

Appendice C

Studio di Dispersione Termica

Doc. No. P0014978-3-H1 – Luglio 2019



Studio modellistico della dispersione degli scarichi dell'acqua di raffreddamento della Centrale termoelettrica di Tavazzano – Montanaso (LO)

Relazione tecnica di sintesi



This report has been prepared under the DHI Business Management System certified by Bureau Veritas to comply with ISO 9001 (Quality Management)

ISO 9001
Management System Certification

BUREAU VERITAS
Certification Denmark A/S



Studio modellistico della dispersione degli scarichi dell'acqua di raffreddamento della Centrale termoelettrica di Tavazzano – Montanaso (LO)

Relazione tecnica di sintesi

Committente RINA Consulting S.p.A.
Referente del Committente ing. Linda Volpi



Vista della centrale di Tavazzano – Montanaso e del canale Muzza (LO)

Project manager	Davide Persi
Quality supervisor	Andrea Crosta
Author	Daniele Dolia
Codice progetto - elaborato	22802694-01-00102
Data di approvazione	04/07/2019
Revisione	3.0
Classificazione	Open



INDICE

1	Introduzione.....	1
2	Descrizione del caso studio	2
2.1	Descrizione del reticolo idrografico locale	2
2.2	Descrizione degli scenari analizzati	4
2.3	Normativa di riferimento	7
3	Dati a disposizione.....	7
3.1	Fonti di informazione utilizzate.....	7
3.2	Geometrie delle opere di prese e scarico.....	8
3.2.1	Opere di presa	9
3.2.2	Opere di scarico	10
3.3	Dati batimetrici	12
3.3.1	Canale Muzza	12
3.3.2	Canale Belgiardino.....	14
3.3.3	Fiume Adda.....	14
3.4	Dati idrologici	15
3.5	Dati di temperatura.....	17
4	Definizione degli scenari	19
4.1	Caso 1 - periodo invernale.....	19
4.2	Caso 2 - periodo estivo.....	20
5	Implementazione del modello numerico.....	20
5.1	MIKE 21 FM.....	20
5.2	Definizione della maglia di calcolo	21
5.3	Parametri del modello e condizioni a contorno.....	25
6	Risultati	27
6.1	Metodologia di verifica del rispetto dei limiti di legge	27
6.2	Caso 1 - periodo invernale.....	30
6.3	Caso 2 - periodo estivo.....	32
7	Conclusioni.....	35
8	Riferimenti	38



ALLEGATI

ALLEGATO A

Il codice di calcolo MIKE 21 – Descrizione tecnica dei moduli HD e AD

1 Introduzione

Il progetto proposto da EP Produzione S.p.A. prevede, in sostituzione dell'esistente sezione 8, la realizzazione di una nuova unità di produzione elettrica composta da un'unità di generazione di tipo turbogas e un'unità in cascata a vapore da circa 850 MWe da realizzare presso l'esistente Centrale termoelettrica di Tavazzano e Montanaso, in un'area attualmente priva di installazioni.

La Centrale di Tavazzano e Montanaso è attualmente costituita da due unità di produzione a ciclo combinato CCGT (Gruppo 5 e Gruppo 6) con rispettive potenze elettriche pari a 760 e 380 MWe e da una sezione (Gruppo 8) a ciclo convenzionale, della potenza di 320 MWe. Tutte le unità di produzione sono alimentate con il solo combustibile gas naturale.

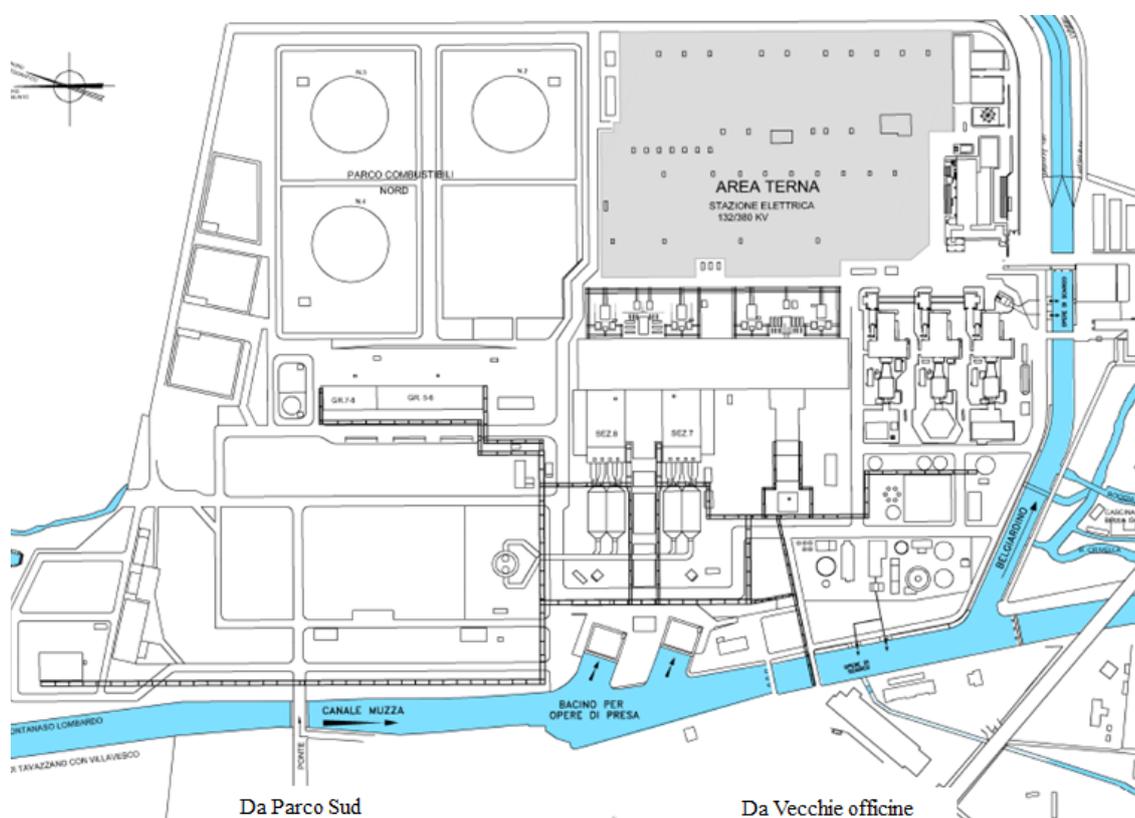


Figura 1.1 Layout della centrale di Tavazzano - Montanaso

Si riporta in Tabella 1.1 la sintesi della configurazione impiantistica attuale.

Tabella 1.1 Situazione impiantistica attuale

Modulo/sezione	Potenza Elettrica [MWe]	Potenza Termica [MWt]	Tipologia
TGA TGB Turbina a vapore 5	760	1400	Ciclo combinato
TGC Turbina a vapore 6	380	700	Ciclo combinato
Gruppo 8	320	800	Ciclo convenzionale

Il progetto sarà realizzato in due Fasi distinte: la prima fase (Fase 1) vedrà la realizzazione di un impianto di produzione di energia elettrica in ciclo aperto (OCGT), composto da una turbina a

gas di classe “H” dotata di bruciatori DLN (Dry Low NOx) avente potenza di targa pari a 560MWe.

La nuova unità prevede l’installazione di un camino di by-pass che ne permetta il funzionamento in ciclo aperto.

La seconda fase del progetto (Fase 2) prevede il completamento del nuovo gruppo in ciclo combinato (CCGT) con l’installazione di un generatore di vapore a recupero, del gruppo turbina a vapore e di tutti gli ausiliari necessari al funzionamento dell’impianto a vapore.

La nuova unità produttiva in ciclo combinato sarà ad alta efficienza (potenza complessiva di circa 850 MWe e rendimento non inferiore al 60%) ed andrà ad affiancare i moduli in ciclo combinato esistenti Gruppi 5 e 6.

Il presente studio è stato predisposto sia nella configurazione attuale della Centrale termoelettrica, sia nel suo assetto di progetto di Fase 2, ritenuto l’assetto maggiormente impattante in quanto nella configurazione di Fase 1 la nuova unità (OCGT) sarà esercita in ciclo aperto e pertanto il rilascio termico dovuto all’acqua di raffreddamento sarà trascurabile.

L’analisi è stata condotta utilizzando il codice di calcolo MIKE 21 HD FM, modello bidimensionale idrodinamico in grado anche di risolvere le equazioni di dispersione e trasporto della temperatura.

2 Descrizione del caso studio

2.1 Descrizione del reticolo idrografico locale

Il reticolo idrografico locale in prossimità della Centrale di Tavazzano e Montanaso è costituito dal Fiume Adda e dai canali Muzza e Belgiardino, Figura 2.1.

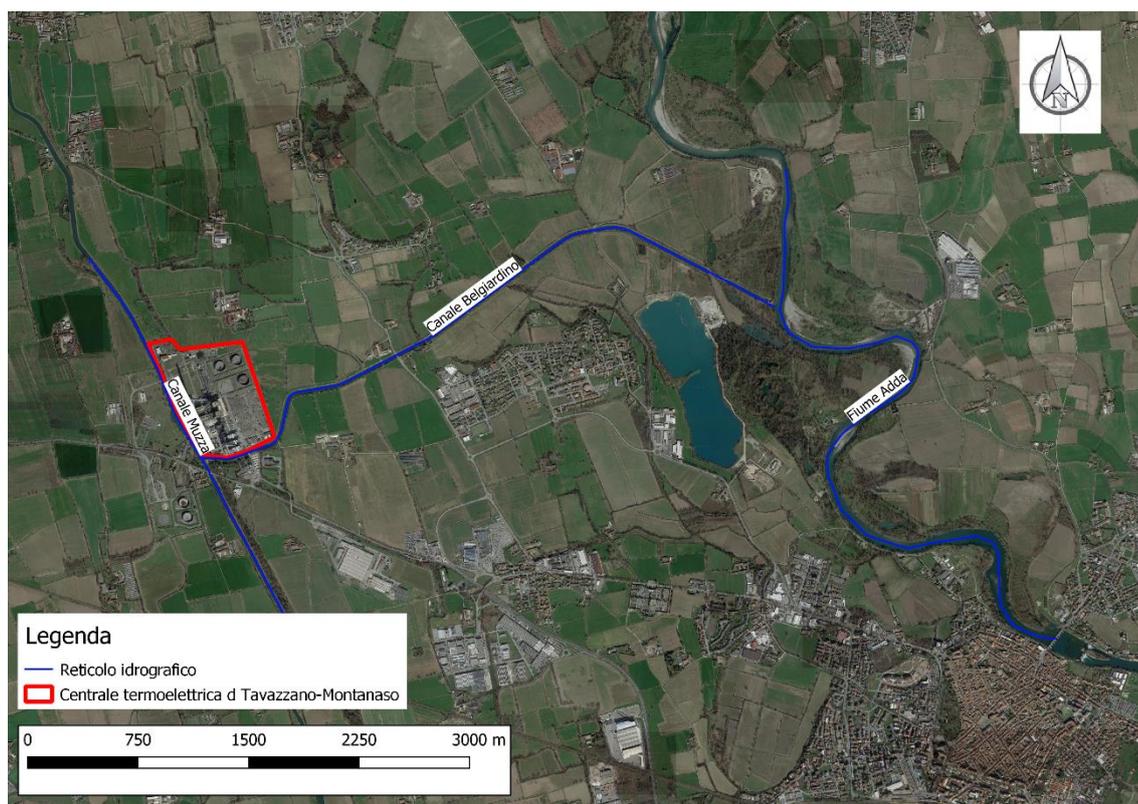


Figura 2.1 Identificazione del reticolo idrografico in prossimità della Centrale di Tavazzano-Montanaso (poligono rosso)

Il Fiume Adda (280 km) nasce sopra Bormio, scorre in Valtellina e sfocia nel lago di Como di cui è il principale immissario ed emissario. Il fiume riveste una grande importanza nell'idrologia lombarda sia per la notevole portata, sia per la vasta porzione di territorio interessato.

Il regime idrologico del tratto di Fiume Adda a valle del Lago di Como è regolato da una diga di ritenuta realizzata tra i laghetti di Garlate e Olginate: la regolazione risponde alle esigenze di controllo del livello del lago di Como e alle necessità irrigue e industriali a valle di tale lago. Le portate che defluiscono nel Fiume Adda in prossimità di Lodi possono pertanto subire notevoli variazioni, da poche decine di m^3/s a parecchie centinaia di m^3/s (oltre 1300), come conseguenza della regolazione artificiale dei deflussi.

Il canale Muzza è il più importante canale alimentato dal Fiume Adda. Esso può derivare in sponda destra, all'altezza di Cassano, una portata massima di $112 m^3/s$ e alimenta un territorio di circa 50.000 ettari nel Lodigiano e le centrali termoelettriche di Cassano e Tavazzano-Montanaso. Le portate del canale Muzza assumono valori diversi in relazione ai periodi stagionali di irrigazione essendo le acque del canale tutte impegnate a favore degli utenti irrigui del Consorzio di Bonifica Muzza - Bassa Lodigiana, che ha in gestione le utenze del canale stesso: le portate nel canale possono oscillare tra i 20 e i $60 m^3/s$ (dati 1994-2001).

Per garantire il deflusso delle portate del canale Muzza lungo tutto l'arco dell'anno (anche nei periodi di manutenzione della rete irrigua e conseguente asciutta totale o parziale a valle della Centrale), è stato realizzato il canale scaricatore Belgiardino che, partendo dalla Muzza immediatamente a valle della Centrale, va a confluire direttamente nel Fiume Adda dopo un percorso di circa 4.500 m. La principale funzione dello scaricatore consiste dunque nel dirottare in Adda le acque transitanti presso la Centrale di Tavazzano-Montanaso, permettendo la continuità del servizio di raffreddamento anche quando il sistema di canali a valle della Centrale fosse parzialmente o integralmente indisponibile per asciutte legate a lavori di manutenzione. In tali circostanze lo scaricatore può arrivare a far defluire una portata massima di $40 m^3/s$. In condizioni normali le portate che defluiscono nel canale oscillano tra i 20 e i $30 m^3/s$.

2.2 Descrizione degli scenari analizzati

La Centrale termoelettrica di Tavazzano e Montanaso, identificata in Figura 2.2, sorge su un'area di circa 70 ettari nei Comuni di Montanaso Lombardo e di Tavazzano con Villavesco, in provincia di Lodi, a 25 km da Milano. È vicina a importanti centri di consumo di energia elettrica e ha una buona disponibilità di acqua tutto l'anno grazie alla rete idraulica superficiale composta dai canali Muzza, Belgiardino e dal fiume Adda, necessaria per la condensazione del vapore scaricato dalle turbine.

La potenza installata è pari a 1.140 MWe e gli impianti dedicati alla produzione di energia elettrica utilizzano solo gas naturale.

Attualmente sono in esercizio due gruppi a ciclo combinato CCGT (Combined cycle gas turbine). Il primo (Gruppo 5), da 760 MWe, è entrato in servizio a gennaio 2005 ed è costituito da due turbine a gas e due generatori di vapore a recupero, accoppiati a una turbina a vapore. Il secondo (Gruppo 6), da 380 MWe, è entrato in servizio a novembre 2005 e ha una sola turbina a gas e un solo generatore di vapore accoppiato alla turbina a vapore.

È presente inoltre una unità convenzionale (Gruppo 8) da 320 MWe in ciclo convenzionale alimentata a gas naturale.

La Centrale preleva l'acqua di raffreddamento dei condensatori dal canale Muzza e la scarica parte nel canale Muzza stesso e parte nel canale Belgiardino. Quest'ultimo confluisce nell'Adda circa 4.5 km dopo la derivazione, mentre il canale Muzza prosegue oltre e confluisce in Adda circa 28 km più a valle.

Tuttavia, a seconda del periodo dell'anno, le acque di raffreddamento vengono rilasciate secondo diverse modalità, in particolare:

- nel periodo invernale, tutta l'acqua del canale Muzza viene deviata sul canale Belgiardino a meno del deflusso minimo vitale della Muzza, Figura 2.3;
- nel periodo estivo, il canale Belgiardino viene parzialmente chiuso, a meno del suo deflusso minimo vitale, e l'acqua viene convogliata principalmente nel canale Muzza, Figura 2.4.

L'assetto di progetto (Fase 2) prevede:

- una nuova sezione in ciclo combinato (CCGT) completa di generatore di vapore a recupero, del gruppo turbina a vapore e di tutti gli ausiliari necessari al funzionamento dell'impianto a vapore, in sostituzione dell'esistente Gruppo 8;
- mantenimento in funzione dei Gruppi 5 e 6.

Si riportano in Tabella 2.1 le informazioni fornite dalla Centrale relative alle condizioni di scarico termico (condensatori) per i vari gruppi.

Tabella 2.1 Condizioni di scarico termico dei gruppi

Sezione	Gruppo 5	Gruppo 6	Gruppo 8	OCGT (Fase 1)	CCGT (Fase 2)
Portata [m ³ /s]	14.3	12.5	12.5	-	12.5
Delta T [°C]	8.1	4.7	7.6	-	7.6
Potenza termica [MWt]	485	246	397	-	397

Si evidenzia che dal punto di vista modellistico la condizione attuale (Gruppi 5, 6 e 8) non differisce da quella di progetto che prevede il funzionamento dei Gruppi 5, 6 e nuovo CCGT.

Questo perché nell'assetto di progetto l'unica variante rispetto alla situazione attuale è l'introduzione della nuova sezione a ciclo combinato in sostituzione al Gruppo 8. Tuttavia, le portate prelevate e rilasciate dai due gruppi risultano pressoché di pari valore e localizzate nella stessa posizione, come meglio descritto nel capitolo "Geometrie delle opere di prese e scarico", e rilasciate alla stessa differenza di temperatura. Di conseguenza l'impatto degli scarichi termici nei corpi idrici recettori risulta analogo per le due configurazioni. Per semplicità espositiva, nel seguito della relazione si farà riferimento solo all'assetto di progetto (Fase 2), nella configurazione invernale ed estiva.



Figura 2.2 Inquadramento del sito (poligono rosso) ed indicazione della posizione delle opere di scarico dell'acqua di raffreddamento della Centrale di Tavazzano e Montanaso

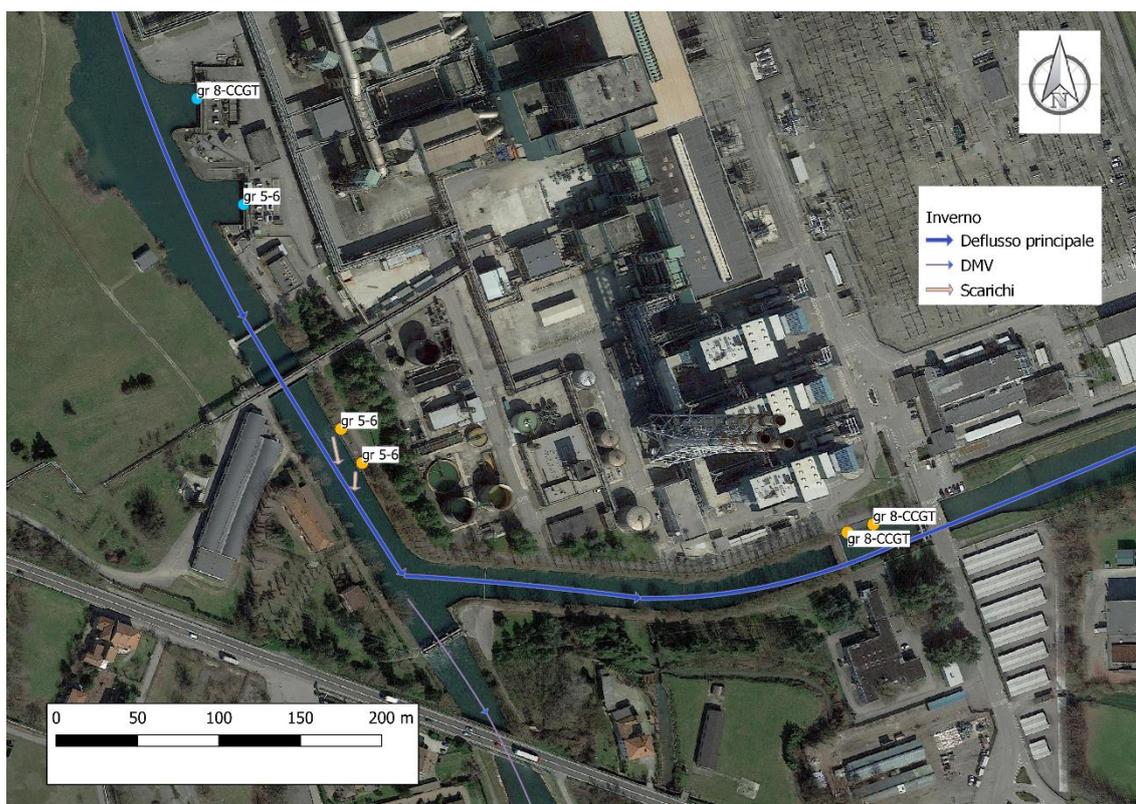


Figura 2.3 Identificazione del deflusso principale del canale Muzza e degli scarichi della centrale di Tavazzano nel periodo invernale. In azzurro le opere di presa, in arancione i rilasci.

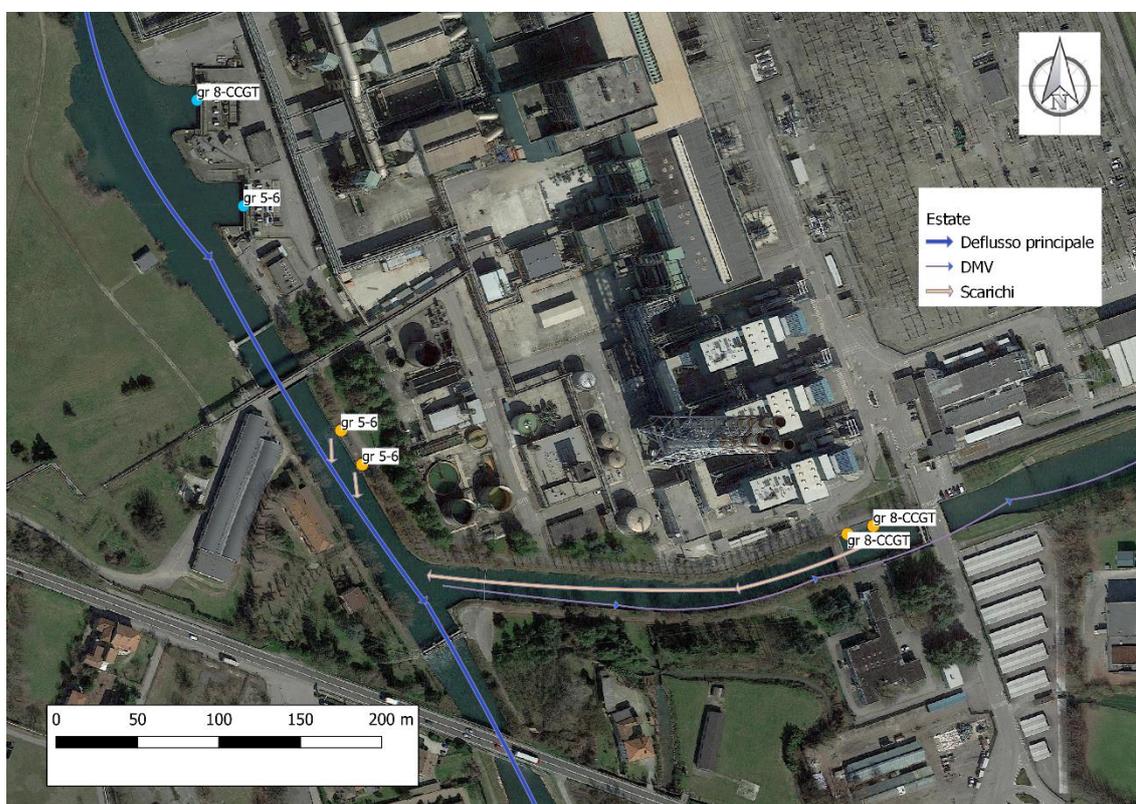


Figura 2.4 Identificazione del deflusso principale del canale Muzza e degli scarichi della centrale di Tavazzano nel periodo estivo. In azzurro le opere di presa, in arancione i rilasci.

2.3 Normativa di riferimento

Per la configurazione estiva ed invernale, viene verificato il rispetto della normativa vigente in termini di compatibilità ambientale delle temperature di scarico della Centrale.

La normativa di riferimento a tutela dei corpi idrici recettori di acque di scarico è il Testo Unico Ambientale (T.U.A) emanato con Decreto legislativo del 3 aprile 2006, n. 152 e successive modifiche ed integrazioni.

Il documento riporta nella sua Parte Terza, Allegato 5 (Limiti di emissione degli scarichi idrici), la Tabella 3 (Valori limiti di emissione in acque superficiali e in fognatura), che alla nota 1 recita:

- (1) 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. Per i laghi la temperatura dello scarico non deve superare i 30 °C e l'incremento di temperatura del corpo recipiente non deve in nessun caso superare i 3 °C oltre 50 metri di distanza dal punto di immissione. 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. Per il mare e per le zone di foce di corsi d'acqua non significativi, la temperatura dello scarico non deve superare i 35 °C e l'incremento di temperatura del corpo recipiente non deve in nessun caso superare i 3 °C oltre i 1000 metri di distanza dal punto di immissione. Deve inoltre essere assicurata la compatibilità ambientale dello scarico con il corpo recipiente ed evitata la formazione di barriere termiche alla foce dei fiumi.

Inoltre, per la Convenzione del 15 maggio 1975 stipulata tra gli Enti Locali e l'ENEL (C/SPT/SOIC/T.T. n. 12971) "il massimo valore medio della temperatura dell'acqua nella sezione del 'canale scaricatore in Adda' immediatamente a monte del punto d'immissione nel fiume Adda è di 30 °C".

3 Dati a disposizione

3.1 Fonti di informazione utilizzate

L'implementazione del modello numerico per l'analisi delle temperature degli scarichi della Centrale richiede dati in input di diversa origine.

Tra le informazioni principali per implementare la modellazione idraulica bidimensionale, vi sono i dati altimetrici dei canali e del fiume Adda, così come le informazioni geometriche relative alle opere di presa e rilascio della Centrale.

Gli input di portata, così come i dati di temperatura dell'acqua, sono stati determinati a partire da diverse fonti, in modo da utilizzare un dataset il più completo possibile.

Tra i documenti consultati per la stesura della presente relazione vi è lo Studio di Impatto Ambientale presentato da Endesa Italia nel 2006 dal titolo: "Centrale di Tavazzano – Montanaso Realizzazione dei moduli 9 e 10 a ciclo combinato single shaft". Il documento a sua volta fa riferimento ad altri lavori svolti in precedenza, tra i quali:

- Granata T. (1998): "Centrale di Tavazzano-Montanaso. Caratterizzazione della perturbazione termica indotta dallo scarico delle acque di raffreddamento del condensatore nei canali Muzza e Belgiardino e nel Fiume Adda" – Relazione Tecnica Enel Produzione/ULM-PC n. 212TZ16540 (settembre).

- Granata T. (2001): “Centrale termoelettrica di Tavazzano-Montanaso. Valutazione dell’incremento termico indotto nel Fiume Adda dallo scarico delle acque di raffreddamento della Centrale” – Relazione Tecnica Enel Produzione/ULM-PC n. 212TZ16589 Rev. 1 (marzo).
- Imp. E. Grassetto (1979): “Centrale termoelettrica di Tavazzano-Montanaso. Gr. 1 e 2. Opera di presa acqua di circolazione. Pianta a quota 78.20 – Dis. n. 41727 Rev. 6 scala 1:50”(agosto).
- Imp. E. Grassetto (1979): “Centrale termoelettrica di Tavazzano-Montanaso. Gr. 1 e 2. Opera di presa acqua di circolazione. Sezione longitudinale A-A– Dis. n. 41729 Rev. 3 scala 1:50”(febbraio).
- Imp. E. Grassetto (1978): “Centrale termoelettrica di Tavazzano-Montanaso. Gr. 1 e 2. Opera di presa acqua di circolazione. Sezione trasversale G-G – Dis. n. 41735 Rev. 1 scala 1:50”(luglio).

Nei documenti sopra citati vengono riportati dati geometrici, idrologici e di temperatura utili ai fini del presente studio.

Dati più aggiornati relativi alla temperatura del fiume Adda indisturbato sono stati reperiti dal sito della Regione Lombardia (<https://www.arpalombardia.it/>). Questi dati sono disponibili per gli anni 2015, 2016 e 2017.

Il committente ha fornito dati recenti, anno 2017 e 2018, di portata osservata nel canale Belgiardino e nel fiume Adda in corrispondenza della confluenza con il Belgiardino.

Per quanto riguarda la caratterizzazione geometrica del fiume Adda nel tratto oggetto di analisi, sono state utilizzate le sezioni trasversali già disponibili a DHI nell’ambito delle attività di previsione delle piene del Bacino del Po, per conto di Arpa ER / AIPO. Tali sezioni fanno riferimento ad un rilievo dei primi anni duemila e rappresentano quindi un aggiornamento topografico rispetto quanto adottato negli studi di dispersione termica pregressi.

Grazie al sistema previsionale operativo sul bacino del fiume Po, è stato possibile estrarre la serie di portata del fiume Adda a Lodi al fine di confermare o modificare la scelta della portata di riferimento sul fiume Adda stesso.

Infine, è stata utilizzata la Carta Topografica Regionale della Lombardia Scala 1:10000 per desumere parte delle informazioni altimetriche dei canali artificiali.

3.2 Geometrie delle opere di prese e scarico

In Figura 3.1 si riporta la localizzazione delle opere di presa e di rilascio delle acque di raffreddamento dei condensatori della Centrale.

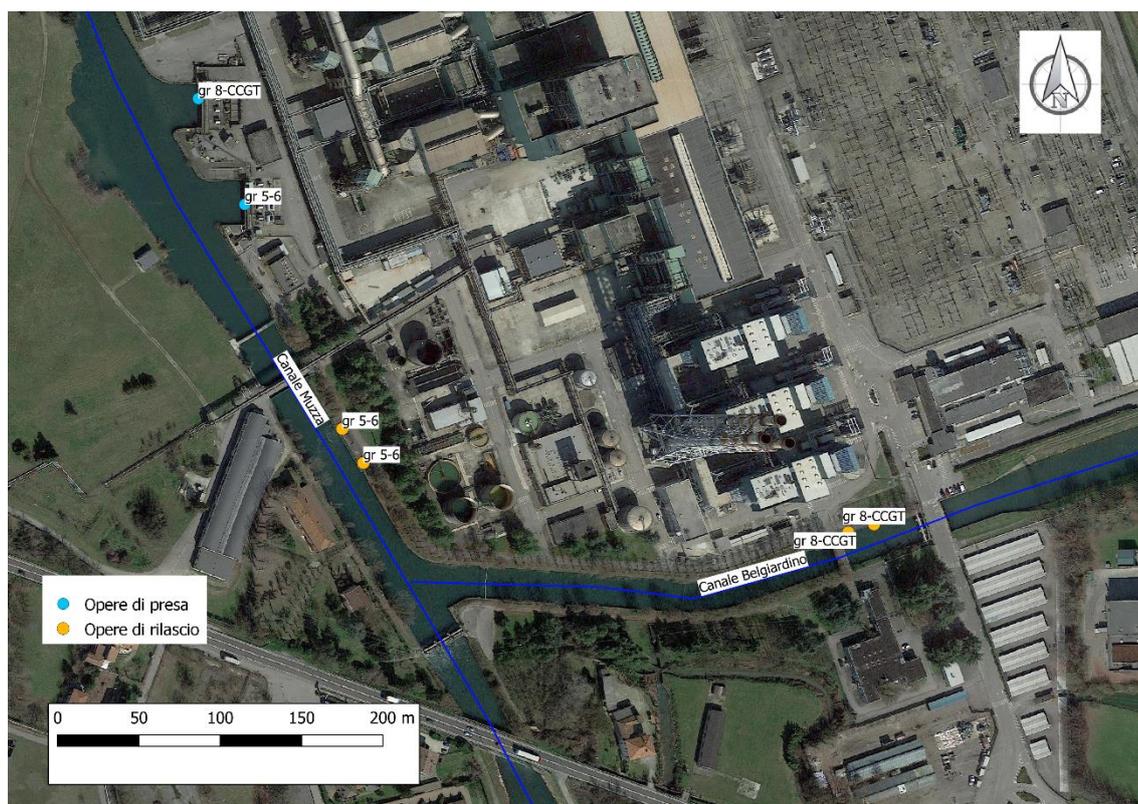


Figura 3.1 Localizzazione delle opere di presa e rilascio delle acque di raffreddamento dei condensatori della Centrale di Tavazzano - Montanaso

3.2.1 Opere di presa

Le opere di presa della Centrale, così come mostrato in Figura 3.1, insistono sul canale Muzza e sono collocati a circa 300 metri a monte della confluenza con il canale Belgiardino. In particolare, si possono identificare due distinte opere di presa, una per i gruppi 5 e 6 e l'altra per le sezioni 8 o per la nuova sezione CCGT (situazione di progetto).

Di fatto, l'opera di presa per i gruppi 5 e 6 si configura come un'unica struttura che presenta dal lato del canale Muzza quattro sezioni di aspirazione identiche, di forma rettangolare, aventi una luce di 6.20 m ciascuna ed una altezza di 8.80 m, il cui basamento è posto ad una quota di 75.50 m s.l.m.m. L'acqua del canale è convogliata in tale struttura per mezzo di una bocca di presa larga 27.8 m con un fondo posto a 78.8 m s.l.m.m.; è inoltre presente un tramezzo di convogliamento di spessore pari ad 1.2 m per regolare l'afflusso delle acque tra le sezioni afferenti al gruppo 5 e quelle del gruppo 6, che di fatto porta l'area efficace di aspirazione della bocca, che è quella che interessa ai fini dello studio, a 90.44 m². In Figura 3.2 sono riportati i particolari della sezione longitudinale all'imbocco dell'opera di presa tratte dagli studi pregressi.

Analogamente, l'opera di presa per le sezioni 8 e nuova sezione CCGT si configura come un'unica struttura che presenta dal lato del canale Muzza quattro sezioni di aspirazione identiche, di forma rettangolare, aventi una luce di 6.20 m ciascuna ed una altezza di 8.80 m, il cui basamento è posto ad una quota di 75.50 m s.l.m.m.; di fatto, per quanto riguarda le sezioni di aspirazione esse sono identiche a quelle della Figura 3.2. La sezione efficace della bocca di aspirazione è quindi pari a 94.52 m².

Tenendo conto che a livello di progetto si considera un livello massimo nel canale Muzza in corrispondenza alle opere di presa di 82.2 m, le caratteristiche di aspirazione sono riassunte in Tabella 3.1.

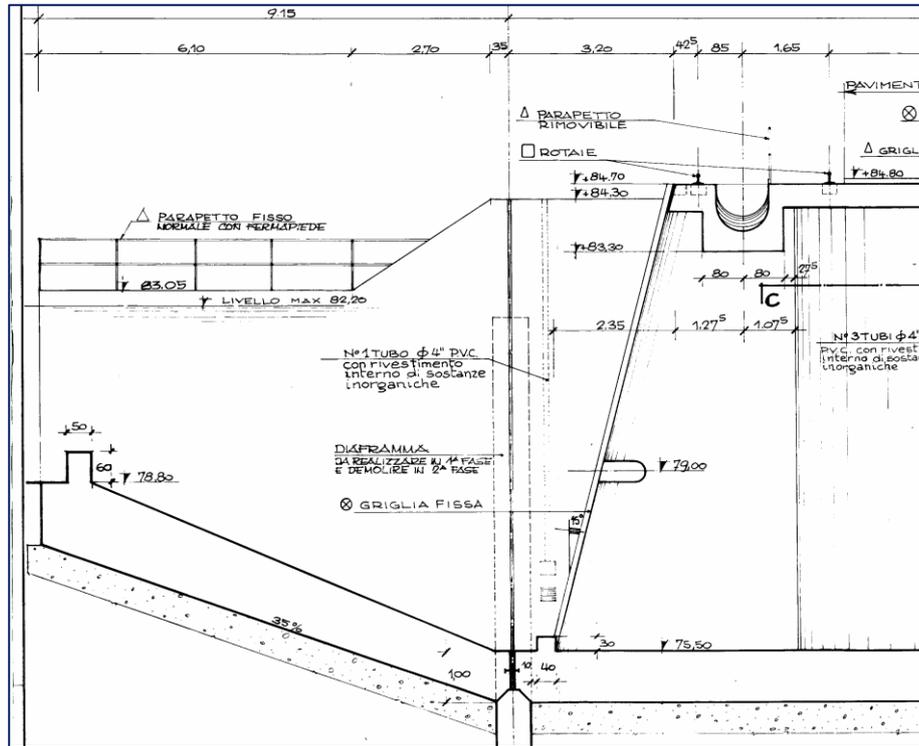


Figura 3.2 Opera di presa gruppi 5/6 e sezioni 7/8 - sezione longitudinale nella zona di aspirazione

Tabella 3.1 Parametri caratteristici delle opere di presa

Dimensione caratteristica	Opera di presa moduli 5/6	Opera di presa sezioni 8/CCGT	Unità di misura
Sezioni di aspirazione	4	4	==
Larghezza di ogni sezione	6.20	6.20	m
Altezza di ogni sezione	6.5	6.5	m
Larghezza bocca di presa	27.8 (26.6)	27.8	m
Altezza bocca di presa	3.40	3.40	m
Quota max superiore	82.2	82.2	m
Quota inferiore	78.8	78.8	m
Sezione efficace	90.44	94.52	m ²
Velocità di aspirazione nominale	0.30	0.26	m/s

3.2.2 Opere di scarico

Diversamente dalle opere di presa, che prelevano con due strutture affiancate dallo stesso bacino di presa, le opere di scarico per i gruppi 5/6 e per le sezioni 8 e la nuova CCGT sono posizionate in punti diversi, come si può constatare da Figura 3.1.

L'opera di scarico per i gruppi 5/6 restituisce le acque di raffreddamento al canale Muzza, circa 160 m a valle dell'opera di presa e circa 90 m a monte rispetto all'imbocco del canale Belgiardino, che deriva dal Muzza stesso. Le acque provenienti dal circuito di raffreddamento vengono scaricate per mezzo di un diffusore per ciascun gruppo avente una sezione di scarico

quadrata di larghezza pari a 5 m e di altezza pari a 4.40 m, come si può ricavare da sezione di Figura 3.3; tuttavia, poiché il livello massimo nel canale è stabilito in 82 m s.l.m. ed il fondo dell'opera è posto a 78.6 m, la sezione efficace massima di scarico per ciascun diffusore risulta di 17 m².

L'opera di scarico per le sezioni 8 o per la nuova sezione CCGT restituisce le acque di raffreddamento al canale Belgiardino, circa 280 m dopo l'imbocco del canale Belgiardino. Le acque provenienti dal circuito di raffreddamento vengono scaricate per mezzo di un diffusore per ciascun gruppo avente una sezione di scarico quadrata di larghezza pari a 5 m e di altezza pari a 3.60 m, come si può ricavare dalla sezione di Figura 3.4; tuttavia, poiché il livello massimo nel canale è stabilito in 82 m s.l.m. ed il fondo dell'opera è posto a 78.9 m, la sezione efficace massima di scarico per ciascun diffusore risulta di 15.5 m².

Tenendo conto che a livello di progetto si considera un livello massimo nei canali interessati dagli scarichi di 82.0 m, le caratteristiche di scarico sono riassunte in Tabella 3.2.

Infine, si segnala che, in base alla convenzione con il Consorzio, la restituzione delle acque al canale Muzza deve avvenire in modo che il pelo libero nel canale, appena a monte dello sbarramento, si mantenga costante e pari ad un valore di 81.5 m s.l.m.; tale regolazione viene fatta mediante apposite paratoie.

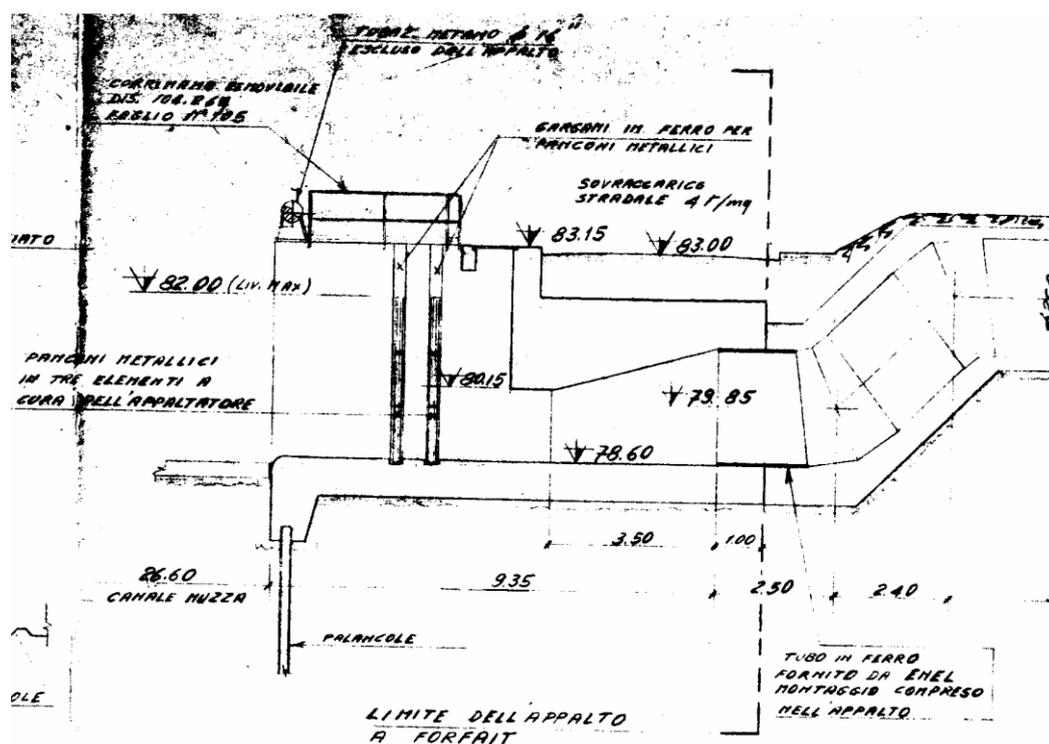


Figura 3.3 Opera di scarico gruppi 5/6. Sezione longitudinale della zona di scarico

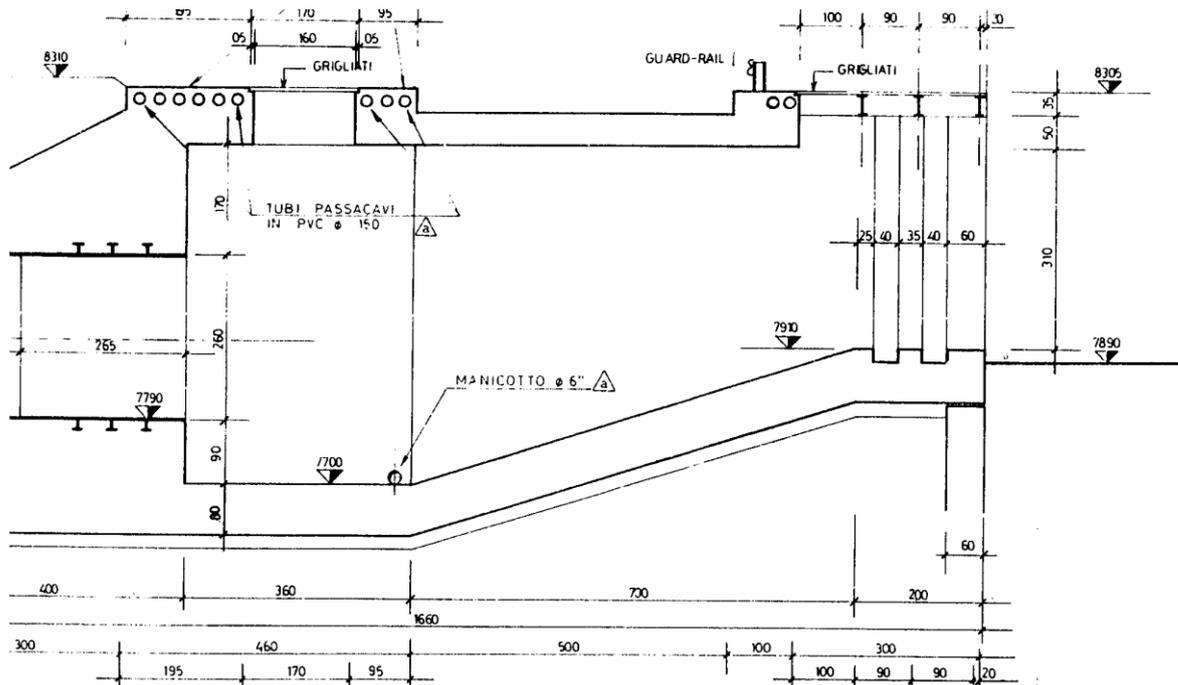


Figura 3.4 Opera di scarico gruppi 8/CCGT. Sezione longitudinale della zona di scarico

Tabella 3.2 Parametri caratteristici delle opere di scarico

Dimensione caratteristica	Opera di scarico moduli 5/6	Opera di scarico sezioni 8/CCGT	Unità di misura
Sezioni di scarico	2	2	==
Larghezza di ogni sezione	5	5	M
Altezza max di scarico	3.7	3.1	M
Quota max superiore	82.0	82.0	M
Quota inferiore	78.6	78.9	M
Sezione totale max	34	31.2	m ²
Portata totale allo scarico	26.8	12.5	m ³ /s
Incremento termico allo scarico	6.53	7.6	°C
Velocità di scarico nominale	0.79	0.80	m/s

3.3 Dati batimetrici

3.3.1 Canale Muzza

Il canale Muzza, trattandosi di un manufatto antropico, ha una geometria piuttosto regolare lungo tutta la tratta di interesse. La forma della sezione è stata desunta dalla relazione idrologica-idraulica intitolata "Rimozione condotta attraversamento canale Muzza", redatta da Enereco nel 2013. La geometria qui dedotta è stata mantenuta lungo tutta la tratta, traslandola nello spazio in accordo con i dati altimetrici derivante dalla carta topografica e le informazioni delle opere di presa e rilascio in modo da raccordare tutte le informazioni a disposizione e

ricostruire l'intero profilo. A titolo d'esempio si riporta in Figura 3.6 una sezione ricostruita del canale Muzza.

Le sezioni monodimensionali sono state infittite lungo tutto il tratto di canale analizzato grazie ad una funzionalità specifica del modello MIKE HYDRO che permette l'interpolazione delle sezioni secondo le specifiche dell'utilizzatore. Le sezioni così ottenute utilizzate per la costruzione della geometria bidimensionale del canale. Questa operazione è stata possibile grazie ad un tool del modello idraulico MIKE HYDRO, che permette appunto di ricostruire una batimetria bidimensionale a partire da una serie di sezioni monodimensionali attraverso un'opportuna interpolazione dei dati geometrici. In Figura 3.5 si riassumono gli step seguiti, a partire dalle sezioni monodimensionali di partenza fino alla batimetria bidimensionale dell'intero canale Muzza.

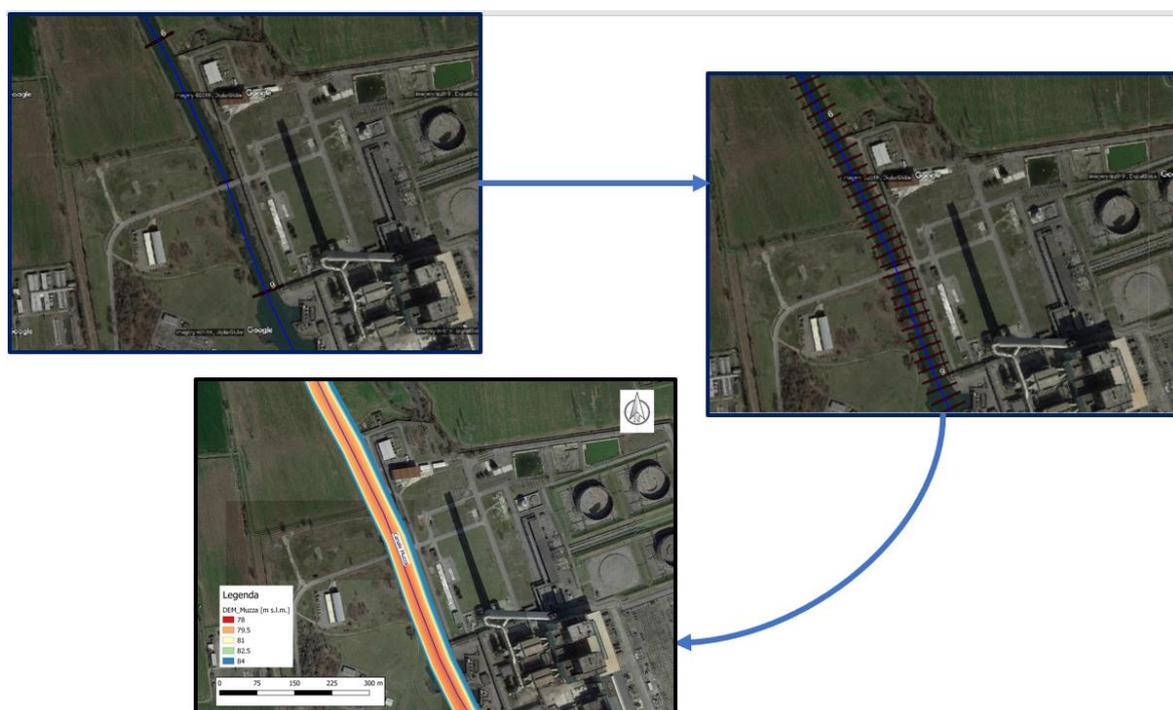


Figura 3.5 Procedura di definizione della geometria bidimensionale a partire dalle sezioni monodimensionali.

Per quanto riguarda il tratto di interesse ai fini della modellazione numerica, la sezione di ingresso del canale è stata collocata a circa 1400 m a monte del bacino di presa, mentre la sezione di uscita è stata collocata 1400 m a valle della derivazione del canale Belgiardino.

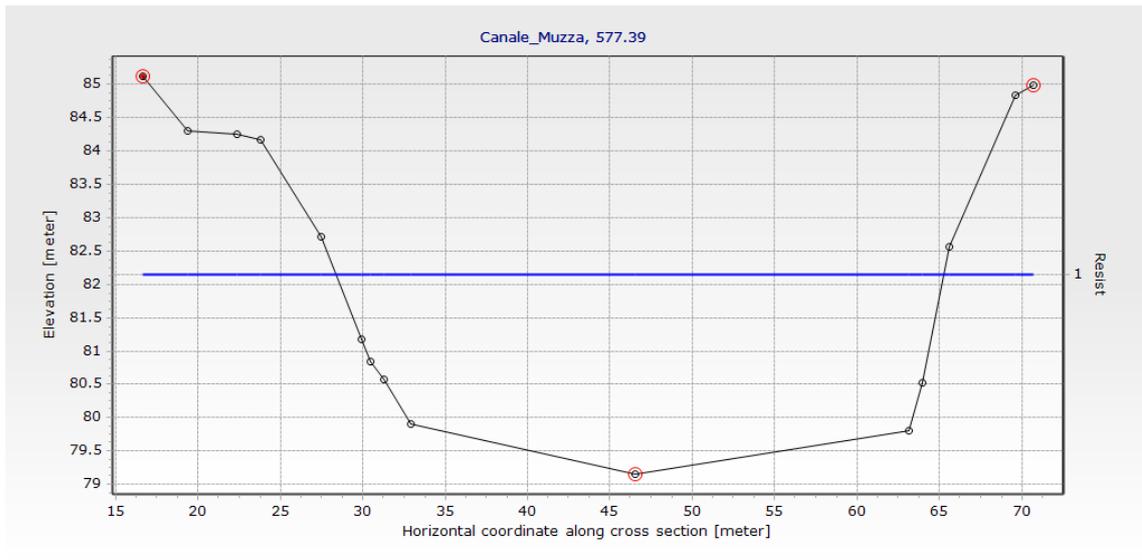


Figura 3.6 Sezione tipo del canale Muzza

3.3.2 Canale Belgiardino

Anche il canale Belgiardino, così come il Muzza, essendo artificiale ha una geometria praticamente regolare. Per ricostruire le informazioni altimetriche lungo tutta la sua tratta, si è utilizzata la sezione nota riportata in Figura 3.7, localizzata a monte della confluenza con il fiume Adda. Le informazioni ivi riportate sono state combinate con le informazioni altimetriche della carta topografica e delle opere di scarico al fine di creare una serie regolare di sezioni conformi alla realtà.

Le sezioni monodimensionali così determinate hanno subito un processamento analogo a quello descritto nel paragrafo precedente “ Canale Muzza”, ottenendo così la batimetria bidimensionale.

A partire da un numero finito di sezioni, una funzionalità specifica del modello idraulico MIKE HYDRO ha permesso di ricostruire il profilo bidimensionale dell'intero tratto lungo circa 4500 m.

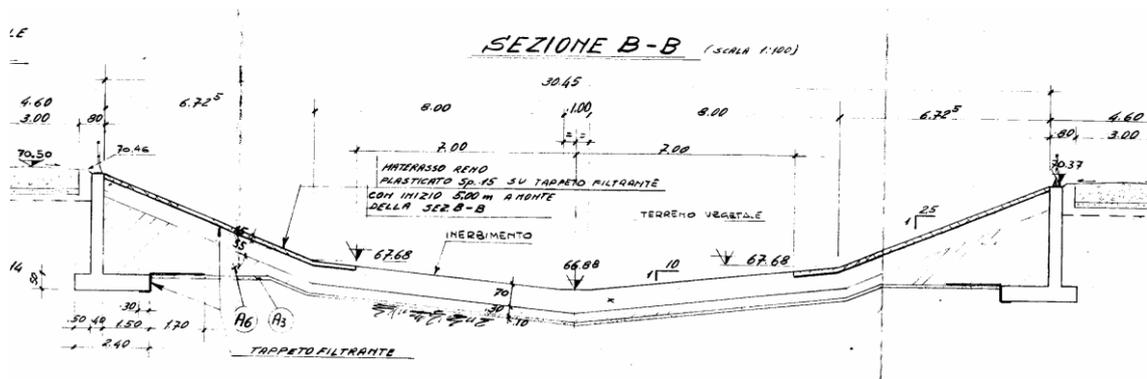


Figura 3.7 Sezione di canale Belgiardino a monte dell'opera di sbocco

3.3.3 Fiume Adda

La ricostruzione del profilo batimetrico del Fiume Adda viene effettuata dal modello numerico impiegato nello studio a partire da una serie di sezioni dell'alveo disponibili a DHI nell'ambito

delle attività di previsione delle piene del Bacino del Po, per conto di AIPO. Tali sezioni, riportate in Figura 3.8, fanno riferimento ad un rilievo dei primi anni duemila.

Il tratto interessato parte da circa 1000 metri a monte della confluenza del Belgiardino in Adda e termina all'idrometro di Lodi, posto a circa 2.5 km a valle in corrispondenza del ponte della SS235.

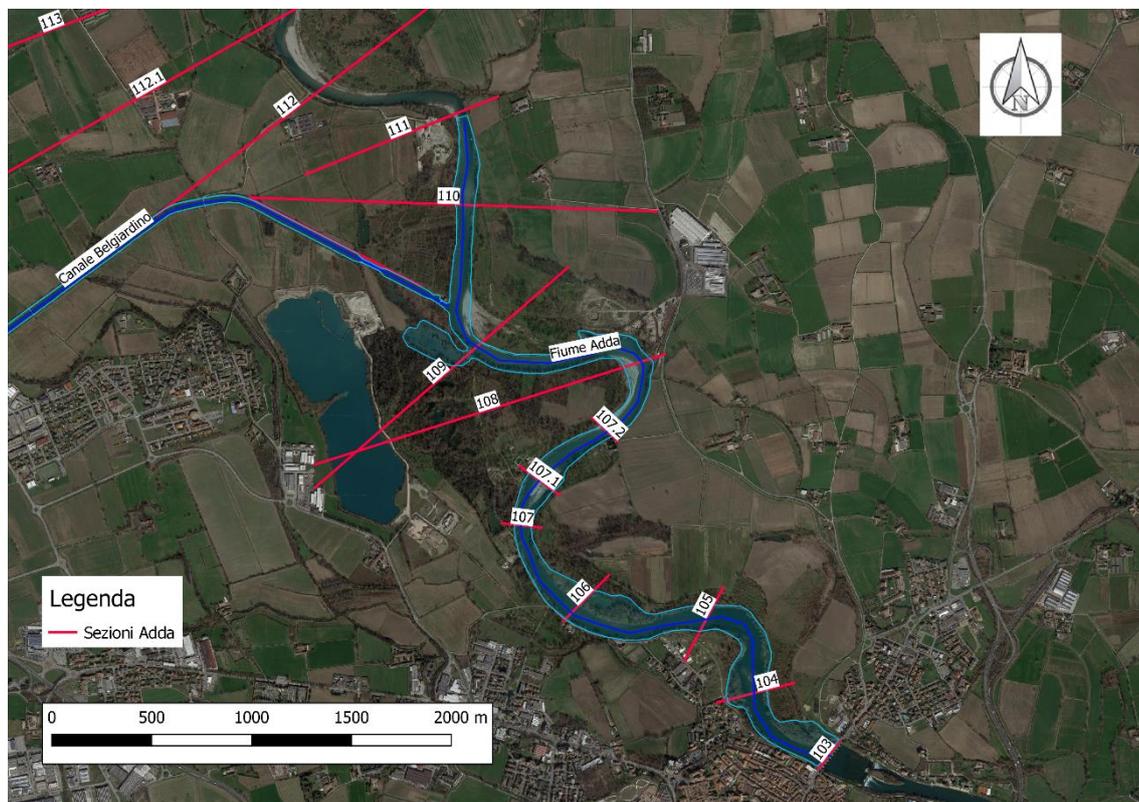


Figura 3.8 Sezioni rilevate del fiume Adda

3.4 Dati idrologici

Per l'implementazione del modello idrodinamico è necessario definire i valori di portata transitanti nei corpi idrici nei quali avviene la diffusione termica. Nel caso specifico è necessario valutare i valori di portata da attribuire al canale Muzza, Belgiardino ed il fiume Adda sia nel periodo estivo che invernale.

Per quanto riguarda i valori di portata nel canale Muzza a monte delle opere di presa, sono state utilizzate le informazioni derivanti da studi precedenti i quali, a loro volta, utilizzano i dati forniti dalla Centrale tra il 1994 ed il 2002 riferiti alla levata di Quartiano, che riportano valori medi variabili tra 40 – 60 m³/s.

Per quanto riguarda la portata dell'acqua nel Fiume Adda a monte dello sbocco Belgiardino e nel Belgiardino stesso, si è fatto riferimento ai seguenti dati:

- valori rilevati durante le campagne di misura nel 1991 e nel 1997 e riportate in Tabella 3.3, dati derivanti da studi pregressi;
- analisi delle portate fornite dalla Centrale tra il 1994 ed il 2002, dati derivanti da studi pregressi;

- analisi delle portate fornite dalla Centrale relative al periodo 2017 e 2018, di cui si riportano alcuni valori statistici in Tabella 3.4.

Tabella 3.3 Portate misurate in Adda a monte dello sbocco Belgiardino e nel canale stesso, periodo 1991 – 1997 (dati pregressi)

data	Portata Adda (m ³ /s)	Portata Belgiardino (m ³ /s)
21/3/91	135.0	26.0
26/3/97	81.6	24.0
21/5/97	24.2	13.0
14/11/97	232	36.0

Tabella 3.4 Portate misurate in Adda a monte dello sbocco Belgiardino e nel canale stesso, periodo 2017 – 2018

Portata [m ³ /s]	Periodo invernale		Periodo estivo	
	Adda	Belgiardino	Adda	Belgiardino
Max	268.7	44.7	656.2	44.4
Mean	70.0	18.9	74.9	4.1
St.Dev	25.6	2.6	52.7	16.5

Nello studio pregresso di Impatto Ambientale presentato da Endesa Italia vengono raccolti i risultati dell'analisi statistica riguardante i rapporti di portata tra Adda e Belgiardino (Qa/Qb) prima della confluenza con il canale stesso. In linea teorica, quanto più questo rapporto è piccolo, quanto più critica è la situazione dal punto di vista termico. Viceversa, al crescere del rapporto, la temperatura riscaldata proveniente dal canale Belgiardino ha sempre meno impatto sulla portata del fiume Adda. L'analisi statistica, i cui risultati vengono riportati in Tabella 3.5, è basata sui dati disponibili al momento dello studio, ovvero i primi anni duemila.

Lo stesso tipo di analisi, effettuata a partire dai dati più aggiornati (2017 e 2018), mostrano i risultati riassunti in Tabella 3.6.

Tabella 3.5 Analisi statistica del rapporto tra le portate di Adda e Belgiardino. Risultati derivanti dallo Studio di Impatto Ambientale presentato da Endesa Italia nel 2006

Prob. di sup.	Mese di marzo	Mese di ottobre	Periodo invernale	Periodo estivo
99% (minimo)	2.22	2.28	1.57	1.9
95%	2.56	2.72	1.78	==
90%	2.66	3.03	2.03	==
valore medio	4.01	4.76	9.44	==
dev. standard	1.19	1.94	4.91	==

Tabella 3.6 Analisi statistica del rapporto tra le portate di Adda e Belgiardino. Risultati derivanti dai dati forniti dalla centrale del 2017 e 2018

Prob. di sup. [-]	Periodo invernale	Periodo estivo
99 % (minimo)	1.25	5.31
95 %	2.08	7.35
90 %	2.57	8.53
valore medio	4.27	22.42
dev. standard	2.57	16.53

Il confronto tra i risultati riportati in Tabella 3.5 e Tabella 3.6 mostra come negli ultimi due anni la gestione degli scarichi della Centrale nel canale Belgiardino sia migliorata notevolmente nel periodo estivo, in quanto emerge un rapporto di portata del 99esimo percentile quasi tre volte maggiore. Nel periodo invernale invece la differenza non è significativa sia per il 99esimo percentile che per portate meno frequenti. Tuttavia, in ottica cautelativa, nella modellazione idraulica verrà utilizzato il rapporto di portata al quale consegue la condizione di più sfavorevole sia per il periodo estivo che invernale.

Nello studio pregresso, un'analisi simile individua per il canale Belgiardino un valore massimo di portata, avente probabilità di superamento dell'1%, di 27.35 m³/s nel periodo estivo mentre un valore di 34.2 m³/s nel periodo invernale. Dai dati aggiornati (2017 e 2018) si ottengono 13.16 m³/s nel periodo estivo mentre 44.56 m³/s nel periodo invernale; questi valori, in quanto più recenti, sono quelli che verranno utilizzati nelle simulazioni idrauliche. Si noti che la scelta adottata non ha un impatto significativo sui risultati, in quanto la condizione più cautelativa è garantita dal rapporto di portata scelto.

La portata nel fiume Adda registrate all'idrometro di Lodi, disponibile dal 1999 ad oggi, è stata utilizzata per validare quantitativamente le portate transitanti in Adda prima dell'immissione del Belgiardino e del Belgiardino stesso. Dal confronto emerge che le portate del fiume Adda nel periodo 2017 e 2018 sono coerenti con quelle medie ricavate nell'intero periodo d'analisi, sia per la stagione estiva che quella invernale.

Infine, le informazioni dei livelli idrometrici registrati all'idrometro di Lodi, disponibile dal 1999 ad oggi, sono state utilizzate per desumere le quote del pelo libero da attribuire al modello numerico in prossimità di questa sezione.

3.5 Dati di temperatura

Tra i più recenti dati di temperatura dell'acqua indisturbata del fiume Adda a disposizione vi sono i risultati della campagna di campionamento effettuata da ARPA Lombardia negli anni 2015, 2016 e 2017 lungo tutto il corso d'acqua. I dati, disponibili sul portale della Regione, riferiti alla sezione dell'Adda a monte dell'immissione del canale Belgiardino sono riassunti in Tabella 3.7. Dai dati a disposizione risulta una temperatura media dell'Adda in estate e inverno pari rispettivamente a 9.8 e 21 ° C.

A loro volta, gli studi pregressi utilizzano dati di temperatura dell'acqua nel fiume Adda ricavati dalle seguenti fonti:

- temperature medie della sezione imperturbata a monte dello sbocco Belgiardino durante le campagne di misura nel 1991 e nel 1997 e riportate in Tabella 3.8;
- analisi delle temperature misurate giornalmente dalla Centrale tra il 1994 ed il 2002.

Dagli studi pregressi emerge un valor medio di temperatura dell'acqua nel canale Muzza pari a 6.5 ° C in inverno e 21 ° C in estate, mentre nell'Adda 7.5 ° C in inverno e sempre 21 ° C in estate.

Per le simulazioni numeriche verranno utilizzati, sia per l'Adda che il canale Muzza, gli stessi valori medi di temperatura dell'acqua indisturbata in quanto non si presuppone una differenza sostanziale tra i due corsi d'acqua. In particolare, vengono utilizzati i valori medi derivanti dalle misurazioni più recenti, in inverno ed estate pari rispettivamente a 9.8 e 21 ° C.

Tabella 3.7 Temperature dell'acqua del fiume Adda a monte dell'immissione del canale Belgiardino derivanti da campionamento ARPA Lombardia tra il 2015 – 2017

Data campionamento	Temperatura [° C]
22/01/2015	7.6
18/02/2015	8.87
19/03/2015	12.71
23/04/2015	15
21/05/2015	13.89
23/06/2015	19.75
21/07/2015	23.36
20/08/2015	20.22
22/09/2015	18.8
20/10/2015	14.99
17/11/2015	14.21
10/12/2015	10.15
21/01/2016	8.56
18/02/2016	9.91
17/03/2016	12.16
21/04/2016	16.37
24/05/2016	16.36
21/06/2016	19.92
27/07/2016	22.74
24/08/2016	21.5
21/09/2016	20.07
20/10/2016	16.86
15/11/2016	11.57
15/12/2016	8.46
25-01-2017	8.53
22-02-2017	10.19
22-03-2017	13.76
19-04-2017	14.1
18-05-2017	18.02
20-06-2017	22.37
18-07-2017	21.5
10-08-2017	22.42
12-09-2017	19.61
05-10-2017	17.23
08-11-2017	13.98
12-12-2017	6.24

Tabella 3.8 Temperature medie misurate in Adda a monte dello sbocco Belgiardino nel periodo 1991-1997 (studi pregressi)

data	ora	T _{media} (°C)
21/3/91	11:35	11.57
26/3/97	10:30	10.60
26/3/97	12:01	11.10
26/3/97	14:34	11.90
21/5/97	10:59	16.56
21/5/97	13:31	17.82
21/5/97	14:51	18.52
14/11/97	11:49	11.60
14/11/97	14:07	11.80

4 Definizione degli scenari

Gli scenari analizzati fanno riferimento all'assetto di progetto che prevede il funzionamento dei Gruppi 5, 6 e nuova sezione CCGT, studiati sia nel periodo invernale che estivo. Si ricorda che questo assetto, dal punto di vista modellistico, risulta analogo alla situazione attuale, così come spiegato nel paragrafo 2.2.

In Tabella 4.1 si riportano i valori di portata e temperatura utilizzati nei diversi periodi, rimandando al seguito del paragrafo per una spiegazione più dettagliata.

Tabella 4.1 Dati di portata e temperatura dei corsi d'acqua in input al modello idrodinamico

Condizione	Q Muzza [m ³ /s]	Q Adda [m ³ /s]	Q Adda/Q Belgiardino [-]	T indisturbata Muzza [° C]	T indisturbata Adda [° C]
Caso 1 – Periodo invernale	50	55.7	1.25	9.76	9.76
Caso 2- Periodo estivo	50	25	1.89	21	21

4.1 Caso 1 - periodo invernale

Nel periodo invernale, la maggior parte della portata di scarico della centrale viene convogliata nel canale Belgiardino prima di confluire in Adda. In condizioni di esercizio, nel canale Muzza viene comunque mantenuta una portata attribuibile al deflusso minimo vitale.

Questo scenario prevede la configurazione di progetto con attivi i Gruppi 5, 6 e nuova sezione CCGT. Nel periodo invernale la temperatura dell'acqua indisturbata assunta sia per il canale Muzza che fiume Adda è di 9.76 ° C.

La portata media nel canale Muzza a monte delle prese è statisticamente compresa tra i 40 e 60 m³/s. Essendo la portata prelevata dalle opere di presa pari a 39.3 m³/s si è scelto di utilizzare una portata in ingresso media pari a 50 m³/s.

In questo periodo dell'anno, il rapporto di portata tra Adda e Belgiardino (Q_a/Q_b) più sfavorevole determinato dall'analisi statistica riportata nel paragrafo "Dati idrologici" è pari a 1.25. Sempre dall'analisi statistica, è stato determinato il valore di portata del Belgiardino con probabilità di superamento dell'1%, ovvero tra i più significativi, pari a 44.56 m³/s nel periodo invernale. Ne consegue che il valore minimo di portata dell'Adda statisticamente atteso è pari a 55.7 m³/s per tale periodo, e verrà utilizzato per la simulazione numerica.

Il contributo di portata che dagli scarichi della Centrale e dal canale Muzza defluiscono nel Belgiardino affinché vengano rispettate le condizioni sopra descritte è garantito dalla modellazione delle opere antropiche di regolazione presenti nei canali. Tali opere garantiscono inoltre un livello del pelo libero nel canale Muzza a monte della derivazione pari a 81.5 m s.l.m.

4.2 Caso 2 - periodo estivo

Nel periodo estivo, la maggior parte della portata di scarico della centrale viene convogliata nel canale Muzza prima di confluire in Adda dopo circa 28 km. In condizioni di esercizio, nel canale Belgiardino viene comunque mantenuto il deflusso minimo vitale.

Questo scenario prevede la configurazione di progetto con attivi i Gruppi 5 e 6 e la nuova sezione CCGT. Nel periodo estivo la temperatura dell'acqua indisturbata assunta sia per il canale Muzza che fiume Adda è di 21 ° C.

La portata media nel canale Muzza a monte delle prese è statisticamente compresa tra i 40 e 60 m³/s. Essendo la portata prelevata dalle opere di presa pari a 39.3 m³/s si è scelto di utilizzare una portata in ingresso media pari a 50 m³/s.

In questo periodo dell'anno, il rapporto di portata tra Adda e Belgiardino (Qa/Qb) più sfavorevole determinato dall'analisi statistica riportata nel paragrafo "Dati idrologici" è pari a 1.89. Sempre dall'analisi statistica, è stato determinato il valore di portata del Belgiardino con probabilità di superamento dell'1%, ovvero tra i più significativi, pari a 13.16 m³/s nel periodo invernale. Ne consegue che il valore minimo di portata dell'Adda statisticamente atteso è pari a circa 25 m³/s per tale periodo, e verrà utilizzato per la simulazione numerica.

Il contributo di portata che dagli scarichi della Centrale e dal canale Muzza defluiscono nel Belgiardino affinché vengano rispettate le condizioni sopra descritte è garantito dalla modellazione delle opere antropiche di regolazione presenti nei canali. Tali opere garantiscono inoltre un livello del pelo libero nel canale Muzza a monte della derivazione pari a 81.5 m s.l.m.

5 Implementazione del modello numerico

5.1 MIKE 21 FM

Il sistema modellistico si basa sulla soluzione numerica delle equazioni dei Navier-Stokes mediate (Reynolds Averaged Navier-Stokes equations) sotto le ipotesi di Boussinesq e in condizioni di pressione idrostatica.

La versione Flexible Mesh 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 attraverso una maglia non strutturata costituita da triangoli. Il modello permette di infittire la densità degli elementi nelle zone per le quali è richiesta la massima accuratezza, quale ad esempio l'area in prossimità dello scarico della Centrale ed il tratto interessato dalla dispersione iniziale del pennacchio termico – mixing zone.

Il modello MIKE 21 HD necessita di una serie di dati di input che si possono raggruppare in differenti categorie, ovvero:

- parametri di base (es. mesh di calcolo, durata della simulazione);
- fattori di calibrazione (es. scabrezza, viscosità turbolenta);
- condizioni iniziali (es. livelli, campi di corrente);

- condizioni al contorno (es. livelli, portate);
- altre forzanti (es. campi di vento, apporti puntuali di portata).

L'utilizzo di un approccio di tipo bidimensionale, permette di indagare in dettaglio non solo l'intensità del fenomeno, ma anche direzione e verso del vettore velocità in ogni cella della matrice. Per ciascun elemento di calcolo, è possibile ottenere le variazioni temporali delle seguenti variabili:

- profondità e livelli idrici;
- flussi di corrente nelle direzioni principali;
- densità e temperatura;
- velocità di corrente e direzione.

Per una descrizione più dettagliata si rimanda agli allegati.

5.2 Definizione della maglia di calcolo

Il modello idrodinamico bidimensionale è stato implementato nell'area riportata in Figura 5.1 che comprende parte del canale Muzza, il canale Belgiardino ed il tratto del fiume Adda interessato dall'afflusso proveniente dalla Centrale.

Il modello è costituito da una maglia di calcolo triangolare irregolare a risoluzione variabile, come mostrato in Figura 5.2 e Figura 5.3; in particolare, si è scelto di rappresentare le aree prossime alle opere di presa e rilascio con una risoluzione più fine, aree dei triangoli di circa 5 m², mentre la restante parte con una risoluzione variabile compresa, aree dei triangoli comprese tra i 10 e 15 m². La mesh finale è formata da 56'154 nodi e 106'403 elementi. La definizione delle quote altimetriche dei nodi della mesh avviene attribuendogli i dati interpolati determinati per ogni tratto come descritto in "Dati batimetrici".

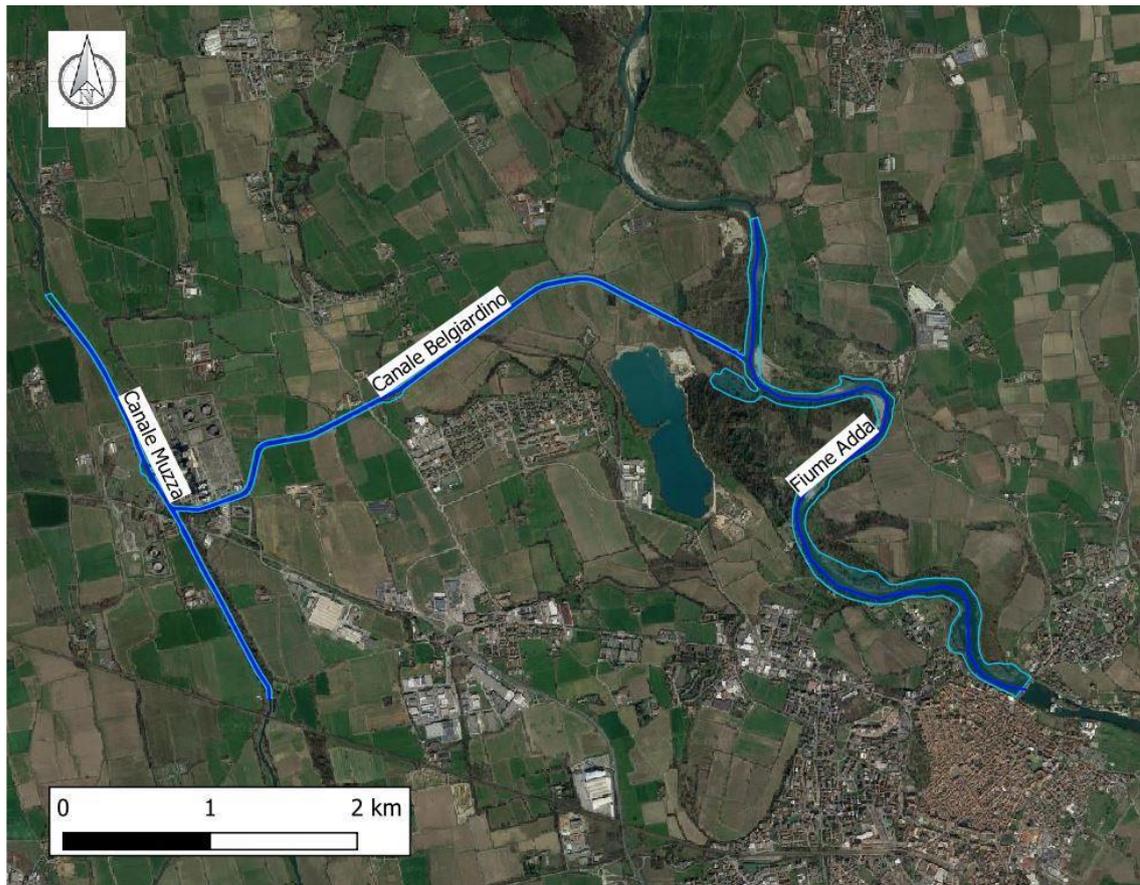


Figura 5.1 Definizione del dominio di calcolo

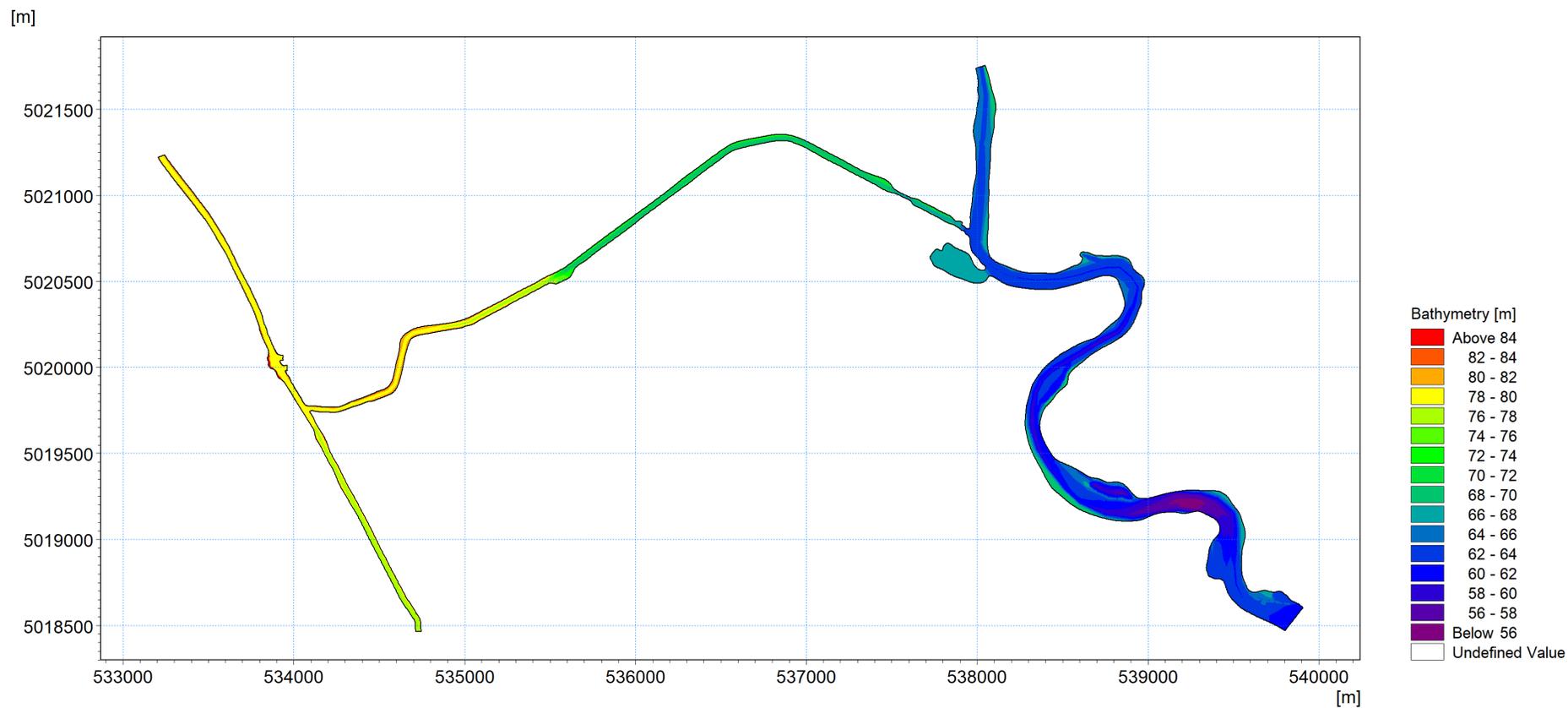


Figura 5.2 Rappresentazione della maglia di calcolo

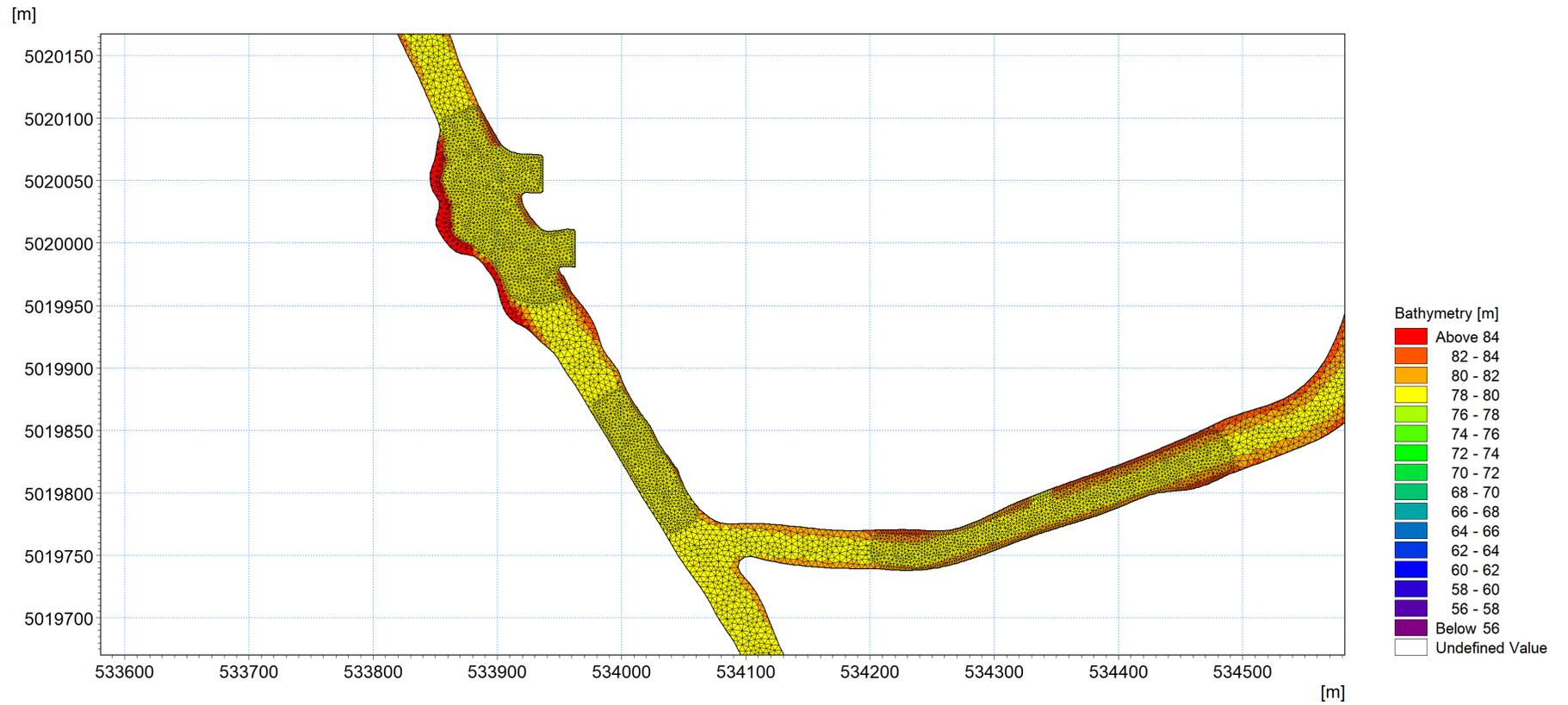


Figura 5.3 Dettaglio della maglia di calcolo che evidenzia la maggior risoluzione nell'area in prossimità delle prese e rilasci della centrale

5.3 Parametri del modello e condizioni a contorno

La definizione del modello di simulazione, oltre alla descrizione geometrica, richiede una serie di altri parametri, dei quali i più rilevanti risultano la scabrezza e le condizioni al contorno.

La scabrezza rappresenta, all'interno delle equazioni del moto, il parametro che regola le perdite di energia distribuite, in primo luogo quelle per attrito di scorrimento sul fondo e sulle sponde dell'alveo attivo. Tale parametro è difficilmente valutabile con precisione ed è abitualmente utilizzato per tarare il modello.

In un modello bidimensionale i coefficienti di scabrezza da considerare si ottengono incrementando opportunamente di circa un 15-20% quelli comunemente impiegati nei modelli monodimensionali, per tenere conto del fatto che in un modello 2D sono già in tutto o almeno in gran parte direttamente considerati nelle equazioni del moto gli effetti di resistenza al moto indotti dalle condizioni di moto non-monodimensionali (turbolenza, moti vorticosi, sinuosità dell'alveo, ecc.) che nell'ambito di un modello monodimensionale devono essere globalmente inclusi in un valore inferiore del coefficiente di scabrezza.

Nel caso in esame è stato adottato un coefficiente medio di scabrezza di Strickler pari a 40 $m^{1/3}/s$.

Il modello bidimensionale, oltre alla descrizione geometrica, al coefficiente di scabrezza e alle condizioni al contorno, necessita del coefficiente di viscosità turbolenta ("eddy viscosity"). Quest'ultima è legata alla non uniforme distribuzione del campo delle velocità e può essere simulata nel modello in differenti modalità. Nel presente caso si è fatto riferimento alla formulazione di Smagorinsky, con il relativo coefficiente pari a 0.28 data la cella di calcolo adottata. La dispersione orizzontale è rappresentata attraverso la formulazione "scaled eddy viscosity". In ottica cautelativa, nel modello non vengono rappresentati gli scambi termici tra corpo idrico e l'ambiente circostante.

Al fine di garantire la corretta ripartizione del deflusso tra il canale Belgiardino e Muzza ed allo stesso tempo mantenere il livello del pelo libero in prossimità della confluenza ad un livello pari a 81.5 m s.l.m, così come indicato nella convenzione con il Consorzio di Bonifica Muzza - Bassa Lodigiana, sono state inserite nel modello idraulico apposite strutture di controllo. In particolare, è stato modellato sia lo sbarramento posto immediatamente a valle della confluenza Muzza-Belgiardino che lo sbarramento posto in prossimità delle opere di scarico localizzate sul canale Belgiardino. In entrambi i casi sono stati tarati appositamente i parametri delle strutture affinché venissero garantite le ipotesi sopra indicate, così come la stabilità numerica.

Il modello idrodinamico necessita di diverse condizioni a contorno, sia in termini di portata che temperatura, in particolare:

- i valori di portata e temperatura in input al canale Muzza e fiume Adda;
- i valori di portata e temperatura prelevata dalla Centrale;
- i valori di portata e temperatura rilasciata dalla Centrale;
- i livelli di tirante idrico nelle sezioni di valle del canale Muzza, in prossimità dell'attraversamento ferroviario, e del fiume Adda, in prossimità dell'idrometro di Lodi.

In Figura 5.4 si riportano la localizzazione delle condizioni a contorno implementate nel modello.

I valori di temperatura e portata differiscono a seconda del caso studio. In tutti i casi studio, le portate che le temperature sono state modellate in regime stazionario. Per garantire il raggiungimento di tale regime, la durata della simulazione è stata impostata a 24 ore.

In Figura 5.4 vengono riassunte le condizioni a contorno utilizzate per ogni caso.

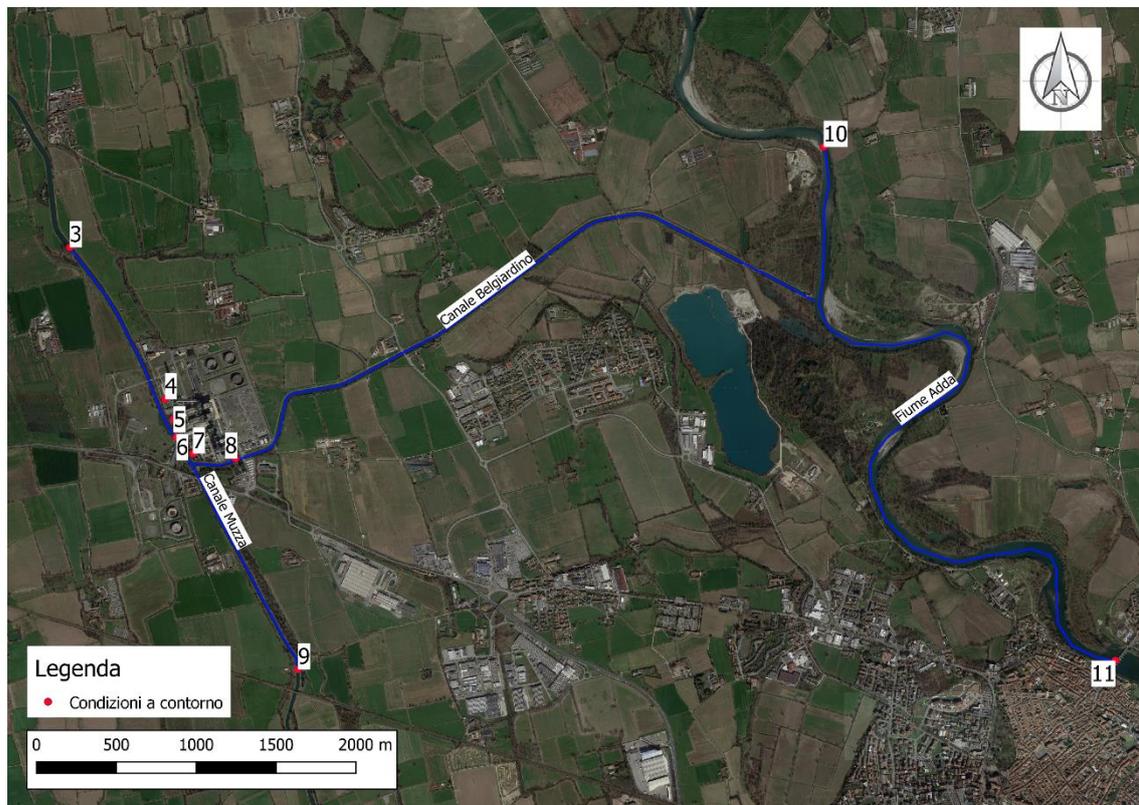


Figura 5.4 Localizzazione delle condizioni a contorno implementate nel modello idraulico

Tabella 5.1 Tabella riassuntiva delle condizioni a contorno applicate nei diversi casi studio

Dati	Condizione a contorno	Caso 1 - periodo invernale	Caso 2 - periodo estivo
QMuzza [m ³ /s]	BC3	50	50
TMuzza [° C]	BC3	9.76	21
Q presa 5 [m ³ /s]	BC4	14.3	14.3
T presa 5 [° C]	BC4	Zero gradient	Zero gradient
Q presa 6 [m ³ /s]	BC4	12.5	12.5
T presa 6 [° C]	BC4	Zero gradient	Zero gradient
Q presa 8/CCGT [m ³ /s]	BC5	12.5	12.5
T presa 8/CCGT [° C]	BC5	Zero gradient	Zero gradient
Q scarico 5 [m ³ /s]	BC6	14.3	14.3
T scarico 5 [° C]	BC6	17.89	29.13
Q scarico 6 [m ³ /s]	BC7	12.5	12.5
T scarico 6 [° C]	BC7	14.46	25.7
Q scarico 8/CCGT [m ³ /s]	BC8	12.5	12.5
T scarico 8/CCGT [° C]	BC8	17.36	28.6
WL Muzza out [m s.l.m.]	BC9	78	78
T Muzza out [° C]	BC9	Zero gradient	Zero gradient
QAdda [m ³ /s]	BC10	55.7	25
TAdda [° C]	BC10	9.76	21
WL Adda [m s.l.m.]	BC11	62	62
T Adda out [° C]	BC11	Zero gradient	Zero gradient

6 Risultati

6.1 Metodologia di verifica del rispetto dei limiti di legge

Tra i risultati principali del modello idrodinamico MIKE 21 FM vi sono i tiranti, le velocità e la temperatura in ogni elemento della maglia di calcolo. Si riportano in Figura 6.1 e Figura 6.2 rispettivamente un esempio di visualizzazione dei risultati di tiranti e velocità e temperatura in prossimità della confluenza Adda e Belgiardino.

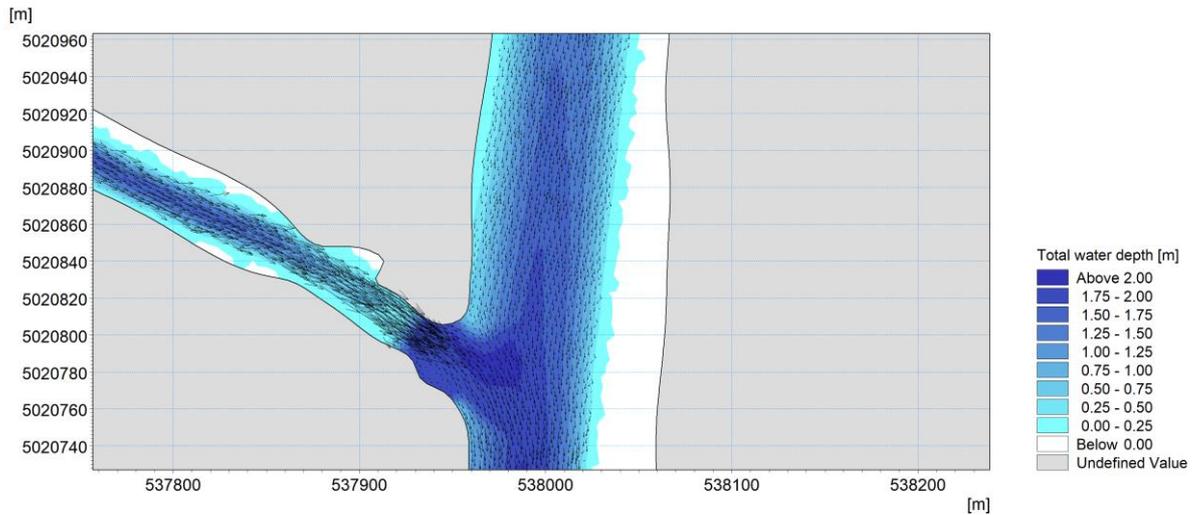


Figura 6.1 Esempio di visualizzazione di risultati del modello idrodinamico. In scala di blu i tiranti, in nero i vettori delle velocità

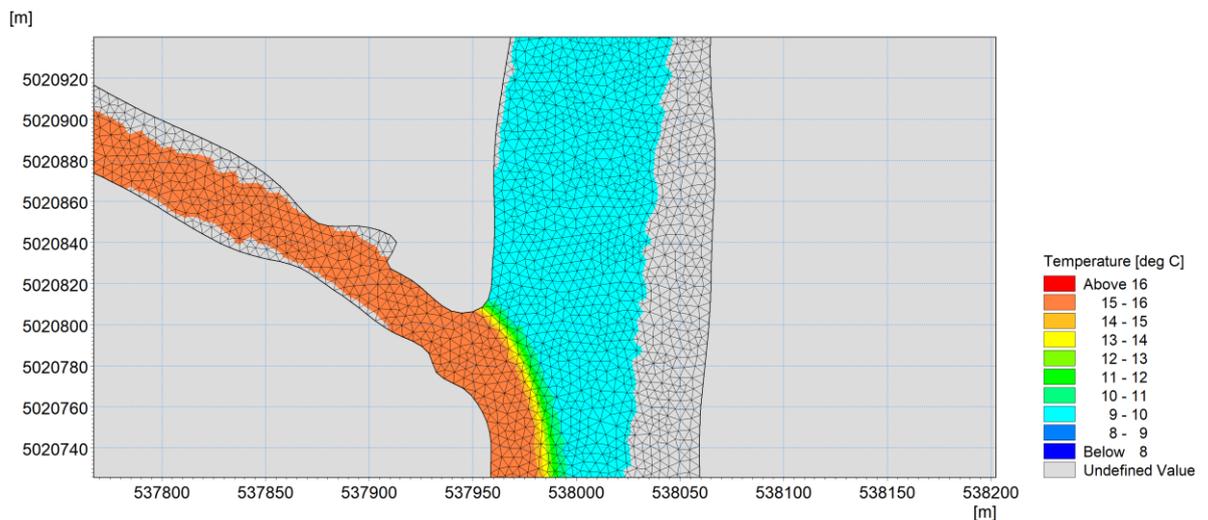


Figura 6.2 Esempio di visualizzazione di risultati di temperatura del modello idrodinamico

Per verificare la conformità con i vincoli normativi, si fa riferimento a quanto riportato nel paragrafo “2.3 Normativa di riferimento”. La normativa prevede che 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 e che su almeno metà di qualsiasi sezione a valle tale variazione non deve superare 1 ° C (D.Lgs. 152/06 e successivi). Per i canali artificiali, il massimo valore medio della temperatura dell’acqua di qualsiasi sezione non deve superare i 35 °C. Inoltre, il massimo valore medio della temperatura dell’acqua nella sezione del ‘canale scaricatore in Adda’ immediatamente a monte del punto d’immissione nel fiume Adda è di 30° C (Convenzione del 15 maggio 1975 tra gli Enti locali e l’Enel).

La sezione indisturbata a monte del punto di immissione è stata scelta a circa 250 m a monte dell’immissione con il canale Belgiardino. La sezione a valle dell’immissione sulla quale vengono analizzati i risultati di temperatura è posta a 100 metri dalla confluenza con il Belgiardino, così come già proposto negli studi pregressi. Si noti inoltre che, non avendo modellato gli scambi termici con l’ambiente circostante in ottica cautelativa, la temperatura media delle sezioni a valle dell’immissione resta invariata. Si riporta in Figura 6.3 la localizzazione della sezione a valle della confluenza insieme alla sezione indisturbata dell’Adda.

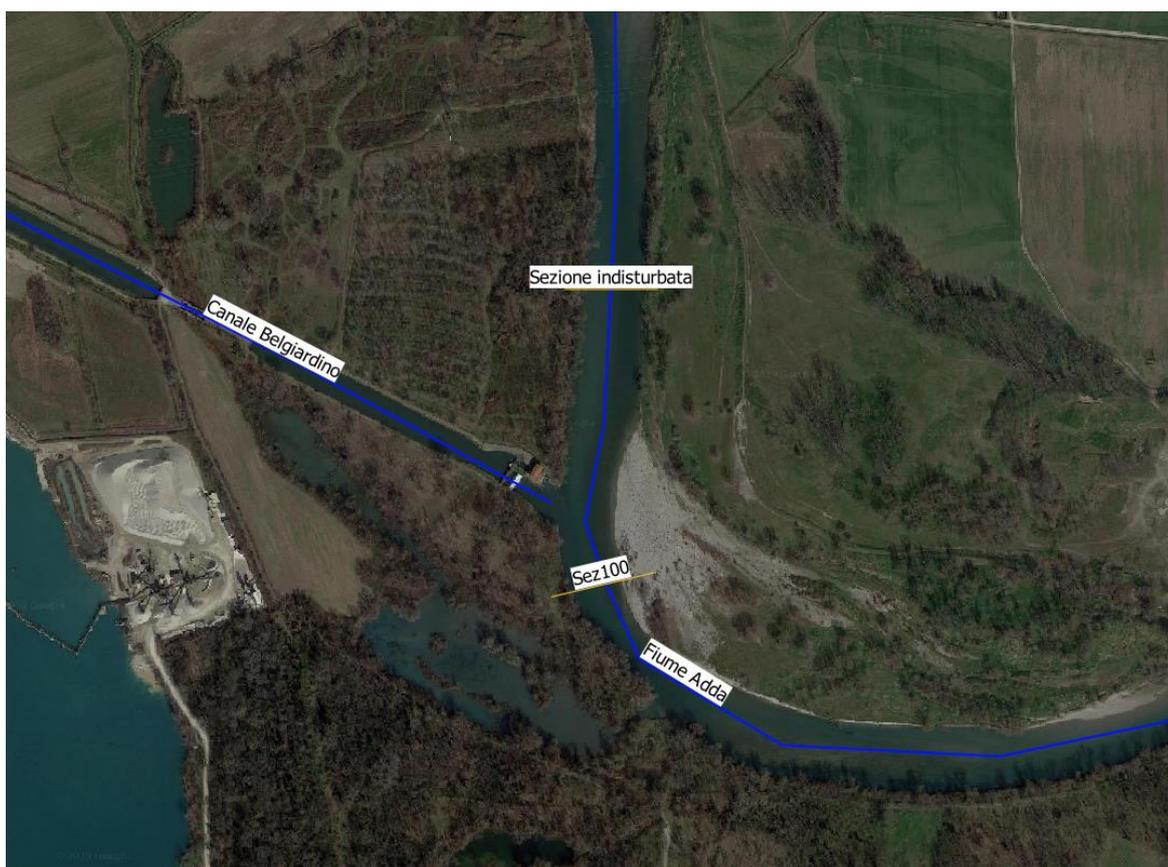


Figura 6.3 – Localizzazione delle sezioni di misura della perturbazione termica

In una qualunque sezione fluviale, 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:

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

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 negli elementi costituenti il reticolo di calcolo, l'espressione precedente viene ad assumere la forma approssimata:

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

Dove T_i sono i valori di temperatura negli elementi 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 alla porzione i -esima della sezione.

Analogamente, per calcolare poi il valore di temperatura media sulla semi sezione, 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:

$$T_m(100\%) = \frac{\sum_i^N T_i \cdot A_i}{\sum_i^N A_i}$$

$$T_m(50\%) = \frac{\sum_i^M T_i \cdot A_i}{\sum_i^M A_i}$$

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.

Si riportano nei seguenti paragrafi, per ogni caso analizzato, i risultati della modellazione in termini di temperatura distribuita e l'andamento dell'incremento termico medio nella sezione a 100 m in funzione della percentuale di area e l'andamento della temperatura nella medesima sezione.

6.2 Caso 1 - periodo invernale

Il Caso studio 1 fa riferimento alle condizioni di scarico della Centrale durante l'inverno. In questo periodo dell'anno le acque di raffreddamento sono ripartite tra il canale Belgiardino, giungendo in Adda, ed il canale Muzza. La maggior parte della portata è convogliata nel canale Belgiardino, garantendo sulla Muzza un deflusso minimo vitale.

Questo scenario prevede la configurazione di progetto con attivi i Gruppi 5 e 6 e la nuova sezione CCGT. L'analisi del campo termico e del campo di velocità risultante nelle varie sezioni del dominio di calcolo porta alle seguenti considerazioni:

- il regime ottenuto al termine della simulazione è di moto stazionario;
- il rapporto di portata impostato Q_a/Q_b , pari a 1.25, è stato garantito dalla modellazione delle opere di regolazione poste nel canale Muzza e Belgiardino. Il post-processing dei risultati ha permesso di verificare che la portata transitante nel canale Belgiardino corrispondesse a quella definita nelle ipotesi (circa 44.6 m³/s). Inoltre, è stato verificato il livello del pelo libero in prossimità della confluenza Muzza e Belgiardino, pari a 81.5 m s.l.m.;
- il pennacchio termico degli scarichi 5 e 6 si propaga principalmente nel canale Belgiardino, in accordo con la direzione principale del deflusso;
- la temperatura dell'acqua media nel canale Muzza in prossimità della ferrovia è di circa 10.75 ° C;
- la temperatura dell'acqua media nel canale Belgiardino a monte dell'immissione in Adda è di circa 15.70 ° C;
- la temperatura media calcolata alla sezione indisturbata dell'Adda è di 9.76 ° C;
- la temperatura media calcolata alla Sezione100 sull'intera sezione risulta essere di circa 12.52 [° C], da cui risulta una differenza di **2.76 ° C** con la sezione indisturbata;
- la temperatura media calcolata alla Sezione100 sulla semi sezione risulta essere di circa 10.09 [° C], da cui risulta una differenza di **0.34 ° C** con la sezione indisturbata.

Si riportano, in Figura 6.4 e Figura 6.5, i risultati in termini di temperatura relativi al Caso 1, rispettivamente alla confluenza Muzza/Belgiardino e Belgiardino/Adda.

Si riportano, in Figura 6.6 e Figura 6.7, l'andamento dell'incremento termico medio nella sezione a 100 m in funzione della percentuale di area e l'andamento della temperatura nella medesima sezione.

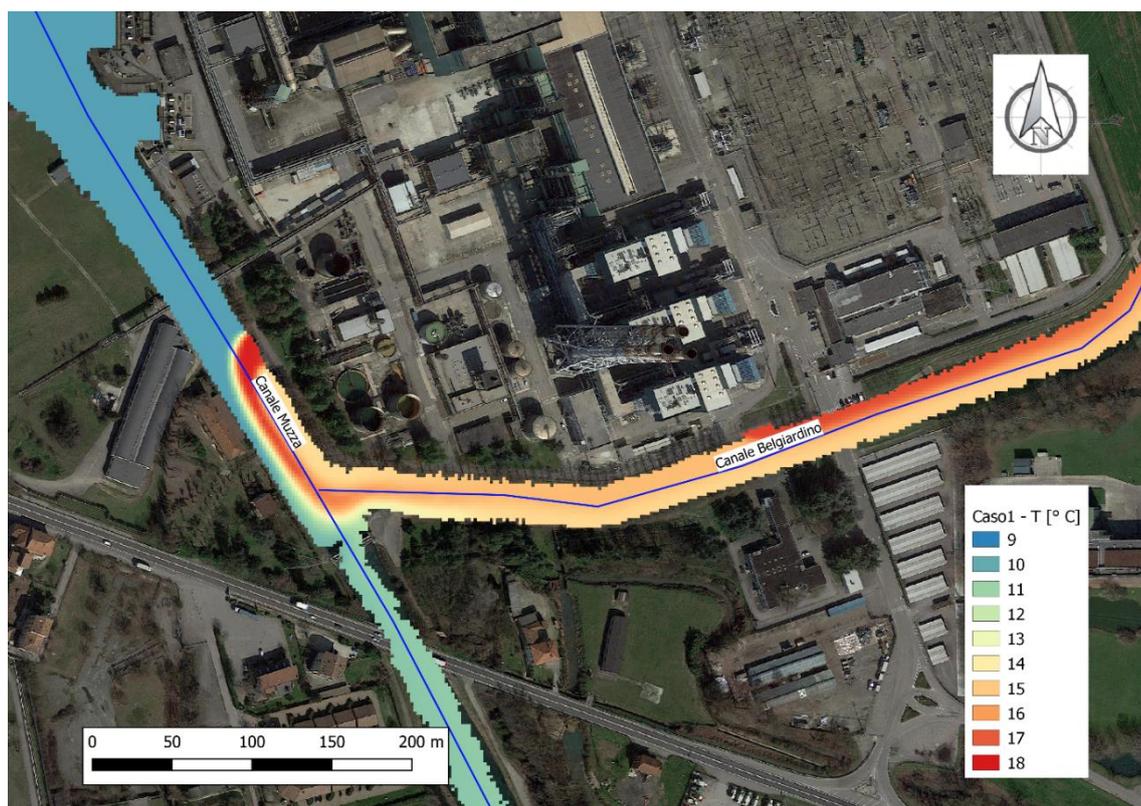


Figura 6.4 Caso 1, mappa di temperature in prossimità della confluenza Muzza/Belgiardino

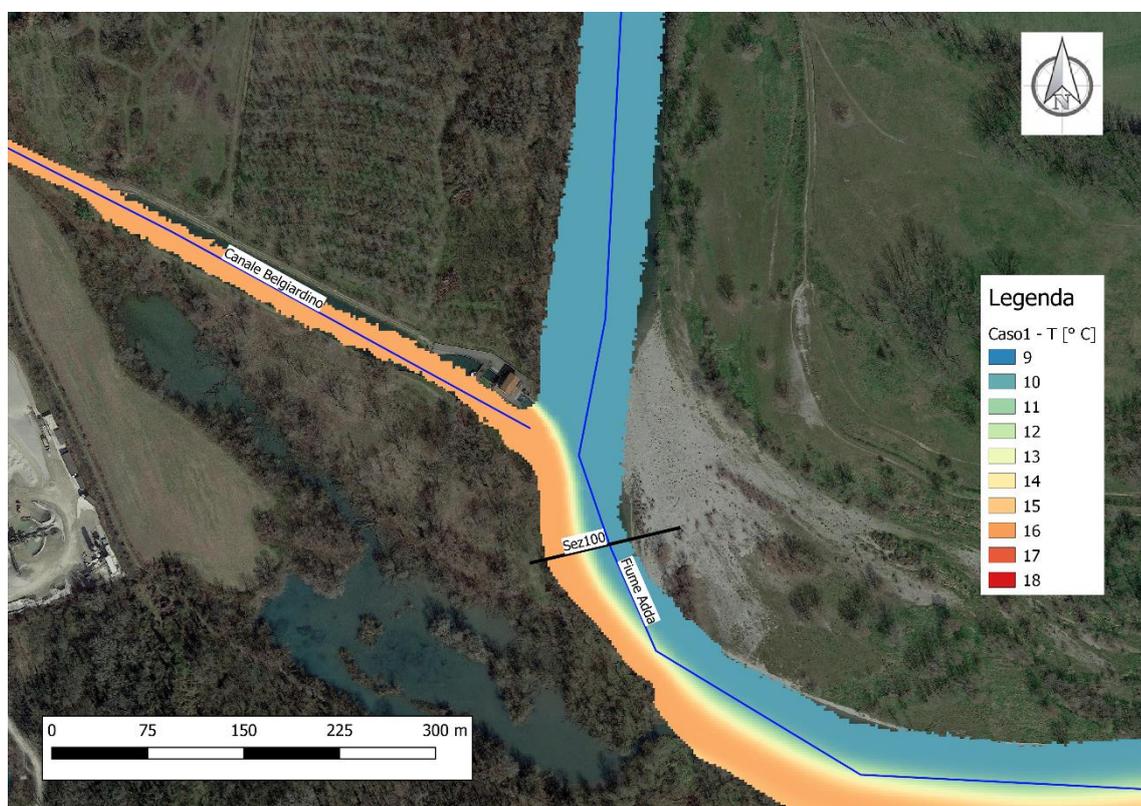


Figura 6.5 Caso 1, mappa di temperature in prossimità della confluenza Belgiardino/Adda

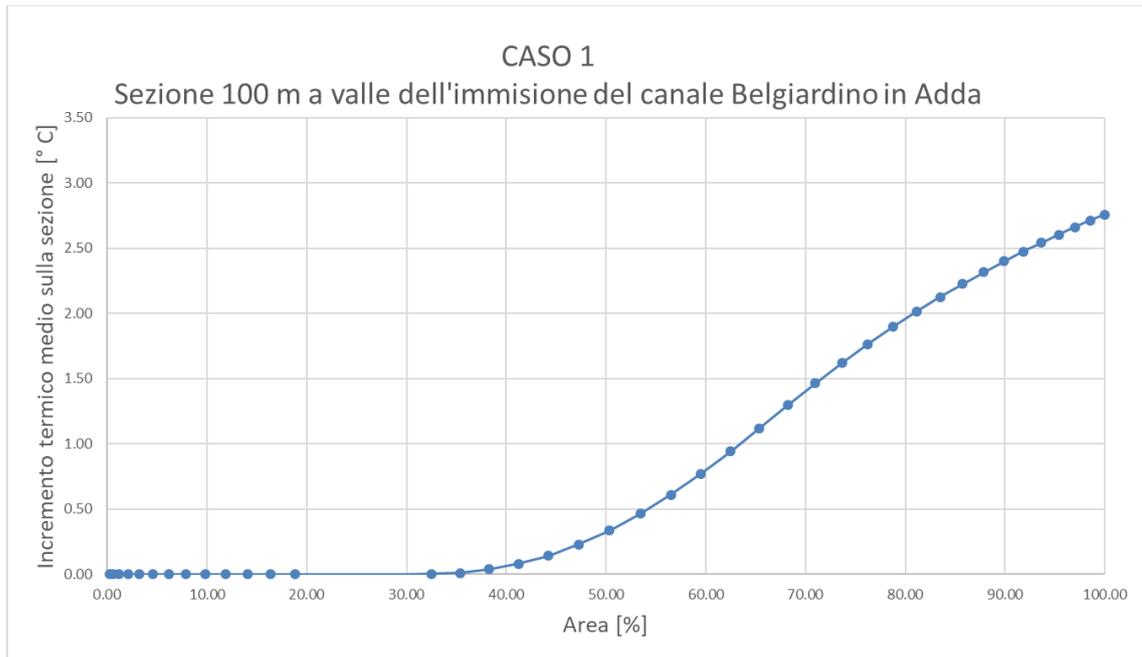


Figura 6.6 Caso 1, andamento dell'incremento termico medio nella sezione a 100 m in funzione della percentuale di area

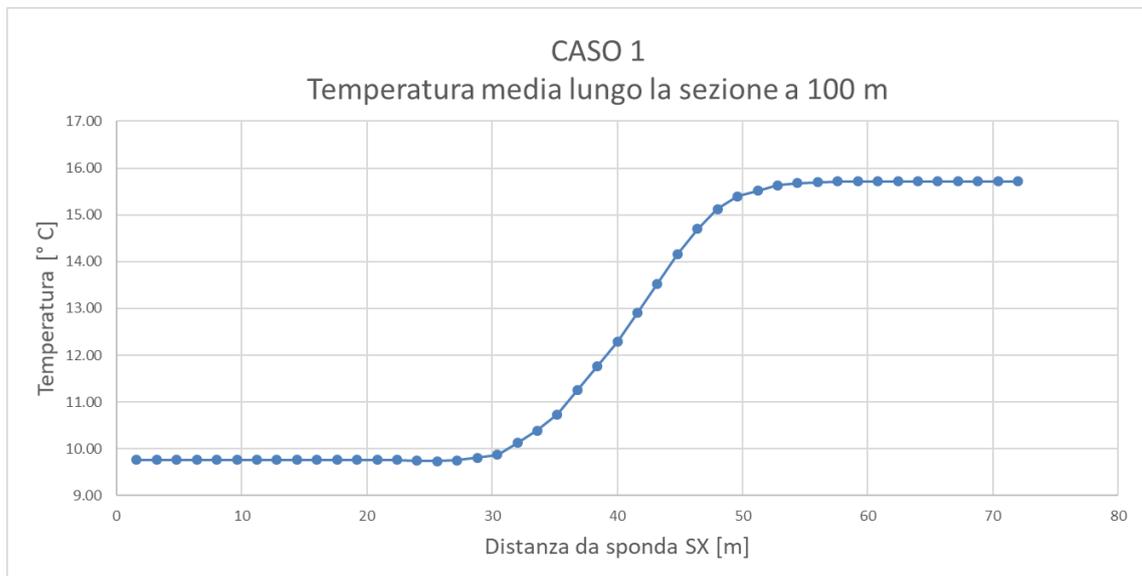


Figura 6.7 Caso 1, andamento della temperatura nella sezione a 100 m

6.3 Caso 2 - periodo estivo

Il Caso 2 fa riferimento alle condizioni di scarico della Centrale durante l'estate. In questo periodo dell'anno le acque di raffreddamento sono ripartite tra il canale Belgiardino, giungendo in Adda, ed il canale Muzza. In linea teorica, la maggior parte della portata viene convogliata nel canale Muzza, mentre nel Belgiardino viene garantito il minimo deflusso vitale.

Questo scenario prevede la configurazione di progetto con attivi i gruppi 5 e 6 e la nuova sezione CCGT. L'analisi del campo termico e del campo di velocità risultante nelle varie sezioni del dominio di calcolo porta alle seguenti considerazioni:

- il regime ottenuto al termine della simulazione è di moto stazionario;
- il rapporto di portata impostato Q_a/Q_b , pari a 1.89, è stato garantito dalla modellazione delle opere di regolazione poste nel canale Muzza e Belgiardino. Il post-processing dei risultati ha permesso di verificare che la portata transitante nel canale Belgiardino corrispondesse a quella definita nelle ipotesi (circa $13.2 \text{ m}^3/\text{s}$). Inoltre, è stato verificato il livello del pelo libero in prossimità della confluenza Muzza e Belgiardino, pari a 81.5 m s.l.m.;
- il pennacchio termico degli scarichi 5 e 6 si propaga sia nel canale Belgiardino che nella Muzza con prevalenza di quest'ultimo canale;
- la temperatura dell'acqua media nel canale Muzza in prossimità della ferrovia è di circa $25.62 \text{ }^\circ\text{C}$;
- la temperatura dell'acqua media nel canale Belgiardino a monte dell'immissione in Adda è di circa $28.46 \text{ }^\circ\text{C}$;
- la temperatura media calcolata alla sezione indisturbata dell'Adda è di $21 \text{ }^\circ\text{C}$;
- la temperatura media calcolata alla Sezione100 sull'intera sezione risulta essere di circa $23.84 \text{ }^\circ\text{C}$, da cui risulta una differenza di **$2.84 \text{ }^\circ\text{C}$** con la sezione indisturbata;
- la temperatura media calcolata alla Sezione100 sulla semi sezione risulta essere di circa $21.18 \text{ }^\circ\text{C}$, da cui risulta una differenza di **$0.18 \text{ }^\circ\text{C}$** con la sezione indisturbata.

Si riportano, in Figura 6.8 e Figura 6.9, i risultati in termini di temperatura relativi al Caso2, rispettivamente alla confluenza Muzza/Belgiardino e Belgiardino/Adda.

Si riportano, in Figura 6.10 e Figura 6.11, l'andamento dell'incremento termico medio nella sezione a 100 m in funzione della percentuale di area e l'andamento della temperatura nella medesima sezione.

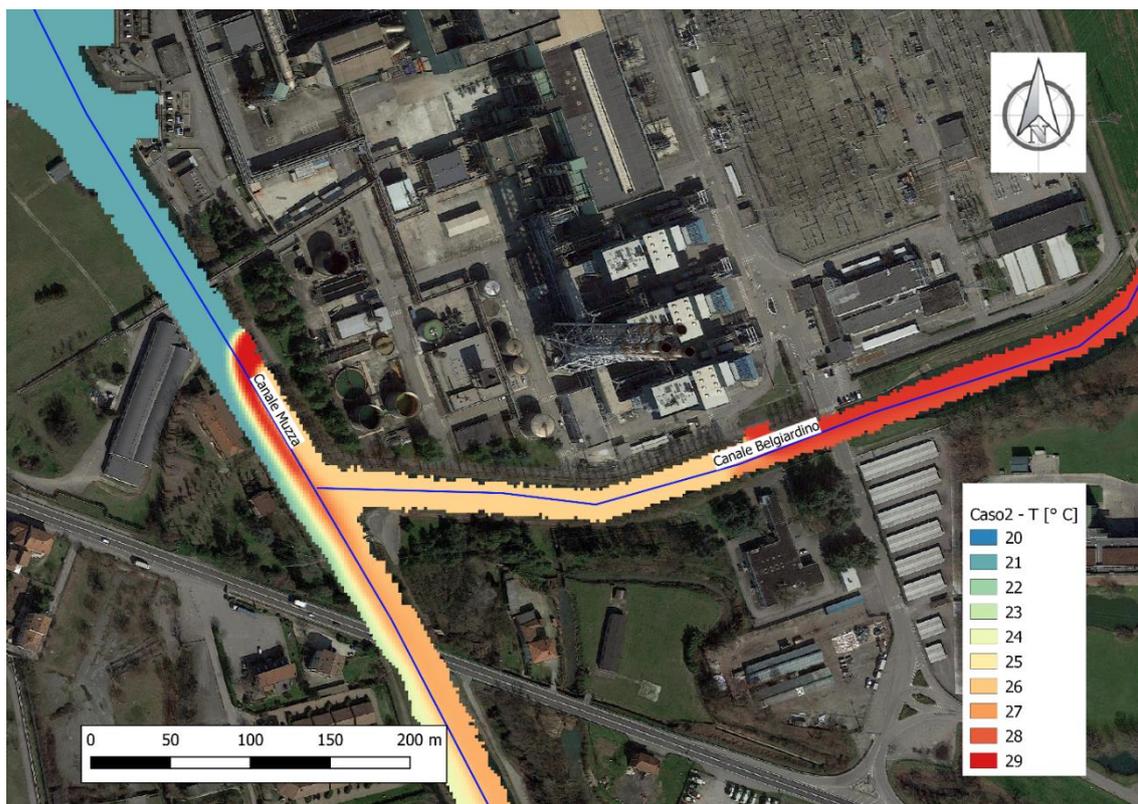


Figura 6.8 Caso 2, mappa di temperature in prossimità della confluenza Muzza/Belgiardino

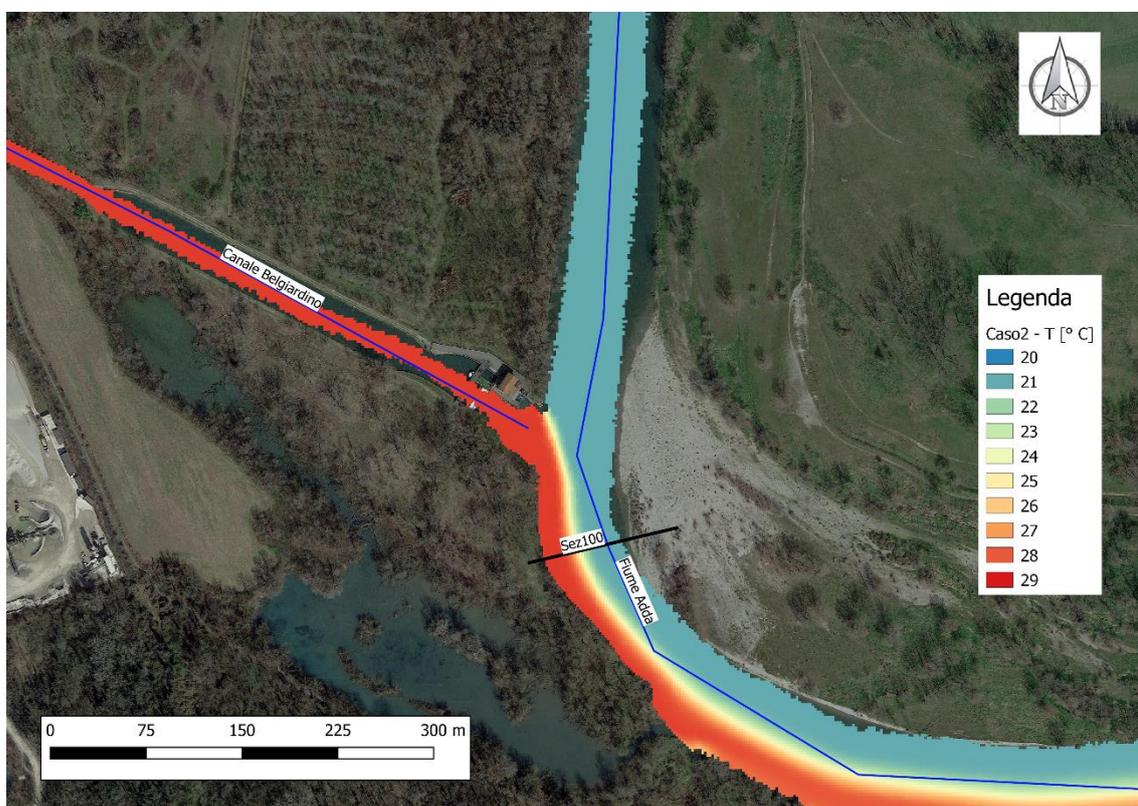


Figura 6.9 Caso 2, mappa di temperature in prossimità della confluenza Belgiardino/Adda

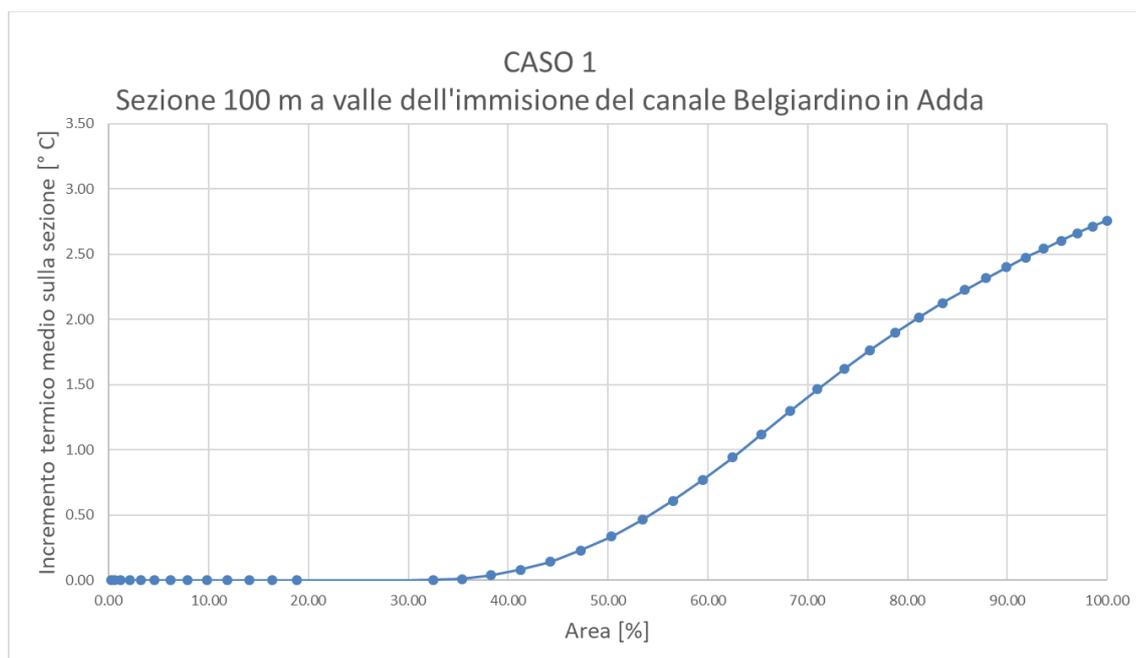


Figura 6.10 Caso 2, andamento dell'incremento termico medio nella sezione a 100 m in funzione della percentuale di area

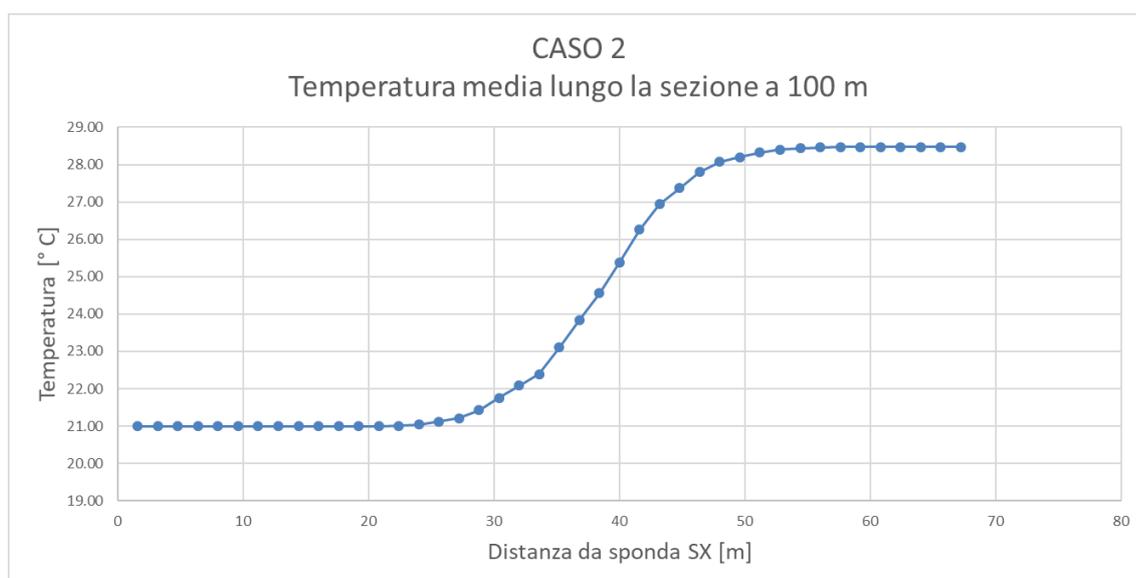


Figura 6.11 Caso 2, andamento della temperatura nella sezione a 100 m

7 Conclusioni

Lo studio condotto ha permesso di analizzare la dispersione termica degli scarichi della centrale di Tavazzano – Montanaso sul fiume Adda e di valutarne la conformità con la vigente normativa sui limiti di emissione (D.Lgs. 152/06 e successive modifiche e integrazioni).

L'analisi è stata condotta sia per il periodo invernale, nel quale la maggior parte della portata proveniente dal canale Muzza viene deviata sul canale Belgiardino, sia estivo, nel quale la portata continua a defluire principalmente nel canale Muzza.

Le configurazioni della centrale analizzate sono le seguenti:

- configurazione attuale, con due gruppi a ciclo combinato CCGT (Combined cycle gas turbine) in esercizio, il Gruppo 5 da 760 MW e Gruppo 6 da 380 MW, e supponendo il Gruppo 8 operativo;
- configurazione di progetto, che prevede la realizzazione di una nuova sezione a ciclo combinato di taglia 850 MWe circa in sostituzione dell'esistente Gruppo 8.

La configurazione attuale e quella di progetto sono dal punto di vista modellistico identiche, in quanto non cambiano le portate di presa e rilascio così come la loro localizzazione ed i valori di temperatura. Per semplicità espositiva si è fatto riferimento principalmente all'assetto di progetto. In ogni caso, sono stati definiti i seguenti casi studio:

- *Caso1*, simula la dispersione termica degli scarichi della Centrale nel periodo invernale.
- *Caso2*, simula la dispersione termica degli scarichi della Centrale nel periodo estivo.

Lo studio si è avvalso dei più aggiornati dati geometrici ed idrologici disponibili, derivanti principalmente da:

- studi pregressi, di cui fa parte lo Studio di Impatto Ambientale presentato da Endesa Italia nel 2006 dal titolo: "Centrale di Tavazzano – Montanaso Realizzazione dei moduli 9 e 10 a ciclo combinato single shaft";
- dati di temperatura del fiume Adda per gli anni 2015, 2016 e 2017 reperiti dal sito della Regione Lombardia (<https://www.arpalombardia.it/>);
- dati di portata osservata nel canale Belgiardino e nel fiume Adda in corrispondenza della confluenza con il Belgiardino, per gli anni 2017 e 2018, forniti dal committente;
- geometrie del fiume Adda già disponibili a DHI nell'ambito delle attività di previsione delle piene del Bacino del Po, per conto di Arpa ER / AIPO;
- serie di portata del fiume Adda a Lodi derivanti dal sistema previsionale operativo sul bacino del fiume Po;
- la Carta Topografica Regionale della Lombardia Scala 1:10000 per desumere parte delle informazioni altimetriche dei canali artificiali.

Lo studio è stato effettuato grazie all'utilizzo del codice di calcolo MIKE 21 HD FM (Flexible Mesh), bidimensionale idrodinamico in grado anche di risolvere le equazioni di dispersione e trasporto della temperatura attraverso il metodo dei volumi finiti. Il modello è stato implementato con una maglia di calcolo a risoluzione variabile, in modo infittire la densità degli elementi nelle zone in prossimità delle prese e degli scarichi. Inoltre, per una rappresentazione verosimile della ripartizione delle portate tra il canale Muzza e Belgiardino a seconda del periodo dell'anno, sono state inserite nel modello apposite strutture di regolazione dei deflussi.

Il modello è stato implementato utilizzando un approccio cautelativo sia nella scelta dei dati che dei parametri del modello stesso, tra i principali:

- sono stati utilizzati i rapporti di portata tra canale Belgiardino e Adda (Q_a/Q_b) statisticamente più cautelativi a partire dai dati aggiornati (2017 e 2018) e quelli derivanti da studi pregressi;
- nel modello sono stati omessi gli scambi termici tra corpo idrico e l'ambiente circostante.

Si riportano in Tabella 7.1 i risultati ottenuti nei diversi casi analizzati, dalla quale **si evince che i vincoli normativi risultano rispettati in tutte le configurazioni analizzate.**

Tabella 7.1 Tabella riassuntiva degli incrementi termici calcolati nella sezione a valle della confluenza Adda e Belgiardino e temperature calcolate agli estremi del Belgiardino per i diversi casi studiati

	Condizione	modulo/gruppo attivo	Delta T intera sezione [° C]		Delta T semi sezione [° C]		Temp. Muzza-Belgiardino [° C]		Temp. Sbocco Muzza-Belgiardino [° C]	
			Valore	Limite	Valore	Limite	Valore	Limite	Valore	Limite
Caso 1	Periodo invernale	5 - 6 - CCGT	2.76	3	0.34	1	10.75	35	15.7	30
Caso 2	Periodo estivo	5 - 6 - CCGT	2.84	3	0.18	1	25.62	35	28.46	30

8 Riferimenti

- MIKE by DHI 2017. *MIKE 21 Flow Model. Hydrodynamic Module. Scientific documentation.* DHI, Hørsholm, Denmark, 2017.
- MIKE by DHI 2017. *MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model. Advection-Dispersion Module. Scientific Documentation.* DHI, Hørsholm, Denmark, 2017.
- Decreto Legislativo n°152/2006, Parte Terza, Allegato 5, Tab. 3.
- Studio di Impatto Ambientale: “Centrale di Tavazzano – Montanaso Realizzazione dei moduli 9 e 10 a ciclo combinato single shaft”. Endesa Italia, 2006.
- Relazione idrologica-idraulica “Rimozione condotta attraversamento canale Muzza”, Enereco, 2013.
- Portale internet della Regione Lombardia (<https://www.arpalombardia.it/>).

ALLEGATI



ALLEGATO A
MIKE 21 HD & AD
Descrizione tecnica



PREMESSA

Il MIKE 21 è un programma modulare contenente diversi codici per la simulazione di corpi idrici per i quali sia possibile adottare l'approssimazione idrodinamica bidimensionale, piana, per fluidi verticalmente omogenei. Infatti, il numero "21" che contraddistingue il codice indica proprio la bidimensionalità nel piano ("2") e la monodimensionalità lungo la verticale ("1").

Il sistema modellistico è stato sviluppato per la simulazione delle correnti a pelo libero e dei fenomeni correlati all'idraulica in fiumi, laghi o invasi, così come in ambito costiero e offshore. I principali campi di applicazione sono:

- modellazione idrodinamica del trasporto solido e della qualità delle acque in fiumi;
- laghi ed aree golenali;
- studio del moto ondoso in aree costiere, bacini portuali ed offshore;
- analisi idrodinamica del trasporto solido e morfologica in aree costiere;
- analisi della qualità delle acque al largo e sottocosta;
- supporto alla pianificazione e progettazione di opere costiere ed offshore;
- supporto alla pianificazione e progettazione di opere di difesa fluviale;
- supporto all'ottimizzazione di layout portuali;
- analisi impatto ambientale;
- previsione degli stati di mare a supporto della navigazione;
- analisi di allagamenti in aree costiere e fenomeni di storm surge.

In generale il MIKE 21 offre un ambiente di lavoro completo, efficace e robusto a supporto dell'ingegneria e della pianificazione e gestione territoriale a diverse scale spaziali. La combinazione di un'interfaccia grafica avanzata con un motore di calcolo robusto ed affidabile, frutto di un pluriennale e continuo sviluppo da parte del DHI, rende questo software lo strumento più utilizzato ed efficace per l'ingegneria fluviale e marittima in tutto il mondo.



Il pacchetto MIKE 21 è disponibile in 4 versioni che si differenziano in base alla schematizzazione geometrica adottata:

- CLASSIC GRID (Griglia classica singola): le equazioni di continuità e del moto sono risolte con una tecnica implicita alle differenze finite su una griglia rettangolare, uniforme in tutto il dominio di calcolo;
- MULTIPLE GRID (Griglia multipla): questo schema utilizza lo stesso approccio della griglia singola, con la possibilità di innestare nel dominio griglie a risoluzione crescente nelle aree ove sia richiesto un maggiore dettaglio;
- FLEXIBLE MESH (Griglia flessibile): questo schema utilizza un metodo ai volumi finiti per la discretizzazione delle equazioni di flusso e trasporto con valori centrati sul singolo elemento. Il dominio di calcolo è discretizzato nelle dimensioni orizzontali attraverso una maglia non strutturata. La griglia non strutturata garantisce il massimo della flessibilità nella rappresentazione di geometrie complesse, in particolare per domini di calcolo estesi in cui sia necessario adottare una risoluzione spaziale variabile;
- CURVILINEAR (Griglia curvilinea): è la griglia adottata da MIKE 21C, codice di calcolo studiato appositamente per applicazioni di morfologia fluviale.

In campo fluviale MIKE 21 può essere utilizzato in modo integrato con altri codici di calcolo del DHI, in particolare:

- MIKE 11, grazie al modulo MIKE FLOOD, che consente di condurre simulazioni idrodinamiche accoppiando gli approcci 1d e 2d in modo totalmente integrato;
- MIKE URBAN CS per la simulazione di allagamenti in ambito urbano dalla rete di drenaggio.

In campo marittimo e costiero, dove risulta più efficace l' utilizzo della versione FM, il MIKE 21 consente di studiare in modo integrato il moto ondoso (moduli SW, PMS, NSW, BW, EMS), le correnti e le variazioni di livello superficiale (HD), il trasporto solido e la morfologia di sedimenti non coesivi e coesivi (ST, MT), la dispersione di soluti (AD/TR).

L'utilizzo di formati comuni a tutti i codici del mondo MIKE garantisce la possibilità di utilizzare i file di MIKE 21 anche in input ad altri modelli quali LITPACK e MIKE 3.

Infine, attraverso l'utilizzo di EcoLab, MIKE 21 consente di studiare anche i processi più complessi in termini di qualità delle acque, in presenza di composti e reagenti.

Di seguito si descrive il modulo MIKE 21 HD Classical Grid.

Modulo Idrodinamico (HD)

Il modulo idrodinamico (HD), cuore del codice MIKE 21, simula le variazioni di livello e corrente in risposta alle differenti tipologie di forzanti considerate, potendo essere utilizzato da solo o come base per i calcoli effettuati dagli altri moduli disponibili. In particolare, il modulo HD di MIKE 21 permette di tenere in considerazione i seguenti fenomeni:

- flooding and drying;
- perdite di carico;
- attrito al fondo;
- forza di Coriolis;
- effetto del vento;
- gradienti di pressione barometrica;
- coperture di ghiaccio;
- effetto delle maree;
- precipitazioni/Evaporazioni;
- radiation stresses;
- pozzi e sorgenti.

Come menzionato in precedenza, i risultati di una simulazione MIKE 21 HD possono essere usati come input per la simulazione di fenomeni fisici strettamente dipendenti dagli aspetti idrodinamici:

- trasporto di sostanze disciolte/sospese in acqua, modulo AD e modulo "Mud Transport";
- trasporto solido di materiale non coesivo, modulo ST;
- qualità delle acque ed idroecologia, modulo ECO Lab.

Infine, per quanto riguarda le analisi dei fenomeni di esondazione, MIKE 21 può essere accoppiato in modo dinamico attraverso l'interfaccia MIKE FLOOD al codice monodimensionale MIKE 11, per la simulazione degli alvei e dei canali, ed al codice MIKE URBAN, per la simulazione delle reti di drenaggio e collettamento urbano, schematizzando il dominio di calcolo in modo integrato 1D/2D.

Il modulo idrodinamico HD del Mike 21 risolve le equazioni complete del moto di De St.Venant in un caso bidimensionale piano (la terza dimensione - asse z - è implicitamente integrata nelle

equazioni considerando un mezzo verticalmente omogeneo), non stazionario. Il sistema delle equazioni di De St.Venant è costituito dalle seguenti equazioni.

Equazione di conservazione della massa:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0$$

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo x:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{C^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega q - fVV_x \\ + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} p_a + \frac{1}{\rho_w} \left(\frac{\partial \mathcal{S}_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \mathcal{S}_{xy}}{\partial y} \right) = 0 \end{aligned}$$

Equazione di conservazione della quantità di moto lungo y:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gq\sqrt{p^2+q^2}}{C^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega p - fVV_y \\ + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} p_a + \frac{1}{\rho_w} \left(\frac{\partial \mathcal{S}_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \mathcal{S}_{xy}}{\partial x} \right) = 0 \end{aligned}$$

nelle quali:

$h(x,y,t)$ = profondità dell'acqua;

$\zeta(x,y,t)$ = quota del pelo libero;

$p,q(x,y,t)$ = portate unitarie nelle direzioni x e y;

$C(x,y)$ = coefficiente di scabrezza di Chezy;

G = accelerazione di gravità;

$f(V)$ = fattore d'attrito del vento;

$V, V_x, V_y(x,y,t)$ = velocità del vento e componenti lungo le direzioni x e y;

$\Omega(x,y)$ = parametro di Coriolis;

$p_a(x,y,t)$ = pressione atmosferica;

ρ_w = densità dell'acqua;

x,y = coordinate spaziali;

t = tempo;

$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$ = componenti dello sforzo di taglio che tengono conto della turbolenza e del profilo verticale delle velocità;

S_{xx}, S_{xy}, S_{yy} = componenti del radiation stress (nel caso la forzante idrodinamica derivi dall'interazione tra il moto ondoso ed il fondo).

Il termine di turbolenza è rappresentato dagli sforzi di taglio τ che compaiono nelle equazioni di conservazione della quantità di moto lungo le direzioni x e y . La formulazione utilizzata prende in considerazione il parametro E "eddy viscosity" che è implementato secondo due modalità:

1. dipendente dal flusso locale:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(E \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(E \frac{\partial p}{\partial y} \right) \quad (\text{nella direzione } x);$$

2. oppure dipendente dalla velocità locale:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(hE \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hE \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (\text{nella direzione } x);$$

Le due equazioni rappresentano il termine di sforzo di taglio nelle equazioni di conservazione della quantità di moto. Il coefficiente E può essere specificato come costante su tutta la griglia, variabile da punto a punto, o come funzione del campo di velocità locale secondo la formulazione di Smagorinski:

$$E = c_s^2 \Delta^2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]$$

nella quale u e v sono le componenti della velocità locale, Δ è la dimensione spaziale della griglia e c_s è una costante compresa tra 0,25 e 1.

In questo caso il termine di sforzo di taglio nelle equazioni di conservazione della quantità di moto (asse x) è dato da:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(hE \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{2} hE \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right)$$

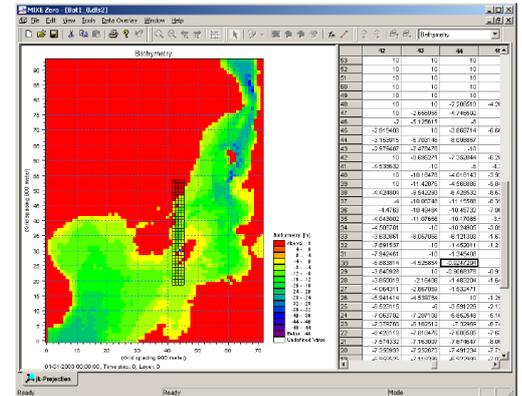
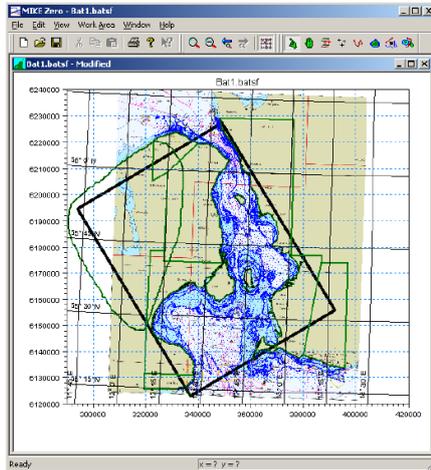
La portata entrante nell'area di calcolo viene assegnata come portata unitaria ($m^3/s/m$) lungo la frontiera libera dalla quale entra il flusso: viene assegnata al modello la portata complessiva (m^3/s) che viene poi ripartita automaticamente sui punti di calcolo della griglia.

La condizione iniziale è rappresentata da una situazione di "quiete", nel senso che tutte le componenti delle forzanti sono nulle (portate, velocità, livelli) e variano poi linearmente nel tempo fino a raggiungere il valore assegnato in un tempo prefissato. Questa tecnica, detta del "soft start" consente di eliminare eventuali brusche oscillazioni iniziali della soluzione che potrebbero presentarsi per problemi di stabilità numerica. Al termine del "soft start" la situazione ottenuta è di effettiva stazionarietà.

Le equazioni di continuità del moto sono risolte con una tecnica implicita alle differenze finite su una griglia rettangolare, uniforme su tutto il dominio di calcolo, costituita da celle di dimensioni tali da poter descrivere in maniera sufficientemente corretta le variazioni piano-altimetriche della batimetria.

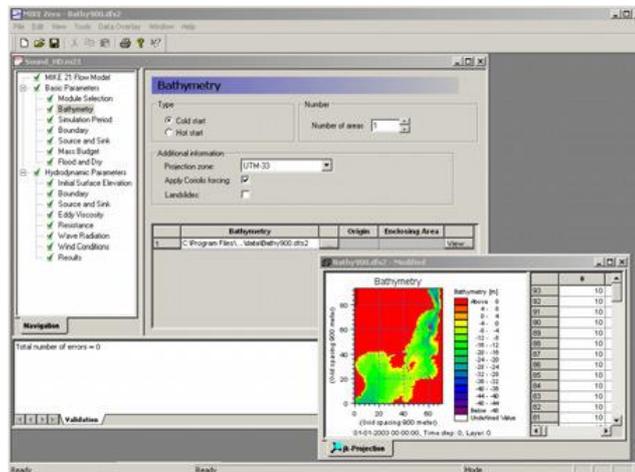
Il medesimo approccio della griglia singola viene utilizzato anche nella versione "griglia multipl-nested grid", che permette di innestare nel dominio di calcolo griglie a risoluzione crescente nelle aree ove sia richiesto un maggiore dettaglio.

Le equazioni della conservazione della massa e della quantità di moto sono risolte alle differenze finite utilizzando il metodo ADI (Alternating Direction Implicit). Il sistema di equazioni linearizzate che scaturisce dall'algorithmo è risolto con il metodo DS (Double Sweep, Abbott, 1979).



Il modello MIKE 21 HD necessita di una serie di dati di input che si possono raggruppare in differenti categorie, ovvero:

- parametri temporali e del dominio (risoluzione della griglia di calcolo, time step, durata simulazione);
- fattori di calibrazione (bed resistance, viscosità turbolenta);
- condizioni iniziali (livelli e campi di corrente);
- condizioni al contorno (livelli, portate);
- altre forzanti (campi di vento, radiation stresses, sorgenti o pozzi).

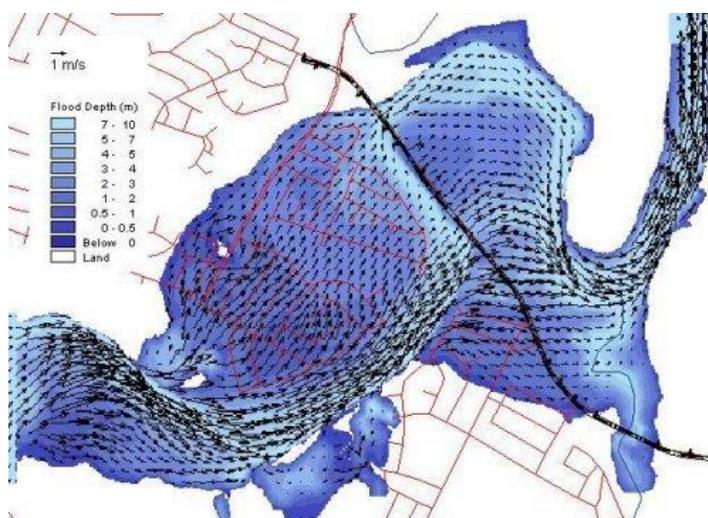


I risultati di un'applicazione modellistica bidimensionale possono essere rappresentati con i molteplici strumenti di visualizzazione statica e dinamica a corredo dello strumento modellistico utilizzato. Gli strumenti di post processing consentono di creare animazione 2D da esportare ed

utilizzare in ambiente di lavoro esterno alla piattaforma modellistica utilizzata per il calcolo numerico.

L'utilizzo di un approccio di tipo bidimensionale, permette di indagare non solo l'intensità del fenomeno ma anche direzione e verso del vettore velocità in ogni cella della matrice. Ad esempio, per ognuno degli elementi della griglia, sono rappresentati le variazioni temporali delle seguenti variabili:

- profondità e livelli idrici;
- flussi di corrente nelle direzioni principali;
- velocità di corrente e direzione.

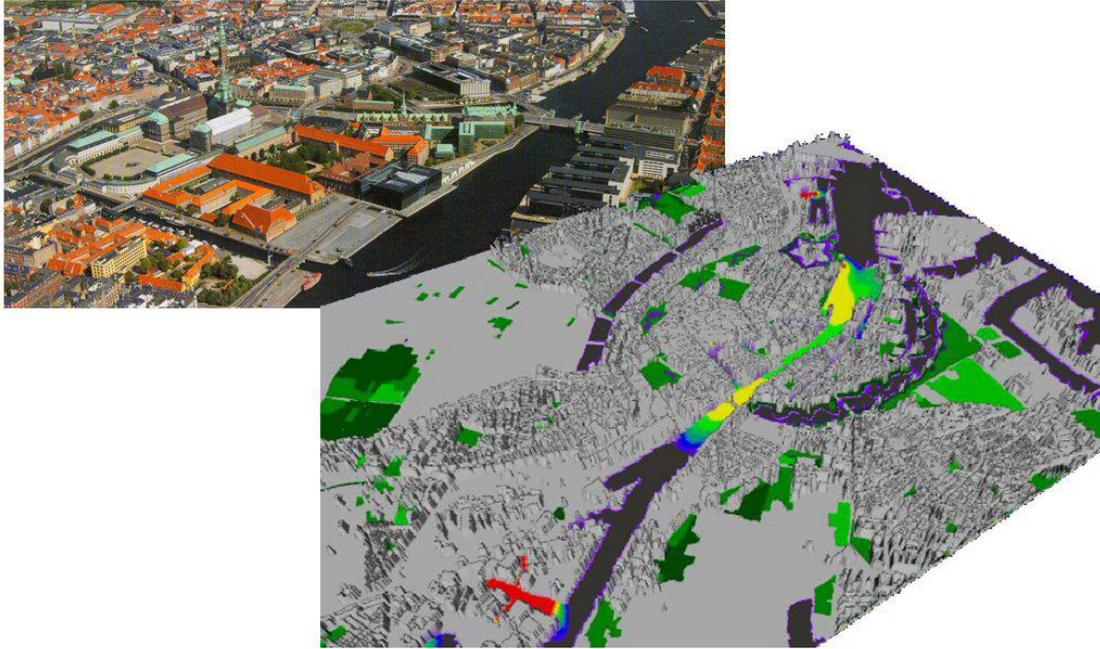


Modulo Avvezione/Dispersione (AD)

Il Modulo AD di MIKE 21 simula il comportamento di sostanze in sospensione o disciolte in acqua per effetto del flusso idrodinamico (avvezione) e dei processi di dispersione. Le sostanze possono essere conservative o non-conservative, organiche o inorganiche. Le reazioni di sostanze non-conservative possono essere simulate attraverso l'introduzione di un semplice decadimento dipendente dal solo fattore tempo.

La base idrodinamica per AD è costituita dal modulo idrodinamico HD. Il modulo di avvezione/dispersione può essere applicato ad un'ampia gamma di fenomeni idraulici. Le aree di applicazione sono generalmente legate all'idrodinamica e al trasporto di sostanze disciolte, simulazioni di traccianti, studi di ricircolo e semplici studi di qualità delle acque.

Il modulo AD è strettamente correlato a ECOLab, il codice di calcolo del DHI per la modellazione dei processi ecologici ed ambientali, il quale permette di simulare reazioni chimiche complesse e decadimento non lineare delle sostanze.



Il sistema modellistico del modulo AD, legato dinamicamente al modulo idrodinamico HD, è basato sulla soluzione numerica delle equazioni di Navier-Stokes valide per fluidi incomprimibili e soggette all'assunzione di Boussinesq e alla pressione idrostatica. L'equazione di continuità utilizzata per il calcolo del trasporto di una grandezza scalare è riportata di seguito:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial wC}{\partial z} = F_C + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial C}{\partial z} \right) - k_p C + C_s S$$

Il termine di diffusività orizzontale è dato da:

$$F_C = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] C$$

Per le simulazioni 2D, l'equazione di continuità è mediata sulla profondità ed è definita in maniera seguente:

$$\frac{\partial h\bar{C}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{C}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{C}}{\partial y} = hF_C - hk_p\bar{C} + hC_s S$$

Symbol list

t	<i>time</i>
x, y, z :	<i>Cartesian coordinates</i>
D_v :	<i>vertical turbulent (eddy) diffusion coefficient</i>
S :	<i>magnitude of discharge due to point sources</i>
F_c :	<i>horizontal diffusion term</i>
D_h :	<i>horizontal diffusion coefficient</i>
h :	<i>depth</i>
\bar{u}, \bar{v} :	<i>depth-averaged velocity components</i>
C :	<i>concentration of scalar quantity</i>
k_p :	<i>linear decay rate of scalar quantity</i>
C_S :	<i>concentration of scalar quantity in source</i>

La soluzione delle equazioni del trasporto è strettamente legata alla soluzione delle condizioni idrodinamiche. I dati di input al modello sono relativi ai componenti da simulare, in particolare è necessario specificare: il tipo di componente, la formulazione scelta per il calcolo dei coefficienti di dispersione, la legge di decadimento, le condizioni iniziali e le condizioni al contorno (in termini di concentrazione del componente).

L'output del modello è rappresentato dalla distribuzione nel tempo della concentrazione dei componenti simulati.

