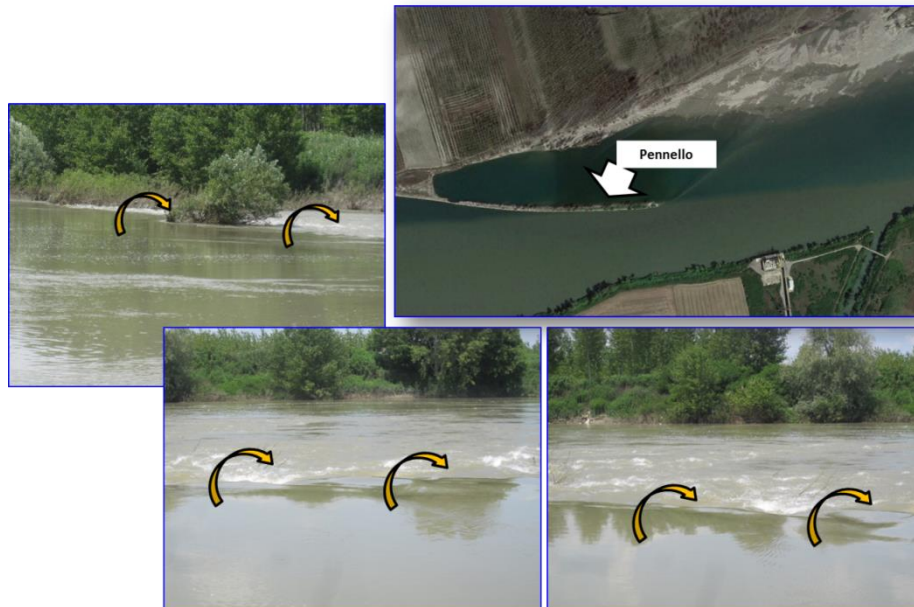


Figura 8 Tracimazione del pennello, normalmente emerso, davanti all'area di presa/scarico della centrale (foto CESI durante il rilievo batimetrico eseguito a giugno 2018)

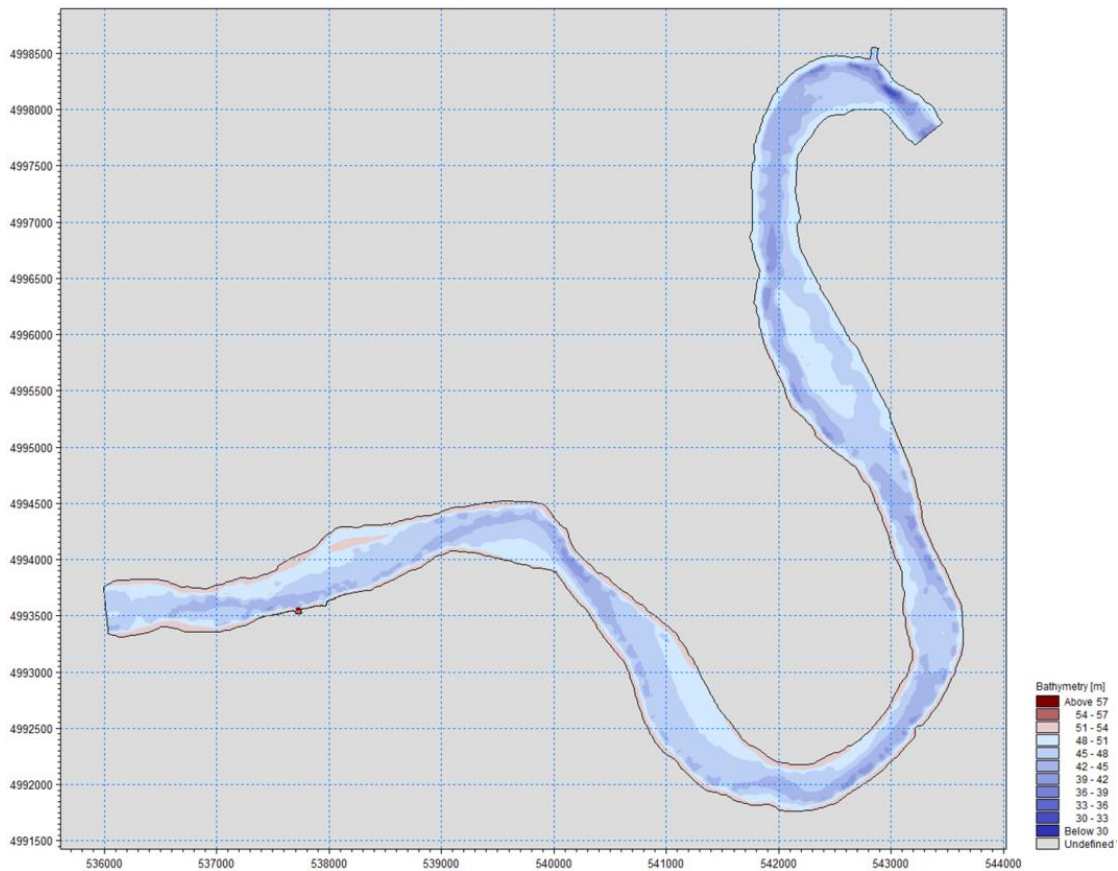


Figura 9 Batimetria del segmento di 16 km circa del fiume Po così come risultante dalla schematizzazione nel modello di calcolo

3.1.5 Livelli e portate del fiume Po

Al fine di calcolare le quote assolute (sul livello del mare) dei rilievi batimetrici sono state utilizzate le registrazioni alle stazioni idrometriche del Po a Spessa e a Piacenza scaricabili dal sito ARPA dell'Emilia Romagna (Rif. 4) corrispondenti al periodo temporale dei rilievi e riassunte nella Tabella 1.

Tabella 1 Livelli idrologici misurati alle stazioni sul Po di Spessa e Piacenza nei giorni del rilievo (Rif. 4)

SPESSA PO (zero idrometrico 52.13 m)				PIACENZA (zero idrometrico 41.97 m)			
data	ora	livello idrologico (m quota pelo libero (m))		data	ora	livello idrologico (m) quota pelo libero (m)	
14/06/2018	08:00:00	1.09	53.22	14/06/2018	08:00:00	3.06	45.03
14/06/2018	08:30:00	1.11	53.24	14/06/2018	08:30:00	3.05	45.02
14/06/2018	09:00:00	1.12	53.25	14/06/2018	09:00:00	3.02	44.99
14/06/2018	09:30:00	1.11	53.24	14/06/2018	09:30:00	3.01	44.98
14/06/2018	10:00:00	1.1	53.23	14/06/2018	10:00:00	3.03	45
14/06/2018	10:30:00	1.06	53.19	14/06/2018	10:30:00	3.01	44.98
14/06/2018	11:00:00	1.07	53.2	14/06/2018	11:00:00	3.05	45.02
14/06/2018	11:30:00	1.06	53.19	14/06/2018	11:30:00	3.04	45.01
14/06/2018	12:00:00	1.06	53.19	14/06/2018	12:00:00	3.03	45
14/06/2018	12:30:00	1	53.13	14/06/2018	12:30:00	3.02	44.99
14/06/2018	13:00:00	1.01	53.14	14/06/2018	13:00:00	3	44.97
14/06/2018	13:30:00	0.98	53.11	14/06/2018	13:30:00	3.01	44.98
14/06/2018	14:00:00	1.01	53.14	14/06/2018	14:00:00	3.02	44.99
14/06/2018	14:30:00	0.98	53.11	14/06/2018	14:30:00	2.99	44.96
14/06/2018	15:00:00	0.98	53.11	14/06/2018	15:00:00	2.98	44.95
14/06/2018	15:30:00	0.98	53.11	14/06/2018	15:30:00	3.01	44.98
14/06/2018	16:00:00	0.97	53.1	14/06/2018	16:00:00	3	44.97
14/06/2018	16:30:00	0.96	53.09	14/06/2018	16:30:00	2.98	44.95
14/06/2018	17:00:00	0.97	53.1	14/06/2018	17:00:00	2.99	44.96
14/06/2018	17:30:00	0.95	53.08	14/06/2018	17:30:00	2.98	44.95
14/06/2018	18:00:00	0.94	53.07	14/06/2018	18:00:00	2.96	44.93
14/06/2018	18:30:00	0.91	53.04	14/06/2018	18:30:00	2.96	44.93
15/06/2018	08:00:00	0.71	52.84	15/06/2018	08:00:00	2.64	44.61
15/06/2018	08:30:00	0.69	52.82	15/06/2018	08:30:00	2.63	44.6
15/06/2018	09:00:00	0.66	52.79	15/06/2018	09:00:00	2.62	44.59
15/06/2018	09:30:00	0.64	52.77	15/06/2018	09:30:00	2.59	44.56
15/06/2018	10:00:00	0.63	52.76	15/06/2018	10:00:00	2.58	44.55
15/06/2018	10:30:00	0.62	52.75	15/06/2018	10:30:00	2.57	44.54
15/06/2018	11:00:00	0.62	52.75	15/06/2018	11:00:00	2.56	44.53
15/06/2018	11:30:00	0.62	52.75	15/06/2018	11:30:00	2.56	44.53
15/06/2018	12:00:00	0.59	52.72	15/06/2018	12:00:00	2.54	44.51
15/06/2018	12:30:00	0.61	52.74	15/06/2018	12:30:00	2.53	44.5
15/06/2018	13:00:00	0.6	52.73	15/06/2018	13:00:00	2.52	44.49
15/06/2018	13:30:00	0.59	52.72	15/06/2018	13:30:00	2.5	44.47
15/06/2018	14:00:00	0.6	52.73	15/06/2018	14:00:00	2.49	44.46
15/06/2018	14:30:00	0.59	52.72	15/06/2018	14:30:00	2.49	44.46
15/06/2018	15:00:00	0.59	52.72	15/06/2018	15:00:00	2.49	44.46
15/06/2018	15:30:00	0.57	52.7	15/06/2018	15:30:00	2.5	44.47
15/06/2018	16:00:00	0.54	52.67	15/06/2018	16:00:00	2.49	44.46
15/06/2018	16:30:00	0.56	52.69	15/06/2018	16:30:00	2.47	44.44
15/06/2018	17:00:00	0.51	52.64	15/06/2018	17:00:00	2.45	44.42
15/06/2018	17:30:00	0.54	52.67	15/06/2018	17:30:00	2.44	44.41
15/06/2018	18:00:00	0.54	52.67	15/06/2018	18:00:00	2.43	44.4
15/06/2018	18:30:00	0.51	52.64	15/06/2018	18:30:00	2.41	44.38

Da tali registrazioni si deducono i seguenti livelli di riferimento:

- a Spessa circa 53.15 m s.l.m. per il giorno 14/6 e 52.75 m s.l.m. per il giorno successivo;
- a Piacenza 45 m s.l.m. per il giorno 14/6 e 44.5 m s.l.m. per il giorno successivo.

Per valutare le portate associate a tali valori sono state utilizzate le curve idrometriche ricavate dagli annali idrologici 2016 alle stazioni sul Po di Spessa e Piacenza (scaricabili dal sito ARPA dell'Emilia Romagna, Rif. 4) e di seguito riportate (Tabella 2).

Tabella 2 Scala numerica delle portate alle stazioni di Spessa e Piacenza

SPESSA (zero idrometrico 52.13 m)			PIACENZA (zero idrometrico 41.97 m)		
alt.idrom (m)	quota pelo libero (m)	Q (mc/s)	alt.idrom (m)	quota pelo libero (m)	Q (mc/s)
-1.97	50.16	276	-0.45	41.52	298
-1.96	50.17	280	-0.4	41.57	321
-1.92	50.21	296	-0.35	41.62	345
-1.88	50.25	313	-0.3	41.67	369
-1.84	50.29	330	-0.25	41.72	393
-1.8	50.33	347	-0.2	41.77	418
-1.76	50.37	365	-0.1	41.87	468
-1.68	50.45	400	0	41.97	518
-1.6	50.53	437	0.1	42.07	569
-1.52	50.61	474	0.2	42.17	621
-1.44	50.69	511	0.3	42.27	674
-1.36	50.77	550	0.4	42.37	727
-1.28	50.85	589	0.5	42.47	781
-1.12	51.01	668	0.6	42.57	836
-0.96	51.17	750	0.8	42.77	947
-0.8	51.33	832	1	42.97	1060
-0.64	51.49	916	1.2	43.17	1170
-0.48	51.65	1000	1.4	43.37	1290
-0.32	51.81	1090	1.6	43.57	1400
0	52.13	1270	1.8	43.77	1520
0.32	52.45	1460	2	43.97	1640
0.64	52.77	1650	2.4	44.37	1880
0.96	53.09	1850	2.8	44.77	2130
1.28	53.41	2040	3.2	45.17	2410
1.6	53.73	2270	3.6	45.57	2740
2.24	54.37	2720	4	45.97	3080
2.88	55.01	3220	4.4	46.37	3440
3.52	55.65	3920	4.8	46.77	3810
4.16	56.29	4690	5.6	47.57	4640
4.8	56.93	5470	6.4	48.37	5610
5.44	57.57	6300	7.11	49.08	6850
6.05	58.18	7210			

Inoltre, sono state valutate le distanze, misurate lungo l'asse fluviale del Po, tra le stazioni di Spessa e Piacenza, e gli estremi di monte e valle del tratto di Po considerato nelle simulazioni con il codice di calcolo (Tabella 3).

Tabella 3 Distanze misurate in asse al fiume Po

	progressiva (m)	dist. parziale (m)
Spessa Po	0	
Estremo di monte dominio	9144	9144
Estremo di valle dominio	25444	16300
Piacenza	48235	22791

Per ciascuna portata si è quindi stimata una pendenza media del livello del Po tra le stazioni di Spessa e Piacenza come riportato nella seguente Tabella 4.

Tabella 4 Scale numeriche delle portate nelle sezioni di interesse

da ANNALI		Monte Dominio quota pelo libero (m)	Valle Dominio quota pelo libero (m)	da ANNALI (con interpolazione)	Pendenza media pelo libero
Q (mc/s)	SPESSA quota pelo libero (m)			PIACENZA quota pelo libero (m)	
276	50.16				
280	50.17				
296	50.21	48.563	45.626	41.52	0.0001802
313	50.25	48.601	45.662	41.55	0.0001803
330	50.29	48.640	45.700	41.59	0.0001804
347	50.33	48.680	45.738	41.62	0.0001805
365	50.37	48.719	45.776	41.66	0.0001805
400	50.45	48.798	45.852	41.73	0.0001807
437	50.53	48.877	45.929	41.81	0.0001808
474	50.61	48.955	46.006	41.88	0.0001809
511	50.69	49.034	46.083	41.96	0.0001811
550	50.77	49.114	46.161	42.03	0.0001811
589	50.85	49.193	46.239	42.11	0.0001812
668	51.01	49.351	46.394	42.26	0.0001814
750	51.17	49.510	46.550	42.41	0.0001816
832	51.33	49.668	46.705	42.56	0.0001818
916	51.49	49.826	46.861	42.71	0.0001819
1000	51.65	49.984	47.015	42.86	0.0001822
1090	51.81	50.145	47.176	43.02	0.0001821
1270	52.13	50.463	47.492	43.34	0.0001823
1460	52.45	50.786	47.819	43.67	0.0001820
1650	52.77	51.105	48.137	43.99	0.0001821
1850	53.09	51.427	48.464	44.32	0.0001818
2040	53.41	51.745	48.776	44.63	0.0001821
2270	53.73	52.069	49.109	44.97	0.0001816
2720	54.37	52.697	49.715	45.55	0.0001829
3220	55.01	53.326	50.323	46.13	0.0001842
3920	55.65	53.987	51.022	46.88	0.0001819
4690	56.29	54.645	51.712	47.61	0.0001799
5470	56.93	55.285	52.354	48.25	0.0001799
6300	57.57	55.901	52.925	48.77	0.0001825
7210	58.18				

Utilizzando questa tabella sono state quindi valutate:

- le portate del Po corrispondenti alle date dei rilievi batimetrici (1850 m³/s per il giorno 14/6; 1650 m³/s per il giorno 15/6) e quindi le pendenze medie riferite a tali portate;
- le quote assolute delle batimetrie dei fondali (necessarie alla definizione del dominio per il codice di calcolo) noti i battenti misurati (rilievi batimetrici) e le quote del livello del Po alle varie posizioni dei rilievi assumendo le pendenze medie stimate;
- le condizioni al contorno da assegnare al codice di calcolo (assegnata una portata all'estremità di monte è possibile stimare la condizione del livello all'estremità di valle).

4 MODELLO NUMERICO DI SIMULAZIONE

MIKE 21 (Rif. 1) simula correnti bidimensionali ed è applicabile ad ambienti fluviali e marini. Il modulo di calcolo principale, denominato **MIKE 21 HD** (*HydroDynamic*), risolve le equazioni idrodinamiche (equazione di continuità e di conservazione della quantità di moto) per il calcolo del livello e delle componenti di velocità e l'equazione dell'energia per il calcolo della temperatura. Usato nella versione *Flexible Mesh* (FM) ai volumi finiti, il codice MIKE 21 consente di adottare una risoluzione spaziale variabile in funzione delle diverse aree di studio.

Essendo un codice bidimensionale le componenti della velocità e la temperatura calcolate nei vari punti del dominio di calcolo corrispondono alle medie sulla verticale.

Il modulo HD simula le variazioni di livello, di corrente e di temperatura una volta assegnate le opportune condizioni iniziali e al contorno.

4.1 Equazioni utilizzate e tecniche di soluzione

Il sistema modellistico si basa sulla soluzione numerica delle equazioni di Navier- Stokes mediate (*Reynolds Averaged Navier-Stokes equations*) in condizioni di pressione idrostatica. Il modello è costituito dalle equazioni di continuità, momento, temperatura, salinità e densità con schema di chiusura turbolenta. La densità non dipende dalla pressione ma solo dalla temperatura e dalla salinità.

A seguire si presentano in coordinate cartesiane, le equazioni utilizzate.

Equazione di continuità:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = hS$$

Equazione del momento lungo la componente x:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu^2}{\partial x} + \frac{\partial hvu}{\partial y} \\ & = fvh - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{xy}) + hu_S S \end{aligned}$$

Equazione del momento lungo la componente y:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial hv^2}{\partial y} \\ & = fuh - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) + hv_S S \end{aligned}$$

in cui:

- t: tempo
- x, y: coordinate cartesiane
- u, v: componenti del campo velocità
- S: immissione puntuale di portata.

I termini T_{ij} indicano gli effetti viscosi e turbolenti e sono dati dalle relazioni

$$T_{xx} = 2A \frac{\partial u}{\partial x} ; \quad T_{xy} = A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) ; \quad T_{yy} = 2A \frac{\partial v}{\partial y}$$

Equazione dell'energia per il calcolo della temperatura T:

$$\frac{\partial hT}{\partial t} + \frac{\partial huT}{\partial x} + \frac{\partial hvT}{\partial y} = hF_T + hH + hT_S S$$

La versione FM utilizza un metodo ai volumi finiti per la discretizzazione delle equazioni di flusso e trasporto con valori centrati sul singolo elemento.

Il dominio spaziale è discretizzato tramite la suddivisione del continuo in elementi/celle non sovrapposte.

L'area oggetto di studio è stata schematizzata all'interno del modello bidimensionale MIKE 21 FM mediante una griglia di calcolo (*mesh*) a maglie triangolari. Ad ogni cella del dominio è stata associata una quota del fondo interpolata sulla base dei rilievi batimetrici disponibili. I confini dell'area di calcolo sono stati fatti coincidere con le sponde del ramo di Po considerato e con due limiti: il primo, a monte della presa, e il secondo a valle del segmento fluviale analizzato posto ad una distanza tale da non influire sui risultati del modello del tratto esaminato.

4.2 Definizione del dominio di calcolo

Il tratto di fiume Po analizzato nello studio comprende il tratto posto a circa 1.7 km a monte della presa e si estende complessivamente per circa 16 km con l'estremità di valle posta subito dopo la confluenza con il fiume Lambro. L'estremo di monte è stato assunto ad una distanza dall'opera di presa tale da consentire una corretta configurazione del campo di moto in prossimità delle opere di presa, mentre l'estremità di valle è stata assunta ad una distanza tale da garantire una completa diffusione della perturbazione termica indotta dallo scarico della centrale.

In Figura 10 è riportato il tratto di fiume Po assunto nelle simulazioni numeriche con il codice MIKE 21 con l'indicazione dei contorni di monte e di valle, oltre a quella del tratto finale del canale di scarico riprodotto nel dominio di calcolo e dell'immissione del fiume Lambro in sponda sinistra del Po, poco prima della sezione di chiusura a valle del dominio.

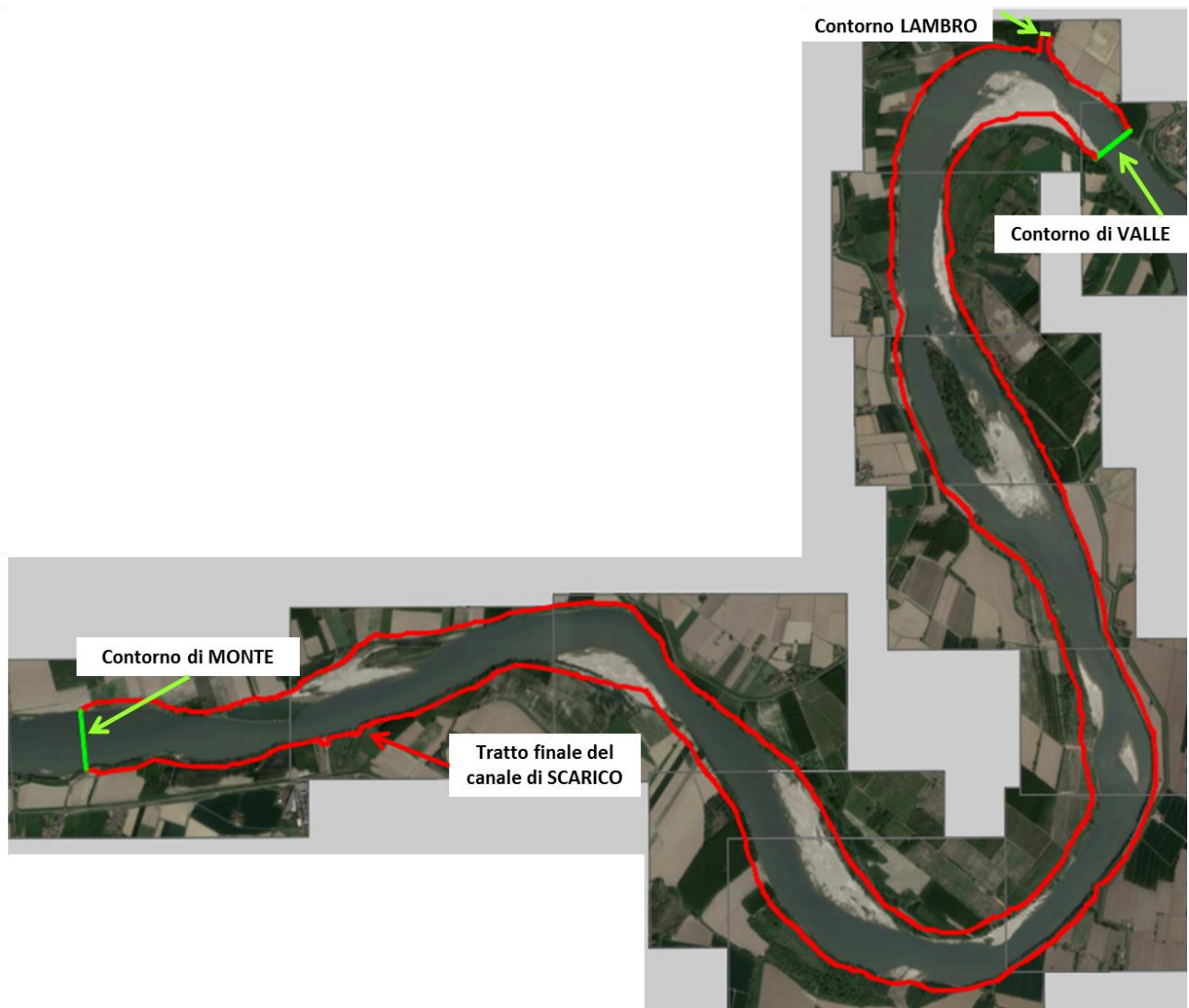


Figura 10 Tratto di fiume Po assunto nelle simulazioni numeriche. In verde sono indicate le sezioni di estremità del dominio di calcolo.

4.2.1 Reticolo di calcolo

Le informazioni georeferenziate della batimetria e degli elementi geometrici necessari alla modellazione (sponde, opere di presa e di scarico, eventuali isole emerse denominate “sabbioni”) ricavate in ambiente AutoCAD sono state esportate in ambiente MIKE con cui è stato successivamente generato il reticolo di calcolo necessario al modello numerico.

Allo scopo di garantire l’accuratezza dei risultati del calcolo, questa operazione è stata condotta con i seguenti criteri:

- garantire il massimo dettaglio, generando elementi di piccole dimensioni, nelle zone maggiormente interessate dai fenomeni di diffusione termica o più critiche dal punto di vista idrodinamico, quali l’area delle opere di presa e le zone antistanti lo scarico;
- operare con elementi il più possibile regolari, allo scopo di incrementare la stabilità e la convergenza del calcolo;

- definire le sezioni di presa e scarico con un dettaglio sufficiente a garantire la corretta assegnazione delle condizioni di portata ed incremento termico.

Per la discretizzazione del dominio è stata generata una *mesh* di calcolo caratterizzata da 54632 elementi triangolari (delimitati da 28264 nodi) con aree variabili tra 10 e 250 m².

In Figura 11 è riportato il reticolo di calcolo adottato per le simulazioni; si nota il maggior dettaglio (elementi triangolari di dimensioni ridotte) assunto in corrispondenza delle opere di presa e scarico, dove sono maggiori i gradienti di velocità e temperatura.

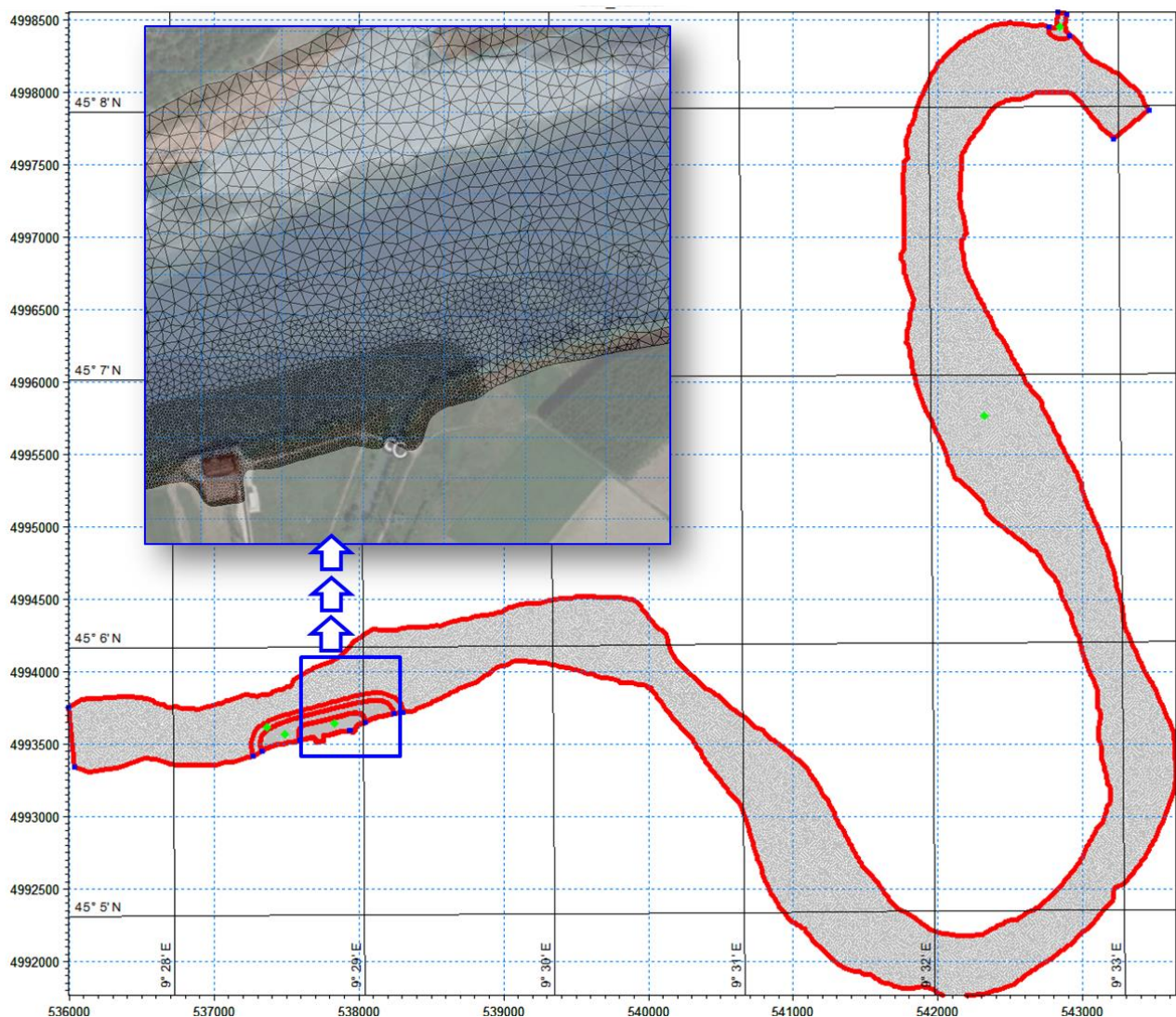


Figura 11 Discretizzazione dominio di calcolo mediante mesh ad elementi triangolari. Il riquadro evidenzia il maggior dettaglio assunto in corrispondenza delle opere di presa e scarico.

4.2.1 Condizioni al contorno e condizioni iniziali

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

Per il calcolo della stazionarietà in determinate condizioni ambientali e di esercizio della centrale occorre simulare un transitorio partendo da opportune condizioni iniziali e assegnando le dovute condizioni ai contorni di monte e valle. Il transitorio deve avere una durata temporale tale da garantire il raggiungimento della condizione di stazionarietà (invariabilità dei valori assunti dalle grandezze in gioco).

Per tutti gli scenari indagati si è operato seguendo le seguenti ipotesi:

- condizione iniziale: acqua ferma; livello del pelo libero costante e pari al livello assegnato all'estremità di valle; temperatura dell'acqua pari alla temperatura ambientale (indisturbata di monte) dello scenario indagato;
- condizione alla sezione di monte: relativamente ad ogni scenario, portata costante entrante pari alla portata del Po e temperatura ambientale costante;
- condizione alla sezione di valle: livello costante del pelo libero dedotto dalla Tabella 4 nota la portata assegnata a monte; gradiente nullo per la temperatura.

L'opera di presa è stata simulata come *sorgente*, mentre quella di scarico è stata riprodotta mediante un *contorno aperto*; entrambe le opere sono state definite mediante le due condizioni interne seguenti:

- opera di presa: portata prelevata dal Po costante e pari alla portata di raffreddamento egualmente ripartita in 4 sorgenti (negative); temperatura corrispondente al valore calcolato al punto di presa;
- opera di scarico: portata pari a quella prelevata dall'opera di presa e temperatura pari al valore calcolato alla presa addizionato dell'incremento termico associato allo scenario indagato.

La condizione di stazionarietà si può ritenere raggiunta dopo 18 ore di transitorio.

5 FASE DI CALIBRAZIONE

5.1 Metodologia di verifica del rispetto dei limiti di legge

La metodologia (Rif. 7 e Rif. 8) di verifica del rispetto dei limiti di legge fa riferimento al D. Lgs n° 152/06 che, nell'allegato 5 alla Parte Terza (*Limiti di emissione degli scarichi idrici*), punto 1 (*Scarichi in corpi d'acqua superficiali*), tabella 3 (*Valori limite di emissione in acque superficiali e in fognatura*), parametro 2 (*temperatura*), nota 1, recita tra l'altro:

“Per i corsi d’acqua la variazione massima tra temperature medie di qualsiasi sezione del corso d’acqua a monte e a valle del punto di immissione non deve superare i 3 °C. Su almeno metà di qualsiasi sezione a valle tale variazione non deve superare 1 °C. omissis..... Per i canali artificiali, il massimo valore medio della temperatura dell’acqua di qualsiasi sezione non deve superare i 35 °C, la condizione suddetta è subordinata all’assenso del soggetto che gestisce il canale”

Ciò significa che in una qualunque sezione fluviale a valle dello scarico della centrale, nota la distribuzione della temperatura in funzione della profondità h e della distanza x dalla riva, è possibile calcolare la temperatura media T_m secondo l'espressione:

$$T_m = \frac{1}{A} \int T(x, h) dx dh$$

dove A è l'area della sezione e $T(x, h)$ è la funzione distribuzione della temperatura (campo termico). Poiché il modello numerico fornisce i valori di temperatura nei nodi degli elementi costituenti il reticolo di calcolo, si individuano i nodi che caratterizzano una sezione, in numero discreto, e l'espressione precedente viene ad assumere la forma approssimata:

$$T_m = \frac{\sum_i T_i A_i}{\sum_i A_i}$$

essendo T_i i valori di temperatura nei nodi ed A_i le aree della sezione in cui tale valore può essere ritenuto costante. Poiché il modello numerico adottato effettua già una media sulla verticale, di fatto la sezione considerata viene suddivisa in un numero di superfici verticali elementari ciascuna relativa ad uno dei nodi della sezione.

Per calcolare poi il valore di temperatura media sulla semi sezione “più fredda”, oltre che il valore sull'intera sezione, si ordinano le temperature T_i in senso crescente, ciascuna con la superficie elementare associata, e si valutano le quantità:

$$T_m(100\%) = \frac{\sum_{i=1}^N T_i A_i}{\sum_{i=1}^N A_i}$$

$$T_m(50\%) = \frac{\sum_{i=1}^M T_i A_i}{\sum_{i=1}^M A_i}$$

essendo N il numero totale di nodi della sezione ed M il numero di nodi la cui somma delle superfici elementari è pari alla metà dell'area totale della sezione.

Gli incrementi termici medi sono poi calcolati come differenza tra i valori medi di temperatura nella sezione a valle dello scarico calcolati secondo le formule sopra riportate e la contemporanea temperatura media calcolata in una sezione imperturbata posta a monte dello scarico stesso (sezione fredda).

La legislazione vigente, poi, richiede che la verifica dei limiti di legge avvenga misurando l'incremento termico tra una *qualsiasi* sezione a monte ed a valle del punto di immissione dello scarico.

5.2 Simulazione di alcune campagne di misura

Prima di procedere alla simulazione degli scenari previsionali sono state effettuate alcune simulazioni di calibrazione del modello, con l'intento di riprodurre le condizioni di funzionamento esistenti, in assetto attuale d'impianto, nei giorni delle campagne di monitoraggio termico che Enel è tenuta ad eseguire in periodo estivo e invernale, per la verifica degli esistenti vincoli di legge.

Tra le varie campagne di misura condotte da CESI per conto Enel sono state considerate quelle del 12 luglio 2013 (Rif. 5) e del 13 gennaio 2016 (Rif. 6) in quanto i dati disponibili, non sufficienti per le simulazioni, potevano essere integrati con ipotesi plausibili.

I dati dedotti da tali campagne sono riportati in Tabella 5.

Tabella 5 Dati delle campagne di monitoraggio

data	Potenza impianto (MW _e)	Portata di raffreddamento (m ³ /s)	Portata del fiume Po (m ³ /s)	Temperatura indisturbata dell'acqua (°C)
12/07/2013	650	16	496	23.11
13/01/2016	761	16	335	7.14

I rilievi termometrici nelle campagne di misura sono stati effettuati in una sezione trasversale posta 500 m a monte del canale di scarico per la misura della temperatura indisturbata (T della sezione fredda) e in due sezioni trasversali del fiume Po poste, rispettivamente, 100 m e 600 m a valle del punto di immissione del canale di scarico nel Po (sezioni calde, Figura 14).

Rilievi del 12/07/2013

In tali condizioni (potenza impianto di 650 MW_e; portata del circuito di raffreddamento di 16 m³/s) è plausibile il funzionamento di due soli gruppi in assetto ridotto rispetto al pieno carico (761 MW_e).

Nel simulare questa condizione di funzionamento con il codice MIKE 21 si è assunto quanto segue:

- condizione iniziale: temperatura dell'acqua pari a 23.11 °C;
- condizione al contorno di monte: portata del Po pari a 496 m³/s; temperatura dell'acqua pari a 23.11 °C;

- condizione al contorno di valle: livello del Po pari a 46.05 m slm (Tabella 4);
- opera di presa: portata di 16 m³/s; temperatura corrispondente al valore calcolato alla presa;
- opera di restituzione: portata di 16 m³/s; temperatura pari al valore calcolato alla presa incrementato di 7 °C.

Rilievi del 13/01/2016

In tali condizioni (potenza impianto di 761 MW_e; portata del circuito di raffreddamento di 16 m³/s) è probabile il funzionamento di due soli gruppi in assetto a pieno carico e, quindi, alla portata di raffreddamento di 16 m³/s è plausibile corrisponda un sovrizzo termico di 7 °C.

Nel simulare questa condizione di funzionamento con il codice MIKE 21 si è assunto quanto segue:

- condizione iniziale: temperatura dell'acqua pari a 7.14 °C;
- condizione al contorno di monte: portata del Po pari a 335 m³/s; temperatura di 7.14 °C;
- condizione al contorno di valle: livello del Po pari a 45.70 m slm (Tabella 4);
- opera di presa: portata di 16 m³/s; temperatura corrispondente al valore calcolato alla presa;
- opera di restituzione: portata di 16 m³/s; temperatura pari al valore calcolato alla presa incrementato di 7°C.

La Tabella 6 riassume i valori misurati e calcolati alle sezioni calde 1 e 2 nelle due campagne di monitoraggio. La Figura 12 e la Figura 13, invece, mostrano i campi di temperatura calcolati nelle due simulazioni.

Tabella 6 Confronto tra misure da campagne di monitoraggio e simulazioni numeriche

		misure del 12/07/2013 (T fredda 23.11 °C)		risultati simulazione	
		sez. calda 1	sez. calda 2	sez. calda 1	sez. calda 2
T media intera sez.	(°C)	23.5	23.43	23.31	23.37
ΔT intera sez.(100%)	(°C)	0.39	0.34	0.21	0.26
limite di legge (100%)	(°C)	3	3	3	3
ΔT semi sez. (50%)	(°C)	0.03	0.1	0	0.01
limite di legge (50%)	(°C)	1	1	1	1

		misure del 13/01/2016 (T fredda 7.14 °C)		risultati simulazione	
		sez. calda 1	sez. calda 2	sez. calda 1	sez. calda 2
T media intera sez.	(°C)	7.65	7.51	7.45	7.51
ΔT intera sez.(100%)	(°C)	0.5	0.37	0.31	0.37
limite di legge (100%)	(°C)	3	3	3	3
ΔT semi sez. (50%)	(°C)	-0.11	-0.09	0	0.03
limite di legge (50%)	(°C)	1	1	1	1

Il confronto tra temperature misurate e calcolate indica una leggera sottostima per quanto riguarda i valori calcolati in data 12/07/2013. Il confronto con le misure del 13/01/2016 appare invece più congruente soprattutto nella sezione calda 2.

Nell'analizzare questi risultati occorre tener presente che nelle misure del 12/07/2013 le modalità di funzionamento dell'impianto lasciano una certa incertezza nella definizione di alcuni dati non disponibili nelle misure e quindi ipotizzati nella simulazione con il modello. Il fatto che la centrale operi ad una

potenza di 650 MW_e, quindi probabilmente con due gruppi a potenza ridotta, lascia una certa incertezza nella definizione della portata di raffreddamento e nel sovrizzo termico da attribuire. Questa incertezza, invece, non si ha nelle misure del 13/01/2016 in cui la potenza dell'impianto è pari alla potenza di due gruppi a pieno carico. Occorre, inoltre, tener presente che le posizioni delle stazioni di misura risultano vicine al canale di scarico, soprattutto la sezione calda 1, e quindi potrebbero risentire delle inevitabili imprecisioni nella rappresentazione della geometria tra la confluenza dello scarico e l'alveo del Po. Occorre, infine, considerare le possibili modifiche dell'alveo avvenute tra i periodi delle campagne di misura e la data dei più recenti rilievi batimetrici.

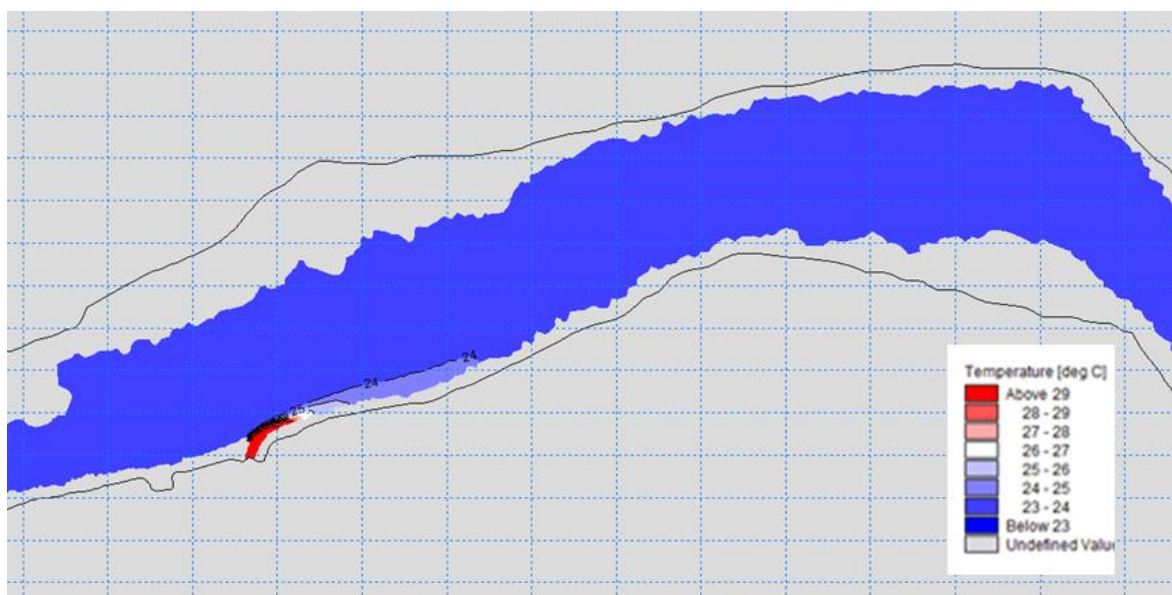


Figura 12 Campo termico simulato per la campagna di misure del 12/07/2013.

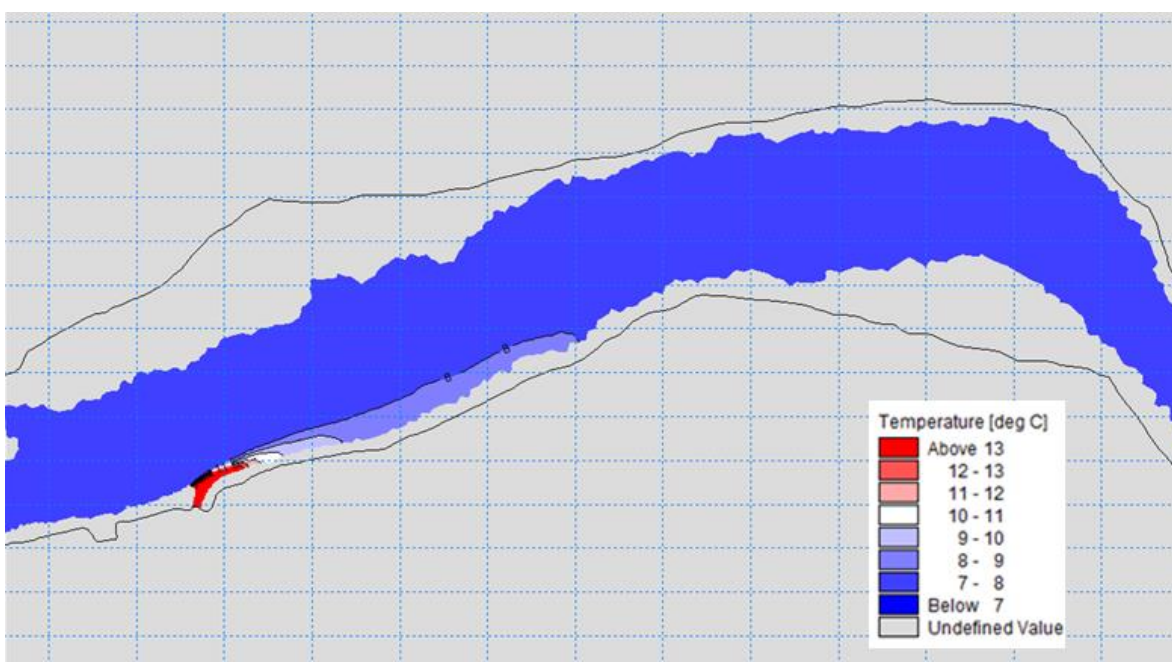


Figura 13 Campo termico simulato per la campagna di misure del 13/01/2016.

Considerando le incertezze che si introducono in una simulazione mediante codice di calcolo (approssimazioni nella definizione dell'alveo, delle portate reali, dei parametri fisici che caratterizzano le equazioni rappresentative dei fenomeni in gioco, ecc..), si conclude che l'impostazione assunta nell'uso del codice di calcolo adottato per la descrizione dei fenomeni indotti dallo scarico termico della centrale di La Casella sia da ritenersi affidabile.

Ultimata la fase di calibrazione si è quindi passati alla simulazione degli scenari previsionali.

6 SCENARI DI CALCOLO

6.1 Introduzione

Gli scenari di calcolo adottati per il presente studio sono derivati dalla combinazione dell'assetto di esercizio della centrale e delle condizioni ambientali critiche per le problematiche in oggetto, o comunque più probabili, scelte tra quelle tipiche del sito e descritte ai capitoli precedenti.

Tutti gli scenari si riferiscono alla condizione di funzionamento più gravosa (a pieno carico) dell'impianto nell'assetto attuale e in quello futuro.

Per la definizione delle condizioni idrologiche del fiume Po si è fatto riferimento ai dati riportati negli annali idrologici del Po a Spessa (Rif. 4) assumendo le portate medie di magra invernale ed estiva nel periodo 2013-2018, con esclusione del 2014 nel calcolo della magra estiva poiché si è trattato di un anno particolarmente piovoso. Per le portate medie estiva e invernale si è invece fatto riferimento a quelle riportate nell'annale 2018 per il periodo 1991-2017 (con l'esclusione dell'anno 2012 non disponibile).

Definite le portate del Po è stato quindi dedotto il livello da assegnare come condizione al contorno di valle utilizzando la Tabella 4. In mancanza di dati di dettaglio in merito, è stata assunta per il fiume Lambro una portata di 10 m³/s; peraltro, l'analisi dei risultati ha evidenziato l'ininfluenza delle acque del Lambro sull'evoluzione della perturbazione termica che si sviluppa diversi chilometri a monte della sua immissione in Po.

Per la definizione della temperatura media indisturbata del Po si è fatto riferimento alla serie di misure effettuate da CESI durante le campagne invernali ed estive tra il 2009 ed il 2016.

Tabella 7 Condizioni di esercizio simulate negli scenari in configurazione attuale e futura dell'impianto

SCENARI ATTUALI 4 gruppi 381 MW	Funzionamento	portata pompe AC (m ³ /s)	ΔT presa-scarico (°C)	STAGIONE	PORTATA PO (m ³ /s)		T acqua Po (°C)	Livello valle dominio (m slm)
					magra	media		
scenario 1	pieno carico	30	7	inverno	magra	500	8	46.07
scenario 2	pieno carico	30	7	inverno	media	750	8	46.55
scenario 3	pieno carico	30	7	estate	magra	370	24	45.78
scenario 4	pieno carico	30	7	estate	media	670	24	46.39
SCENARI FUTURI								
scenario 5	pieno carico	40	8.3	inverno	magra	500	8	46.07
scenario 6	pieno carico	40	8.3	inverno	media	750	8	46.55
scenario 7	pieno carico	40	8.3	estate	magra	370	24	45.78
scenario 8	pieno carico	40	8.3	estate	media	670	24	46.39

I risultati ottenuti col codice MIKE nelle diverse simulazioni indagate sono stati quindi esaminati e valutati attraverso strumenti di *post processing* allo scopo di visualizzare gli andamenti del campo termico.

Le verifiche di legge sono state condotte con riferimento a tre sezioni collocate a valle dello scarico e illustrate nella seguente Figura 14. Si tratta delle medesime sezioni calde solitamente adottate per le verifiche in campo con l'aggiunta di una terza sezione calda, collocata circa 2400 m a valle dello scarico.



Figura 14 Posizione delle sezioni calde utilizzate per la calibrazione (sezioni calde 1 e 2) e per la verifica degli scenari previsionali (sezioni calde 1, 2 e 3).

6.2 Scenari attuali in funzionamento a pieno carico

Di seguito sono riportate le specifiche e i risultati per gli scenari relativi alla configurazione attuale, ossia:

- 4 gruppi a pieno carico (potenza di 381 MW_e per ogni gruppo);
- 30 m³/s di portata complessiva nel circuito di raffreddamento;
- 7 °C di sovrizzo termico tra la temperatura dell'acqua alla presa e alla restituzione.

6.2.1 Scenario 1

Situazione di magra invernale (portata del fiume Po pari a 500 m³/s) e temperatura dell'acqua di 8 °C.

Nella Figura 15 è rappresentato il campo di temperatura sull'intero dominio di calcolo (riquadro a sinistra) e per un tratto di circa 4 km a valle della presa (riquadro a destra).

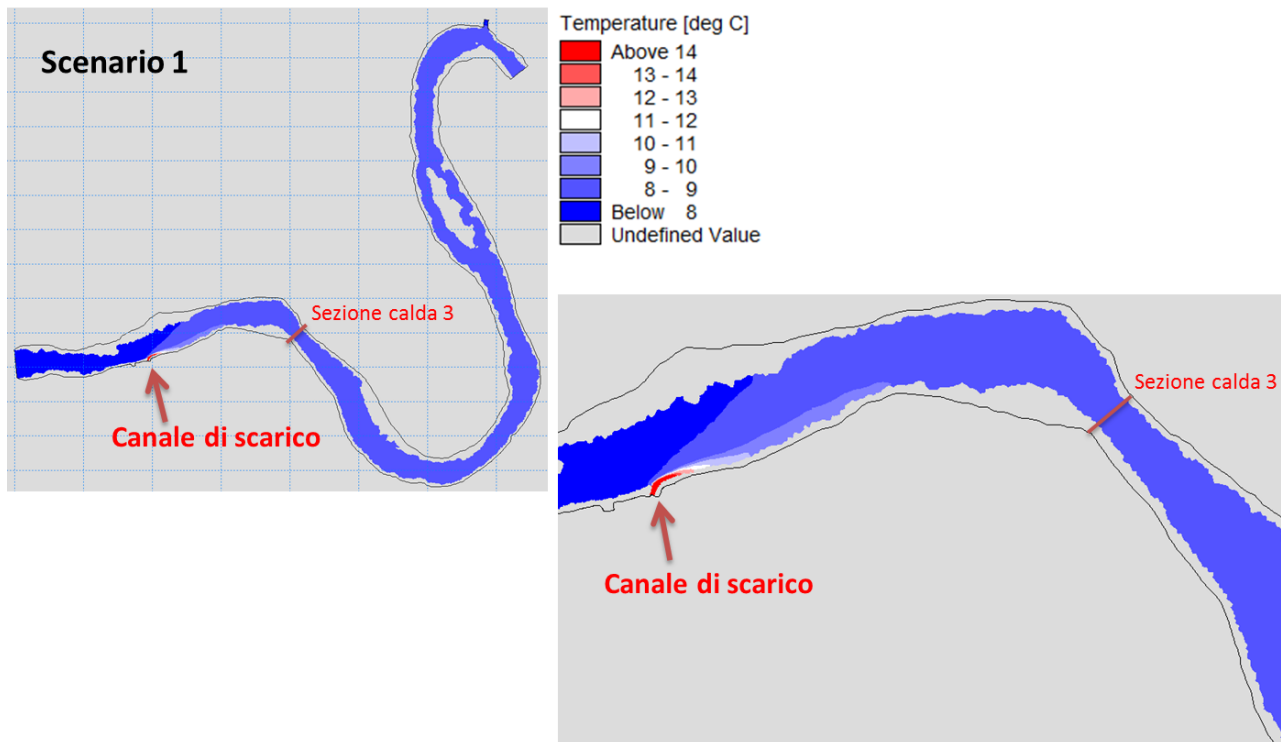


Figura 15 Campo termico calcolato per lo Scenario 1

La Tabella 8 riporta gli scarti di temperatura, riferiti alla T indisturbata, nelle 3 sezioni calde considerate, intera sezione e semisezione, per la verifica del rispetto dei limiti di legge.

Tabella 8 ΔT nelle 3 sezioni calde considerate (intera sezione e semi sezione)

	sezione calda 1		sezione calda 2		sezione calda 3	
	ΔT intera sezione (°C) (limite 3 °C)	ΔT semi sezione (°C) (limite 1 °C)	ΔT intera sezione (°C) (limite 3 °C)	ΔT semi sezione (°C) (limite 1 °C)	ΔT intera sezione (°C) (limite 3 °C)	ΔT semi sezione (°C) (limite 1 °C)
SCENARIO 1	0.38	0.00	0.48	0.02	0.41	0.30

6.2.2 Scenario 2

Situazione di portata media invernale (portata del fiume Po pari a 750 m³/s) e temperatura dell'acqua di 8 °C.

Nella Figura 16 è rappresentato il campo di temperatura sull'intero dominio di calcolo (riquadro a sinistra) e per un tratto di circa 4 km a valle della presa (riquadro a destra).

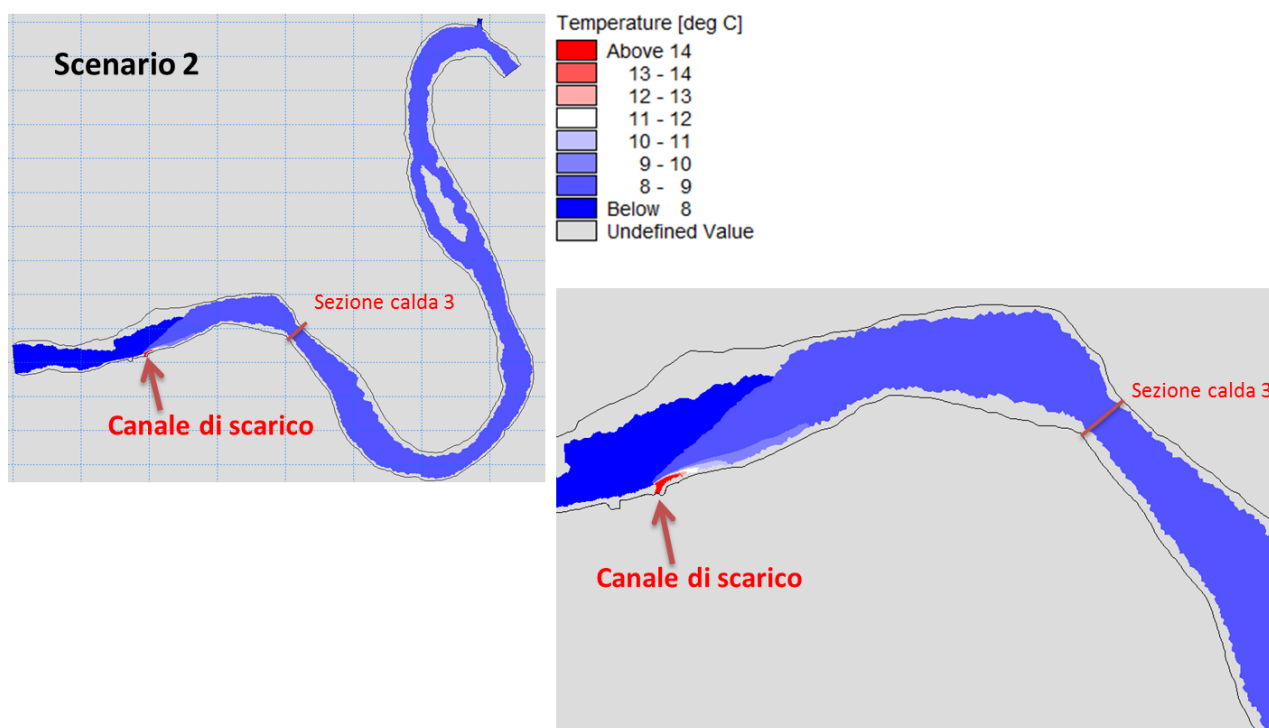


Figura 16 Campo termico calcolato per lo Scenario 2

La Tabella 9 riporta gli scarti di temperatura, riferiti alla T indisturbata, nelle 3 sezioni calde considerate, intera sezione e semisezione, per la verifica del rispetto dei limiti di legge.

Tabella 9 ΔT nelle 3 sezioni calde considerate (intera sezione e semi sezione)

	sezione calda 1		sezione calda 2		sezione calda 3	
	ΔT intera sezione (°C) (limite 3 °C)	ΔT semi sezione (°C) (limite 1 °C)	ΔT intera sezione (°C) (limite 3 °C)	ΔT semi sezione (°C) (limite 1 °C)	ΔT intera sezione (°C) (limite 3 °C)	ΔT semi sezione (°C) (limite 1 °C)
SCENARIO 2	0.28	0.00	0.32	0.01	0.27	0.18

6.2.3 Scenario 3

Situazione di magra estiva (portata del fiume Po pari a 370 m³/s) e temperatura dell'acqua di 24 °C.

Nella Figura 17 è rappresentato il campo di temperatura sull'intero dominio di calcolo (riquadro a sinistra) e per un tratto di circa 4 km a valle della presa (riquadro a destra).

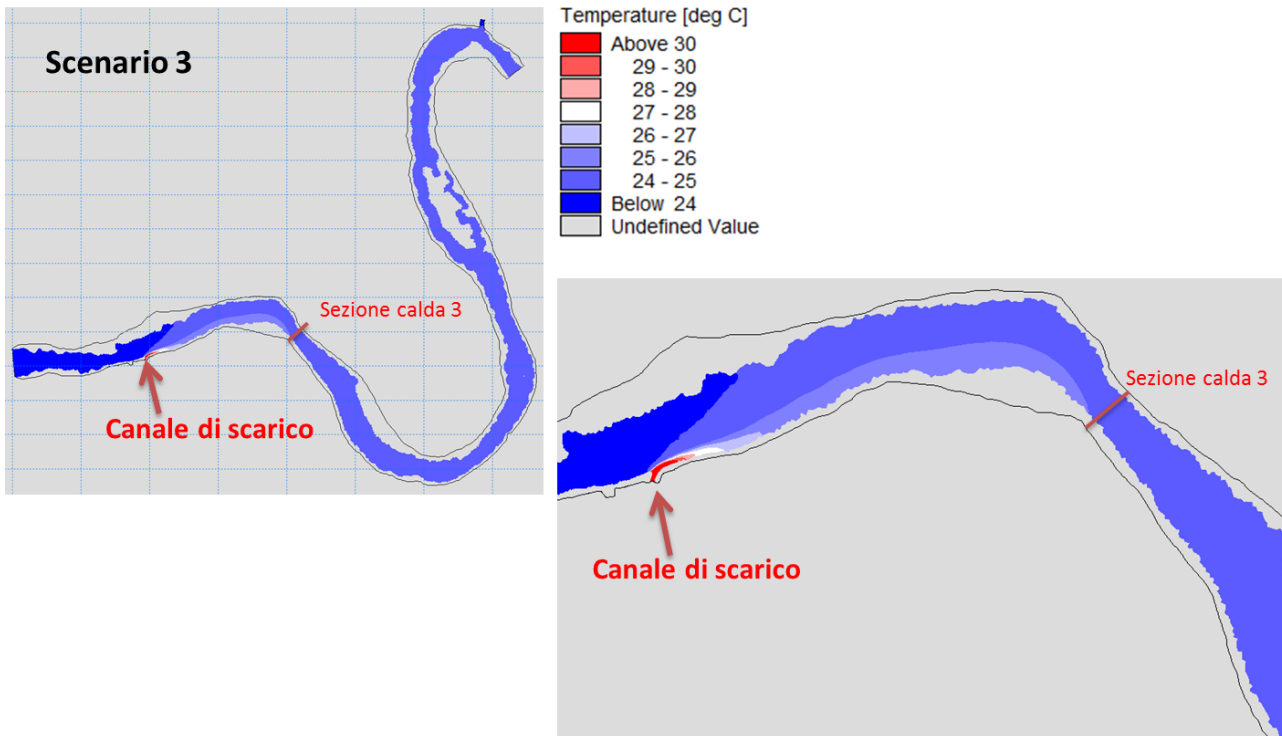


Figura 17 Campo termico calcolato per lo Scenario 3

La Tabella 10 riporta gli scarti di temperatura, riferiti alla T indisturbata, nelle 3 sezioni calde considerate, intera sezione e semisezione, per la verifica del rispetto dei limiti di legge.

Tabella 10 ΔT nelle 3 sezioni calde considerate (intera sezione e semi sezione)

	sezione calda 1		sezione calda 2		sezione calda 3	
	ΔT intera sezione (°C) (limite 3 °C)	ΔT semi sezione (°C) (limite 1 °C)	ΔT intera sezione (°C) (limite 3 °C)	ΔT semi sezione (°C) (limite 1 °C)	ΔT intera sezione (°C) (limite 3 °C)	ΔT semi sezione (°C) (limite 1 °C)
SCENARIO 3	0.43	0.00	0.63	0.04	0.55	0.44

6.2.4 Scenario 4

Situazione di portata media estiva (portata del fiume Po pari a 670 m³/s) e temperatura dell'acqua di 24 °C.

Nella Figura 18 è rappresentato il campo di temperatura sull'intero dominio di calcolo (riquadro a sinistra) e per un tratto di circa 4 km a valle della presa (riquadro a destra).

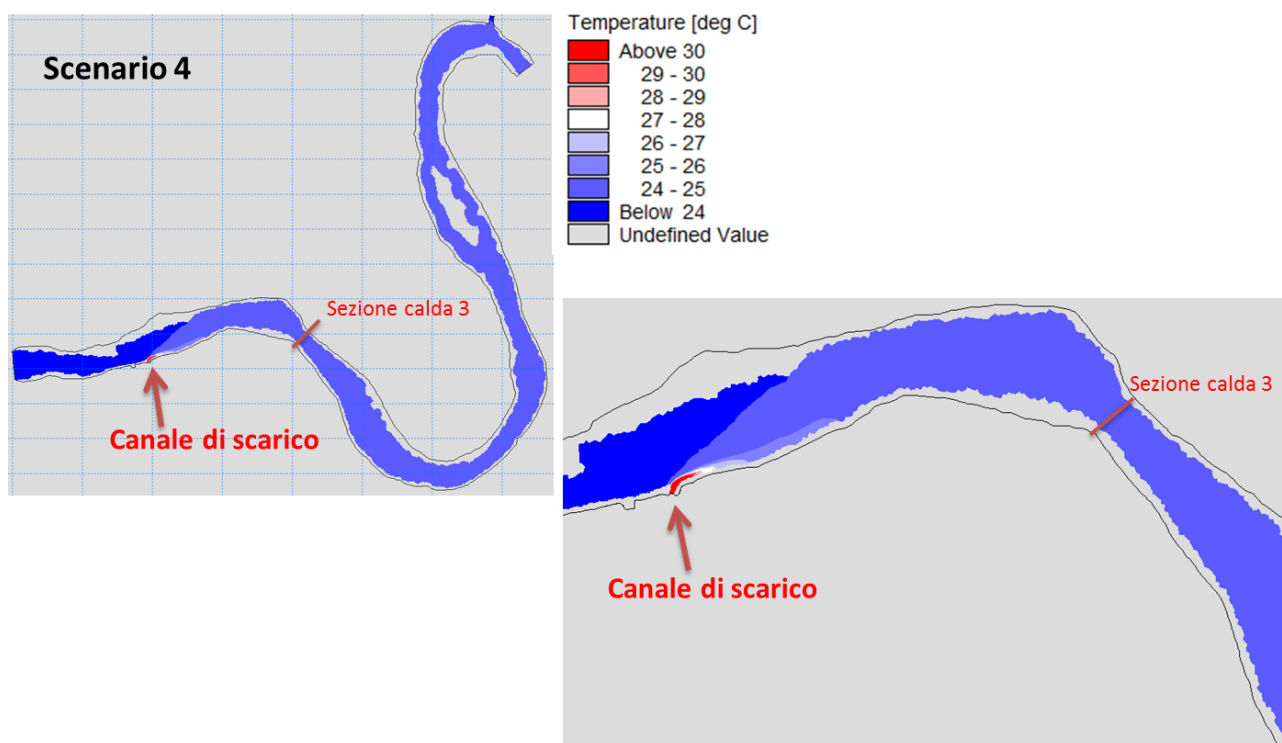


Figura 18 Campo termico calcolato per lo Scenario 4

La Tabella 11 riporta gli scarti di temperatura, riferiti alla T indisturbata, nelle 3 sezioni calde considerate, intera sezione e semisezione, per la verifica del rispetto dei limiti di legge.

Tabella 11 ΔT nelle 3 sezioni calde considerate (intera sezione e semi sezione)

	sezione calda 1		sezione calda 2		sezione calda 3	
	ΔT intera sezione (°C) (limite 3 °C)	ΔT semi sezione (°C) (limite 1 °C)	ΔT intera sezione (°C) (limite 3 °C)	ΔT semi sezione (°C) (limite 1 °C)	ΔT intera sezione (°C) (limite 3 °C)	ΔT semi sezione (°C) (limite 1 °C)
SCENARIO 4	0.29	0.00	0.36	0.01	0.30	0.21

6.3 Scenari futuri in funzionamento a pieno carico

Di seguito sono riportate le specifiche e i risultati per gli scenari relativi alla configurazione futura, ossia:

- gruppi a pieno carico;
- 40 m³/s di portata complessiva nel circuito di raffreddamento;
- 8.3 °C di sovrizzo termico tra la temperatura dell'acqua alla presa e alla restituzione.

6.3.1 Scenario 5

Situazione di magra invernale (portata del fiume Po pari a 500 m³/s) e temperatura dell'acqua di 8 °C.

Nella Figura 19 è rappresentato il campo di temperatura sull'intero dominio di calcolo (riquadro a sinistra) e per un tratto di circa 4 km a valle della presa (riquadro a destra).

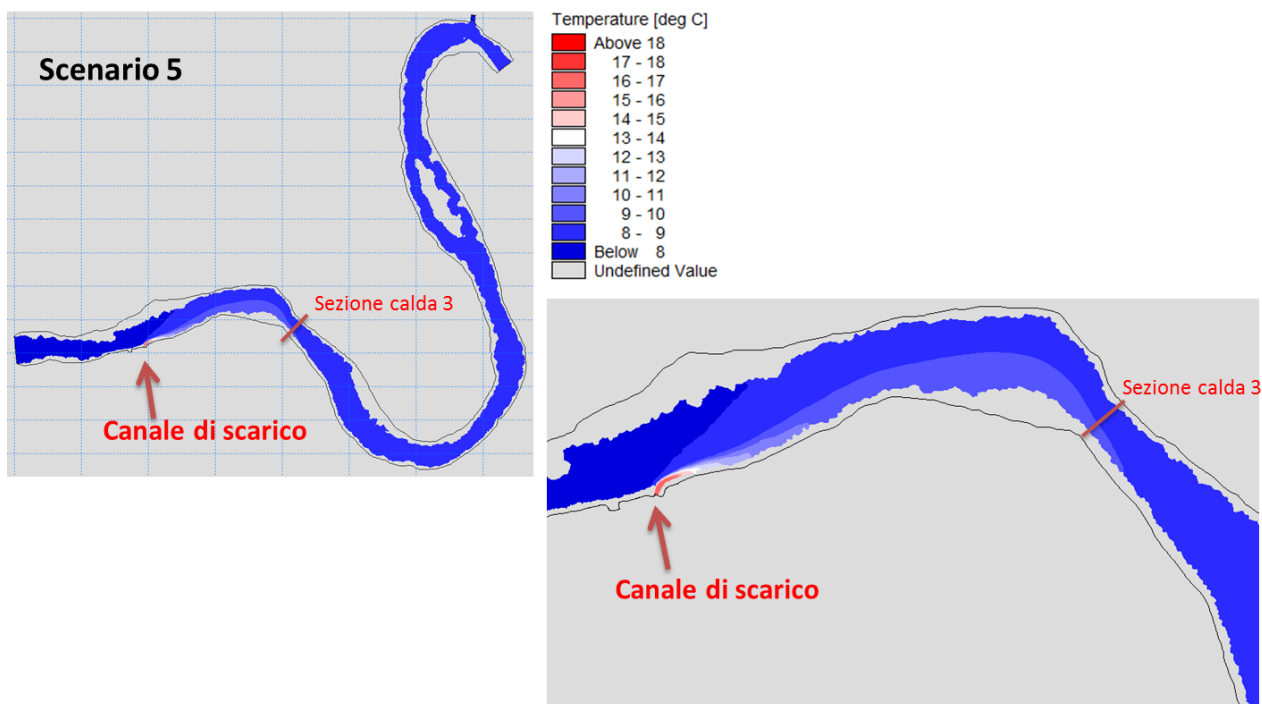


Figura 19 Campo termico calcolato per lo Scenario 5

La Tabella 12 riporta gli scarti di temperatura, riferiti alla T indisturbata, nelle 3 sezioni calde considerate, intera sezione e semisezione, per la verifica del rispetto dei limiti di legge.

Tabella 12 ΔT nelle 3 sezioni calde considerate (intera sezione e semi sezione)

	sezione calda 1		sezione calda 2		sezione calda 3	
	ΔT intera sezione (°C) (limite 3 °C)	ΔT semi sezione (°C) (limite 1 °C)	ΔT intera sezione (°C) (limite 3 °C)	ΔT semi sezione (°C) (limite 1 °C)	ΔT intera sezione (°C) (limite 3 °C)	ΔT semi sezione (°C) (limite 1 °C)
SCENARIO 5	0.58	0.00	0.75	0.03	0.64	0.48

6.3.2 Scenario 6

Situazione di portata media invernale (portata del fiume Po pari a 750 m³/s) e temperatura dell'acqua di 8 °C.

Nella Figura 20 è rappresentato il campo di temperatura sull'intero dominio di calcolo (riquadro a sinistra) e per un tratto di circa 4 km a valle della presa (riquadro a destra).

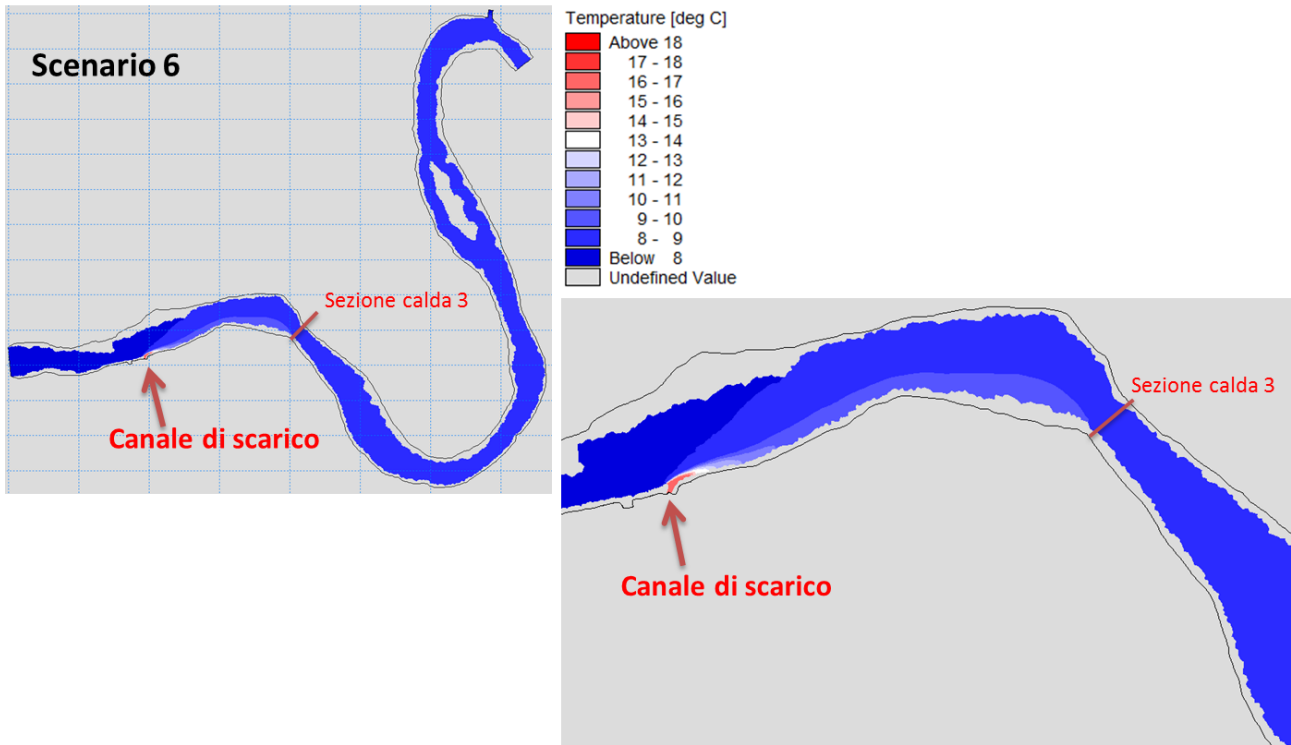


Figura 20 Campo termico calcolato per lo Scenario 6

La Tabella 13 riporta gli scarti di temperatura, riferiti alla T indisturbata, nelle 3 sezioni calde considerate, intera sezione e semisezione, per la verifica del rispetto dei limiti di legge.

Tabella 13 ΔT nelle 3 sezioni calde considerate (intera sezione e semi sezione)

	sezione calda 1		sezione calda 2		sezione calda 3	
	ΔT intera sezione (°C) (limite 3 °C)	ΔT semi sezione (°C) (limite 1 °C)	ΔT intera sezione (°C) (limite 3 °C)	ΔT semi sezione (°C) (limite 1 °C)	ΔT intera sezione (°C) (limite 3 °C)	ΔT semi sezione (°C) (limite 1 °C)
SCENARIO 6	0.44	0.00	0.51	0.01	0.43	0.28

6.3.3 Scenario 7

Situazione di magra estiva (portata del fiume Po pari a 370 m³/s) e temperatura dell'acqua di 24 °C.

Nella Figura 21 è rappresentato il campo di temperatura sull'intero dominio di calcolo (riquadro a sinistra) e per un tratto di circa 4 km a valle della presa (riquadro a destra).

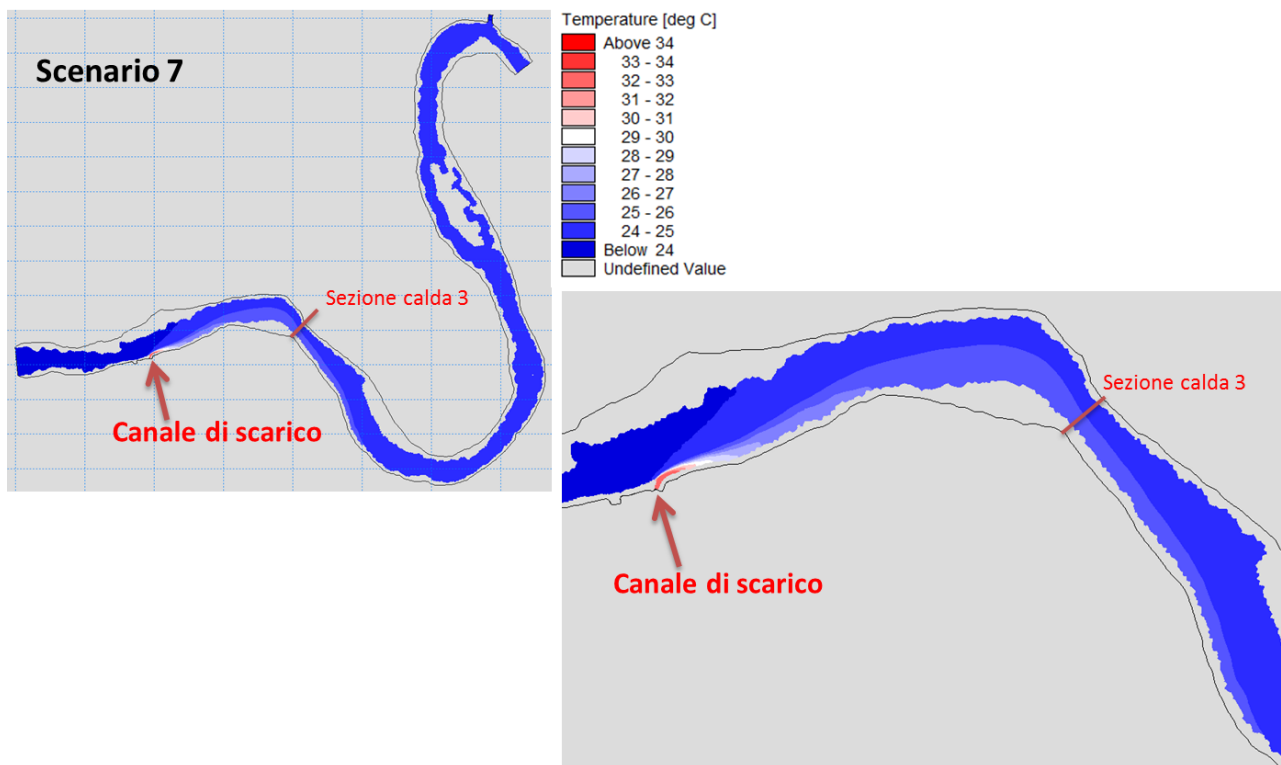


Figura 21 Campo termico calcolato per lo Scenario 7

La Tabella 14 riporta gli scarti di temperatura, riferiti alla T indisturbata, nelle 3 sezioni calde considerate, intera sezione e semisezione, per la verifica del rispetto dei limiti di legge.

Tabella 14 ΔT nelle 3 sezioni calde considerate (intera sezione e semi sezione)

	sezione calda 1		sezione calda 2		sezione calda 3	
	ΔT intera sezione (°C) (limite 3 °C)	ΔT semi sezione (°C) (limite 1 °C)	ΔT intera sezione (°C) (limite 3 °C)	ΔT semi sezione (°C) (limite 1 °C)	ΔT intera sezione (°C) (limite 3 °C)	ΔT semi sezione (°C) (limite 1 °C)
SCENARIO 7	0.70	0.00	1.00	0.07	0.87	0.70

6.3.4 Scenario 8

Situazione di portata media estiva (portata del fiume Po pari a 670 m³/s) e temperatura dell'acqua di 24 °C.

Nella Figura 22 è rappresentato il campo di temperatura sull'intero dominio di calcolo (riquadro a sinistra) e per un tratto di circa 4 km a valle della presa (riquadro a destra).

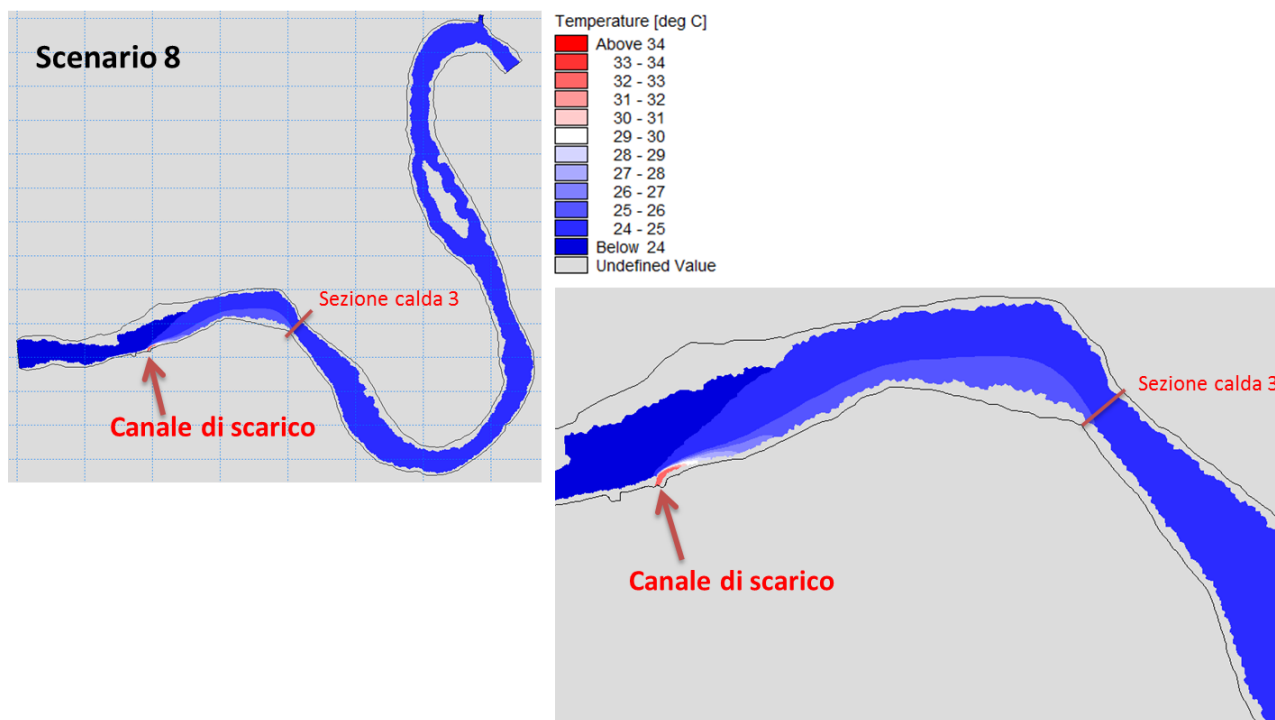


Figura 22 Campo termico calcolato per lo Scenario 8

La Tabella 15 riporta gli scarti di temperatura, riferiti alla T indisturbata, nelle 3 sezioni calde considerate, intera sezione e semisezione, per la verifica del rispetto dei limiti di legge.

Tabella 15 ΔT nelle 3 sezioni calde considerate (intera sezione e semi sezione)

	sezione calda 1		sezione calda 2		sezione calda 3	
	ΔT intera sezione (°C) (limite 3 °C)	ΔT semi sezione (°C) (limite 1 °C)	ΔT intera sezione (°C) (limite 3 °C)	ΔT semi sezione (°C) (limite 1 °C)	ΔT intera sezione (°C) (limite 3 °C)	ΔT semi sezione (°C) (limite 1 °C)
SCENARIO 8	0.46	0.00	0.56	0.01	0.48	0.33

7 ANALISI DEI RISULTATI

L'analisi dei risultati evidenzia che la perturbazione termica tende a mantenersi in corrispondenza della sponda destra del fiume per un ampio tratto del fiume Po a valle dello scarico; dalla sezione calda 3 si osserva l'instaurarsi di condizioni di maggiore rimescolamento che conducono ad una distribuzione uniforme della temperatura poco a valle della sezione stessa.

La maggiore criticità della sezione calda 3, specialmente negli scenari futuri, deriva dalla particolare morfologia dell'alveo (curvatura seguita da restringimento delle sponde) che comporta un maggiore rimescolamento della corrente con conseguente maggiore uniformità della temperatura.

Di seguito sono riassunti, per ogni tipologia di scenario indagato, i risultati ottenuti.

7.1 Scenari attuali in condizioni di funzionamento a pieno carico

I risultati più significativi per gli scenari riferiti al funzionamento a pieno carico dell'impianto nell'assetto attuale sono riportati nella sottostante Tabella 16.

Tabella 16 Risultati per gli scenari nell'assetto attuale (funzionamento a pieno carico)

SCENARI ATTUALI 4 gruppi 381 MW	portata pompe AC (m ³ /s)	ΔT presa-scarico (°C)	STAGIONE	PORTATA PO (m ³ /s)		T acqua Po (°C)	Livello valle dominio (m slm)	sezione calda 1		sezione calda 2		sezione calda 3	
								ΔT	ΔT	ΔT	ΔT	ΔT	ΔT
								intera sezione (°C)	semi sezione (°C)	intera sezione (°C)	semi sezione (°C)	intera sezione (°C)	semi sezione (°C)
scenario 1	30	7	inverno	magra	500	8	46.07	0.38	0.00	0.48	0.02	0.41	0.30
scenario 2	30	7	inverno	media	750	8	46.55	0.28	0.00	0.32	0.01	0.27	0.18
scenario 3	30	7	estate	magra	370	24	45.78	0.43	0.00	0.63	0.04	0.55	0.44
scenario 4	30	7	estate	media	670	24	46.39	0.29	0.00	0.36	0.01	0.30	0.21

Le situazioni più critiche sono relative alle due condizioni di magra, invernale ed estiva, del fiume Po con incrementi della temperatura calcolata nella semisezione fredda n° 3 pari a 0.30 °C e 0.44 °C, rispettivamente; entrambi i valori si mantengono, comunque, al di sotto del limite di legge (1 °C).

7.2 Scenari futuri in condizione di funzionamento a pieno carico

I risultati più significativi per gli scenari riferiti al funzionamento a pieno carico dell'impianto nell'assetto futuro sono riportati nella sottostante Tabella 17.

Tabella 17 Risultati per gli scenari nell'assetto futuro (funzionamento a pieno carico)

SCENARI FUTURI	portata pompe AC (m ³ /s)	ΔT presa-scarico (°C)	STAGIONE	PORTATA PO (m ³ /s)		T acqua Po (°C)	Livello valle dominio (m slm)	sezione calda 1		sezione calda 2		sezione calda 3	
								ΔT	ΔT	ΔT	ΔT	ΔT	ΔT
								intera sezione (°C)	semi sezione (°C)	intera sezione (°C)	semi sezione (°C)	intera sezione (°C)	semi sezione (°C)
scenario 5	40	8.3	inverno	magra	500	8	46.07	0.58	0.00	0.75	0.03	0.64	0.48
scenario 6	40	8.3	inverno	media	750	8	46.55	0.44	0.00	0.51	0.01	0.43	0.28
scenario 7	40	8.3	estate	magra	370	24	45.78	0.70	0.00	1.00	0.07	0.87	0.70
scenario 8	40	8.3	estate	media	670	24	46.39	0.46	0.00	0.56	0.01	0.48	0.33

Anche per gli scenari futuri, le situazioni più critiche sono relative alle due condizioni di magra, invernale ed estiva, del fiume Po con incrementi della temperatura calcolata nella semisezione fredda n° 3 pari a 0.48 °C e 0.70 °C, rispettivamente; entrambi i valori si mantengono, comunque, al di sotto del limite di legge (1 °C).

8 CONCLUSIONI

L'analisi effettuata per la verifica dello scarico termico della Centrale di La Casella nell'ipotesi futura non evidenzia, con impianto funzionante a pieno carico, situazioni di criticità (superamento dei limiti di legge vigenti) nelle condizioni idrologiche del fiume Po considerate.