POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale
in INGEGNERIA ENERGETICA E NUCLEARE

Tesi di Laurea Magistrale

ANALISI DEI PROFILI DI PRODUZIONE E RICHIESTA DELLA RETE DI TELERISCALDAMENTO DI TORINO IN CONDIZIONI DI CARICO ELEVATO

Relatori:

Prof. Vittorio VERDA

Ing. Elisa GUELPA

Candidato:

Nicolò LOSCHI

A.A. 2017/2018

Indice generale

Sommario 1
1. Teleriscaldamento: Concetti e Definizioni 3
1.1 Rete di Torino 5
2. Descrizione Del Modello 8
3. Analisi Dei Dati 11
3.1 Binary search 12
3.2 Dati Utenze 14
3.3 Dati Centrali 15
4. Dati Ottenuti 16
4.1 Volumetrie 16
4.2 Utenza singola 19
4.3 Baricentri 23
4.4 Centrali 30
4.4.1 Curva di carico 32
4.4.2 Suddivisione potenza 34
5. Confronto Utenze-Centrali 36
5.1 Attendibilità profili ottenuti 37
5.2 Analisi dei profili di produzione e richiesta 39
6. Uso Del Modello 42
6.1 Input 42
6.2 Risultati 50
6.2.1 Rete Di Mandata 51
6.2.2 Rete Di Ritorno 63
7. Punti Critici 71
8. Conclusioni 77
Elenco delle figure 80
Bibliografia e sitografia 82
Ringraziamenti 83

Sommario

In questo elaborato verrà analizzato il comportamento della rete di Teleriscaldamento di Torino durante il giorno più freddo dell'ultima stagione invernale, che si è verificato il 28 Febbraio 2018. Si è fissato questo giorno dell'anno per studiare il comportamento della rete con il massimo carico termico richiesto.

Partendo dai dati forniti da IREN Energia S.p.A., si vuole analizzare il profilo di richiesta delle utenze e confrontarlo con quello di produzione delle centrali. A tal fine è stata necessaria un'elaborazione preliminare dei dati delle utenze per renderli utilizzabili: per prima cosa si è effettuata una selezione delle misurazioni utili. In secondo luogo, è stato necessario effettuare un'interpolazione al fine di ottenere dei dati omogenei in tutte le utenze e poterli sommare o confrontare tra loro. Una volta divisi per baricentri, vengono sommati per trovare la richiesta totale della rete. Lo stesso procedimento è stato effettuato per le misurazioni delle centrali.

Successivamente, viene utilizzato un modello fluidodinamico implementato mediante il software MATLAB, il quale consente di simulare il comportamento della rete di trasporto per avere la distribuzione di temperatura e portata lungo tutti i nodi della rete, durante tutto l'arco della giornata**.**

La prima parte dello studio ha come obiettivo il confronto tra l'andamento di richiesta e di produzione al fine di comprendere se esistono spazi di riduzione dei picchi di fabbisogno o di produzione, ad esempio attraverso un migliore utilizzo dell'inerzia termica nel trasporto in rete, e individuare, se presenti, orari della giornata in cui si può modificare la produzione delle centrali. Il fine ultimo del lavoro svolto è quello di valutare se è possibile gestire la rete in modalità differente per sfruttare le inerzie al fine di ottimizzare il trasporto di calore nella rete. Infine, si vuole valutare se potrebbe utile inserire nuovi accumuli, localizzarli nel punto migliore ed eventualmente individuare le zone ideali per poter allacciare nuove utenze.

1. Teleriscaldamento: Concetti e Definizioni

Il teleriscaldamento è una forma di riscaldamento che consiste nella distribuzione, attraverso una rete di tubazioni isolate e interrate, di acqua calda, acqua surriscaldata o vapore (detti fluidi termovettori), proveniente da una grossa centrale di produzione e diretta alle abitazioni con successivo ritorno dei suddetti alla stessa centrale. Il calore trasportato dal fluido termovettore può essere usato per il riscaldamento urbano o per produrre acqua calda sanitaria. Questo approccio permette un utilizzo più efficiente dell'energia primaria, grazie alla produzione di calore in grandi centrali cogenerative, e riduce l'impatto sull'ambiente per via delle ridotte emissioni e dell'utilizzo di fonti energetiche rinnovabili, quali le biomasse, il solare termico e la geotermia dove disponibile. [1]

Il termine "teleriscaldamento" evidenzia una specifica caratteristica del servizio, ossia la distanza esistente tra il punto di produzione e i punti di utilizzo del calore: il cuore del sistema è composto da una o più centrali che possono servire edifici situati anche ad alcuni chilometri di distanza collegati tramite una rete (sistema a rete).

Le componenti principali di un sistema di teleriscaldamento sono:

- Una centrale termica, dove viene prodotto il calore;
- Una rete di trasporto e distribuzione, costituita da doppie condotte sotterranee (mandata e ritorno);
- Sistemi di pompaggio e ripompaggio;
- Un insieme di sottostazioni di servizio (SST).

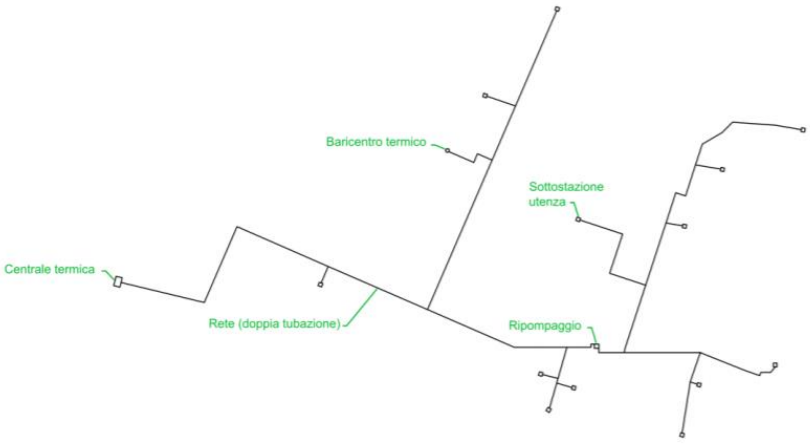

Fig. 1.1, Schema rete teleriscaldamento

Le centrali, spesso cogenerative, producono il calore necessario per soddisfare il bisogno termico della rete. La cogenerazione consiste nella produzione combinata di energia elettrica e di calore utile. Essa consente di recuperare il calore che, nelle centrali termoelettriche convenzionali, viene disperso nell'ambiente esterno in quanto non più utilizzabile per la produzione di energia elettrica. Il recupero del calore che si ottiene è notevole e può variare da un 30% a un 50% dell'energia primaria immessa nel sistema. Il teleriscaldamento abbinato alla cogenerazione costituisce un sistema di fornitura del calore che migliora i benefici energetici ed ambientali nelle aree urbane, in quanto ad una riduzione complessiva dei consumi energetici primari associa una corrispondente riduzione delle emissioni. [2] La potenza proveniente dalle centrali deve corrispondere alla richiesta delle utenze più le perdite termiche della rete. Queste sono più alte in termini percentuali quando la portata che circola è minore. Le centrali cogenerative, per avere un fattore di utilizzazione il più alto possibile, sono dimensionate ad una potenza inferiore a quella massima richiesta. I picchi sono soddisfatti da sistemi di integrazione come caldaie o accumuli. Quest'ultimi si ricaricano nelle ore di minor richiesta per poi scaricarsi quando le centrali non riescono a coprire il fabbisogno: il loro vantaggio principale è quello di ridurre notevolmente l'uso di impianti di integrazione, spesso funzionanti a combustibili fossili, e di spostare la produzione in fasce più convenienti dal punto di vista economico.

La rete del teleriscaldamento consiste in una doppia tubatura interrata e isolata. Nei tubi di mandata circola acqua a circa 120°C, che raggiunge le utenze in cui avviene lo scambio termico. Successivamente torna in centrale ad una temperatura di circa 70°C nelle tubature di ritorno. L'isolamento termico limita la caduta di temperatura nel tragitto fino alle utenze diminuendo le perdite termiche e di conseguenza il carico delle centrali. La rete di trasporto è il sistema di tubazioni atto a trasportare il calore dalle centrali di produzione agli stacchi predisposti per la partenza della rete di distribuzione; è l'arteria principale della rete e le sue tubature presentano un diametro elevato. È caratterizzata dal fatto di non avere stacchi per l'alimentazione diretta di utenze. La rete di distribuzione, invece, è la parte di rete che porta il calore direttamente alle utenze; questa rete serve un quartiere o utenze vicine e presenta tubazioni di diametro sempre più piccolo man mano che ci si avvicini all'utenza finale. I punti dove parte la rete di distribuzione sono chiamati Baricentro di Carico Termico (BCT). Da questi punti nodali della rete è possibile alimentare o intercettare una significativa volumetria d'utenza.

Le stazioni di ripompaggio consentono all'acqua di avere una pressione sempre sufficiente a raggiungere tutte le utenze. Sono poste quasi esclusivamente nella rete di mandata, dove è

assolutamente necessario avere una portata con una certa pressione e velocità per soddisfare immediatamente la domanda.

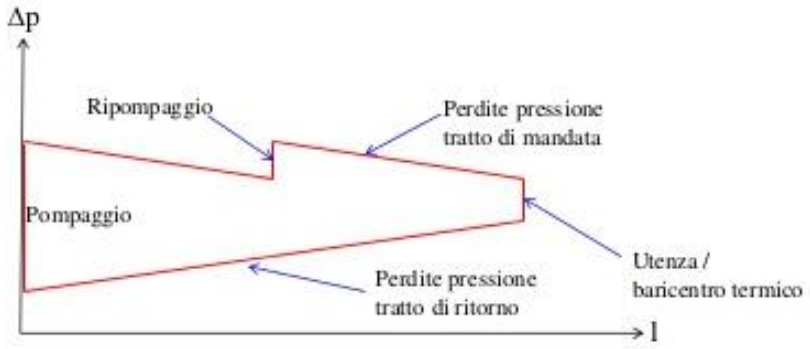

Fig. 1.2, Schema cadute pressione nella rete

Le SST, situate nei singoli edifici da servire, sono costituite da scambiatori di calore, che permettono di realizzare lo scambio termico tra l'acqua della rete di teleriscaldamento (circuito primario) e l'acqua del circuito del cliente (circuito secondario), senza che vi sia miscelazione tra i due fluidi. Tutte le sottostazioni sono dotate di contatori di diverse grandezze fisiche; nel mio elaborato ho preso in considerazione:

- Temperatura di mandata e di ritorno, la temperatura di arrivo nella SST e quella di ritorno nella rete di distribuzione, dopo lo scambio termico.
- Portata, la quantità di fluido che scorre nelle tubazioni in un certo tempo;
- Potenza, il rapporto tra il calore ceduto dal fluido primario al secondario e il tempo;
- Segnante, la somma dell'energia scambiata nella SST.

1.1 Rete di Torino

Il primo impianto di cogenerazione per il teleriscaldamento a Torino, Le Vallette, viene realizzato nel 1982. Nel corso degli anni le utenze aumentano sempre più, nei primi anni del 2000 la rete serve circa 400 mila abitanti. [2] Oggi, con una volumetria servita di oltre 62,4 milioni di m^3, corrispondenti a oltre il 57% della volumetria urbana complessiva, Torino è la città più teleriscaldata d'Italia e una delle metropoli più teleriscaldate d'Europa. [3]

In Fig. 1.3, l'area evidenziata corrisponde all'area attualmente teleriscaldata a Torino. È anche rappresentata in blu scuro la rete di trasporto. Questa è dotata di circa 170 baricentri attivi, dai quali parte, per ognuno, la rete di distribuzione fino alle utenze; quest'ultime non coprono tutte la stessa area ma variano da allacciare poche utenze ad un centinaio.

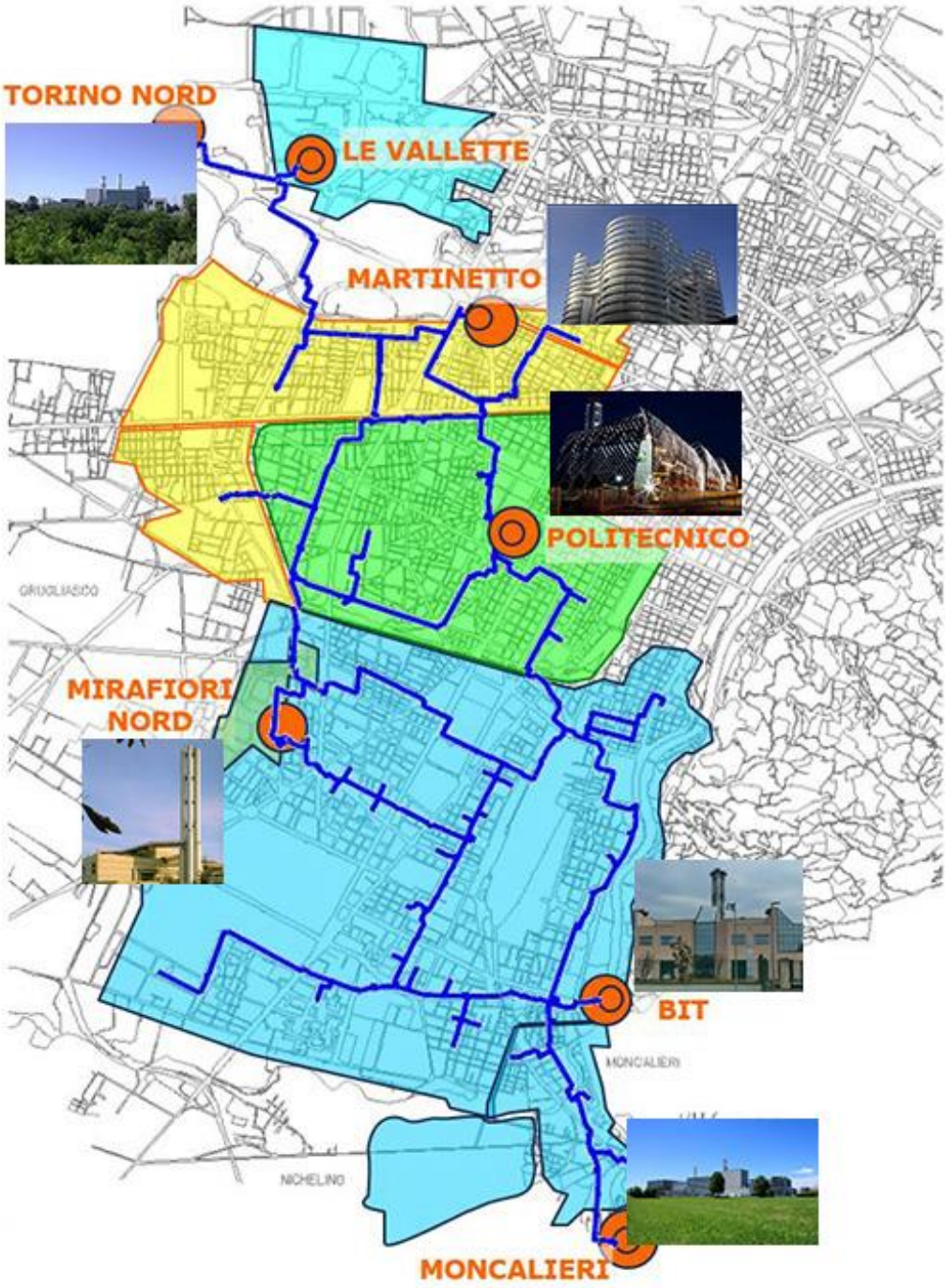

Fig. 1.3, Mappa della rete di Torino. Fonte IREN Energia S.p.A.

Nella rete di Torino si possono individuare diversi anelli di circolazione; questa forma a maglie permette di avere una migliore gestione in caso di malfunzionamento di un tratto di tubazione. Infatti, se il guasto avviene in un tratto magliato, è sufficiente intercettarlo, mantenendo inalterata la circolazione nel resto delle tubazioni. Le reti a maglie, inoltre, presentano minori cadute di pressione, semplificando la gestione della rete in caso di carico elevato.

La centrale di Moncalieri è, insieme alla centrale Torino Nord, la sorgente principale del calore che alimenta la rete di teleriscaldamento di Torino. È costituita da due impianti di cogenerazione a ciclo combinato, il 2° GT ed il 3° GT, con una potenza elettrica complessiva di circa 800 MW ed una potenza termica in assetto di cogenerazione di circa 520 MW. È dotata anche di un impianto di integrazione e riserva con ha una potenza termica complessiva di 141 MW. [4]

L'impianto di cogenerazione di Torino Nord è da 400 MW elettrici e 220 MW termici, dotata anche di un impianto di integrazione e riserva di una potenza termica complessiva di 340 MW e di un sistema di accumulo del calore, costituito da 6 serbatoi di capacità utile complessiva di 5.000 metri cubi. [4]

Completano il sistema:

- l'impianto di integrazione Martinetto, costituito da un sistema di accumulo composto da 6 serbatoi in pressione per una capacità complessiva pari a 5.000 m^3;
- l'impianto di integrazione Politecnico dove la produzione di calore per il teleriscaldamento è realizzata con uno scambiatore di calore di 255 MW di potenza termica e comprende anche un sistema di accumulo di calore da 2.500 m^3;
- l'impianto di integrazione di Mirafiori Nord dotato di una potenza termica di 35 MW;
- l'impianto di integrazione del BIT con una potenza termica di 255 MW. [4]

Tutti gli impianti della rete di Torino sono alimentati da gas naturale. I sistemi di accumulo sono invece ricaricati tramite cogenerazione.

2. Descrizione Del Modello

In questa sezione si descrive il modello fluidodinamico usato per simulare il comportamento della rete di trasporto della Città di Torino, sia per la mandata sia per il ritorno in centrale.

Per modellizzare la rete è necessaria la descrizione accurata della composizione delle tubature (lunghezza, diametri, fattori d'attrito, connessioni). La topologia è descritta usando un approccio grafico. Ogni tubazione è considerata come un ramo delimitato da due nodi, i quali sono identificati come nodo di ingresso e uscita in base a una direzione di riferimento. La matrice di incidenza, A, è usata per esprimere la relazione tra rami e nodi: ha tante righe quanti nodi e tante colonne quanti rami sono presenti. Ogni elemento della matrice, A_{ij} è uguale a -1 se il ramo j è entrante nel nodo, 1 se uscente, 0 negli altri casi. Nel nostro studio la rete è stata suddivisa in circa 680 nodi e 700 rami.

Il modello è basato sulla formulazione monodimensionale delle equazioni di conservazione di massa, momento ed energia. Questo metodo consente di risolvere il problema fluidodinamico (le prime due equazioni) e quello termico (conservazione dell'energia) in due istanti separati, semplificando notevolmente l'analisi.
Per quanto riguarda la parte fluidodinamica, la prima equazione è applicata in ogni nodo, mentre la seconda nei rami. Sono state adottate due ipotesi:

- I termini non constanti non sono considerati perché le perturbazioni fluidodinamiche viaggiano nell'intera rete in un periodo di tempo di pochi secondi, molto più piccolo degli step temporali adottati. Nel nostro caso sono di 5 minuti;
- La densità è considerata costante, quindi il cambio di velocità tra ingresso e uscita di un ramo è trascurabile.

Usando la matrice di incidenza si può scrivere l'equazione di bilancio di massa in forma matriciale per l'intera rete:

$$A * G + G_{EXT} = 0 \qquad (2.1)$$

Dove G è il vettore della portata nei rami e G_{EXT} il vettore delle portate entranti o uscenti nei nodi esterni. G_{EXT} è diversa da zero se la rete è considerata aperta, per esempio se si studia solo la rete di mandata o di ritorno. G_{EXT} è positiva se la portata è entrante nella rete, negativa se uscente.

Anche l'equazione del momento si scrive in forma matriciale:

$$G = Y * A^T * P + Y * \tau \qquad (2.2)$$

Dove la matrice diagonale Y contiene le conduttanze fluidodinamica dei rami, P è il vettore delle pressioni e τ è il vettore delle differenze di pressione dovuta alle pompe poste nei rami. Questa equazione non è lineare per via della dipendenza di Y dalla portata. Infine, bisogna imporre le condizioni al contorno: queste, in caso di rete aperta, sono definite dalle pressioni delle centrali principali e portate nei nodi corrispondenti alle utenze. Per via della non linearità dell'equazione (2.2), il problema richiede un processo iterativo: è stato applicato l'algoritmo SIMPLE (Semi Implicit Method for Pressure Linked Equation). [5] Nella prima iterazione viene fissato un valore di P, il quale, insieme alla portata, viene successivamente corretto usando l'equazione (2.2).
Di seguito vengono riportati schematicamente gli step dell'algoritmo:

1. supporre un valore di P' e G' e scegliere un fattore di rilassamento α. Questo fattore permette di velocizzare il processo di convergenza e diminuire i costi computazionali;

2. risolvere l'equazione del momento: $G = Y * A^t * P' + Y * \tau$. Y è dipendente dai P' e G' stabiliti in precedenza;

3. applicare le condizioni al contorno nel vettore G_{EXT} e calcolare: $H = A * Y' * A^t$ e $d = -A * G' - G_{EXT}$;

4. calcolare i fattori di correzione di portata e pressione: $P_{corr} = {}^{H}/_{d}$ e $G_{corr} = Y * A' * P_{corr}$

5. calcolare i valori di P e G: $P = P' + \alpha * P_{corr}$ e $G = G' + \alpha * G_{corr}$

6. calcolare i residui usando le equazioni del momento e di bilancio di massa: $G' - Y' * A^t * P' - Y' * \tau = R1$ e $A * G - G_{EXT} = R2$.

7. Confrontare i residui con una tolleranza scelta a priori:

    a. se entrambi sono minori della tolleranza, la convergenza è raggiunta;

    b. se invece almeno uno dei due è maggiore, si pone G'=G e P'=P e si ricomincia il procedimento dallo step 1.

Arrivati a convergenza dell'algoritmo, si può passare al modello termico. Questo è basato sulla equazione di conservazione dell'energia e viene applicato in tutti i nodi della rete: è assunto un miscelamento perfetto e adiabatico, perciò le perdite termiche possono avvenire soltanto nei rami. L'equazione viene scritta in forma matriciale per tutti i nodi della rete:

$$M * \dot{T} + K * T = g \qquad (3)$$

Dove M è una matrice diagonale che contiene i coefficienti dei termini dinamici (ρcΔV), K rappresenta i coefficienti dei termini linearmente dipendenti dalla temperatura, e g il vettore dei termini noti. Le condizioni al contorno di tipo Dirichlet (temperatura fissata), sono imposte in tutti i nodi collegati ad una sola tubazione. Questa equazione è scritta in transitorio per due ragioni principali:

- la rete è caratterizzata da un'enorme capacità termica;
- le perturbazioni termiche viaggiano alla velocità dell'acqua, molto inferiore alle perturbazioni di pressione; perciò le variazioni di temperature possono impiegare molto tempo prima di arrivare alle centrali.

A questo punto le due parti del modello vengono risolte fino allo step finale. Riassumendo, l'intero procedimento può essere schematizzato nel modo seguente:

I. Imporre le condizioni al contorno di portata e pressioni al tempo t e risolvere le equazioni di massa e momento con l'algoritmo SIMPLE;
II. Imporre le condizioni al contorno di temperatura al tempo t e risolvere l'equazione dell'energia;
III. controllare se siamo arrivati allo step finale:
    a. se è lo step finale abbiamo il risultato dell'andamento di portata e temperatura nel tempo rispettivamente in ogni ramo e nodo della rete;
    b. se non è lo step finale si controlla se sono cambiate le condizioni al contorno di pressione e portata:
        i. se sono uguali si riparte dallo step II.
        ii. se non sono uguali si riparte dallo step I.

3. Analisi Dei Dati

Il primo step del lavoro è stata la parte di pre-processing dei dati forniti da IREN Energia S.p.A. riguardanti le utenze, necessaria per renderli utilizzabili.

I dati erano divisi in vari file:

- Misure: foglio txt con oltre 65 milioni di misurazioni, con relativi orari di misurazione e codici che identificano unicamente la misurazione (ITEMID);
- Items: foglio txt con oltre 1 milione di record, con la spiegazione dell'ITEMID e il codice dell'utenza relativa (HOSTID).
- Hosts: foglio txt con circa 7 mila record, per l'identificazione degli HOSTID.
- Anagrafica: file Excel contenente l'elenco delle utenze, caratteristiche e volumetrie.
- Contatori: file Excel con elenco contatori utili.

Il file "Misure" comprendeva tutte le misurazioni raccolte, molte delle quali non necessarie al mio studio. Data l'enorme dimensione del file la selezione delle misure utili non è stata immediata, ma si è rivelata faticosa e complicata. Questa selezione ha richiesto l'uso del software Python.

Per rendere immediata la comprensione dei dati si è scelto di creare una tabella unica che comprendesse le informazioni presenti nei primi tre file, così composta: orario della misurazione, valore della misurazione, codice del contatore, utenza. Per prima cosa ho creato una tabella sola dai file Hosts e Items contenente solo i contatori utili: misurazioni di portata, temperatura di mandata e di ritorno, potenza e segnante. Il passo successivo richiedeva di cercare nel file "misure" se fossero presenti i codici dei contatori utili e quindi selezionare solo quelle misurazioni. Lanciato lo script su Python, è emerso che il tempo necessario per eseguire il programma risultava esageratamente lungo. Si è rilevato necessario andare a studiare più nel dettaglio come modificare la ricerca.

3.1 Binary search

Lo script iniziale era scritto nella maniera più semplice possibile, nel quale, per ogni riga nel file "misure", veniva effettuato un controllo su ogni riga dell'altra tabella. Questo procedimento di ricerca, per quanto semplice, risulta il più lento in quanto deve effettuare un numero elevatissimo di confronti. Bisognava quindi passare da un algoritmo di ricerca lineare a uno più efficiente.

La soluzione trovata è stata quella di usare un algoritmo di ricerca logaritmico, chiamato binary search. Questo procedimento però è utilizzabile solo se il file in cui si ricerca è ordinato numericamente in ordine crescente. L'algoritmo compara il valore da ricercare con il valore nella posizione intermedia di quelli disponibili e, se non sono uguali, la ricerca continua nella metà che comprende il valore, riprendendo di nuovo il valore intermedio e paragonandolo al valore obiettivo. Si ripete il procedimento finché il valore non viene trovato; se invece la metà rimasta è vuota, il valore obiettivo non è presente nella lista. [6] In Fig.3.1 è riportato un esempio schematico in cui il valore obiettivo è il numero 6.

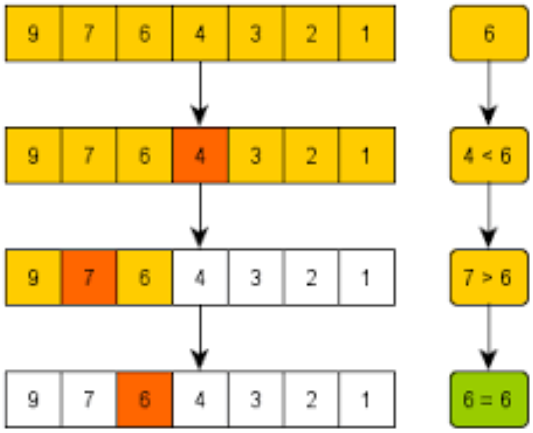

Fig. 3.1, Esempio dell'uso del binary search

Il vantaggio di questo algoritmo è la notevole riduzione delle iterazioni necessarie, infatti ad ognuna si esclude la metà delle possibilità. Nel dettaglio, il numero massimo di iterazioni è $\log_2(n)$ dove 'n' è il numero degli elementi nella lista in cui si ricerca, mentre il numero minimo è ovviamente 1. Invece nell'algoritmo lineare il numero massimo di iterazioni è n e il minimo è 1. [7] È evidente quindi la diminuzione delle iterazioni e quindi del tempo necessario.

In fig. 3.2 è rappresentato il confronto tra le iterazioni necessarie usando l'algoritmo lineare (linea blu) oppure l'algoritmo logaritmico (linea rossa). Si può notare che, anche con un numero elevato di elementi ('n'), la linea rossa indica un numero molto basso di iterazioni.

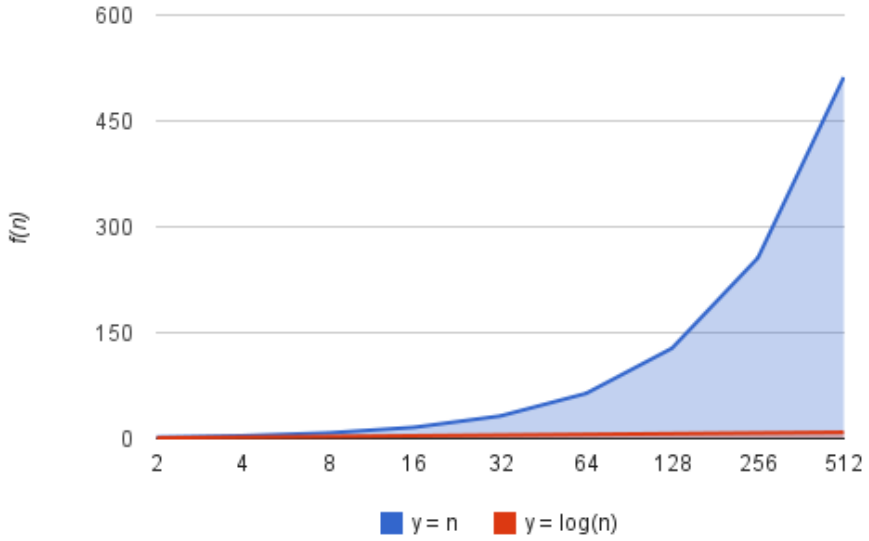

Fig. 3.2, Confronto iterazioni necessarie

Nel mio caso, dove la lista era composta da circa 47 mila elementi, si è passato da 47 mila confronti a 15. Se si considera che il file "misure" era composto da 65 milioni di righe e per ognuna erano necessari questi confronti, la riduzione totale è veramente notevole. Di conseguenza anche il tempo necessario è diminuito da un tempo stimato di 30 gg a 40 minuti. Questa modifica mi ha permesso di ottenere la tabella desiderata e continuare il mio lavoro in tempi accettabili.

La ricerca ha selezionato circa 4 milioni e 400 mila misure, dai 65 milioni iniziali. Queste misure erano suddivise in:

- Segnanti, circa 2 milioni di record;
- Portata, circa 600 mila record;
- Potenza, circa 600 mila record;
- Temperatura di mandata, circa 600 mila record;
- Temperatura di ritorno, circa 600 mila record.

3.2 Dati Utenze

Le misure elencate precedentemente si riferiscono al 28 Febbraio 2018, da mezzanotte alle 23 circa, solamente per quanto riguarda le varie SST. L'obiettivo di questa fase del lavoro è quello di suddividere le misure per baricentro e trovare per ogni grandezza fisica l'andamento giornaliero.

Analizzando i dati, si è notato che questi non erano pronti ad uno studio approfondito, ma era necessaria un ulteriore elaborazione. Infatti, i vari step temporali delle misurazioni raramente erano costanti o uguali tra diverse utenze ed inoltre erano presenti buchi temporali anche di diversi minuti o ore. È stata quindi necessaria un'interpolazione lineare per correggere questi difetti e avere un set di dati uniforme: ora finalmente erano disponibili le misure ogni 5 minuti da mezzanotte alle 23 per ogni utenza. Questa procedura può non rispecchiare fedelmente l'andamento reale, soprattutto per buchi temporali di un'ora o due o per la mancanza di dati costanti nel picco mattutino, ma avendo a che fare con una mole così grande di rilevazioni, era lo strumento più adatto a correggere i dati, vista l'impossibilità di studiare l'andamento per ogni SST nel dettaglio.

Parallelamente, dal file "anagrafica" ho estratto le varie volumetrie per tutte le utenze attive della rete e le ho usate nello step successivo, cioè per raggruppare le misure per ogni baricentro. Il procedimento è stato il seguente:

- Ho controllato quali utenze trasmettevano dati corretti, con valori accettabili e non nulli, e ho sommato la volumetria relativa;
- Ho controllato quali utenze trasmettevano dati nulli o non accettabili, come per esempio portate eccessivamente alte o temperature negative, e ho sommato la volumetria relativa;
- Ho controllato e modificato le varie misure dei diversi contatori per confrontare dati con le stesse unità di misura: m^3/h per la portata, gradi Celsius per le temperature, W per la potenza;
- Ho sommato il totale delle volumetrie dal file "anagrafica".

Non avendo dati per tutte le utenze, per trovare il valore totale per ogni grandezza fisica presa in esame, ho assunto che i consumi variano proporzionalmente alla volumetria:

- Per la potenza e la portata ho fatto una proporzione tra il volume di cui avevo i dati e il volume totale del baricentro. La volumetria relativa ai dati nulli l'ho sommata a quella dei dati a mia disposizione perché quelle utenze potevano essere state spente tutto il giorno;
- Per le temperature ho fatto una media pesata sul volume delle varie temperature delle SST.

Le misurazioni dei segnanti non sono stati presi in esame, ma solo usate per essere sicuro delle unità di misura relative ai contatori di potenza.

3.3 Dati Centrali

Per quanto riguarda le misurazioni delle varie centrali, è stato fornito un file Excel in cui erano presenti le misurazioni ogni 15 minuti di temperatura di ingresso e uscita dalle centrali, portata d'acqua in uscita e potenza prodotta. I dati riguardano le centrali di Moncalieri, Torino Nord e i sistemi di integrazione di Martinetto, Politecnico e BIT.

Anche per questi dati però è stata necessaria un'elaborazione per poterli confrontare con quelli delle utenze. Per prima cosa ho ricavato i dati di portata mancanti con la seguente formula:

$$\Phi = G * Cp * (Tmandata - Tritorno)$$

Dove Φ è la potenza in kW, G la portata in kg/s, Tmandata e Tritorno sono le temperature in uscita e ingresso delle centrali e il Cp è il calore specifico dell'acqua uguale a 4,186 $\frac{Kj}{Kg*K}$. Per ogni centrale ho sommato le potenze fornite di ogni sotto-impianto e avendo le temperature ho potuto trovare le varie portate dei 5 impianti sopra elencati.

Successivamente ho interpolato linearmente i dati per avere gli stessi intervalli temporali di 5 minuti delle utenze.

4. Dati Ottenuti

In questo capitolo si vanno a riassumere i dati e i risultati ottenuti dopo gli step descritti precedentemente.

4.1 Volumetrie

Per fare uno studio accurato è necessario avere una quantità di informazioni sufficienti, quindi per prima cosa ho controllato, per ogni baricentro, di quanta volumetria avessi i dati corretti, dati nulli o anomali, e la volumetria totale. Se la percentuale di volumetria di cui ho rilevazioni utili fosse veramente bassa, questo studio non darebbe risultati attendibili.

In Tab. 4.1 sono riassunte le volumetrie di ogni baricentro. Sono considerate nulle quelle in cui i contatori di portata e potenza segnavano zero: queste misurazioni sono state assunte corrette perché le utenze potrebbero essere state spente durante la giornata presa in esame. Le utenze con dati anomali, per esempio temperature o portate negative, con picchi insensati, con misurazioni ordini di grandezza più alte rispetto alla media, sono state tolte dai dati e considerate come utenze di cui non conosco nulla. Le volumetrie sono espresse in m^3.

sigla	vol dati	vol nulli	vol tot	%	sigla	vol dati	vol nulli	vol tot	%
1	91546	44628	175949	77%	**310**	82474	0	82474	100%
2	1334936	100965	1656905	87%	**311**	126900	0	152550	83%
3	23960	0	23960	100%	**312**	81933	0	81933	100%
4	0	0	29109	0%	**313**	38857	0	38857	100%
5	49798	31991	118592	69%	**314**	8083	0	8083	100%
6	233418	10590	331946	74%	**315**	166994	6700	193428	90%
7	335513	36669	452674	82%	**316**	44598	0	44598	100%
9	167622	80852	354150	70%	**317**	49253	0	49253	100%
10	530039	36187	1372518	41%	**318**	41514	0	41514	100%
11	193969	0	193969	100%	**319**	111415	0	111415	100%
12	790162	6376	1799071	44%	**320**	9359	0	9359	100%
13	485869	45335	630418	84%	**322**	122436	0	122436	100%
14	545125	0	768297	71%	**325**	334542	0	514542	65%
15	105393	0	105393	100%	**326**	14000	0	14000	100%
16	163539	59765	590873	38%	**328**	57589	0	92589	62%
17	146542	10275	177241	88%	**401**	56363	0	71363	79%
19	126755	83106	280825	75%	**402**	114666	16452	163479	80%
20	206283	19203	315403	71%	**403**	90425	0	96378	94%
21	142719	9997	247398	62%	**404**	309382	0	329566	94%
22	120996	0	305767	40%	**406**	953419	5200	1092070	88%
23	121851	23730	169328	86%	**407**	135087	0	146617	92%
24	252878	7552	437586	60%	**408**	423665	0	451444	94%
25	244793	44412	459711	63%	**410**	614278	245536	962149	89%
26	445400	93173	913430	59%	**411**	255048	0	485576	53%

sigla	vol dati	vol nulli	vol tot	%	sigla	vol dati	vol nulli	vol tot	%
27	425224	8431	808147	54%	**412**	628673	0	695043	90%
28	720378	14506	1245051	59%	**413**	678982	31971	919789	77%
29	349760	11256	572343	63%	**414**	539489	0	643220	84%
30	333068	9748	636094	54%	**415**	212000	0	212000	100%
31	204044	0	548412	37%	**418**	1215316	342000	1695863	92%
33	736028	85901	1295137	63%	**419**	343815	36360	395928	96%
34	353254	10755	545429	67%	**420**	106558	0	129917	82%
35	258651	10384	925042	29%	**421**	643817	0	708798	91%
36	238662	18089	514435	50%	**422**	342953	0	397747	86%
37	170106	0	231007	74%	**423**	55800	0	69267	81%
38	447675	61591	734034	69%	**424**	389698	0	421899	92%
40	104356	15327	135557	88%	**425**	152932	0	184776	83%
41	17804	0	31141	57%	**426**	223508	5625	280294	82%
54	151160	56590	440074	47%	**427**	49504	0	49504	100%
55	595008	41215	1013723	63%	**429**	464536	100150	996315	57%
56	355278	31674	597649	65%	**430**	265321	0	358106	74%
57	169484	0	330426	51%	**431**	70316	0	70316	100%
58	249756	21737	390611	70%	**432**	1298335	0	1370521	95%
61	35006	0	35006	100%	**433**	256142	6900	276518	95%
62	15000	0	15000	100%	**440**	1328869	30230	1633591	83%
63	683323	0	753989	91%	**441**	505722	0	621882	81%
65	25500	14300	54800	73%	**442**	619032	48685	726763	92%
67	209097	2199	250216	84%	**443**	540277	10878	609355	90%
68	99001	6115	163252	64%	**445**	447262	10080	530510	86%
70	400442	12818	680060	61%	**447**	354600	0	404358	88%
71	21771	18135	39906	100%	**450**	565628	6296	608154	94%
72	149540	5768	223684	69%	**455**	88511	0	88511	100%
73	50636	0	52415	97%	**456**	51672	0	51672	100%
74	171995	0	211885	81%	**457**	87629	0	87629	100%
75	185607	0	196141	95%	**458**	55883	0	55883	100%
76	86663	7897	151729	62%	**461**	139667	0	160877	87%
77	56307	0	97633	58%	**462**	433622	0	445934	97%
78	181382	0	248623	73%	**463**	244389	0	258089	95%
79	319390	17601	524157	64%	**464**	293665	0	295865	99%
81	55438	0	187169	30%	**465**	219366	0	237839	92%
82	27914	0	27914	100%	**467**	486493	0	500071	97%
90	21100	0	21100	100%	**468**	495345	2290	597831	83%
92	0	0	178800	0%	**469**	342429	0	392542	87%
93	100000	0	100000	100%	**470**	180130	0	213422	84%
95	133000	0	133000	100%	**480**	257580	0	263180	98%
97	43682	0	43682	100%	**485**	97388	0	97388	100%
101	705312	0	1027108	69%	**490**	171792	0	171792	100%
102	534650	75510	791310	77%	**491**	295870	0	314877	94%
103	30560	0	124792	24%	**492**	232891	0	282157	83%
104	0	0	93826	0%	**493**	226756	0	236722	96%
105	0	0	249825	0%	**494**	63185	0	66928	94%
261	7240	0	163611	4%	**495**	248614	0	248614	100%
263	21193	0	248178	9%	**496**	162760	0	162760	100%

sigla	vol dati	vol nulli	vol tot	%	sigla	vol dati	vol nulli	vol tot	%
264	8934	0	116200	8%	**501**	441303	0	450600	98%
265	13047	0	283350	5%	**502**	13803	0	13803	100%
266	0	0	7350	0%	**505**	46082	0	52015	89%
291	709566	69582	1520874	51%	**507**	64711	0	64711	100%
292	616274	0	787090	78%	**508**	354869	0	391012	91%
294	12000	0	312000	4%	**510**	0	0	70000	0%
301	63738	0	88838	72%	**512**	72710	1400	77237	96%
302	56572	0	56572	100%	**10B**	143324	650	143974	100%
303	27996	0	27996	100%	**15B**	797467	0	797467	100%
304	9637	0	9637	100%	**17B**	352448	37636	495862	79%
305	0	0	25145	0%	**29B**	207796	14860	360626	62%
306	103136	9000	112136	100%	**6A**	26401	0	26401	100%
308	15070	0	32070	47%	**6B**	1856	0	1856	100%
309	74076	0	93227	79%					

Tab. 4.1, Elenco volumetrie baricentri

Come si può notare dalla Tab. 4.1, non per tutti i baricentri sono stati forniti la stessa quantità di dati in percentuale. Per alcuni abbiamo informazioni sul 100% della volumetria, quindi lo studio di questi risulterà preciso, senza dover ricorrere ad approssimazioni. Ci sono però anche casi diametralmente opposti, dove la percentuale è inferiore al 10%: in prima approssimazione si è considerata valida la proporzione descritta nel capitolo precedente, qualora ci fossero dei problemi successivamente nel conto delle portate e delle potenze saranno i primi baricentri su cui si andrà a studiare nel dettaglio e intervenire. Dove invece non ho nessun dato si è stimato un comportamento simile ad altri baricentri con volumetrie simili. Anche questi saranno oggetto di intervento nel caso ci siano problemi successivi.

Per riassumere in Tab. 4.2 sono riportate la somma delle varie volumetrie.

volume dati [m^3]	volume nulli [m^3]	volume tot [m^3]	% dati
42759369	**2340834**	**62008375**	**73%**

Tab. 4.2, Somma volumetrie

La percentuale delle volumetrie di cui ho dati è il 73%. Lo studio quindi, seppur con alcune approssimazioni, si può considerare attendibile. I risultati finali verranno commentati tenendo conto delle approssimazioni che si sono rivelate necessarie.

4.2 Utenza singola

Nell'analisi dei risultati ottenuti, si vuole partire dal comportamento della singola utenza. Come descritto precedentemente, per quasi tutte le SST non avevo a disposizione dati precisi, ma è stata necessaria un'elaborazione e soprattutto un'interpolazione lineare per avere misurazioni agli stessi istanti temporali per tutte le utenze e sopperire ai vari buchi temporali.

Per analizzare il comportamento della singola utenza ne verrà presa come esempio una del baricentro 412: si tratta di un palazzo abitativo nel centro di Torino con una volumetria di 2463 m^3. È stata scelta perché rappresenta un caso tipico di utenza privata, con una volumetria abbastanza ridotta, e fornisce dati precisi, senza buchi temporali, con step temporali di circa 5-6 minuti.

Nel dettaglio andremo ora a studiare l'andamento giornaliero di portata, potenza, temperatura di mandata e ritorno.

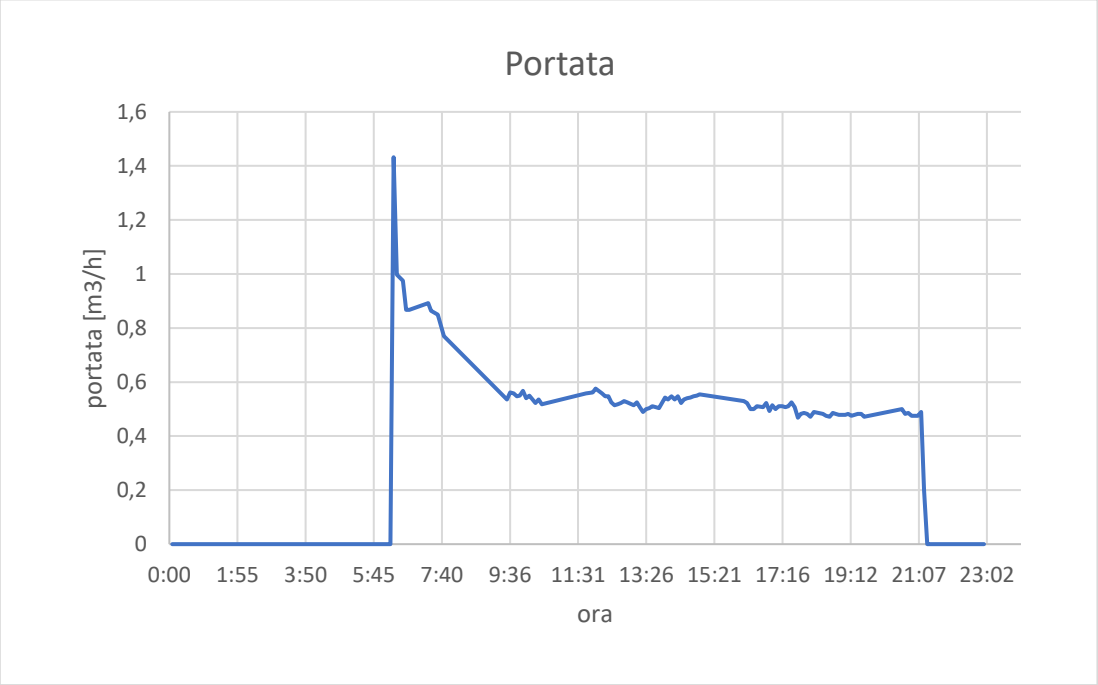

Fig. 4.1 Andamento portata per l'utenza del BCT_412

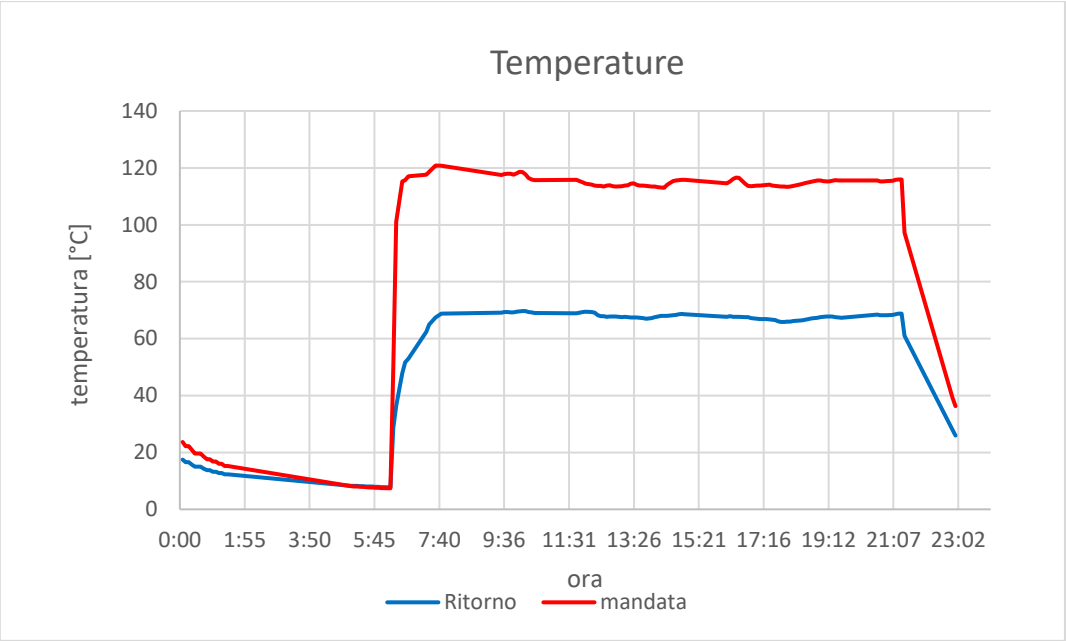

Fig. 4.2, Andamento temperature per l'utenza del BCT_412

Per prima cosa si analizza come variano la portata e le temperature di mandata e ritorno durante la giornata. Di notte il sistema è spento per cui la portata in ingresso alla SST è nulla. Le temperature, sia di mandata sia di ritorno, scendono per via delle alte perdite termiche dovute a una circolazione nei tubi assente o comunque vicina allo zero; si raggiungono circa i 10°C, cioè la temperatura media del terreno in cui sono poste le tubature. In questa fase la differenza tra le temperature si annulla perché il sistema è spento e non si sviluppa potenza.

Alle 6.30 circa del mattino il sistema si accende e si ha il picco di richiesta giornaliero. In questo istante la portata richiesta è massima perché il sistema deve aumentare le temperature nelle tubazioni dopo l'inattività notturna. Dopo il momento iniziale, la portata cala gradualmente fino ad arrivare, verso le 9, ad un valore stabile di circa un terzo del valore massimo. La temperatura di mandata raggiunge immediatamente i 120 °C circa; quella di ritorno, invece, cresce gradualmente durante il picco mattutino dai 40 °C ai 70°C, non raggiungendo subito il valore massimo, poiché il suo andamento è legato a quello della portata: quando quest'ultima è alta, lo scambio termico è maggiore, e di conseguenza anche il delta tra le temperature, ma essendo fissata la temperatura di mandata sui 120 °C, quella che varia nel tempo è quella di ritorno. In altre parole, quanto la portata è più alta, più la temperatura di ritorno è inferiore e viceversa.

Finito il picco mattutino, sia la portata d'acqua sia le due temperature raggiungono un livello quasi stazionario che dura per tutta la giornata, fino allo spegnimento del sistema alle 22. A quest'ora la portata ritorna nulla e di conseguenza le temperature iniziano a scendere.

Fig. 4.3, Andamento potenza per l'utenza del BCT_412

In Fig. 4.3, è riportato l'andamento giornaliero della potenza. Si può notare una notevole somiglianza tra il grafico della potenza e quello di portata in Fig. 4.1. Queste due grandezze sono legate tra loro, infatti serve una portata di grandi dimensioni per sviluppare una potenza elevata. L'unica differenza nell'andamento si nota durante il picco mattutino dove il picco di potenza è più dilatato rispetto a quello di portata: questo perché la potenza dipende anche dalla temperatura di ritorno, infatti si sviluppa una potenza elevata anche con portata inferiore ma con un delta di temperature più elevato, quindi una temperatura di uscita inferiore. Le tre grandezze fisiche sono quindi legate tutte tra di loro come si può notare dai grafici.

Quello appena descritto è il comportamento tipico delle utenze. Non tutte però seguono questo andamento: ci sono utenze attive tutte le 24 ore con un profilo irregolare, per esempio palazzi pubblici di grandi dimensioni, altre con una richiesta costante, altre invece attive 24 ore che presentano un picco mattutino notevole inferiore alla media.

In Fig.4.4 è rappresentato il profilo di portata di una grande utenza del baricentro 15B: si tratta di un grande edificio che opera in ambito sanitario. Questo è un esempio di profilo irregolare, indipendente dall'orario e che non presenta un picco mattutino.

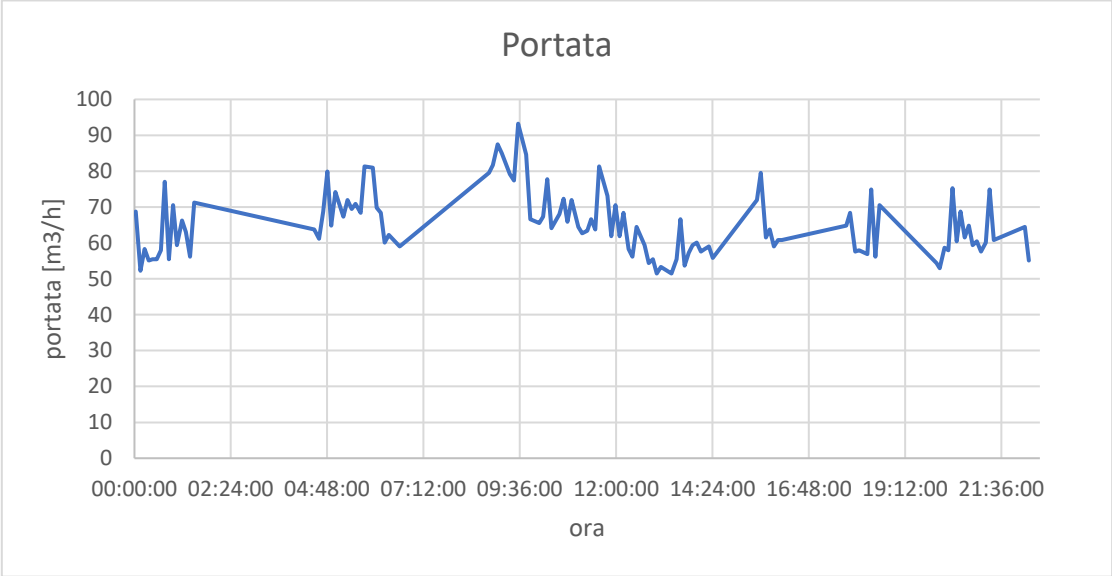

Fig. 4.4, Andamento portata per la grande utenza del BCT_15B

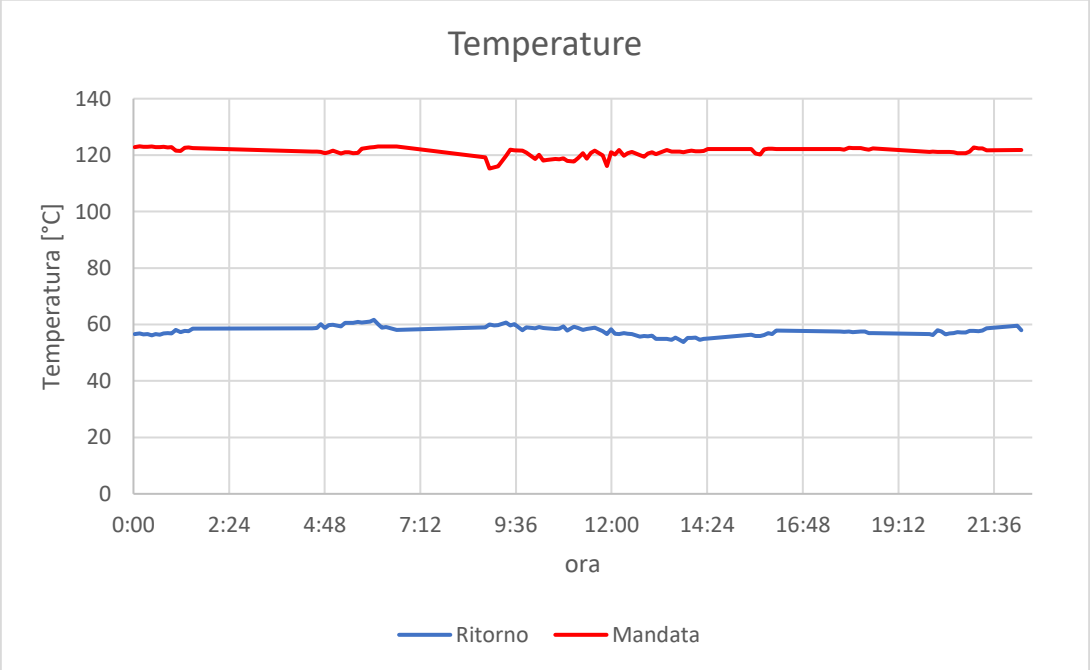

Fig. 4.5, Andamento temperature per la grande utenza del BCT_15B

In Fig. 4.5 sono riportate le temperature di mandata e ritorno dell'utenza. La portata pressoché costante provoca un delta tra le due temperature invariato lungo tutta la giornata. Nelle SST con questo andamento le temperature non calano nelle ore notturne ma restano costanti.

4.3 Baricentri

Proseguendo l'analisi dei risultati ottenuti, si passa ai baricentri. I baricentri sono i punti fisici dove le reti di distribuzione si staccano dalla rete di trasporto principale e a cui si allaccia una significativa volumetria d'utenza. Convenzionalmente, quando si parla di baricentro si intendono tutte le utenze raggiunte dalla stessa rete di distribuzione. Nella rete di Torino ne sono attivi 171, le cui informazioni sono riassunte in Tab. 4.1. Nel mio studio rappresentano l'unità fondamentale, in quanto tutti i ragionamenti che seguiranno saranno basati sui loro dati e non sulle singole utenze; inoltre, nel modello fluidodinamico, si vuole analizzare esclusivamente il comportamento della rete di trasporto inserendo come input le informazioni dei baricentri.

Le grandezze riportate successivamente si riferiscono alla rete di distribuzione corrispondente al baricentro. Sono necessarie le seguenti precisazioni:

- la portata è il volume d'acqua che il baricentro assorbe dalla rete di trasporto e che circola nelle tubazioni della rete di distribuzione;
- la temperatura di mandata nella rete di trasporto è fissa a 120°C, mentre nella rete di distribuzione ci possono essere perdite dovute a una portata ridotta, specialmente nelle ore notturne;
- la temperatura di ritorno si riferisce alla temperatura alla quale la portata d'acqua viene immessa nelle tubazioni di ritorno della rete di trasporto;
- la potenza è la somma delle potenze scambiate nelle varie SST del baricentro.

Si vuole analizzarne ora il comportamento a confronto della singola utenza che li compone.

Come primo esempio prendo il baricentro 412 di cui ho analizzato in precedenza l'utenza. In questo baricentro sono allacciati 695043 m^3 di volumetria, di cui ho dati per 628673 m^3 e 0 m^3 di dati nulli, che rappresentano il 90% del totale.

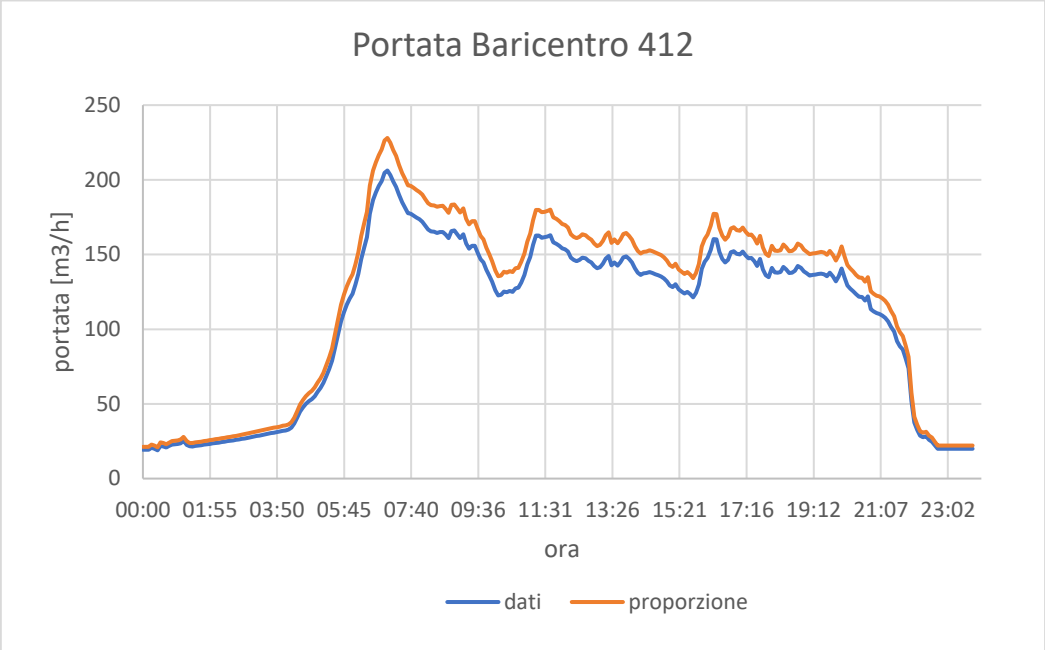

Fig. 4.6, Andamento di portata per il baricentro 412

Per prima cosa, in Fig.4.6, analizzo l'andamento della portata lungo la giornata. La linea blu rappresenta le misurazioni a mia disposizione, mentre la linea arancione è la proporzione sul volume totale come spiegato precedentemente nel capitolo 2.

L'andamento è simile a quello dell'utenza singola ma con alcune sostanziali differenze. Di notte la portata è molto bassa, ma non è nulla; questo perché non tutte le utenze sono spente, ma qualcuna, come per esempio ospedali, caserme e piscine, è sempre attiva. La richiesta in queste ore è comunque molto più bassa rispetto alla domanda stazionaria pomeridiana.

Successivamente, verso le 6:30 abbiamo il picco di richiesta mattutino. Questo non è istantaneo come quello dell'utenza singola, ma dilatato nel tempo, con una crescita graduale della portata dovuta al fatto che le utenze non si accendono tutte nello stesso momento. In minima parte, la dilatazione è anche frutto dell'interpolazione lineare che si è resa necessaria per trattare le misurazioni fornite. La richiesta di portata così cresce, fino ad arrivare al suo valore massimo, quando tutte le utenze sono attive, e poi decresce sino a stabilizzarsi. I pochi minuti in cui la richiesta è massima rappresentano il momento critico per tutta la rete; le tubazioni devono trasportare una grande quantità d'acqua e sono sottoposte al massimo sforzo. Lo studio del picco è fondamentale per dimensionare i tubi della rete di trasporto e di distribuzione sia in fase

di progetto, sia nel caso si vogliano allacciare nuove utenze. In seguito, verrà analizzato nel dettaglio come reagisce la rete di trasporto a questo massimo sforzo.

Nel resto della giornata, a differenza della SST presa in esame precedentemente, non abbiamo una richiesta stazionaria, ma sono presenti orari in cui abbiamo una diminuzione di richiesta, per esempio in tarda mattinata o dopo l'ora di pranzo. Questi cali sono però di lieve entità e legati ad alcuni spegnimenti temporanei di alcune SST.

Verso le 22, le utenze si spengono e il profilo diminuisce fino ad arrivare alla domanda minima notturna. Anche in questo caso abbiamo un calo graduale e non un crollo verticale per gli stessi motivi descritti precedentemente.

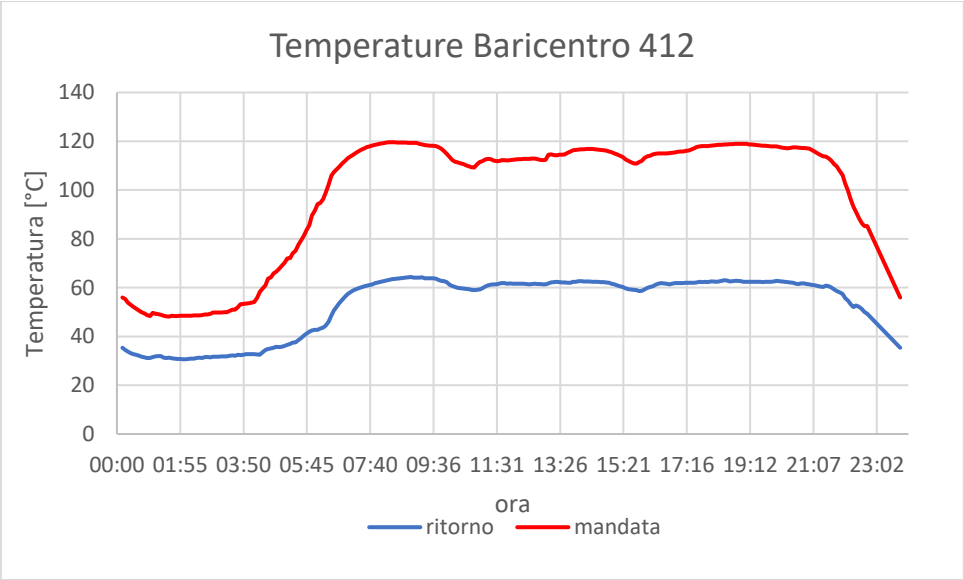

Fig. 4.7, Andamento delle temperature per il baricentro 412

Si passa ora ad analizzare il comportamento delle temperature di mandata e ritorno. Anche queste, ovviamente, hanno un comportamento simile a quello di ogni singola SST.

Nelle ore notturne le due temperature diminuiscono per via delle alte perdite termiche dovute a una bassissima circolazione d'acqua, ma a differenza di Fig. 4.2 non sono uguali tra loro: la portata, seppur bassa, produce una potenza e di conseguenza anche una differenza tra le due temperature. Inoltre, queste sono più alte del caso singolo e non raggiungono mai i 10 °C: le poche utenze attive anche in queste ore fanno circolare l'acqua e aumentano la temperatura media nelle tubazioni.

Nelle ore successive, in contemporanea all'aumento di portata richiesta, le due temperature aumentano gradualmente e raggiungono i 120 °C per la temperatura di mandata e circa 60°C

per il ritorno. Questa crescita graduale e non istantanea è dovuta al fatto che le varie SST iniziano a scambiare potenza in momenti diversi e treni d'acqua più caldi si mischiano ad altri più freddi, fino a quando tutte le utenze non diventano attive, dopodiché le temperature si stabilizzano. Durante la giornata ci sono piccole variazioni di qualche grado, ma nel nostro studio di possono considerare costanti.

Nelle ore serali, allo spegnimento delle utenze e alla conseguente diminuzione di portata, le temperature diminuiscono gradualmente per ritornare ai valori di partenza.

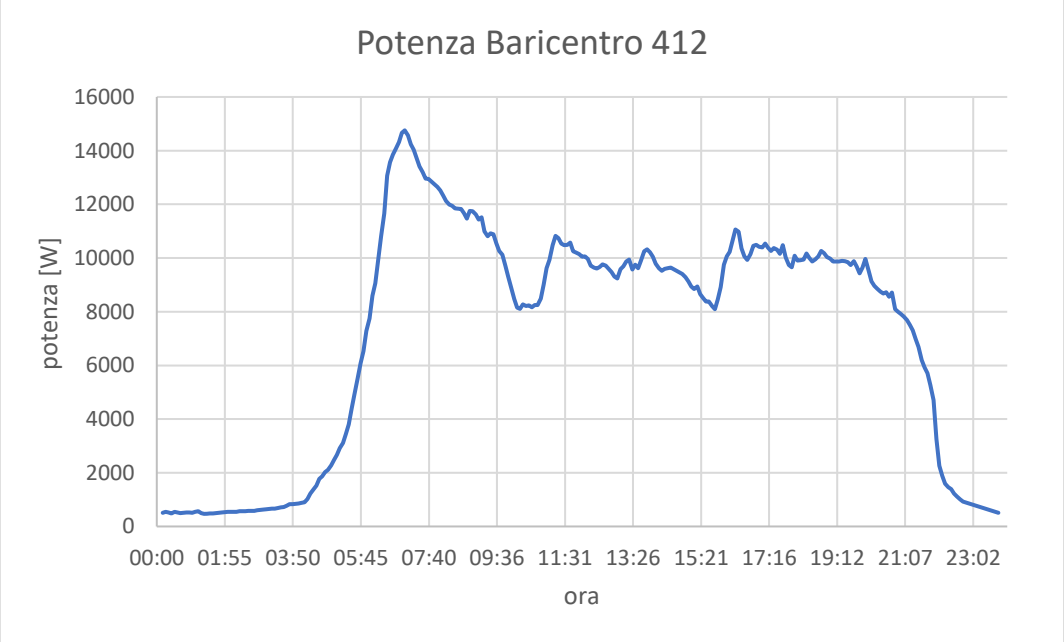

Fig. 4.8, Andamento della potenza per il baricentro 412

Si analizza, infine, come varia la potenza scambiata dalle utenze durante la giornata. La potenza e la portata sono dipendenti tra loro, infatti i due profili giornalieri sono molto simili. Per questo motivo le osservazioni fatte precedentemente per la portata valgono anche in questo caso. La differenza più evidente è che in questo caso il picco mattutino è più pronunciato; ciò è causato dal contemporaneo scarto massimo tra le temperature di mandata e ritorno. Analogamente, nelle ore notturne la potenza è molto bassa perché il delta tra le due temperature è minimo.

Il comportamento del baricentro sopra citato può essere preso come standard, infatti quasi tutti seguono questo andamento per tutte le grandezze fisiche studiate. Fanno eccezioni baricentri di piccole dimensioni, dove sono più possibili casi particolari, oppure quelli dove sono presenti edifici di grandissime dimensioni, la cui richiesta prevale sulle altre utenze.

Di seguito verranno riportati alcuni esempi di profili di portata e temperature di altri baricentri. Il primo riguarda il baricentro 33, con una volumetria di 1295137 m^3, di cui 736028 m^3 di dati noti e 85901 m^3 nulli, per il 63% del totale.

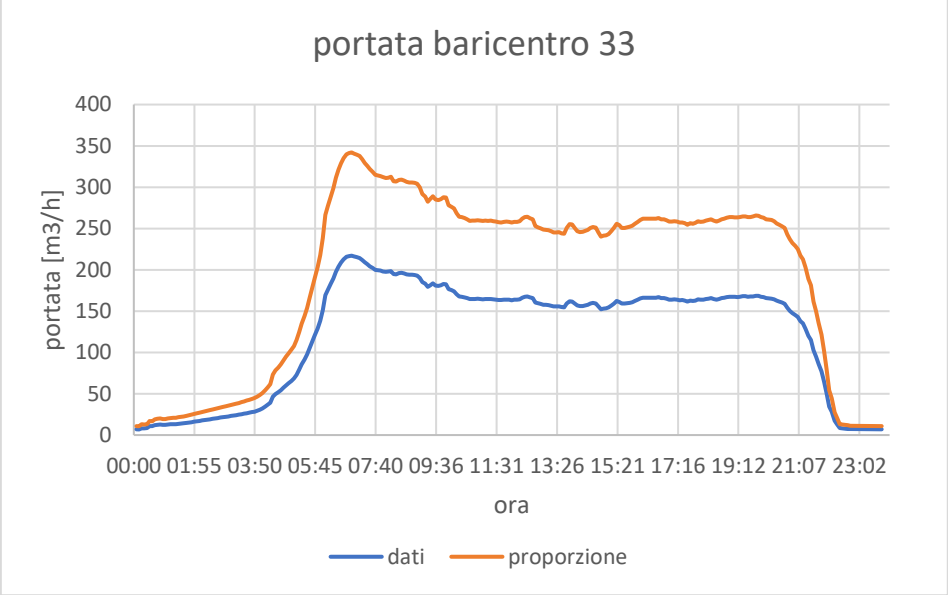

Fig. 4.9, Andamento portata baricentro 33

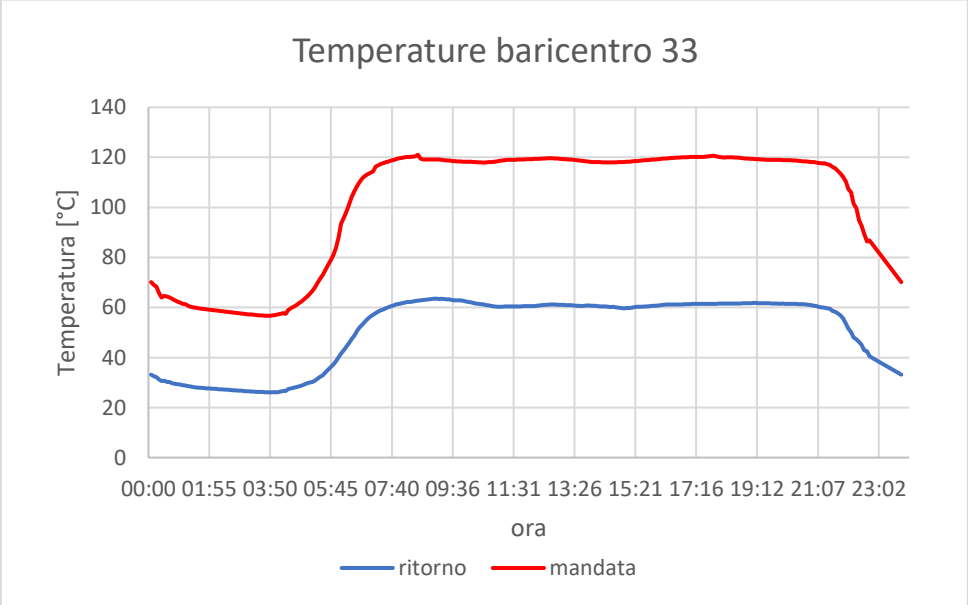

Fig. 4.10, Andamento temperature baricentro 33

Un altro esempio è il baricentro 55, con una volumetria di 1013723 m^3, di cui 595008 m^3 di dati noti e 41215 m^3 nulli, per il 63% del totale.

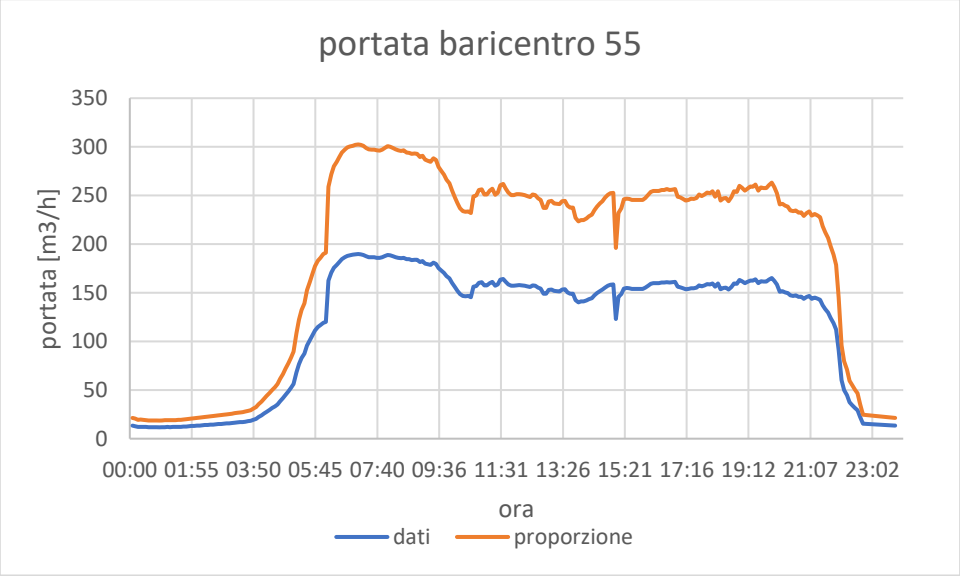

Fig. 4.11, Andamento portata baricentro 55

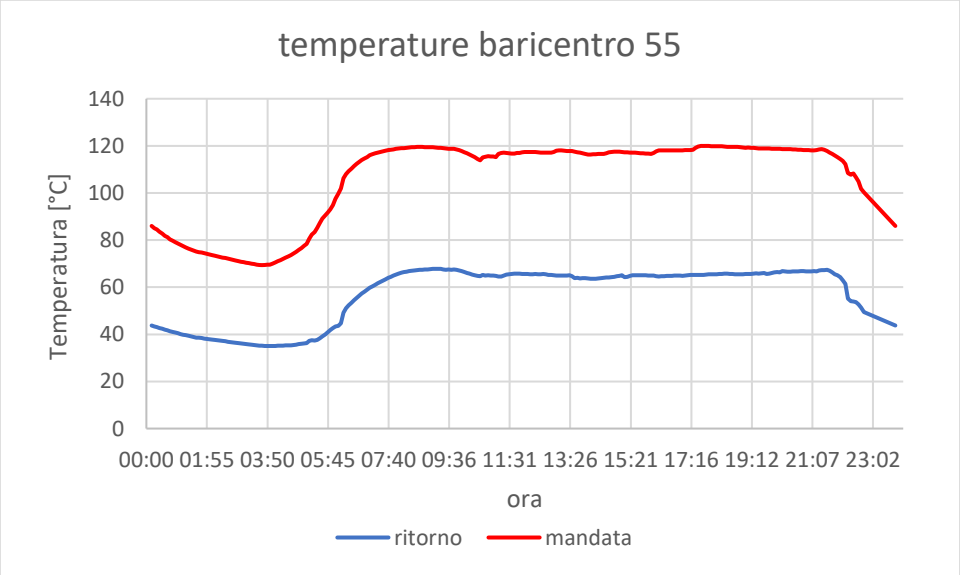

Fig. 4.12, Andamento temperature baricentro 55

Come si può notare, questi due baricentri hanno un profilo simile a quello esaminato in precedenza, le uniche differenze si possono vedere nella forma e durata del picco mattutino che può essere più o meno dilatato o pronunciato in base all'orario di accensione e alla tipologia delle varie utenze.

L’ultimo esempio è il baricentro 15B, con una volumetria di 797467 m^3, di cui mi sono state fornite le misurazioni per tutta la volumetria; il baricentro rappresenta un’eccezione, infatti il 90% della volumetria è formata dalla grande utenza esaminata in precedenza, che domina la richiesta globale.

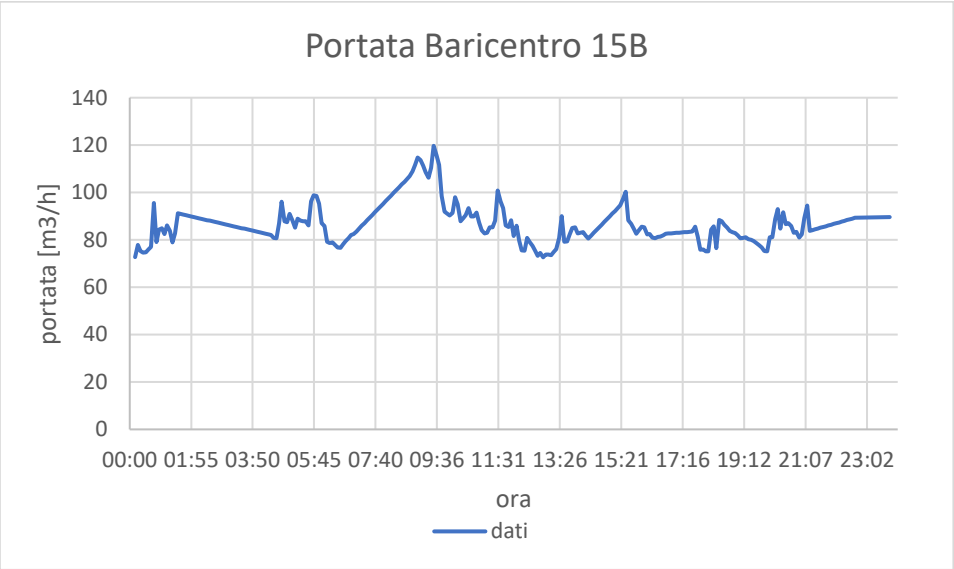

Fig. 4.13, Andamento portata baricentro 15B

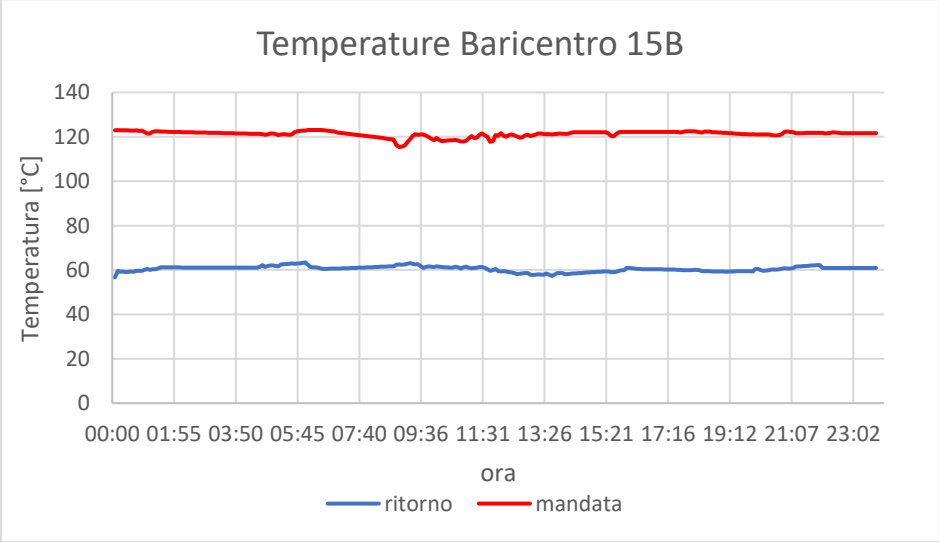

Fig. 4.14, Andamento temperature baricentro 15B

L’andamento della portata è irregolare ed elevato in tutte le ore della giornata. La somiglianza tra la Fig. 4.13 e la Fig. 4.4 dimostra che la richiesta totale dipende fortemente da quella dell’ospedale, come era facilmente prevedibile. Le temperature restano praticamente costanti in tutta la giornata poiché non sono presenti periodi in cui ci sono variazioni importanti di portata. Di conseguenza la potenza scambiata segue l’andamento della portata, essendo il delta delle temperature costante.

4.4 Centrali

Si analizza ora come le centrali della città di Torino soddisfino la richiesta della rete. Le centrali producono acqua o vapore surriscaldato ad una temperatura di circa 120 °C, con piccole variazioni di qualche grado, e la ricevono, dopo l'uso delle utenze, a circa 65-70 °C. La produzione è divisa tra impianti di cogenerazione, caldaie ed accumuli: i primi sono sempre attivi, mentre caldaie e accumuli intervengono solo nei momenti di necessità. Quest'ultimi si ricaricano nei momenti dove la produzione supera la richiesta, specialmente nelle ore serali e notturne.

Per primo verrà analizzato l'andamento della portata prodotta dai vari impianti, successivamente si osserverà come la potenza erogata viene divisa dai vari sotto-impianti.

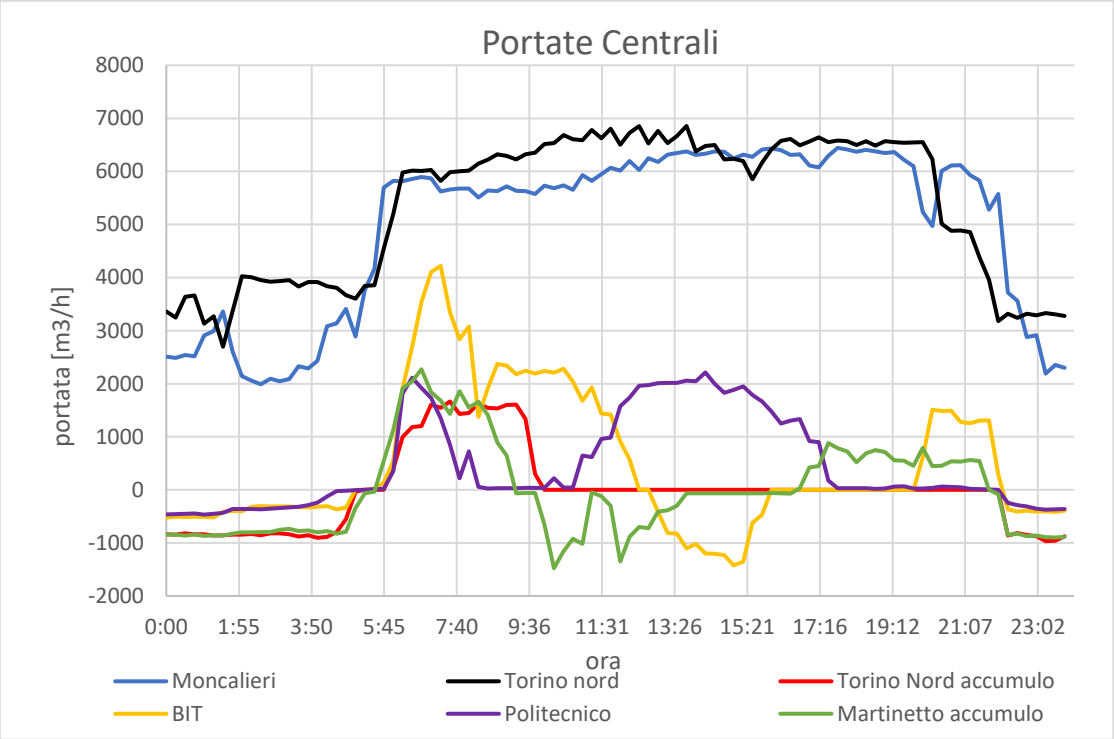

Fig. 4.15, Andamento portate centrali

In Fig. 4.15 è riportata la portata complessiva prodotta da ogni impianto:

- per le centrali del BIT e del Politecnico si sommano il contributo delle caldaie e degli accumuli;
- la centrale di Torino Nord comprende cogenerazione e caldaie, mentre è calcolata separatamente la produzione dell'accumulo (Torino Nord accumulo);
- per Moncalieri si sommano i due gruppi di cogenerazione e le caldaie;
- il Martinetto agisce solamente come accumulo.

Nelle prime ore della giornata, la produzione delle centrali principali è ridotta, perché, come descritto precedentemente, la richiesta della rete è minima. Le portate degli altri impianti sono negative, ciò significa che gli accumuli si stanno ricaricando e assorbono la portata prodotta in eccesso: questa soluzione permette di ottimizzare l'uso delle risorse, infatti sfrutta la produzione eccessiva in orari dove lo sforzo degli impianti principali è minimo, per poterla usare quando questi non riescono a sopperire ai picchi di domanda, cercando di minimizzare l'uso delle caldaie di integrazione.

Nelle prime ore del mattino si nota un aumento quasi istantaneo della produzione delle due centrali e la contemporanea accensione degli altri impianti: questo è il momento critico per la rete, in cui vi è la massima circolazione, infatti in questa fase le centrali devono soddisfare il picco di richiesta analizzato precedentemente dei baricentri. Le centrali principali raddoppiano la portata emessa rispetto alle ore precedenti e gli accumuli scaricano la potenza assorbita.

Nel corso della giornata, Moncalieri e Torino Nord hanno una produzione totale quasi stazionaria; le variazioni di richiesta sono gestite dagli altri impianti minori, i quali hanno ognuno il proprio profilo distinto:

- l'accumulo di Torino Nord è spento per tutto il resto della giornata e ricomincia a caricarsi solo in tarda serata;
- l'impianto del BIT è il più importante degli impianti ausiliari: produce infatti la portata più alta sia durante il picco, sia nel resto della mattinata. Nel pomeriggio l'accumulo si ricarica, infatti la portata è negativa. Ad inizio serata si riaccende fino a all'ora di spegnimento delle utenze;
- l'accumulo del Martinetto ha portata negativa subito dopo il picco e per diverse ore assorbe potenza, che scarica poi di nuovo nel tardo pomeriggio;
- l'impianto del Politecnico, dopo un paio d'ore di inattività successive al picco, ricomincia a produrre una significativa quantità d'acqua per molte ore fino a spegnersi nel tardo pomeriggio.

Nelle ultime ore del giorno, le centrali calano drasticamente la portata prodotta, fino ad arrivare al valore di partenza e gli accumuli tornano a funzionare in modalità di ricarica.

Si può quindi notare che la portata di base è soddisfatta dalle due centrali, mentre, durante il giorno, si attivano in momenti differenti i vari impianti di integrazione; le uniche ore in cui funzionano tutti insieme sono le prime ore del giorno all'accensione di tutte le SST.

4.4.1 Curva di carico

Si è costruita ora la curva di carico suddivisa nei vari sotto-impianti.

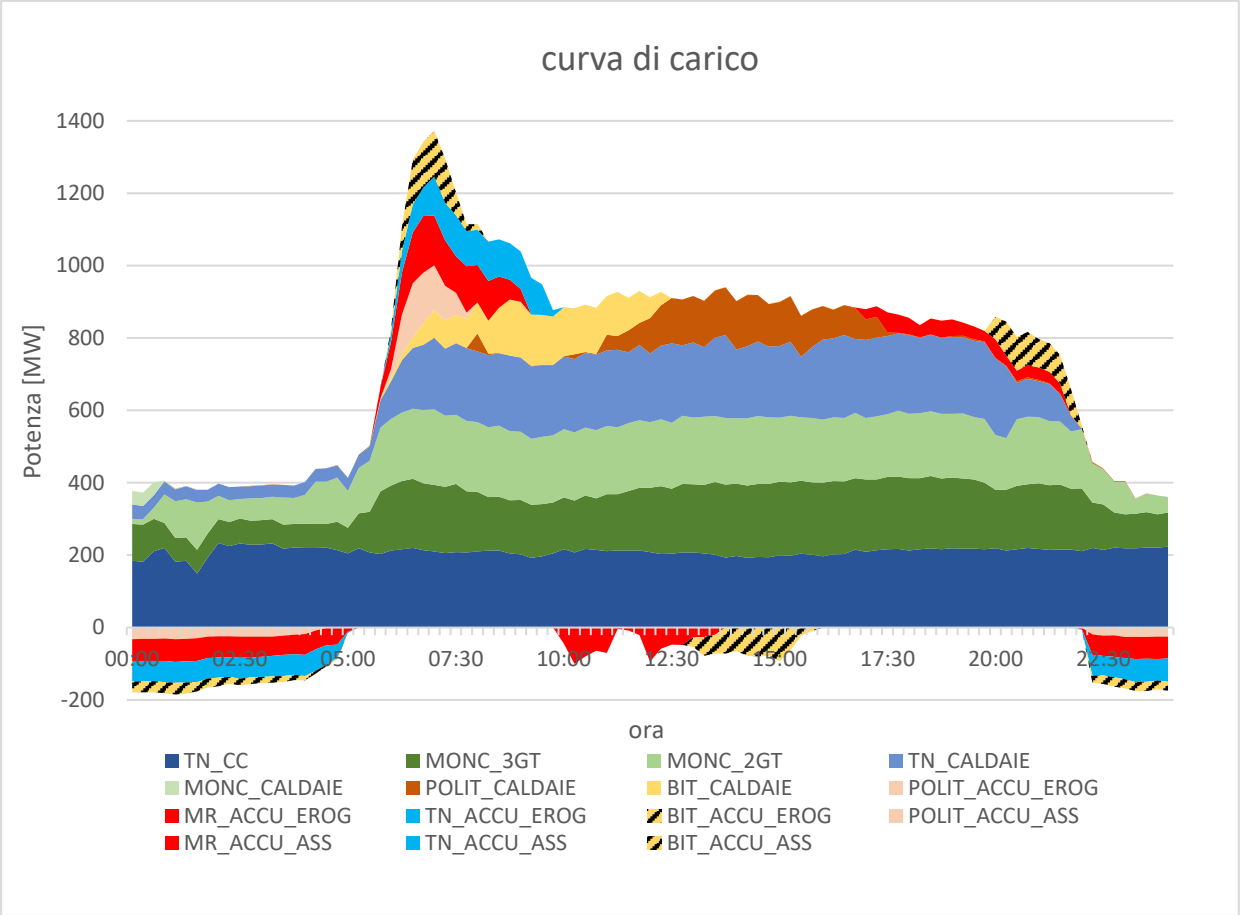

Fig. 4.16, Curva di carico

Come descritto precedentemente, la domanda di base viene soddisfatta dalle due centrali cogenerative, successivamente entrano in funzione gli accumuli e infine, come ultima alternativa, le caldaie. Per quest'ultime si cerca, infatti, di limitare l'utilizzo al minimo indispensabile perché rappresentano il modo più inquinante e costoso per produrre energia. Durante le ore notturne, la domanda è soddisfatta interamente dai gruppi di cogenerazione, i quali consentono anche di ricaricare gli accumuli. Nel corso della giornata, invece, non è più sufficiente ed è necessario l'ausilio degli accumuli e delle caldaie. In particolare, durante il picco mattutino, tutti gli impianti sono attivi ed è evidente come le varie potenze si sommino l'una con l'altra.

Nel dettaglio ora si analizza la suddivisione negli impianti. Il primo strato riporta la potenza sviluppata dalla centrale cogenerativa di Torino Nord; è sempre attiva ad un livello costante per tutta la giornata. Successivamente sono raffigurati i due gruppi cogenerativi di Moncalieri; anche questi sono attivi per tutte le 24 ore, ma la potenza emessa non è costante. Infatti, nelle ore notturna è ridotta, mentre durante la giornata sono a pieno carico.

Gli strati successivi riportano l'erogazione delle caldaie di integrazione. Le più utilizzate sono quelle della centrale di Torino Nord: sono attive per tutte le 24 ore, in cui dal picco mattutino fino a tarda serata allo spegnimento delle utenze, hanno una produzione elevata e costante, mentre nel periodo notturno è minima. Le altre sono le caldaie del BIT, che producono nelle prime ore mattutine di elevata richiesta fino a circa mezzogiorno, e le caldaie del Politecnico che invece sono attive nel pomeriggio.

La parte restante della domanda è coperta con gli accumuli. Tutti e quattro intervengono contemporaneamente durante il picco mattutino, dopo essersi ricaricati durante la nottata. Gli accumuli del BIT e Martinetto erogano anche, seppur in minor parte, nel tardo pomeriggio e inizio serata. Si può quindi notare che l'uso degli accumuli si limita, quasi esclusivamente, a soddisfare la grande richiesta mattutina.

La rete di Torino riesce a soddisfare la richiesta, anche nella giornata più fredda della stagione invernale, prevalentemente con cogenerazione e accumuli. L'uso di caldaie è comunque necessario vista la grande domanda di energia. In seguito, si andrà ad analizzare nel dettaglio come viene suddivisa la potenza generata.

4.4.2 Suddivisione potenza

In Fig. 4.16 è riportata la suddivisione in percentuale della potenza generata.

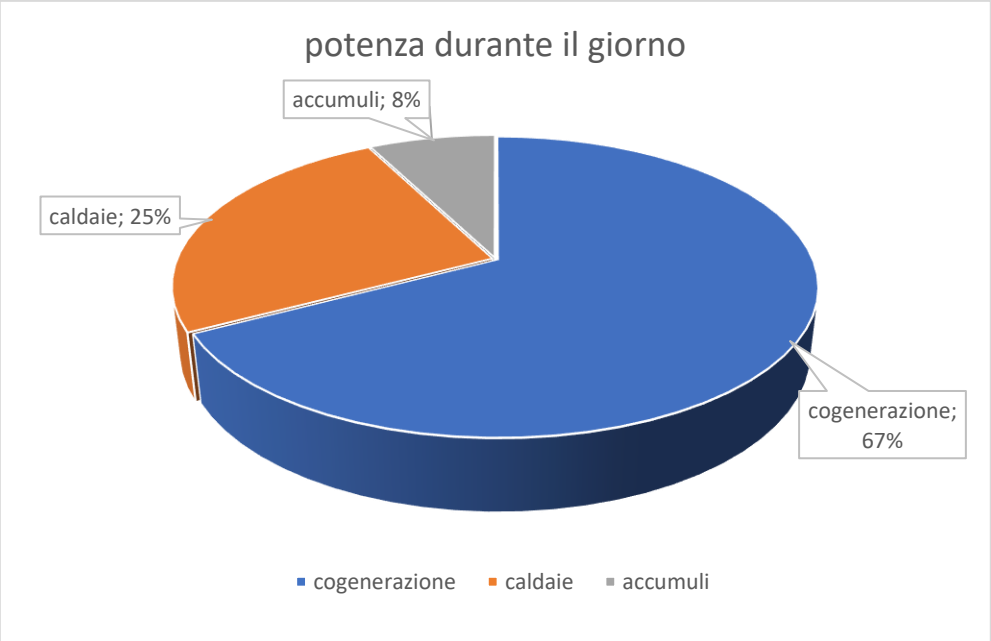

Fig. 4.17, Suddivisione potenza

Nel corso della giornata, la cogenerazione rappresenta la principale fonte di energia e unita agli accumuli soddisfano il 75% della domanda. Questo indica che la rete è abbastanza ottimizzata, in quanto l'uso delle caldaie si limita, nel caso peggiore annuale che sto analizzando, ad un quarto della produzione: si può dedurre quindi che, durante l'anno, ci siano periodi in cui le caldaie non entrano in funzione e la richiesta è soddisfatta interamente dai gruppi cogenerativi e dagli accumuli.

Dalla Fig. 4.17, si potrebbe pensare che questi ultimi ricoprono un ruolo minimo nella produzione di energia, infatti forniscono solo l'8% della potenza totale nell'arco della giornata; la loro presenza è invece molto utile nelle dinamiche della rete per sfruttare a pieno la cogenerazione, recuperando energia non usata durante i periodi con meno richiesta, e per poi soddisfare il picco mattutino quando le due centrali principali non bastano. Così facendo, la produzione viene spostata in orari dove costa meno e sfruttata nei momenti di più necessità.

Si osserva ora come è suddivisa la potenza prodotta durante il picco.

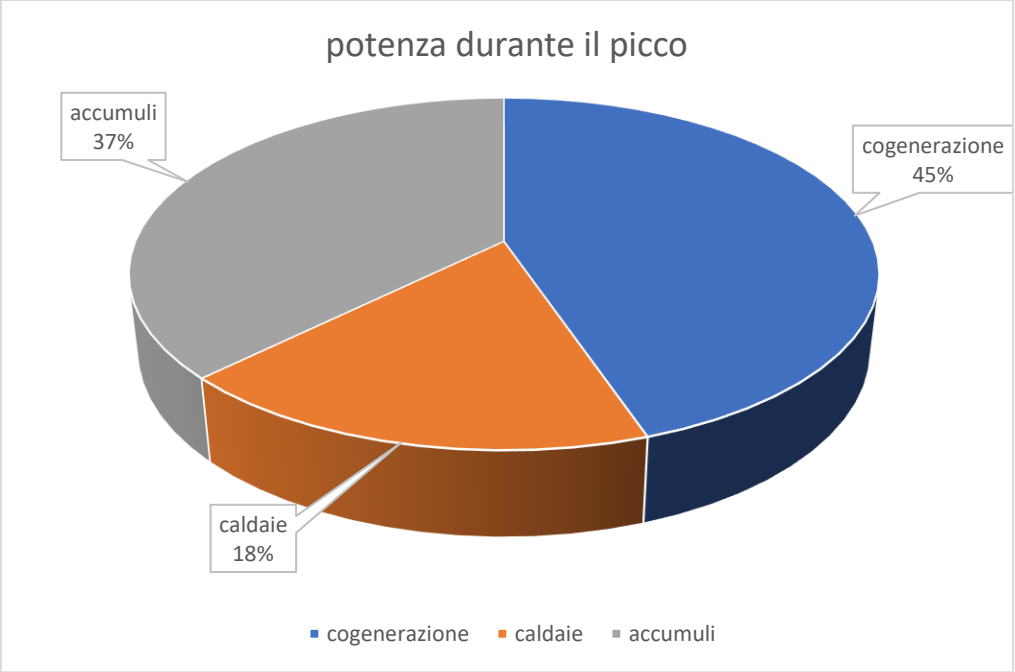

Fig. 4.18, Suddivisione potenza durante il picco

Nel punto più alto della richiesta mattutina, la suddivisione è molto diversa rispetto alla Fig.4.17. Come descritto precedentemente, l'uso degli accumuli è molto importante in questi momenti, infatti sale al 37% del totale; più di un terzo dell'energia è quindi fornita da questa tecnologia che si rivela di fondamentale importanza in questo orario per non ricorrere ad un uso eccessivo dei sistemi di integrazione, come le caldaie. Le due centrali cogenerative sono già al massimo della potenza, ma in questa fase, soddisfano solo il 45% del totale. La restante parte, il 18%, è soddisfatta dalle caldaie; ciò indica che l'uso di queste integrazioni rimane comunque basso anche nel periodo di maggiore stress della rete, ed è sintomo di un'ottima gestione e ottimizzazione delle risorse: senza gli accumuli infatti dovrebbero produrre circa il 55% della potenza totale richiesta, il quale sarebbe un valore veramente alto e richiederebbe un maggior numero di MW istallati, con conseguente aumento di costi ed emissioni.

Un obiettivo per il futuro potrebbe essere quello di diminuire, fino a far scomparire, l'uso dei sistemi di integrazione a fronte di un aumento della volumetria totale dei sistemi di accumulo o della potenza delle centrali principali, con lo scopo di creare una rete soddisfatta interamente dalla cogenerazione.

5. Confronto Utenze-Centrali

In questa sezione andrò a controllare i risultati ottenuti confrontando i profili di produzione delle centrali e di richiesta delle utenze per verificare se i risultati siano plausibili e il lavoro attendibile. Infatti, se ci fossero discordanze evidenti, si renderebbe necessario uno studio approfondito per cercare le cause e modificare l'analisi dei dati.

Il confronto è stato fatto analizzando due grandezze fisiche, la portata e la potenza.

Per la prima ci si aspetta che, in ogni istante della giornata, la quantità d'acqua prodotta dalle centrali (contando negativa quella assorbita dagli accumuli) sia uguale a quella assorbita dai baricentri: l'acqua è un liquido incomprimibile, quindi, per la legge della conservazione della massa, le due quantità devono essere uguali in ogni istante.

I due profili di potenza, invece, non devono essere uguali, infatti la potenza emessa dalle centrali non raggiunge immediatamente le utenze, ma è legata al movimento dell'acqua nelle tubature e all'inerzia termica della rete; deve però essere coerente l'uso degli accumuli rispetto alla produzione e richiesta nella rete, e l'integrale lungo la giornata del profilo di potenza emessa deve essere uguale alla richiesta meno le perdite.

Successivamente, verranno analizzati i profili di produzione delle centrali e di richiesta nelle utenze. Il paragone tra i due andamenti consente di ottenere informazioni sulle perdite termiche della rete e gli orari in cui si manifestano maggiormente, con lo scopo di capire se esistono spazi di miglioramento nella produzione di energia ottimizzando le risorse.

5.1 Attendibilità profili ottenuti

Il primo confronto riguarda le portate calcolate.

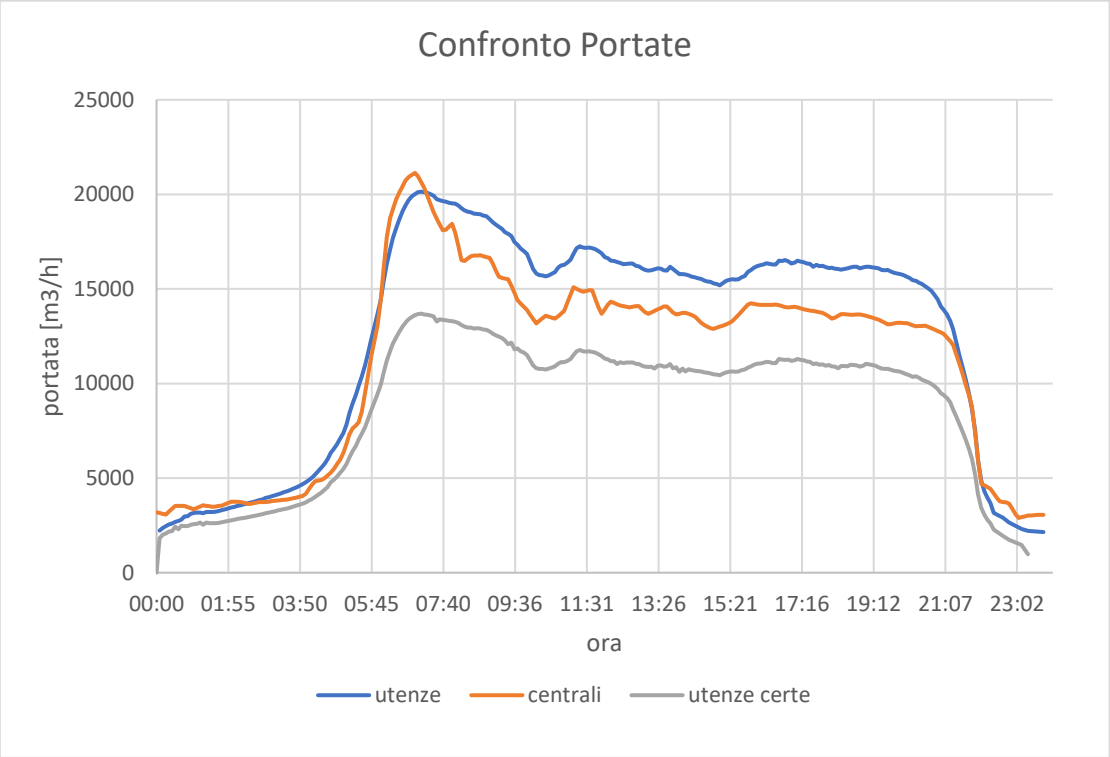

Fig. 5.1, Confronto tra portate

In Fig. 5.1 sono riportati in grigio la portata delle utenze di cui ho dati, in blu la proporzione sulla volumetria totale e in arancione la portata emessa dalle centrali; il confronto è effettuato paragonando questi ultimi due. È subito evidente che i due profili non sono perfettamente sovrapposti come mi aspettavo. In larghi tratti della giornata la discrepanza è minima e si può considerare nulla tenendo conto di errori di approssimazione. Nel resto delle ore, da dopo il picco allo spegnimento serale, si nota, invece, una differenza più elevata: questo scarto rimane costante lungo tutto il periodo e i due profili variano negli stessi momenti. Ciò potrebbe essere dovuto a errori di approssimazione nei baricentri con pochissimi dati, o un errore nel calcolo della portata prodotta dai vari impianti. Si tratta comunque di un errore accettabile in quanto i due profili non hanno discordanze nell'andamento, ma differiscono solo di una costante.

Il secondo confronto riguarda le potenze erogate, assorbite negli accumuli e scambiate nelle SST.

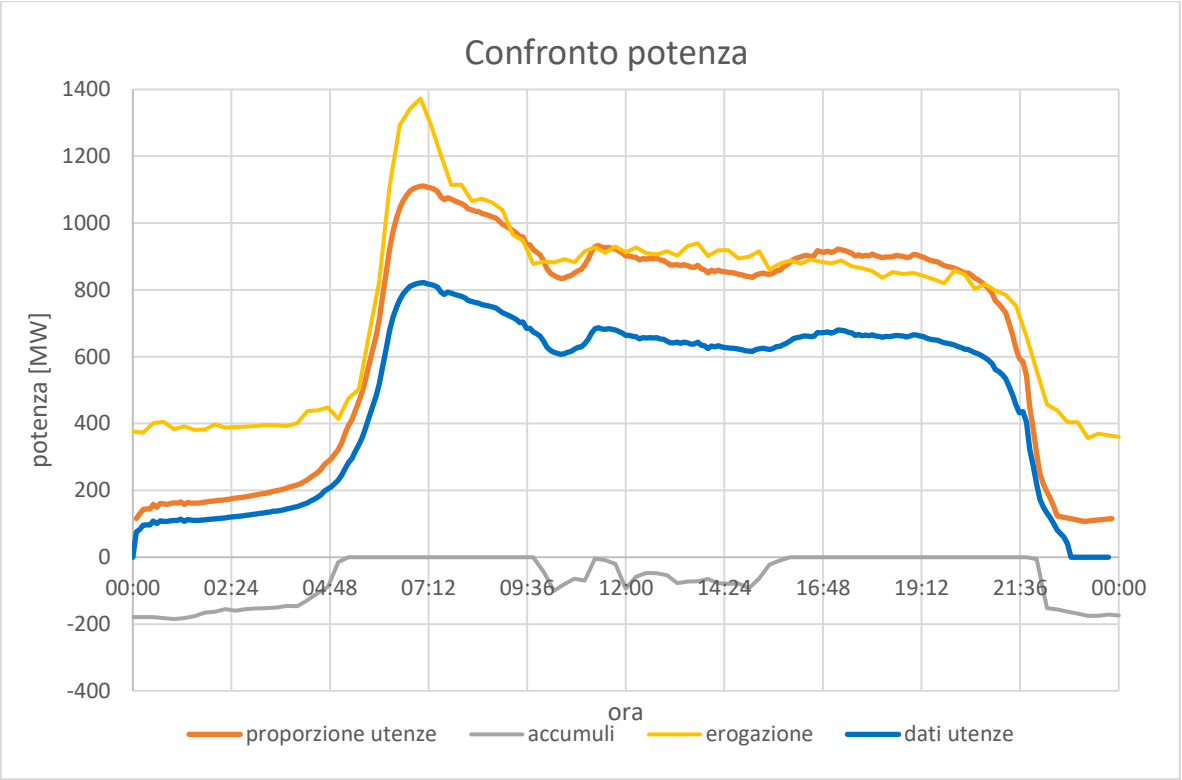

Fig. 5.2, Confronto tra erogazione, accumuli e utenze

In Fig. 5.2 sono riportati gli andamenti giornalieri della potenza erogata dagli impianti e di quella assorbita dalle utenze e dagli accumuli. La linea blu rappresenta i dati a mia disposizione, mentre la linea arancione rappresenta la stima della potenza totale. I risultati riportati sono congruenti tra loro e non sono presenti anomalie evidenti.

Negli orari in cui la produzione supera la richiesta, il surplus è sfruttato per ricaricare gli accumuli, infatti la loro potenza è negativa, cioè assorbita: questo avviene, in maggior parte, nelle ore serali e notturne dove solo la metà della potenza prodotta viene fornita alle utenze, ma anche in alcuni momenti durante la giornata in cui la domanda cala, cioè in tarda mattinata e inizio pomeriggio. La potenza assorbita dagli accumuli è ovviamente nulla quando si scaricano durante il picco e quando la potenza richiesta è circa uguale alla domanda. Si osserva una corrispondenza notevole tra la ricarica degli accumuli e il surplus di potenza sia a livello temporale che quantitativo.

In conclusione, sebbene la portata non sia esattamente uguale in ogni istante, i risultati ottenuti possono essere considerati plausibili per via della netta concordanza delle potenze e la correttezza degli andamenti della portata.

5.2 Analisi dei profili di produzione e richiesta

Dopo aver verificato l'attendibilità dei profili, si analizza ora nel dettaglio il loro comportamento.

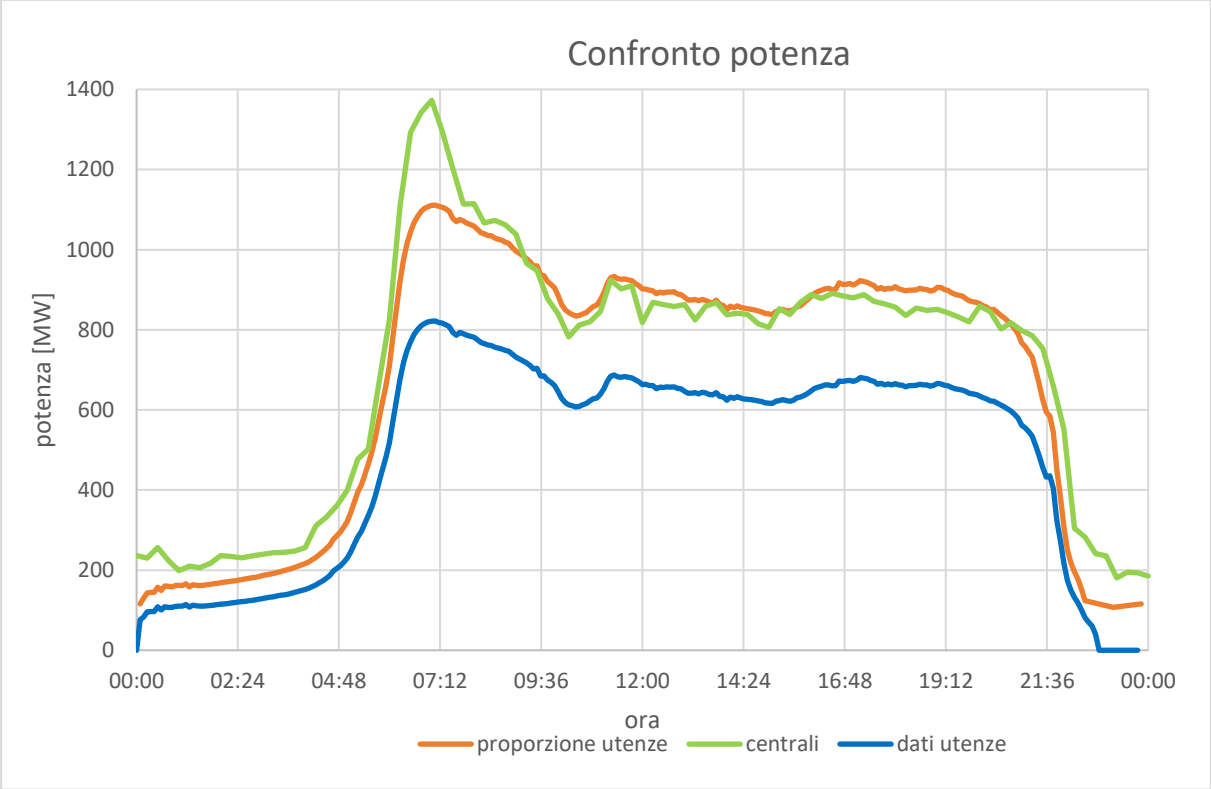

Fig. 5.3, Confronto potenza prodotta e richiesta

La linea verde riportata in Fig.5.3 rappresenta la potenza erogata dalle centrali al netto di quella assorbita dagli accumuli; in altre parole è quella usata esclusivamente per soddisfare la richiesta delle utenze. Il confronto viene effettuato tra la linea verde e quella arancione. I due profili sono molto simili, ma non si sovrappongono a causa di diversi fattori:

- l'acqua impiega del tempo a percorrere i tubi dagli impianti alle utenze, e viceversa: la variazione di richiesta associata a una variazione della portata ha un effetto istantaneo sulle centrali, mentre quella associata ad un cambiamento della temperatura di ritorno ha un effetto ritardato sulla centrale in funzione della velocità dell'acqua;
- ci sono perdite di energia nella rete che diminuiscono la potenza disponibile alle utenze;
- nell'analisi dei dati sono state applicate alcune approssimazioni che hanno effetto sui profili.

Nel dettaglio, si osserva che nelle ore serali e notturne la potenza erogata è costantemente più alta di quella scambiata nelle SST: la causa principale è che sono periodi in cui le portate sono ridotte e le temperature nella rete molto basse, perciò le perdite in termini di energia, che aumentano al diminuire della richiesta, non sono trascurabili. Inoltre, i dati forniti hanno mancanze in queste ore, quindi questa differenza potrebbe essere dovuta, in minima parte, ad errori nelle approssimazioni. Nel periodo notturno lo scarto medio è di 40-50 MW e dura per circa 4 ore, fino all'inizio dell'aumento mattutino; le perdite energetiche in queste ore compongono circa l'8-9% della potenza emessa, cioè il valore tipico in queste condizioni di funzionamento.

Lo studio dettagliato di cosa succede nel picco rappresenta la parte più importante dell'analisi. In questa fase si notano due differenze fondamentali tra la richiesta e la produzione. Per prima cosa il profilo della potenza fornita ha un picco più alto rispetto alla domanda di circa 300 MW: le centrali devono sopperire all'aumento repentino di richiesta dopo un lungo periodo di attività ridotta nella rete, che ha provocato un calo drastico delle temperature dell'acqua che circola nelle tubazioni. All'accensione di massa delle SST, infatti, treni di acqua fredda si miscelano ad acqua più calda; ciò comporta una riduzione della temperatura media della portata di ritorno in centrale e un conseguente aumento di potenza necessaria per riportarla a 120°C della mandata. Inoltre, le portate di acqua più fredda provocano perdite termiche nella rete che contribuiscono ad incrementare lo scarto tra le potenze. L'altra differenza si nota durante la crescita dei profili: questi non sono sovrapposti, ma la potenza scambiata nelle SST è in ritardo rispetto a quella prodotta nelle centrali. Il trasporto del calore è legato al movimento dell'acqua calda che ha una velocità massima limitata, quindi la trasmissione non è istantanea: il risultato è una differenza in ogni istante della crescita è di circa 100 MW e un tempo di circa 5-10 minuti di ritardo della potenza scambiata nelle utenze. Prendendo in esame le ore centrali del picco, dalle 6 alle 8 si è calcolata una differenza di circa 350 MWh tra i due profili, corrispondente al 15% dell'energia prodotta.

Nel resto della mattinata e nel primo pomeriggio, i due profili sono stabili e possono essere considerati sovrapposti essendo le piccole differenze attribuibili ad errori di approssimazione.

Nel tardo pomeriggio la potenza scambiata nelle SST è maggiore di quella prodotta dalle centrali. Ciò è possibile grazie all'inerzia termica della rete che sfrutta la potenza in eccesso prodotta in precedenza per soddisfare la richiesta delle utenze, con una minore produzione delle centrali. Questa fase dura circa 2-3 ore con uno scarto medio di circa 50 MW, quindi non molto elevato ma abbastanza significativo; vengono risparmiati circa 150 MWh che corrispondono circa al 6-7% della potenza scambiata nelle SST.

Nelle ultime ore le utenze si spengono, con un conseguente calo di potenza nei due profili. Le diminuzioni di potenza non sono sovrapposte, ma è presente nuovamente uno scostamento. In questo caso, però, è la potenza delle centrali a decrescere in ritardo: le utenze si spengono istantaneamente e gli impianti recepiscono questa variazione solo in seguito al ritorno della portata agli impianti. Il risultato è un ritardo di circa 10-15 minuti della diminuzione della potenza erogata, con una differenza media in ogni istante di circa 100 MW.

Nel corso dell'intera giornata si è calcolato, integrando le potenze, che vengono emessi circa 16650 MWh dagli impianti e assorbiti 15860 MWh nelle SST; il 96% dell'energia emessa perciò raggiuge le abitazioni, con solo il 4% di perdite energetiche nel trasporto che corrispondono a 30 MWh/h; questo valore è abbastanza contenuto e in linea con i valori standard. Bisogna però fare particolare attenzione a cosa succede nel picco; infatti lo scarto in questi istanti è elevato e gli impianti producono molta più energia di quanta viene effettivamente sfruttata. Per la gestione della rete, questo risultato è molto significativo perché indica che, cercando di limitare questa differenza, si potrebbe diminuire la produzione in questi orari e ridurre l'uso di sistemi di integrazione. Abbassando la produzione si avrebbe anche una minore portata nelle ore di massima richiesta, e quindi un minor stress delle tubature, e la possibilità di espandere la rete allacciando nuove utenze.

6. Uso Del Modello

Si descrive ora come è stato usato il modello fluidodinamico per simulare il comportamento della rete e i risultati ottenuti. Il modello è stato applicato solamente alla rete di trasporto per semplicità di analisi.

6.1 Input

Per prima cosa si illustrano i dati inseriti. La rete è stata studiata sia in mandata, sia in ritorno, con un'attenzione particolare al primo caso poiché l'analisi più interessante riguarda il come la portata raggiunga le utenze. Lo studio è stato fatto partendo da mezzanotte fino a circa le 23.

La suddivisione della rete differisce a seconda del caso: in mandata sono presenti 696 nodi e 704 rami, mentre in ritorno 677 nodi e 685 rami. Le differenze si notano esclusivamente nelle zone delle centrali e delle stazioni di ripompaggio.

Come si evince dalla fig. 5.1, nei risultati ottenuti precedentemente sono però presenti discordanze sulle portate, infatti quella emessa dalle centrali non coincide in ogni istante con quella assorbita dai vari baricentri: questa discordanza impedisce al modello di arrivare a convergenza e di portare ad una soluzione. Si è deciso quindi di correggere le misurazioni dei baricentri di cui non erano stati forniti dati o dove erano insufficienti. Il procedimento è stato il seguente:

- si è calcolato il comportamento dell'utenza standard (Fig. 6.1): la somma dei consumi dei baricentri con dati sufficienti è stata suddivisa per la relativa volumetria. Si è ottenuta una portata per m^3;
- sono state calcolate le portate dei baricentri da correggere moltiplicando il consumo dell'utenza standard per la relativa volumetria;
- si è preso come dato di riferimento le portate delle centrali. Queste infatti sono state considerate precise, in quanto non sono state applicate notevoli approssimazioni nel calcolarle;
- si è suddivisa la somma della portata delle centrali tra i vari baricentri proporzionalmente ai consumi calcolati in precedenza.

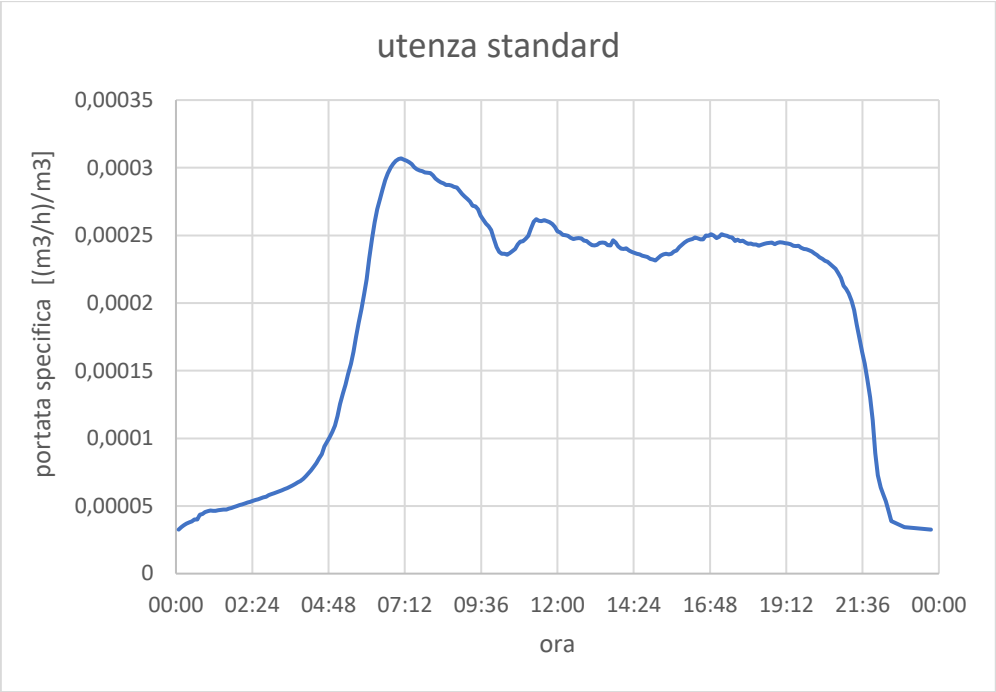

Fig. 6.1, Portata utenza standard

Quest'approssimazione ha permesso l'uso del modello utilizzando i dati il più vicino possibile alle misurazioni fornite.

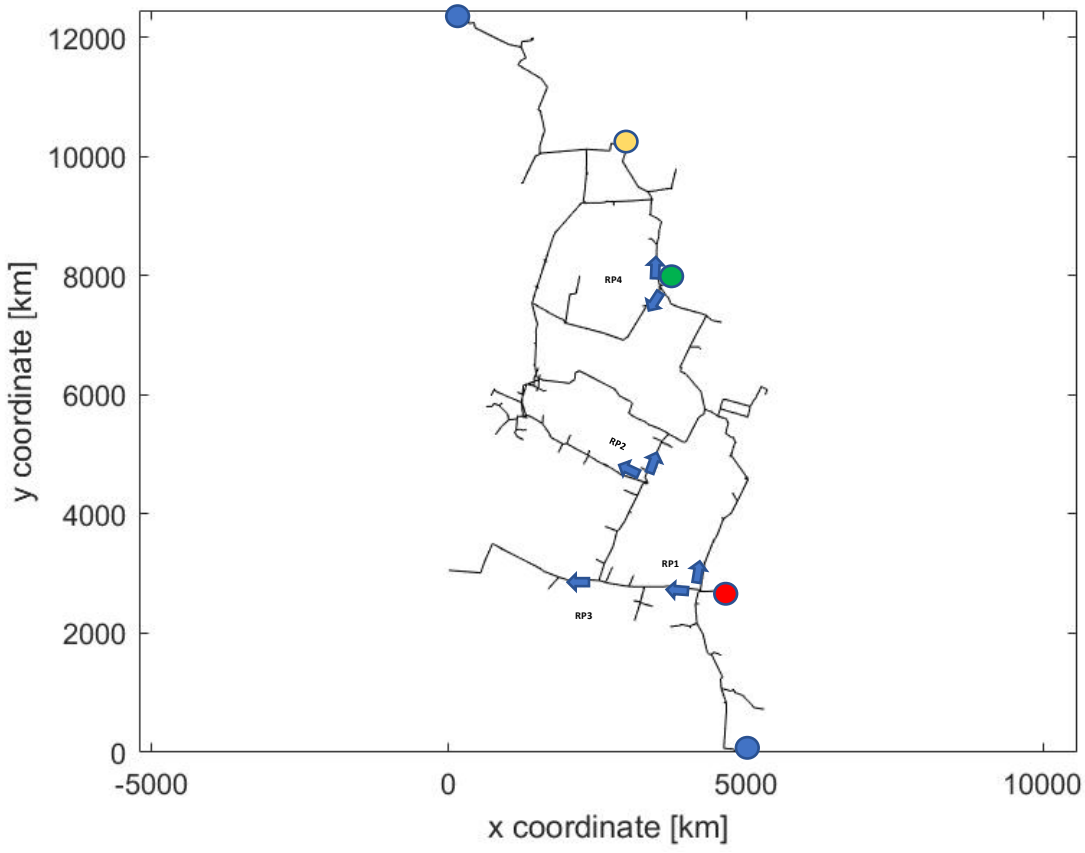

Fig. 6.2, Rappresentazione mappa rete di Torino.

In Fig. 6.2 è stata riportata la mappa della rete. Questa rappresentazione è stata fatta usando le coordinate di ogni nodo e tracciando i rami con l'utilizzo di uno script di Matlab. I pallini colorati rappresentano i vari impianti: blu per le centrali cogenerative di Torino Nord e Moncalieri, rosso per il BIT, verde per il Politecnico e giallo per il Martinetto. Le frecce riportano i punti in cui sono presenti le 4 stazioni di ripompaggio e la direzione verso cui incrementano la pressione. L'impianto del politecnico è dotato sia di sistemi di integrazione sia di una stazione ripompaggio (RP4).

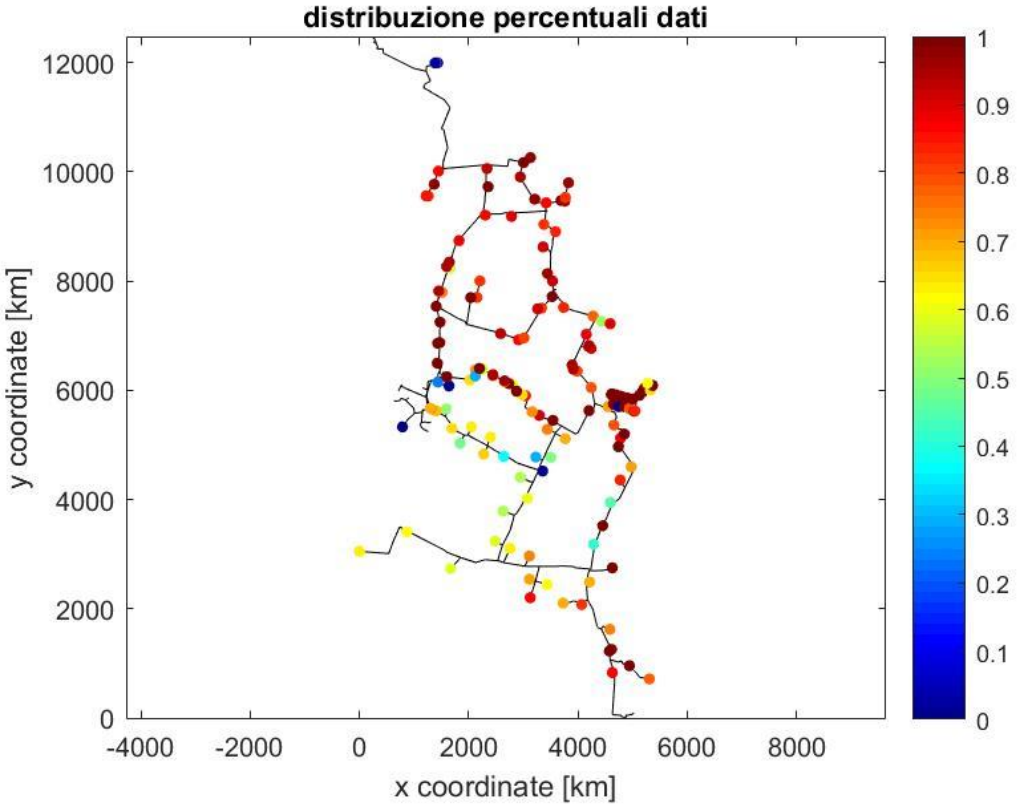

Fig. 6.3, Distribuzione percentuale dati forniti.

In Fig. 6.3 è rappresentata la posizione dei vari baricentri e la relativa percentuale di dati fornita da IREN Energia S.p.A. La barra dei colori riporta le percentuali dallo 0% (blu scuro) al 100% (rosso scuro). I pallini colorati indicano i nodi corrispondenti ai baricentri, da ognuno dei quali partono le reti di distribuzione che nel nostro studio non sono state prese in esame. Nelle parti nord ed est della rete si nota una colorazione predominante sul rosso, quindi con dati superiori all'80%: queste zone possono essere quindi considerate molto affidabili nel commentare i risultati. In altre zone invece, soprattutto la parte ad ovest vicino a RP2 e RP3, le percentuali si abbassano sul 50-60%. Infine, sono presenti casi isolati in cui la percentuale è vicina allo zero: tuttavia, il numero di questi baricentri non è elevato e non è concentrato tutto nella stessa zona, quindi non esistono parti di rete di cui non si ha nessuna informazione.

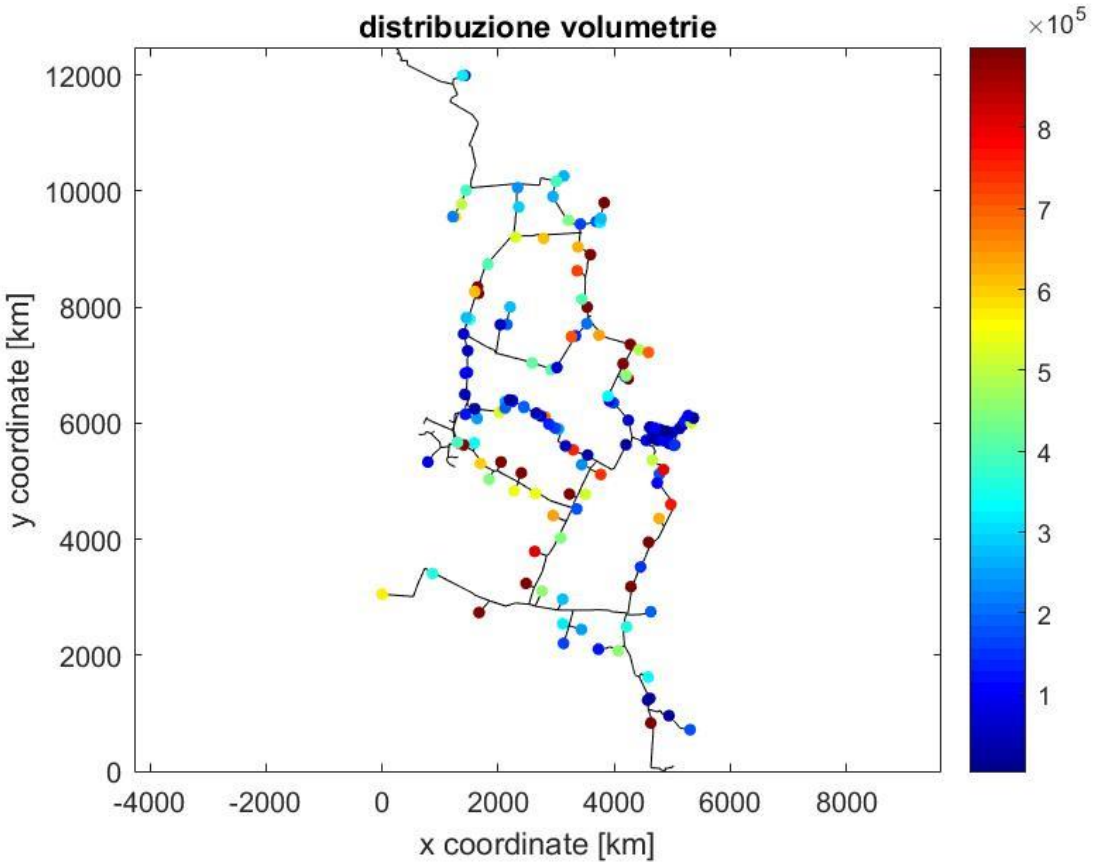

Fig. 6.4, Distribuzione volumetria baricentri.

La colorazione in Fig. 6.4 indica la volumetria dei vari baricentri misurata in m^3. Si può notare un grande numero di baricentri con volumetria limitata, soprattutto nella parte centrale della mappa. Non ci sono zone in cui si concentrano baricentri di grande dimensioni, in cui potrebbe esserci una concentrazione critica di portata, ma la distribuzione è abbastanza casuale lungo tutta la rete.

I dati raccolti e analizzati in precedenza, sono stati inseriti nel modello come condizioni al contorno. Queste sono diverse a seconda se la rete viene studiata in mandata o in ritorno. Nel primo caso comprendono le portate prodotte dagli impianti, quelle assorbite e la temperatura dell'acqua erogata dalle centrali. Nel secondo caso è necessario aggiungere la temperatura dell'acqua in uscita dai baricentri. Le portate sono state inserite in kg/s, mentre le temperature in K.

Si descrive ora come varia la richiesta delle utenze lungo la giornata. Queste mappe sono state fatte con uno script di Matlab in cui vengono rappresentate le portate inserite come condizioni al contorno. Nelle prossime figure la colorbar riporta la portata misurata in m^3/h.

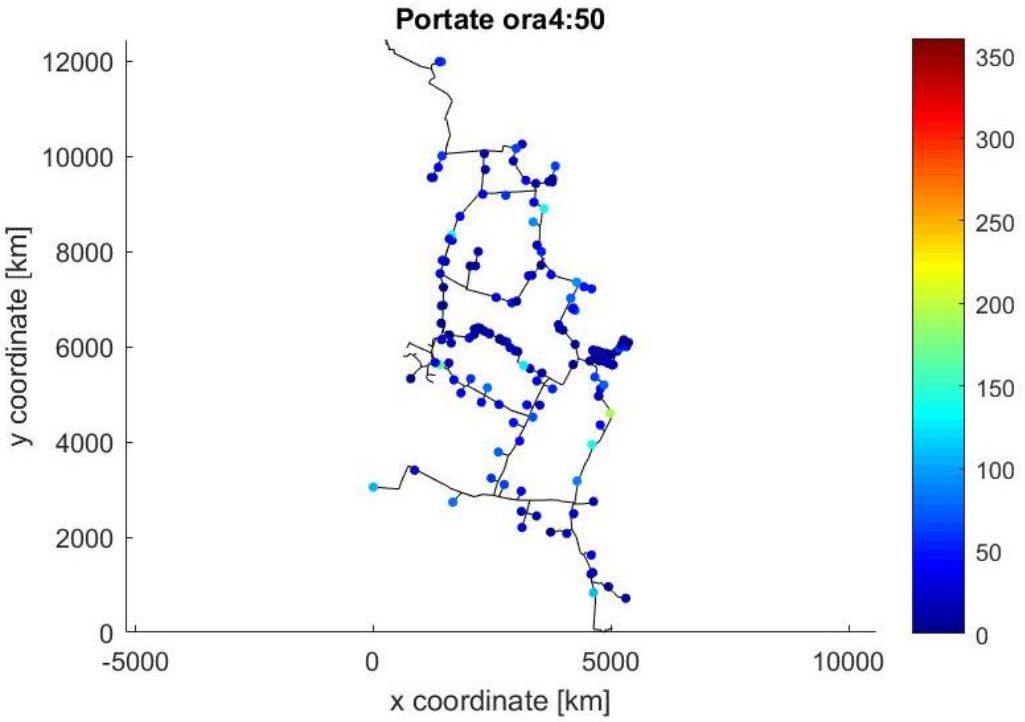

Fig. 6.5, Portate baricentri ore 4:50

Nelle ore notturne il profilo è costante. Nel dettaglio è stato rappresentato alle 4:50. In questo istante la maggior parte delle utenze sono spente e quindi la richiesta è molto bassa, in alcuni baricentri è addirittura nulla. In alcuni casi isolati la portata raggiunge i 150-200 m^3/h, in corrispondenza di utenze sempre accese come gli ospedali.

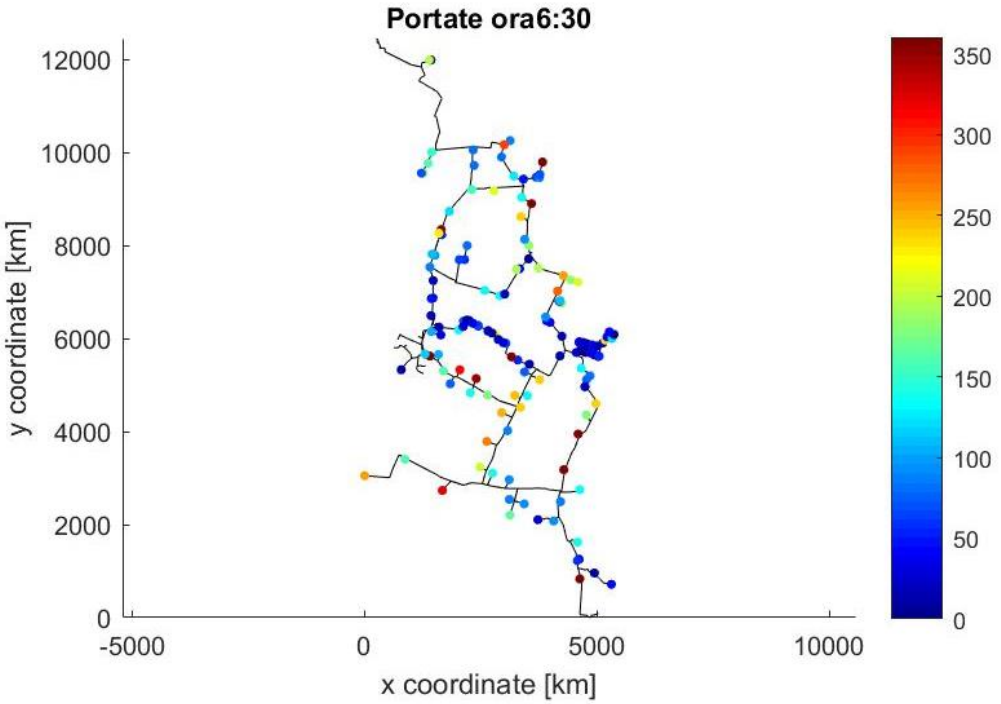

Fig. 6.6, portate baricentri ore 6:30

Alle 6:30 si ha il picco di richiesta mattutino; le portate qui sono molto più alte e ci sono richieste anche oltre i 350 m^3/h. Si nota una somiglianza alla Fig. 6.4, segno di un forte legame tra volumetria e richiesta: infatti, nei baricentri più piccoli circola una portata minore, come si può notare in centro della mappa dove prevale una colorazione sul blu scuro. Non sono presenti zone dove si concentrano portate molto alte, ma sono distribuite casualmente in tutta la rete.

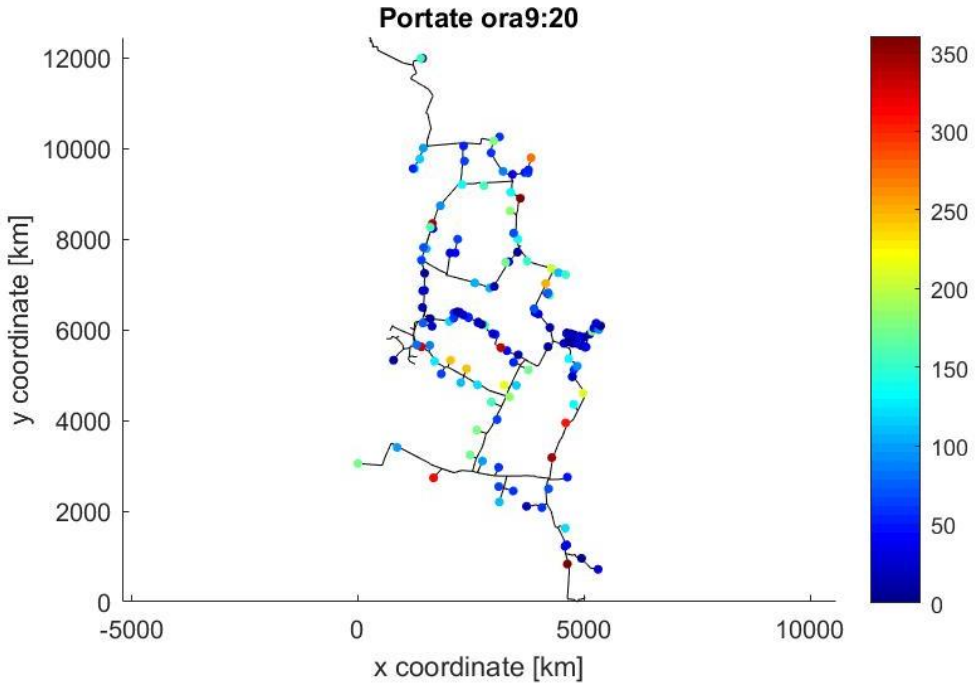

Fig. 6.7, Portate baricentri ore 9:20.

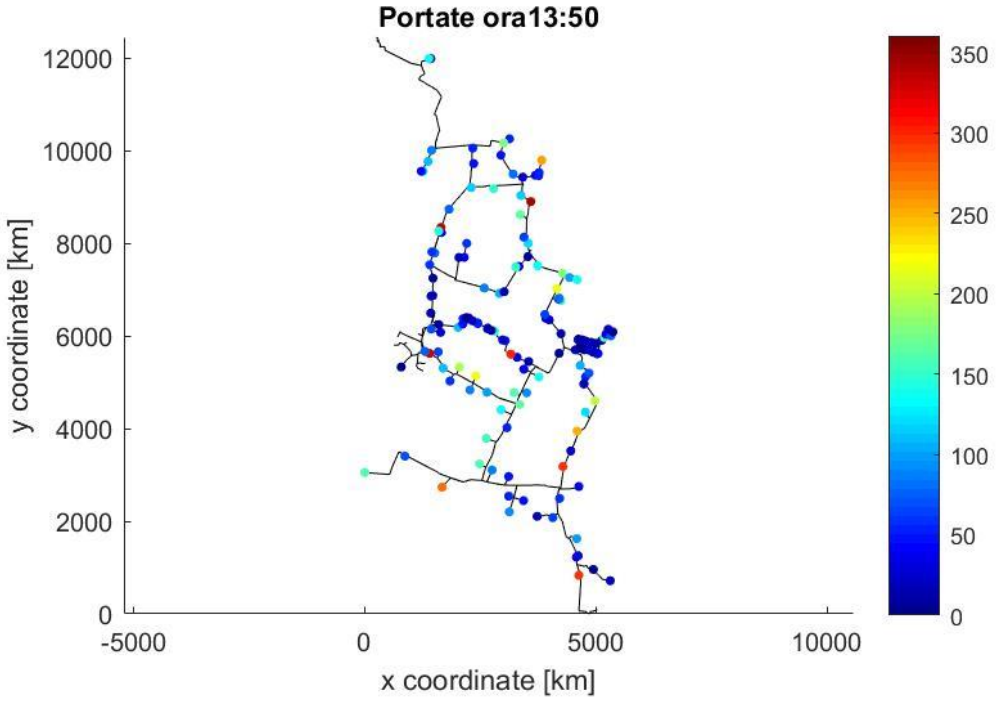

Fig. 6.8, Portate baricentri ore 13:50.

In Fig. 6.7 sono riportate le richieste una volta finito il picco mattutino, alle 9:20. Si nota una diminuzione generale della richiesta in tutti i baricentri, anche di alcune decine di m^3/h. Nel resto della giornata si ha un consumo praticamente costante: si osserva in Fig. 6.8, infatti, una grande somiglianza alla Fig. 6.7 con pochissime variazioni, e in ogni caso molto lievi. Si hanno profili simili fino allo spegnimento serale delle utenze.

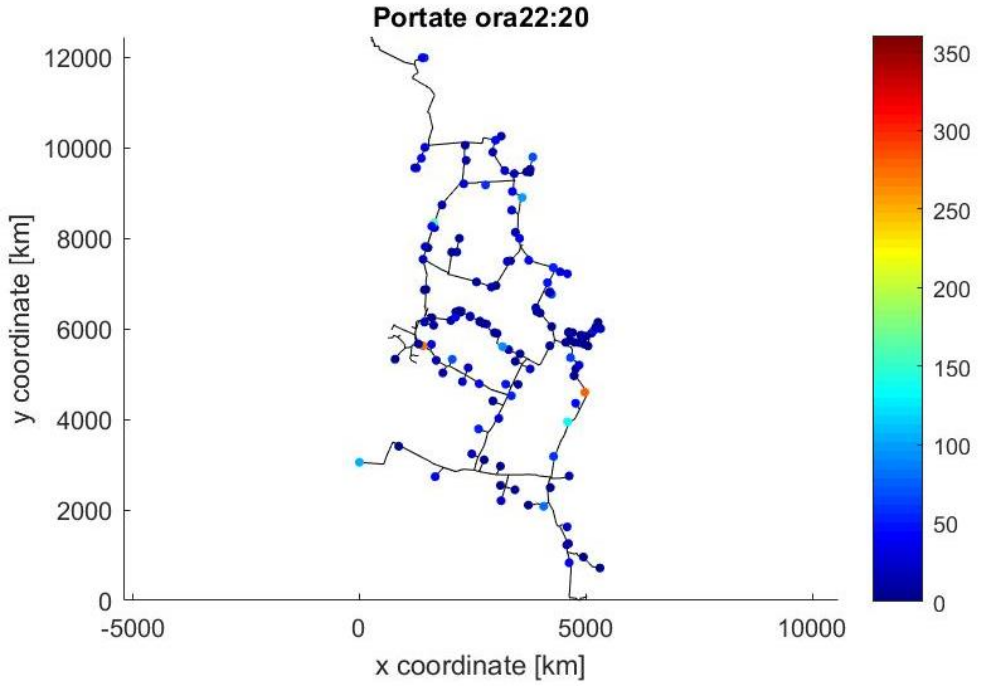

Fig. 6.9, Portate baricentri ore 22:20.

Alle 22:20 la maggior parte delle utenze è ormai spenta e quindi la richiesta diminuisce notevolmente. La situazione è molto simile a quella raffigurata in Fig. 6.5.

Infine, sono stati inseriti i dati relativi ai ripompaggi della sola rete di mandata. Sono stati forniti i delta di pressione in bar delle varie stazioni per ogni direzione, i quali sono poi stati associati ai rispettivi rami della rete. Le variazioni di pressioni non sono costanti, ma variano lungo la giornata: si va da un minimo di circa 4 bar nelle ore notturne, ad un massimo di 8-9 bar durante la giornata. Ogni stazione, come è riportato in Fig. 6.10, ha un suo profilo di utilizzo. I ripompaggi consentono di rimediare alle perdite di carico della rete, e influenzano notevolmente la distribuzione della portata. Nella rete di ritorno non sono presenti stazioni di ripompaggio, ed è puramente resistiva. Nel modello sono stati inseriti in pascal.

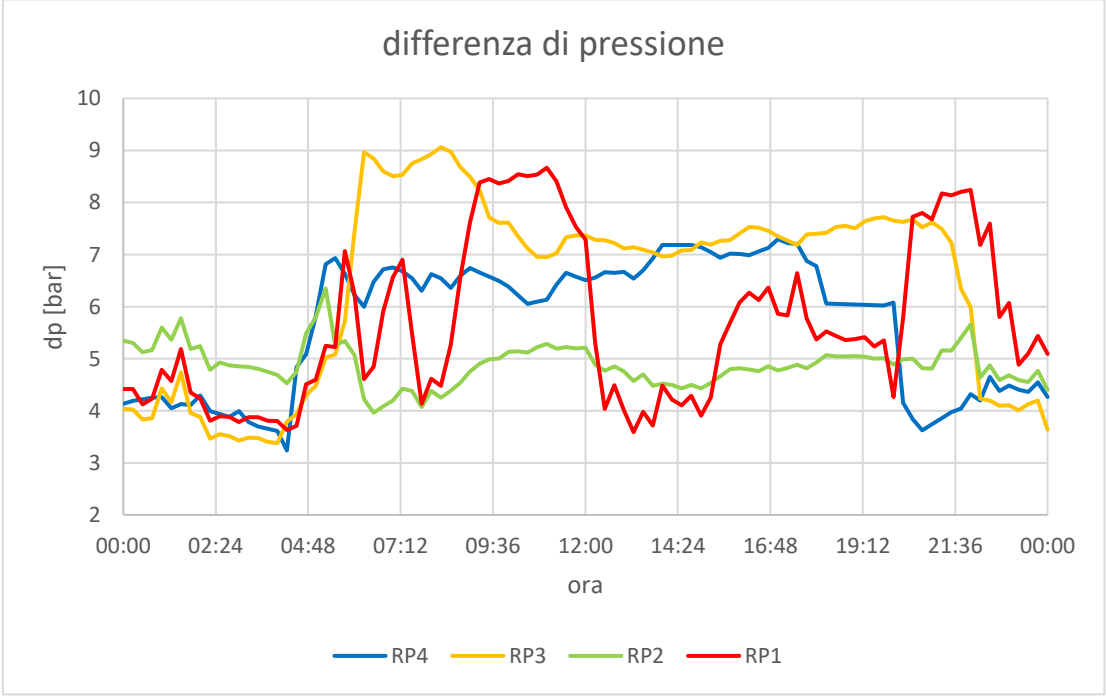

Fig. 6.10, Profili differenze di pressione

6.2 Risultati

Si analizzano ora i risultati ottenuti usando il modello fluidodinamico. Il modello fornisce risultati con una cadenza temporale di 5 minuti, da mezzanotte alle 23, di temperatura e pressione in tutti i nodi e di portata in tutti i rami della rete. Nel mio elaborato prenderò come esempi 6 orari della giornata che riassumono l'andamento giornaliero: 4:50, 6:30, 9, 13:50, 18:30, 22:20.

Inoltre, conoscendo il diametro di tutte le tubazioni, si è calcolata la velocità in ogni ramo, ponendo:

$$v = \frac{Q}{\frac{D^2}{4} * \pi * 1000} \qquad (6.1)$$

Dove v è la velocità in m/s, Q la portata massica in kg/s, D il diametro in m e 1000 la densità dell'acqua in kg/m^3.

Maggiore attenzione sarà rivolta nello studio della rete di mandata, per la quale verranno discussi i profili di temperatura, portata, velocità. Anche per la rete di ritorno verranno illustrati gli stessi profili nonostante sia meno interessante dal punto di vista della gestione della rete, in quanto non sono presenti ripompaggi e ci si aspetta concentrazioni di portata minori.

Nei prossimi grafici, le portate saranno espresse in m^3/h, le temperature in °C, le pressioni in bar e la velocità in m/s.

6.2.1 Rete Di Mandata

Si inizia dai risultati della rete di mandata. Si procederà a esaminare cosa succede nei vari orari scelti per ogni grandezza fisica.

Per quanto riguarda la temperatura di mandata, questa è fissata a circa 120°C. Verrà quindi riportata una sola mappa, in quanto non ci sono variazioni significative lungo la giornata.

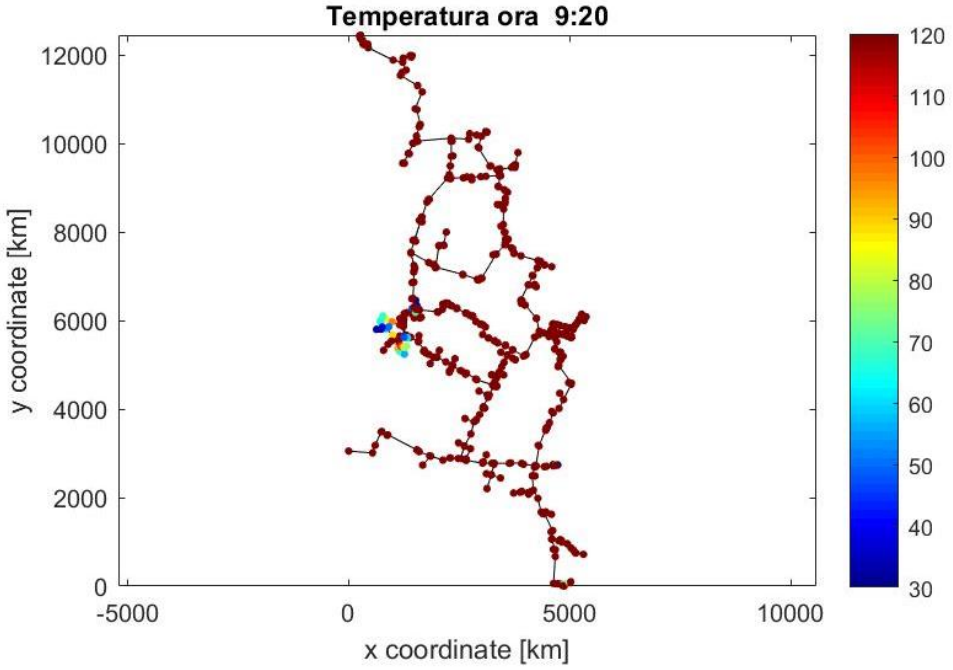

Fig. 6.11, Distribuzione temperatura di mandata

Lungo tutta la rete l'acqua circola ad una temperatura di circa 120°C; le perdite termiche nelle tubazioni sono quindi trascurabili. L'unica eccezione è nel lato ovest della mappa, nella zona che corrisponde a Mirafiori Nord: qui la temperatura è molto bassa e resta intorno ai 40-50 °C. Questo quartiere è abbastanza particolare, in quanto ci sono rami della rete senza alcun baricentro attivo, come si può notare in Fig. 6.3, e nei quali il modello impone una portata molto piccola. Di conseguenza le perdite termiche risultano molto alte e le temperature restano basse in ogni ora della giornata.

Nel capitolo 4.3 si notava una diminuzione della temperatura di mandata nelle ore notturne, cosa che qui non avviene. Questo perché nella mappa è riportata la rete di trasporto, mentre precedentemente si erano analizzate le temperature in arrivo alle utenze e quindi nella rete di distribuzione. Si parla quindi di due tratti diversi della rete e con comportamenti diversi: nel primo la portata è sempre consistente e quindi il calo di temperature è praticamente nullo, mentre nella seconda, specialmente in prossimità delle utenze, nelle ore notturne circola una quantità d'acqua molto limitata con una diminuzione evidente.

Si analizza ora la distribuzione della portata lungo la giornata.

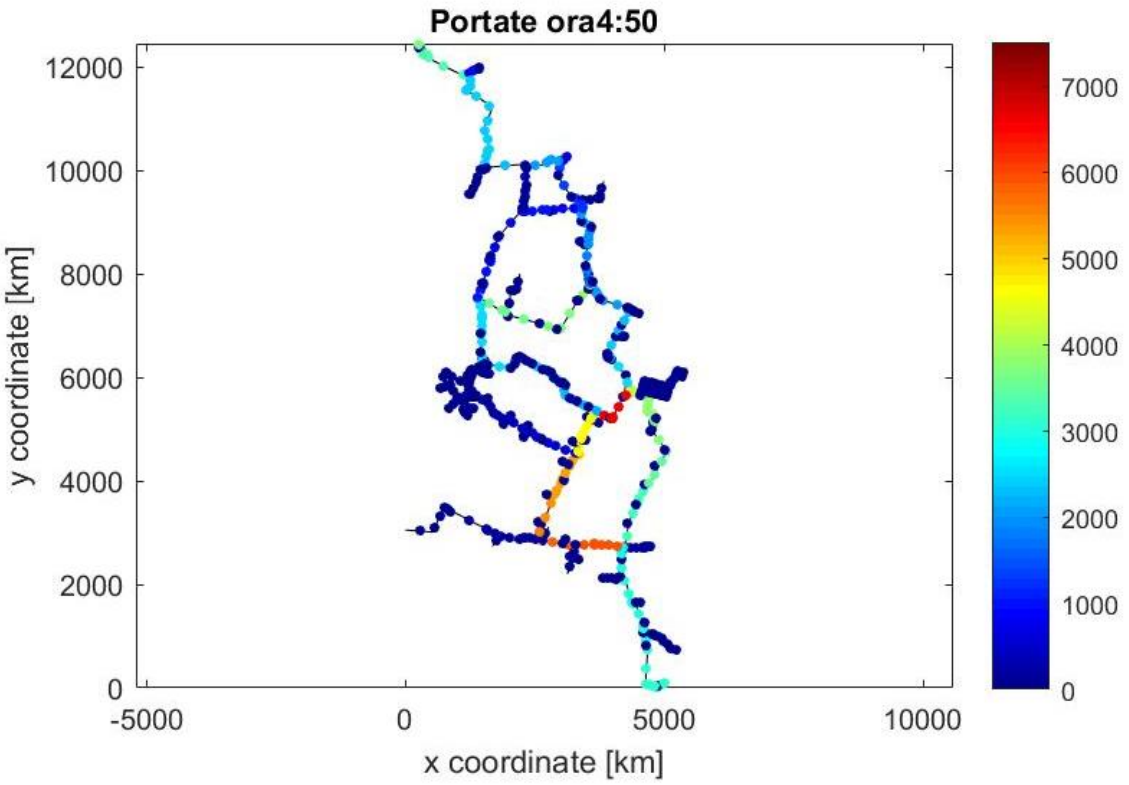

Fig. 6.12, Distribuzione portata alle 4:50

Alle 4:50 le utenze sono ancora in maggior parte spente, perciò abbiamo portate in rete non molto alte. Si notano in Fig. 6.12 portate intorno ai 3000 m3/h in uscita dalle centrali, e nella maggior parte della mappa non si supera questo valore. La portata più alta si ha nel ramo in uscita da RP1 a ovest, e in un tratto breve più a nord dove si raggiungono i 6000 m3/h.

Gli accumuli in queste ore si stanno ricaricando, perciò non producono portata e non ci sono variazioni nelle loro vicinanze.

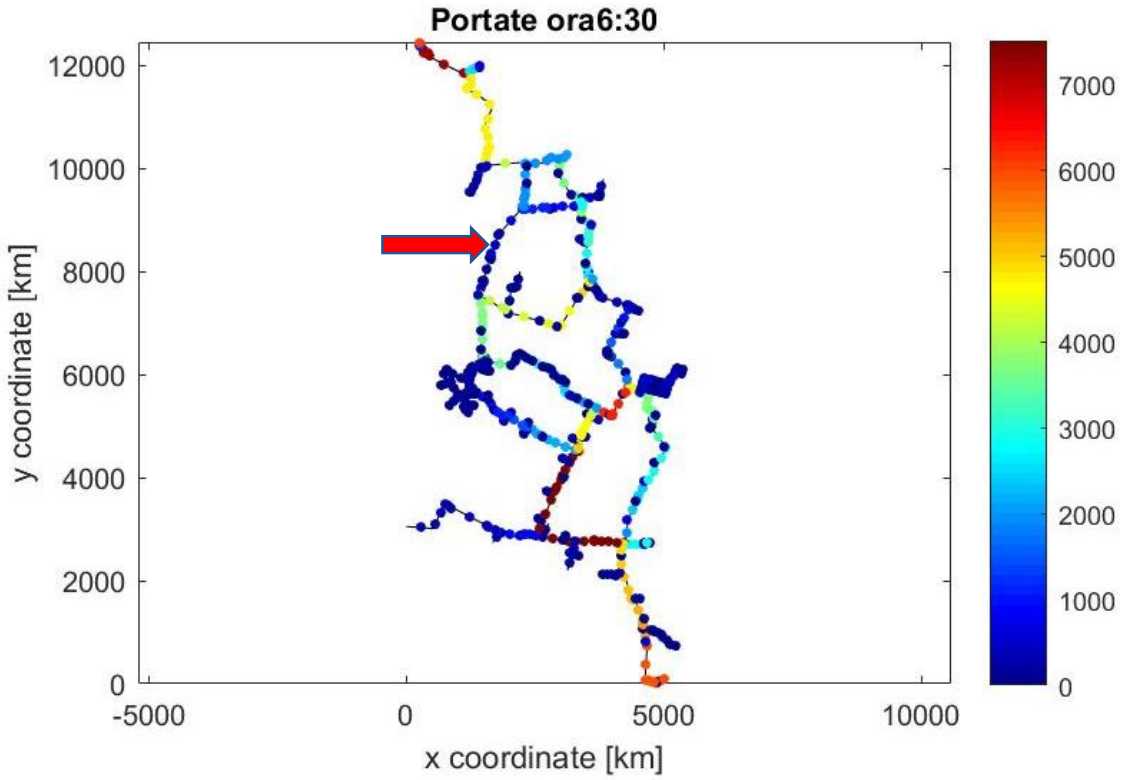

Fig. 6.13, Distribuzione portata alle 6:30

Questo è il momento critico per la rete. Le utenze si accendono e c'è il picco di richiesta. Gli accumuli sono accesi, infatti si ha una portata maggiore anche in uscita da BIT, Martinetto e Politecnico.

Si nota un aumento in tutta la mappa della portata: nei rami in uscita dalle centrali si hanno circa 6000 m^3/h, mentre in uscita da RP1 verso ovest si raggiungono i valori massimi con oltre 8000 m^3/h. Questa è la zona più critica, dove passa la maggior quantità d'acqua: il valore è molto elevato. Sono anche presenti zone con portata molto bassa, come per esempio il quartiere di Mirafiori Nord (già descritto sopra), nella parte più a ovest della rete o comunque nei vari rami che portano ai baricentri più isolati.

Nei vari loop della mappa si può intuire il verso preferenziale verso cui circola l'acqua. Questo è dato soprattutto dai ripompaggi che, oltre a bilanciare le perdite di carico, direzionano la portata verso alcuni rami specifici.

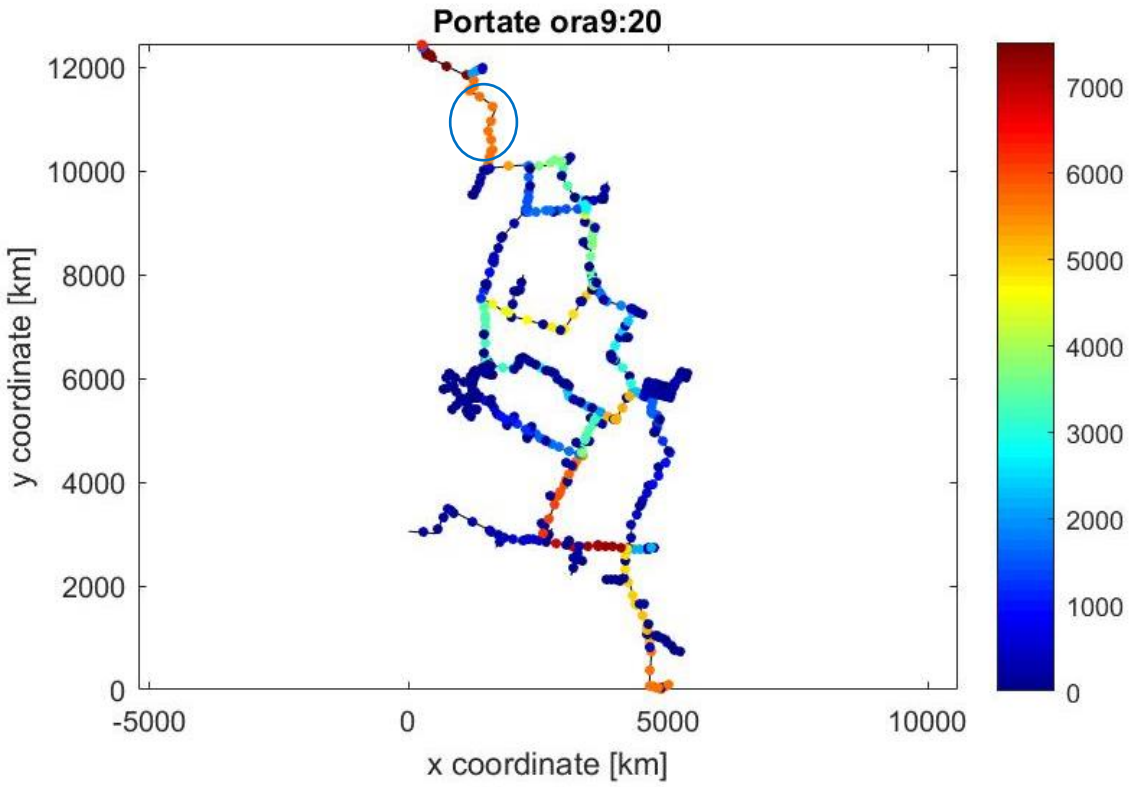

Fig. 6.14, Distribuzione portata alle 9:20

Alle 9:20 il picco mattutino è terminato. Le portate diminuiscono in quasi tutta la rete, ad eccezione di pochi tratti. Nel ramo in uscita da Torino Nord (cerchio blu), si nota infatti un aumento di portata dovuto alla minor richiesta dei baricentri posti subito prima del tratto evidenziato. Questo ha effetto su tutta la parte Nord dove circola una quantità d'acqua leggermente maggiore alla situazione precedente.

Le portate più alte si trovano sempre nello stesso ramo, ma ora sono inferiori e non superano i 6500-7000 m^3/h. La situazione non è più critica come nell'orario di picco.

Gli accumuli sono spenti, tranne il BIT in cui sono attive le caldaie e infatti si nota ancora una significativa portata uscente.

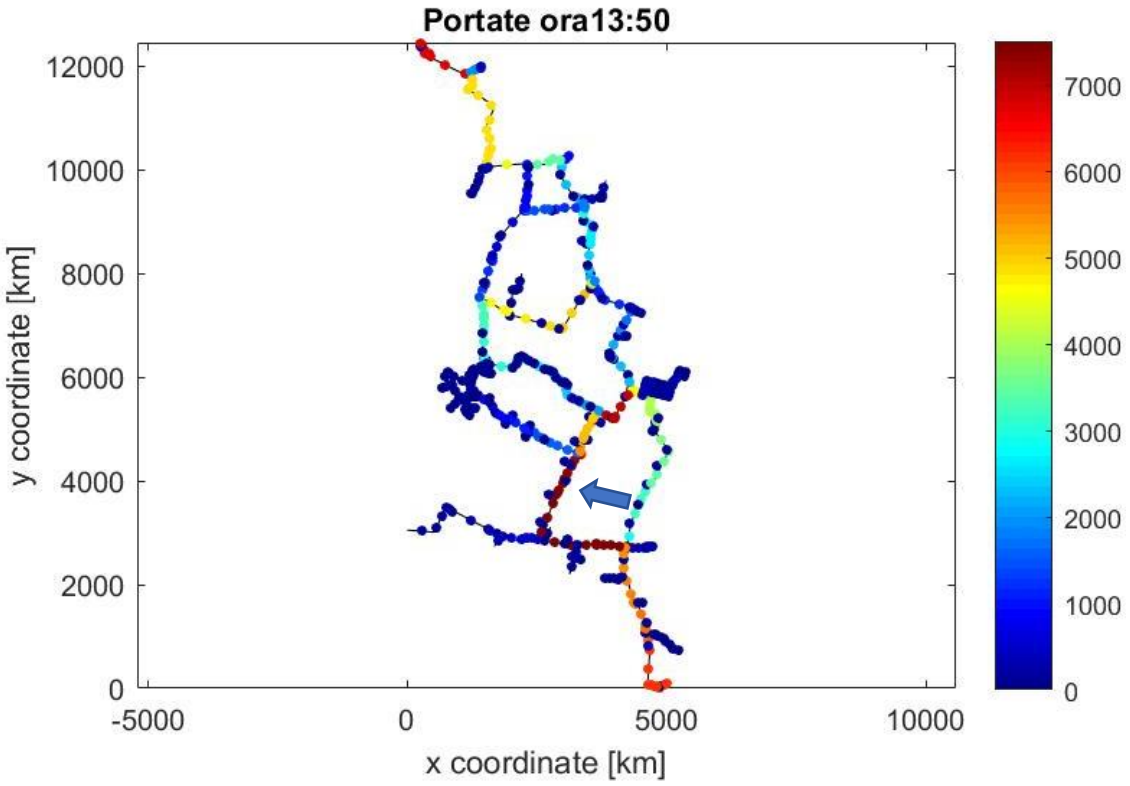

Fig. 6.15, Distribuzione portata alle 13:50

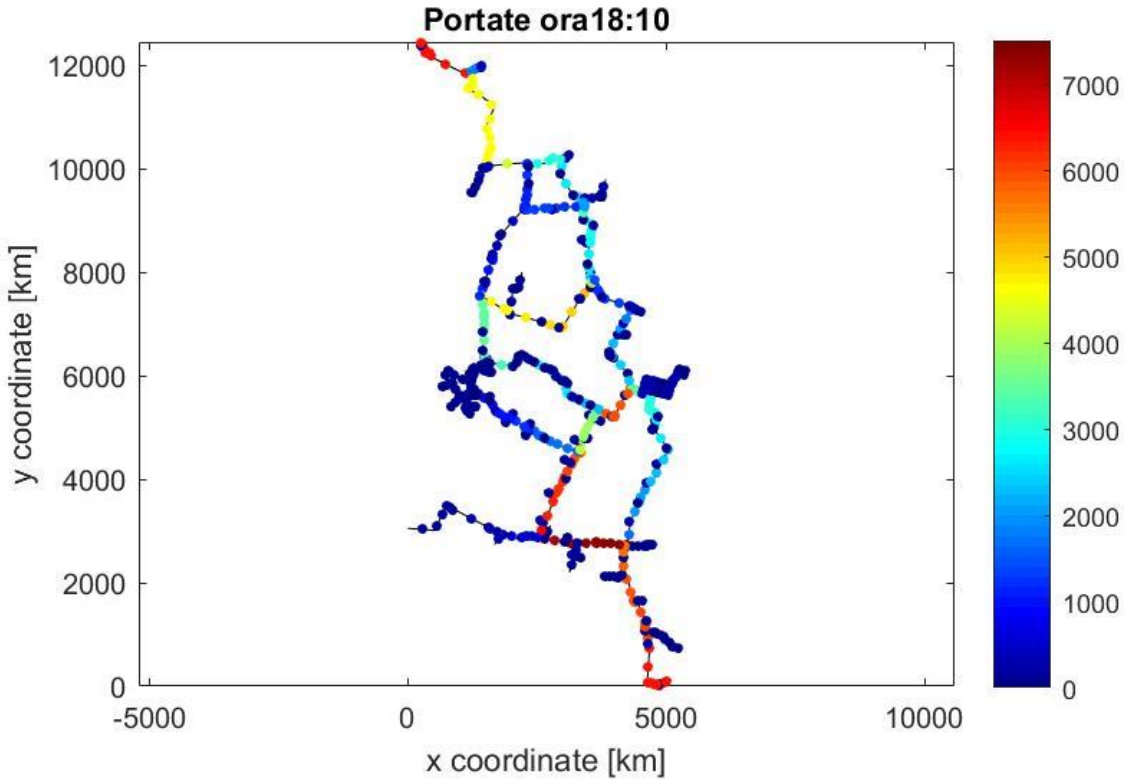

Fig. 6.16, Distribuzione portata alle 18:10

Alle 13:50 si ha una situazione simile alla precedente. Le uniche differenze sono legate modifiche nella produzione delle centrali e nei ripompaggi. Gli accumuli sono tutti spenti.

La produzione di Torino Nord è leggermente inferiore per cui nella zona nord la portata circolante è minore: il calo è di 500-600 m^3/h, per cui non molto significativo. La centrale di Moncalieri, invece, aumenta la produzione e questo produce una maggior portata circolante in tutta la zona sud, vicino a RP1. Questo ramo è di nuovo il più sollecitato con una portata di circa 7500 m^3/h. In generale, nel loop indicato dalla freccia in Fig. 6.15, si ha un aumento di circa 1500-2000 m^3/h rispetto alla mattinata.

Nel pomeriggio si ha un profilo quasi stazionario, come testimonia la netta somiglianza con la Fig. 6.16, in cui si mostra la mappa alle 18:10. Le uniche differenze si notano nel loop nominato precedentemente in cui circola una portata leggermente inferiore. Questo può essere dovuto alla modifica di potenza delle stazioni di ripompaggio che provocano una diversa distribuzione della portata.

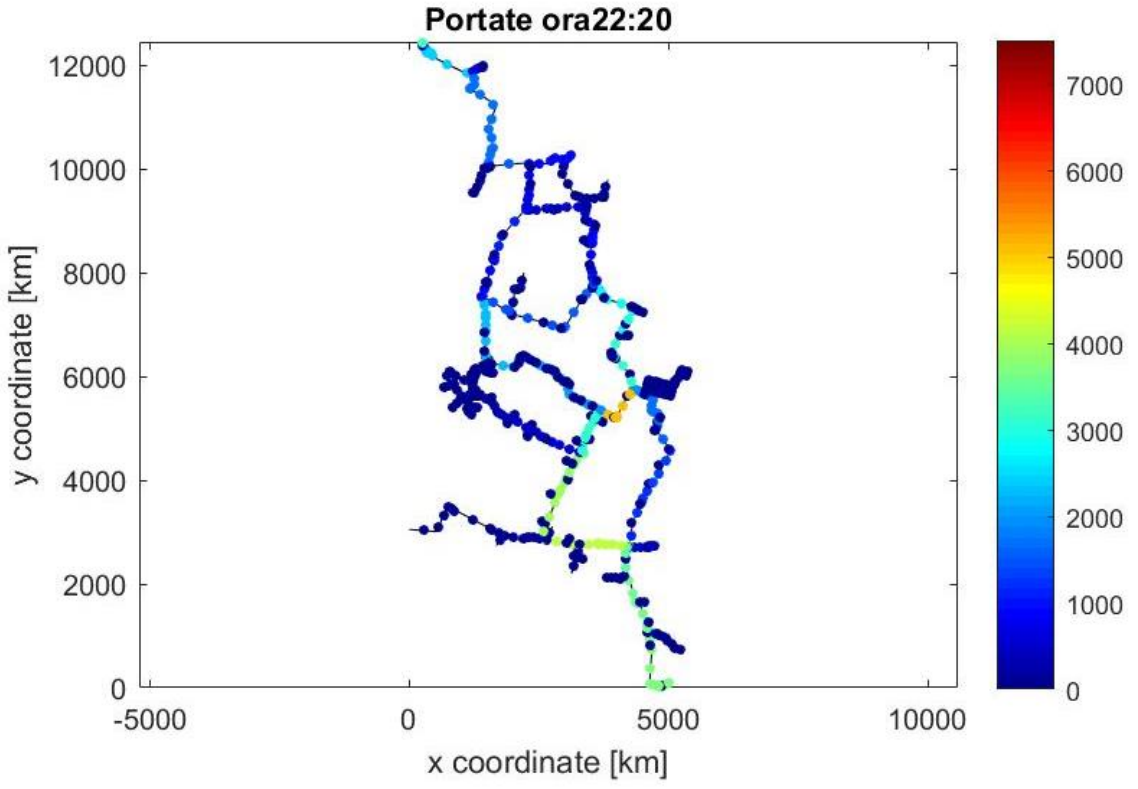

Fig. 6.17, Distribuzione portata alle 22:20

Alle 22:20 le utenze si spengono, le centrali producono molto meno e gli impianti di integrazione sono spenti ed assorbono potenza. La portata circolante è molto inferiore e si ritorna ai livelli iniziali del primo step analizzato. Le portate maggiori si hanno sempre negli stessi rami, però ora sono presenti valori massimi molto inferiori, intorno ai 4000-5000 m^3/h.

Per riassumere, il comportamento giornaliero corrisponde a quello che ci si poteva aspettare; nelle ore notturne le portate sono basse in tutta la rete mentre nel picco mattutino abbiamo la massima circolazione, che diminuisce nelle ore successive fino a raggiungere un livello quasi stabile nelle ore pomeridiane, in cui avvengono piccole variazioni localizzate. In serata poi vi è un ritorno alla situazione iniziale. I risultati sono coerenti con i dati immessi, con i profili di produzione delle centrali e non sono presenti grosse anomalie.
Nella rete sono presenti tratti con altissime portate per tutta la giornata. Nella gestione della rete questi punti sono critici in quanto sono sotto forte stress e una loro eventuale rottura causerebbe molti problemi ad un numero elevatissimo di utenze. In dettaglio il tratto con maggiori portate è quello indicato con una freccia in Fig. 6.15: sarà rivolta grande attenzione a questa porzione di rete nello studio della velocità, in quanto fossero alte significherebbe essere al limite della quantità d'acqua trasportabile e ciò rappresenterebbe un problema nel caso si vogliano allacciare nuove utenze in quel tratto.

Si nota anche la presenza di tratti con bassissime portate. La maggior parte sono rami che collegano baricentri isolati o di piccole dimensioni: un esempio è il quartiere di Mirafiori Nord, già descritto in precedenza, in cui la portata è quasi sempre molto bassa o addirittura, in qualche ramo, nulla. Nel caso del tratto evidenziato con una freccia rossa in Fig. 6.13, invece, abbiamo una zona più rilevante della rete; qui le portate restano molto basse in tutta la giornata e questo collegamento non viene praticamente sfruttato. Questo indica che questa zona potrebbe essere usata maggiormente, magari grazie all'uso di ripompaggi, per alleggerire il carico di altri tratti di rete, oppure potrebbe essere adatta ad allacciare nuove utenze.

Si analizza ora la velocità con cui la portata circola nella rete lungo tutta la giornata. Questa grandezza non è un output diretto del modello ma è calcolata sapendo portata e diametro di ogni tubazione. L'analisi della velocità con cui viaggia l'acqua è molto importante perché ci da informazioni più complete sui punti critici che il solo studio della portata non ci fornisce.

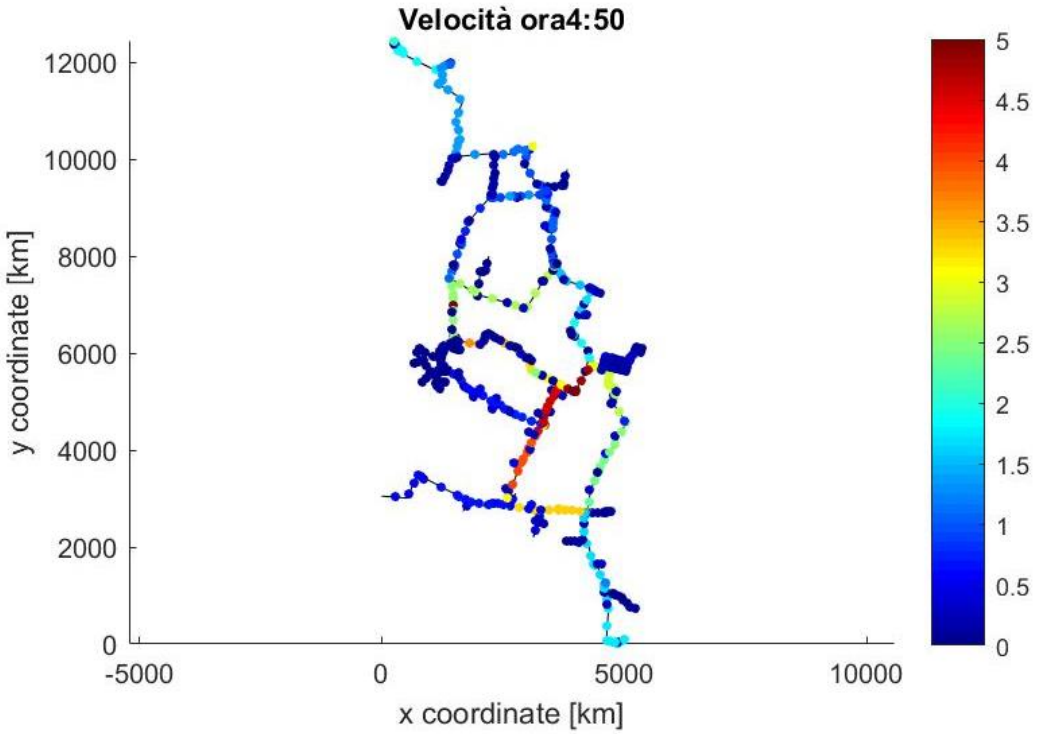

Fig. 6.18, Distribuzione velocità alle 4:50

Nelle ore notturne l'acqua circola con una velocità media abbastanza contenuta, frutto della bassa portata nella rete. I valori massimi si hanno nel ramo centrale in uscita da RP2 dove si superano i 4.5 m/s. Questa velocità è abbastanza elevata ed è sintomo di una portata quasi al limite della capacità delle tubazioni. Nel resto della mappa non sono presenti altre zone critiche.

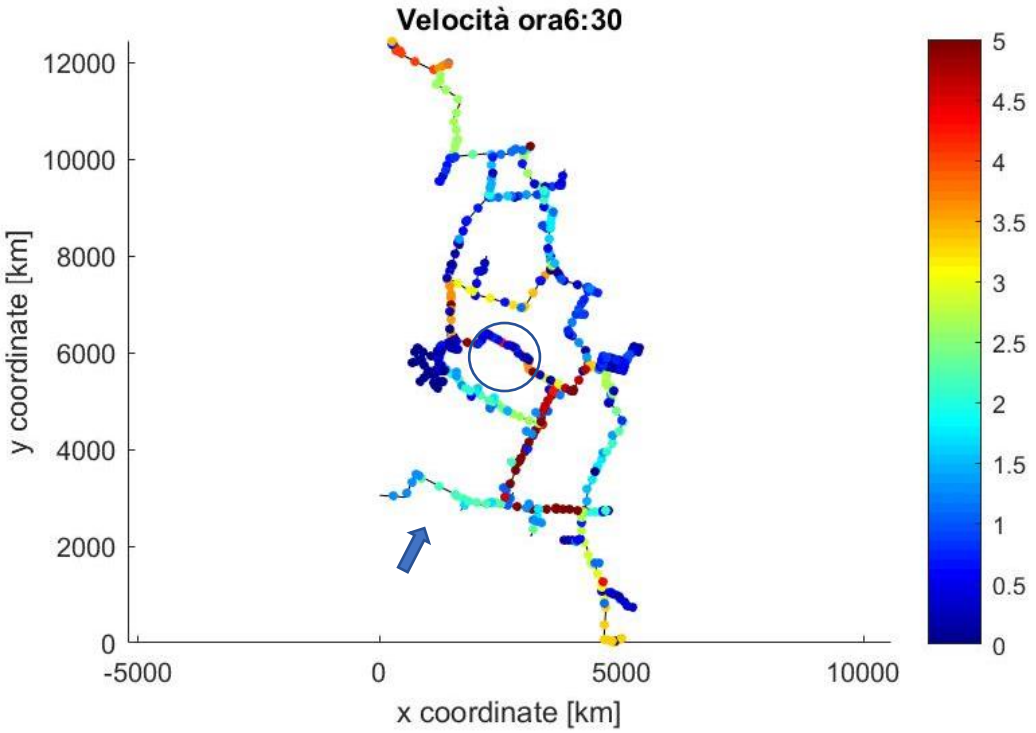

Fig. 6.19, Distribuzione velocità alle 6:30.

Alle 6:30 si ha il picco di portata richiesta e anche le velocità aumentano in tutta la rete, in alcuni punti anche di circa 1-2 m/s.

I valori più alti si hanno nel tratto che unisce RP1 e RP2, nel tratto già evidenziato in precedenza: si superano i 5 m/s, che può essere considerato un valore critico per problemi tecnici e di vibrazioni. Ciò conferma che il ramo in oggetto è il punto critico della rete, dove la portata circolante è al limite della capacità delle tubazioni.
La velocità è abbastanza elevata anche nella dorsale centrale, anche se non circola una portata molto alta: il diametro delle tubature è ridotto per cui anche questi sono tratti critici.

Ci sono infine punti con bassissime velocità anche nel momento di massima richiesta, come i baricentri isolati e il quartiere di Mirafiori Nord. I risultati ottenuti in quest'ultima zona, confermano quanto detto in precedenza in quanto ci sono velocità vicini allo zero, sintomo di una circolazione d'acqua quasi totalmente assente.

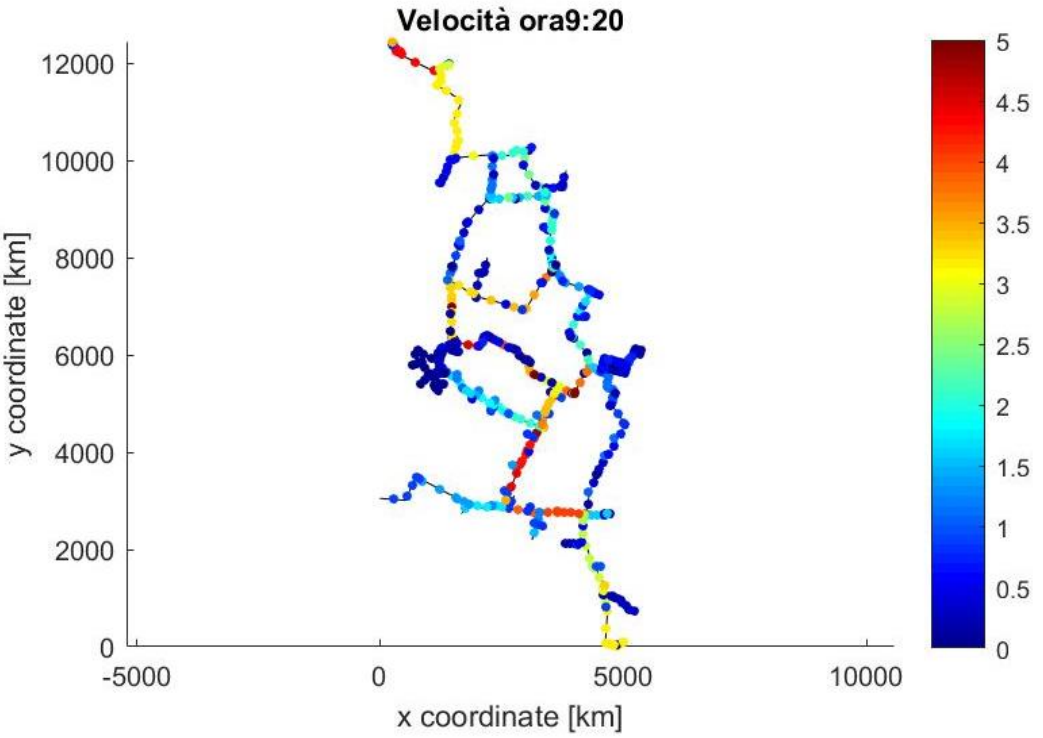

Fig. 6.20 , Distribuzione velocità alle 9:20.

Alle 9:20 le velocità diminuiscono leggermente in tutta la mappa. Le variazioni sono presenti dove varia la portata. Anche nelle zone critiche la velocità si abbassa, non si hanno più valori eccessivi come prima e non si superano i 4 m/s.

Non sono presenti zone dove l'acqua è ferma, tranne il sopra citato quartiere di Mirafiori Nord.

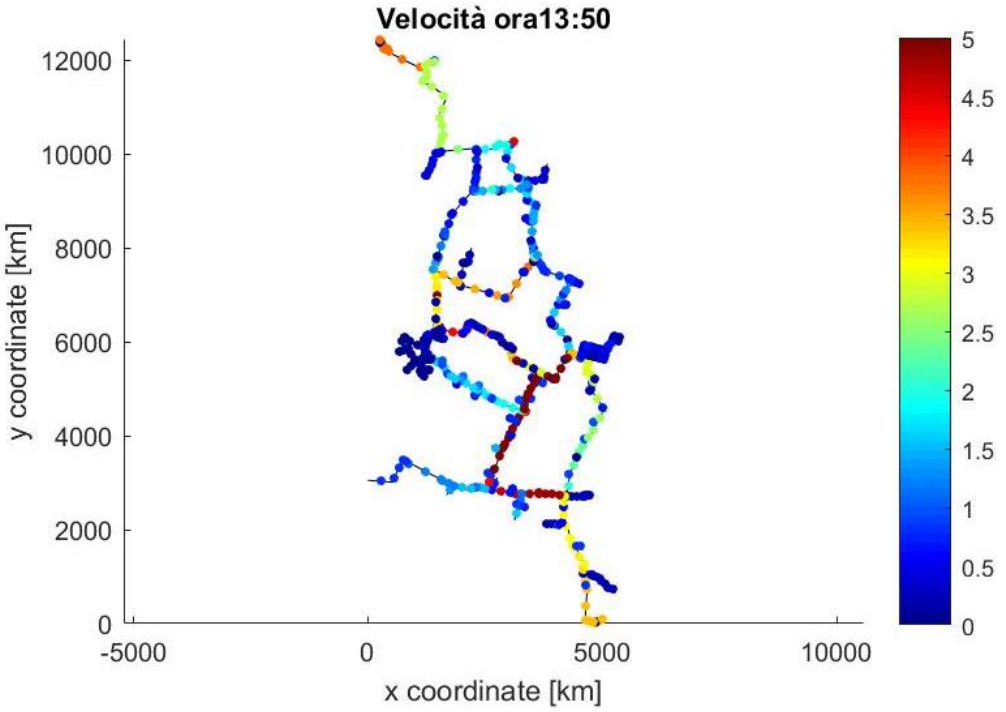

Fig. 6.21, Distribuzione velocità alle 13:50.

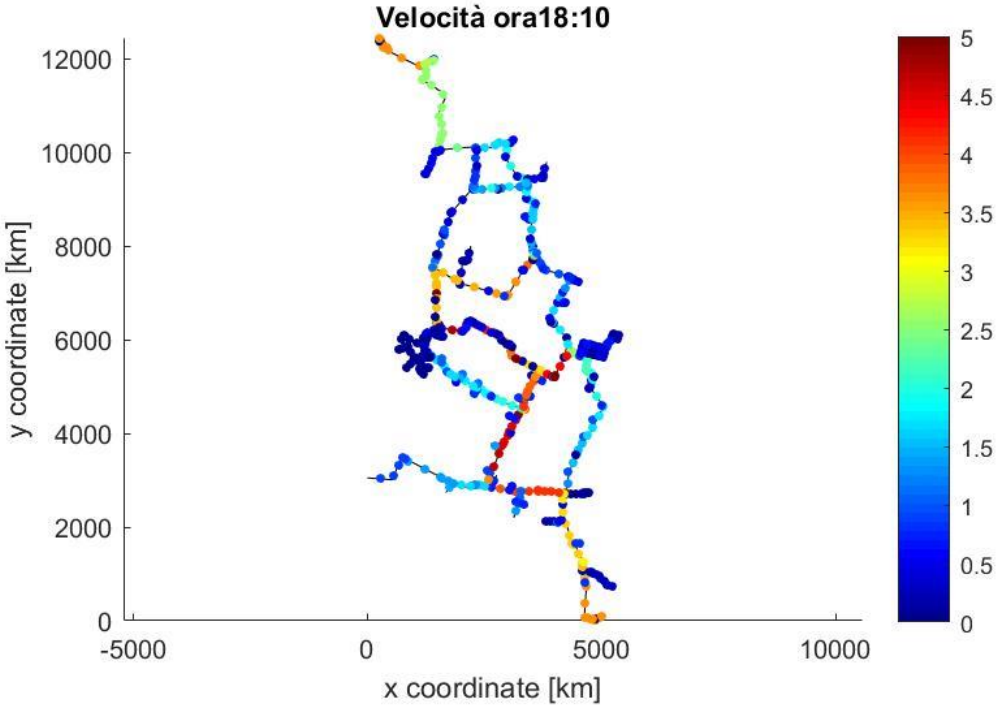

Fig. 6.22 , Distribuzione velocità alle 18:10.

I profili pomeridiani sono molto simili. Le uniche differenze tra i vari orari corrispondono a quelle descritte precedentemente per le portate. In Fig. 6.21 si ha una velocità nel tratto più sollecitato di circa 5 m/s cioè nuovamente un valore elevato.

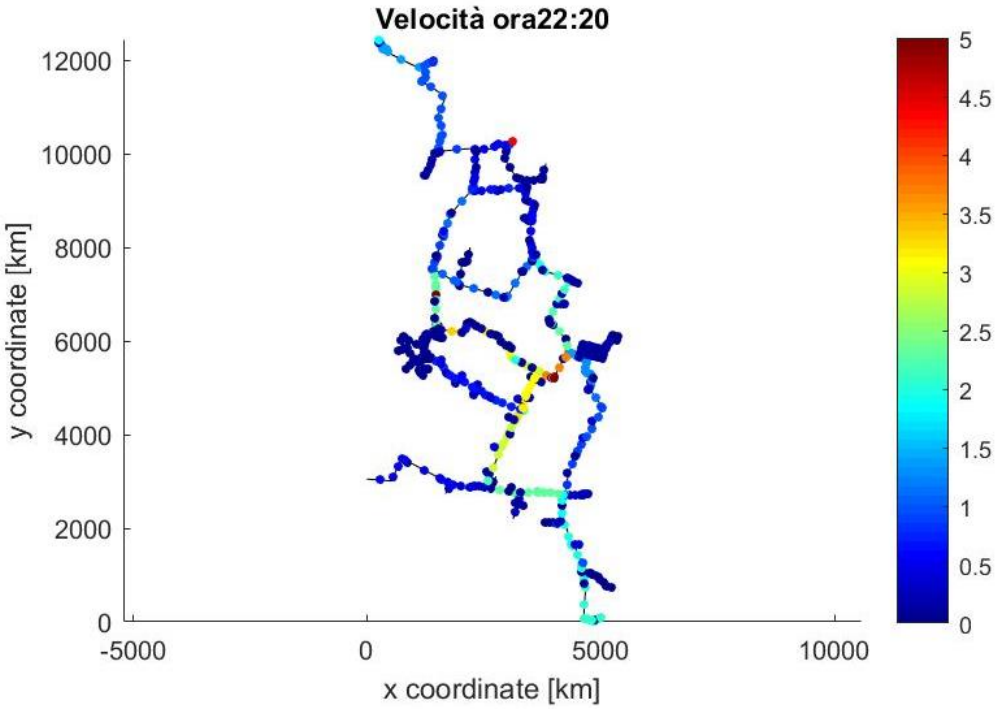

Fig. 6.23, Distribuzione velocità alle 22:20.

In serata si registrano velocità inferiori in tutta la mappa, come descritto per le portate. Non ci sono più tratti critici, ma sono presenti molte più zone dove l'acqua circola con velocità molto basse, intorno a 1 m/s.

In generale queste mappe confermano ciò che emerso nello studio della distribuzione della portata. I commenti fatti precedentemente valgono anche in questo caso.
I rami critici sono praticamente gli stessi elencati nello studio precedente: le velocità sono molto elevate, soprattutto nel picco mattutino, perciò queste tubazioni sono al limite della portata circolante. È necessario un controllo attento di queste zone per evitare problemi in gran parte della città. Inoltre, l'allacciamento di nuove utenze dovrebbe tenere conto delle limitazioni di portata raggiunte in questi tratti. Si nota, però, anche un'altra zona critica che nello studio della portata non era emersa; infatti, nella dorsale centrale (cerchiata in blu in Fig. 6.19), si raggiungono velocità superiori ai 4 m/s. Queste tubazioni, di diametro non elevato, collegano molti baricentri ravvicinati e sono anche loro quasi al limite della propria capacità.

Il ramo evidenziato in Fig. 6.13 presenta, oltre alla portata, anche una velocità molto bassa. Ciò conferma i commenti fatti in precedenza: il ramo è poco sfruttato mentre le tubature potrebbero far circolare molta più acqua.

L'ultima sostanziale differenza rispetto allo studio della portata di nota nel ramo indicato in 6.19 con la freccia blu, in cui non sono presenti portate molto elevate, sono presenti velocità di circa 2 m/s: questa è ottenuta grazie alla stazione di ripompaggio di RP3 che consente all'acqua di arrivare in tutte le utenze.

Per riassumere, nella rete di mandata, non sono presenti anomalie evidenti. Ci sono però tratti con altissime portate e velocità e altri apparentemente non utilizzati al massimo delle loro capacità. Lo studio approfondito di queste zone è fondamentale per la gestione ottimale della rete, per l'inserimento di eventuali accumuli o per l'eventuale allacciamento di nuove utenze. Nel capitolo 7 verranno studiate nel dettaglio queste zone critiche.

6.2.2 Rete Di Ritorno

Si analizza ora cosa accade nella rete di ritorno. L'acqua, in uscita dalle utenze, entra nella rete di trasporto attraverso i vari baricentri. Ci si aspetta una diversa distribuzione della portata e con valori massimi minori, in quanto l'immissione in rete è più distribuita e non concentrata in pochi punti, e inoltre non sono presenti stazioni di ripompaggio che direzionano l'andamento dell'acqua.

Per prima cosa si analizza come varia la portata lungo la giornata.

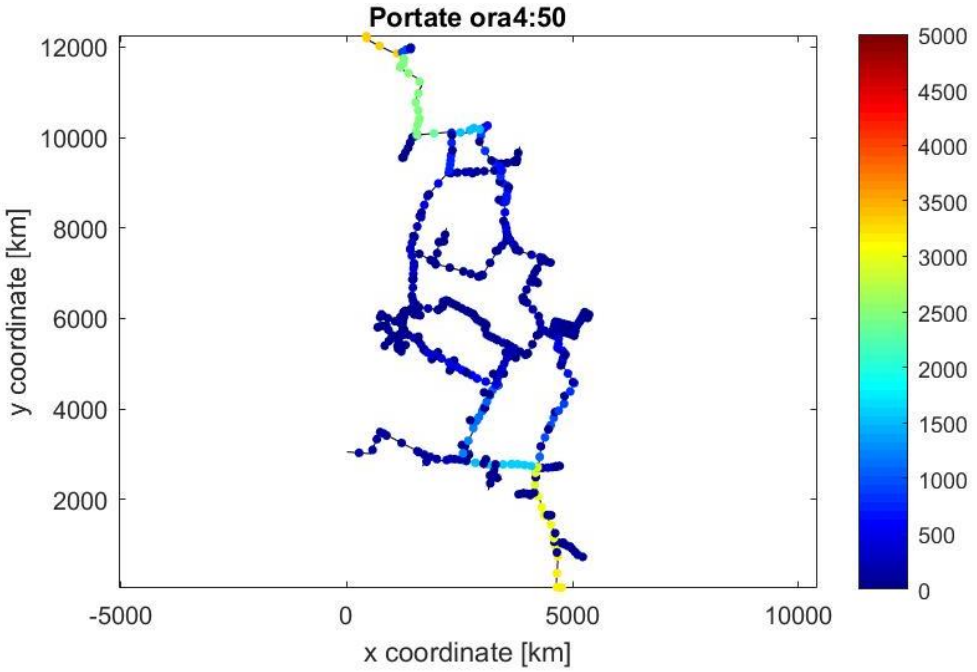

Fig. 6.24, Distribuzione portata rete di ritorno alle 4:50.

In Fig. 6.30 si notano immediatamente valori di portata più bassi rispetto alla rete di mandata nello stesso orario, in Fig. 6.12. Come spiegato prima questo è dovuto al differente settaggio della rete ed all'assenza di ripompaggi.

Le portate sono più basse al centro della rete, poche centinaia di m^3/h, e aumentano man mano che ci si avvicina nelle centrali, dove comunque si hanno valori abbastanza limitati, intorno ai 3000 m^3/h.

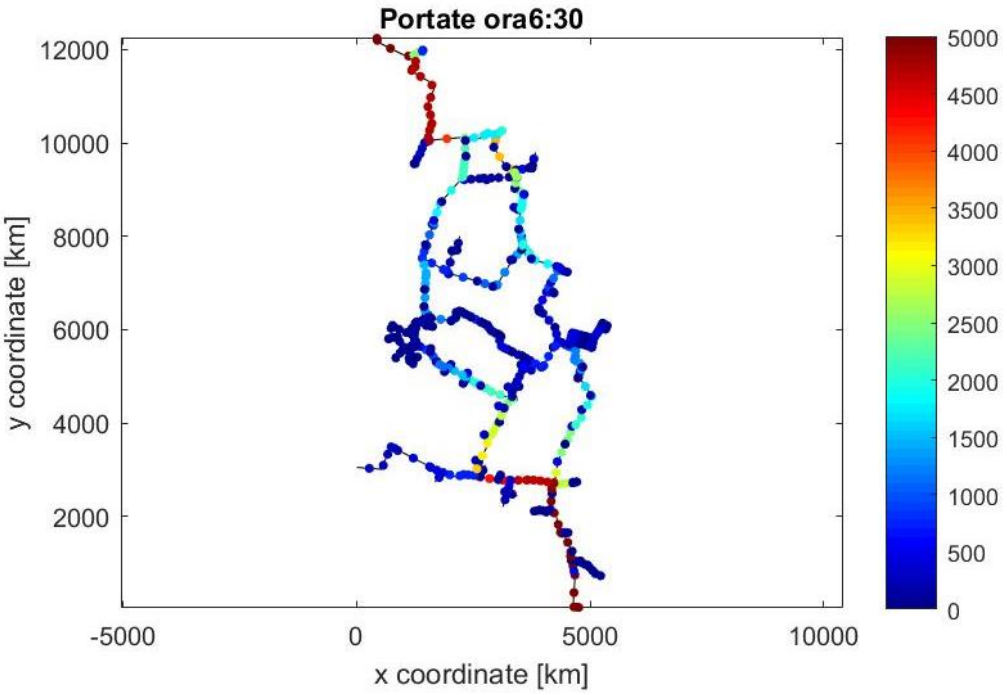

Fig. 6.25, Distribuzione portata rete di ritorno alle 6:30.

Alle 6:30 la richiesta ha il suo punto massimo e infatti le portate aumentano in tutta la rete. I valori massimi si hanno di nuovo in vicinanza delle centrali, ma comunque inferiori rispetto alla rete di mandata; infatti, il valore massimo è intorno ai 5000 m^3/h. Nella rete non sono presenti punti critici poiché le portate sono contenute in ogni zona. La distribuzione risulta come ci si può aspettare, in quanto la quantità d'acqua che circola è inferiore al centro della mappa e cresce man mano che ci si avvicina agli impianti.

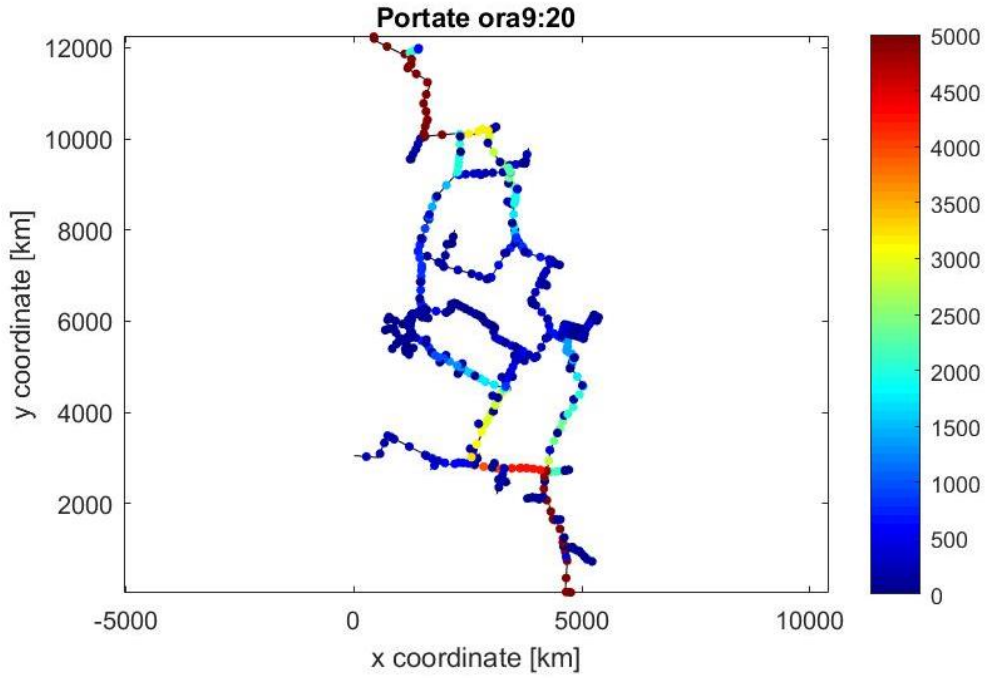

Fig. 6.26, Distribuzione portata rete di ritorno alle 9:20.

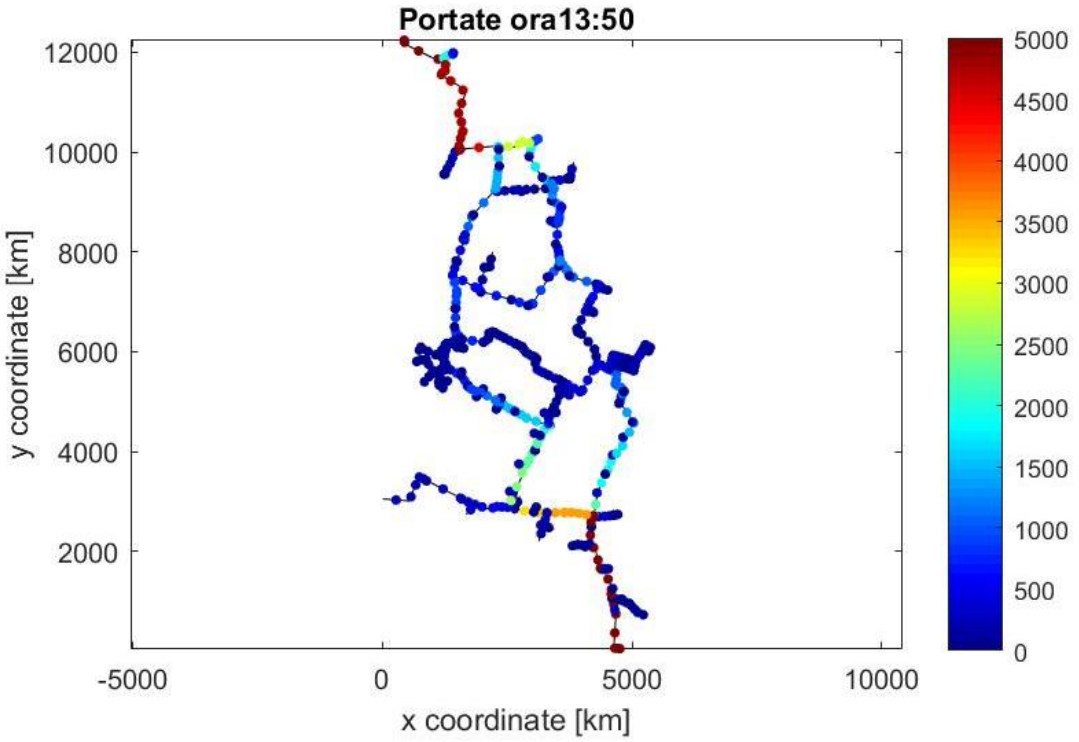

Fig. 6.27, Distribuzione portata rete di ritorno alle 13:50.

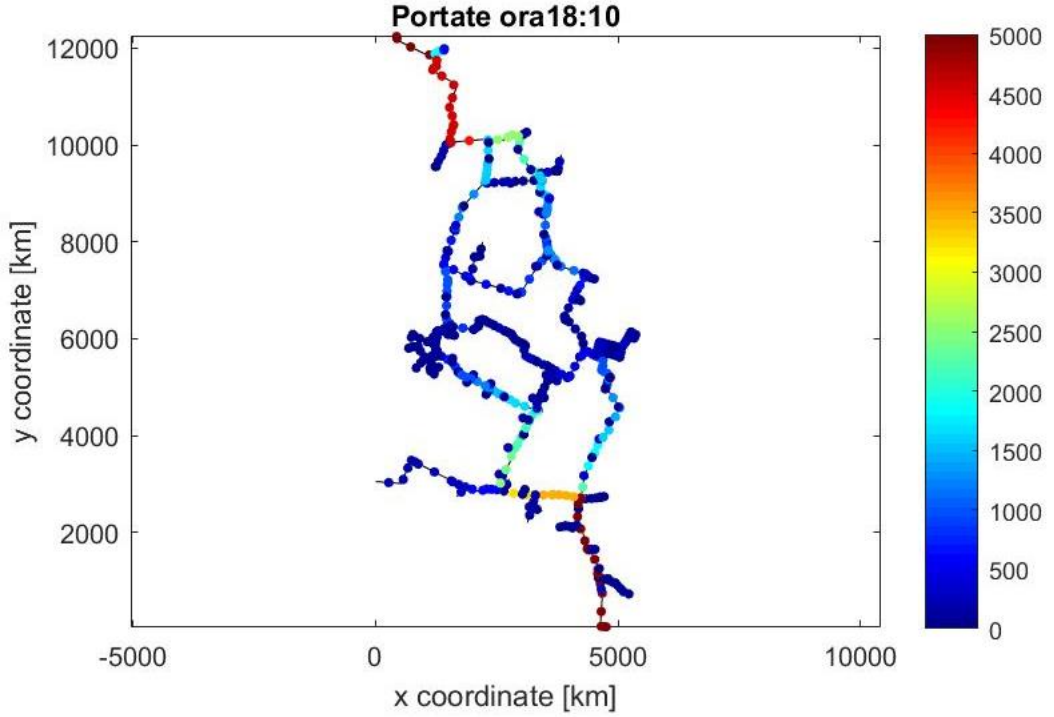

Fig. 6.28, Distribuzione portata rete di ritorno alle 18:10.

Nel corso della giornata la distribuzione resta quasi invariata. Dopo il picco, infatti, si ha una diminuzione della richiesta fino ad arrivare ad un livello stazionario. Nei tre diversi orari non sono presenti differenze notevoli, ma solo lievi cambiamenti localizzati. I valori restano bassi in tutta la mappa e si ha la massima circolazione sempre nelle zone vicine alle centrali.

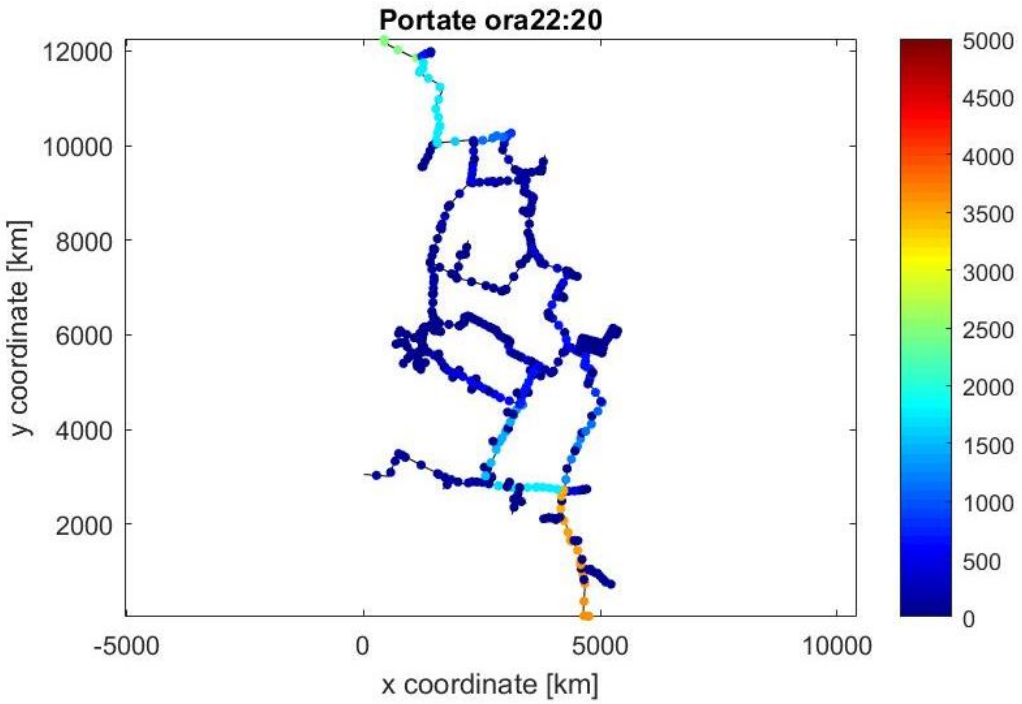

Fig. 6.29, Distribuzione portata rete di ritorno alle 22:20.

A fine giornata si ha un calo di portata in tutta la mappa e si ritorna ai valori bassi tipici del carico notturno.

Lo studio di questa rete ha evidenziato bassi valori di portata in ogni istante, tranne nelle poche ore del picco e nei soli tratti vicini alle centrali. Non sono presenti quindi nessuna zona critica e nessuna anomalia.

Si analizza ora come varia la temperatura della portata di ritorno in centrale: è dipendente dalla potenza scambiata nelle SST, per cui ci si aspetta che ci sia una variazione specialmente durante il picco.

L'analisi dei dati forniti ha prodotto temperature molto basse nelle ore serali e notturne; queste sono ottenute mediando i dati prelevati nelle immediate vicinanze delle varie SST, tenendo conto anche di utenze con bassissima portata. L'uso di queste basse temperature nel modello in questi orari non risulta fedele alla realtà, in quanto sottodimensiona il valore di temperatura. Per questo motivo i risultati riportati si riferiscono solamente dalla prima mattina, nel picco di richiesta, al tardo pomeriggio prima dello spegnimento delle utenze.

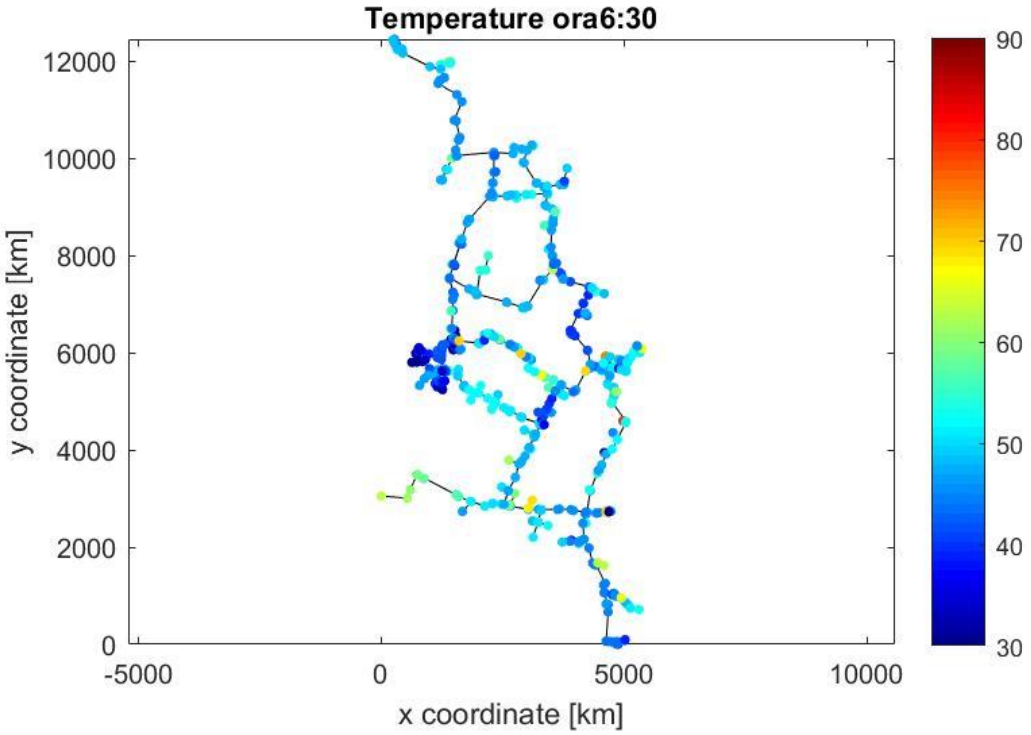

Fig. 6.30, Distribuzione temperatura rete di ritorno alle 6:30

Alle 6:30 le temperature sono relativamente basse in tutta la rete: dopo l'inattività notturna, la potenza scambiata nelle SST in queste ore è massima e così anche il delta tra la temperatura di mandata e ritorno. Si hanno valori di 55-60°C in tutta la mappa, compresi i rami in entrata delle centrali.

Nel quartiere di Mirafiori Nord si possono individuare i tratti non utilizzati in cui l'acqua rimane fredda anche durante il momento di massima richiesta.

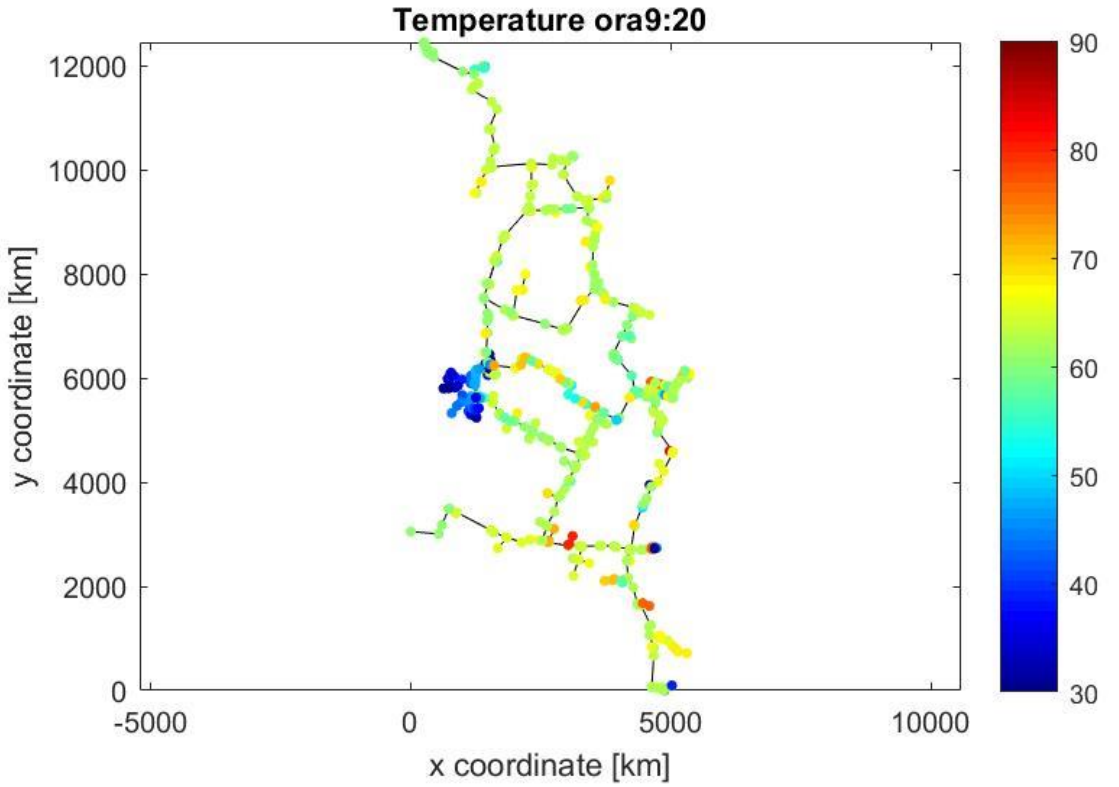

Fig. 6.31, Distribuzione temperatura rete di ritorno alle 9:20.

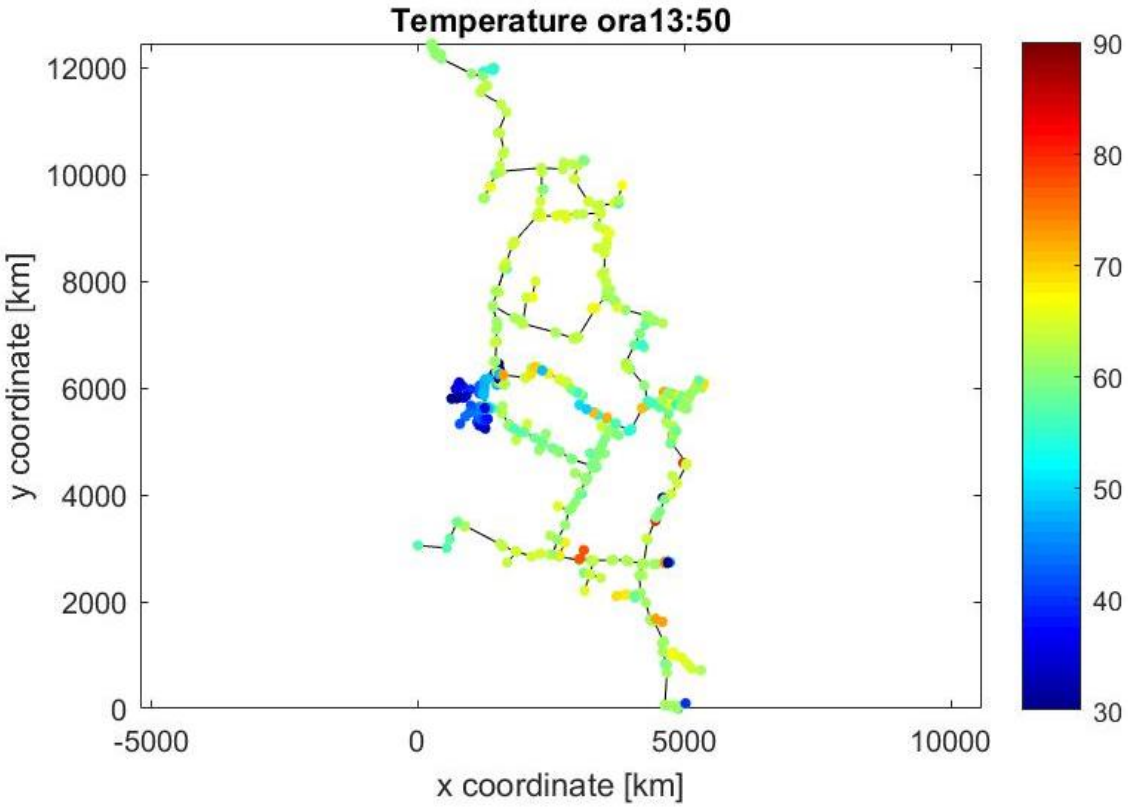

Fig. 6.32, Distribuzione temperatura rete di ritorno alle 13:50.

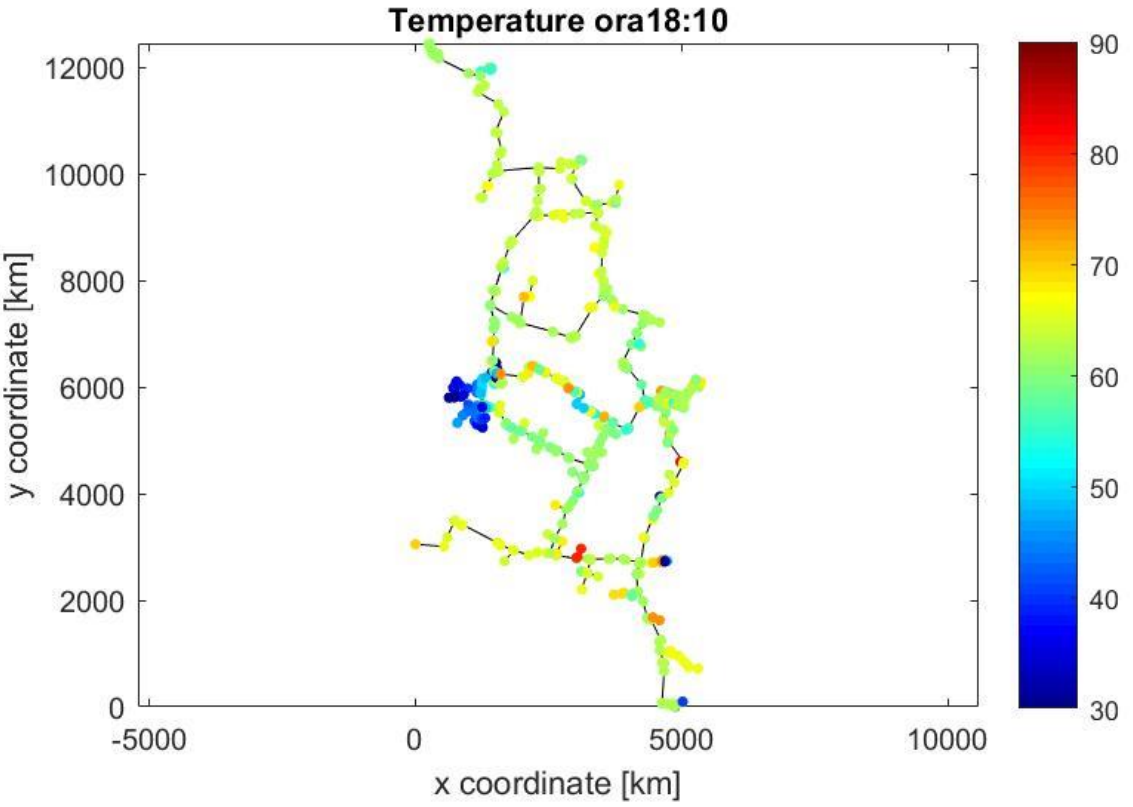

Fig. 6.33, Distribuzione temperatura rete di ritorno alle 18:10.

Dopo il picco le temperature si alzano e arrivano ad un valore stabile sui 65-70°C. Si alzano perché la potenza scambiata è minore, quindi il delta T si riduce, la temperatura di mandata è fissata a 120°C, quindi varia quella di ritorno. Si hanno valori costanti per tutta la giornata con piccole variazioni locali ma non nella temperatura in ingresso alle centrali. Restano molto basse le temperature nel quartiere di Mirafiori Nord.

L'andamento giornaliero rispecchia quello che si poteva aspettare, con un calo durante il picco e una situazione stabile nel resto della giornata. Le temperature sono simili in tutta la mappa, non ci sono zone con picchi molto alti e non sono presenti anomalie. L'unica eccezione è il più citato quartiere di Mirafiori Nord dove le temperature sono sempre basse.

Per completare lo studio della rete di ritorno si riportano gli andamenti di velocità nelle tubazioni di ritorno. Queste sono abbastanza ridotte, perciò non è necessario uno studio approfondito. Verrà riportata la sola distribuzione nel momento di massimo sforzo della rete.

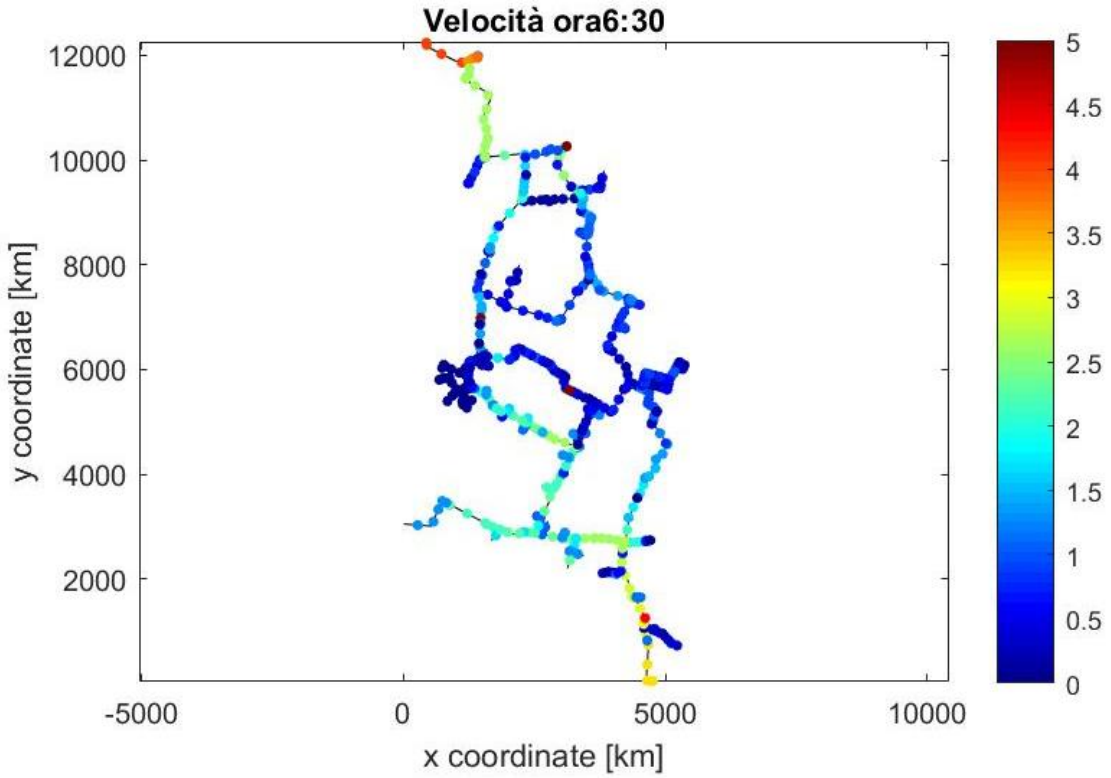

Fig. 6.34, Distribuzione velocità rete di ritorno alle 13:50

Nel picco mattutino le velocità restano molto inferiori rispetto alla rete di mandata. Nella maggior parte della mappa sono presenti valori intorno a 1.5-2 m/s e i valori più alti si hanno in vicinanza delle centrali con valori intorno ai 3.5-4 m/s. In generale non si hanno punti critici a differenza della rete di mandata.

In conclusione, si può dire che nella rete di ritorno lo studio ha riportato i risultati che ci si poteva attendere. Le temperature variano coerentemente nel corso della giornata, le portate sono più basse e di conseguenza anche le velocità. La mancanza dei ripompaggi influisce notevolmente sulla circolazione dell'acqua. Non ci sono punti critici di cui approfondire lo studio e non sono presenti grosse anomalie.

7. Punti Critici

In questa sezione si studierà nel dettaglio il comportamento dei punti critici evidenziati nel capitolo 6.2. Si prenderanno in considerazione solo punti della rete di mandata, in quanto è emerso che nella rete di ritorno ci sono valori minori per ogni grandezza e non sono presenti zone in cui è necessario un approfondimento.

Verranno analizzate la portata e la velocità dell'acqua in ogni istante della giornata, con particolare attenzione ai valori massimi, minimi e la durata in cui si manifestano. Lo studio di queste due grandezze permetterà di capire con più precisione le criticità dei tratti selezionati.

Nella mappa in Fig. 7.1 si evidenziano i tratti presi in esame.

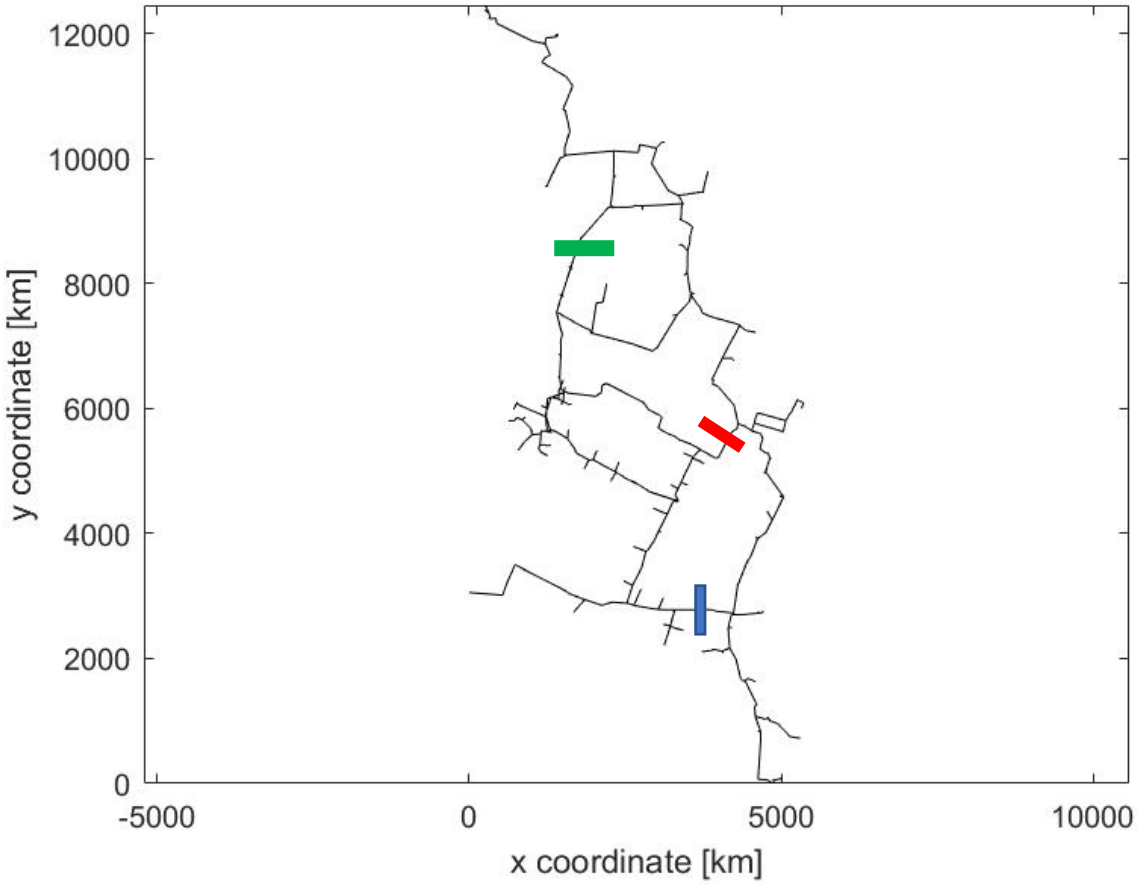

Fig. 7.1, Punti critici

Il primo punto ad essere studiato è quello indicato in Fig. 7.1 con il trattino blu ed è indicato nel modello con il ramo numero 452. Lo studio precedente ha evidenziato come sia il tratto con i picchi più alti di portata e velocità.

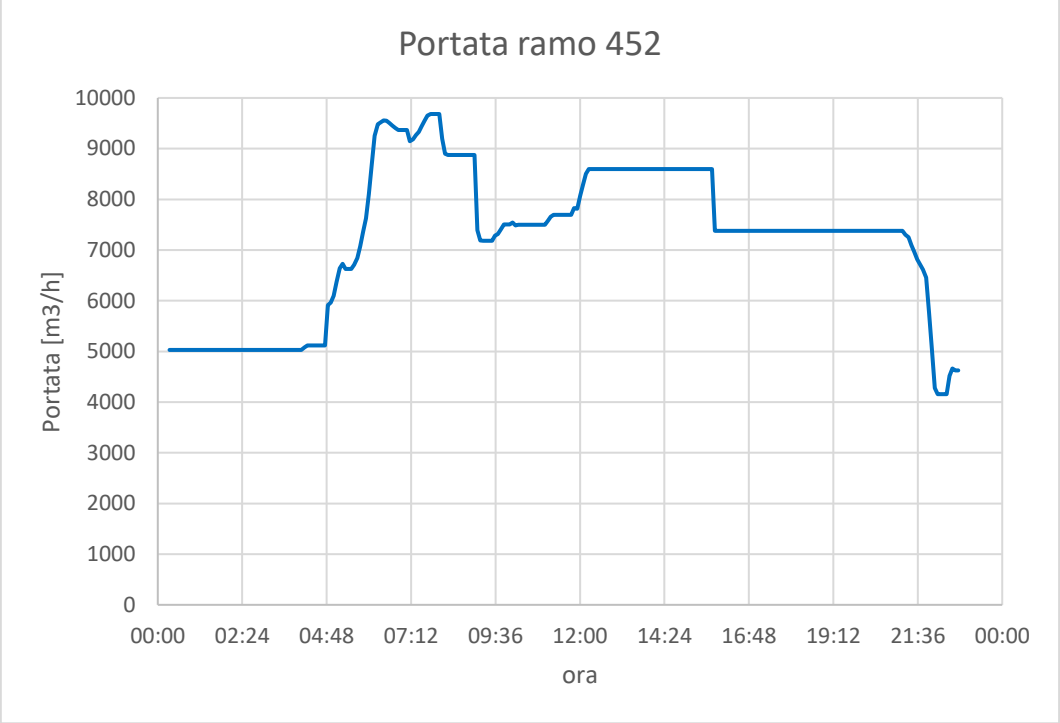

Fig. 7.2, Portata ramo 452

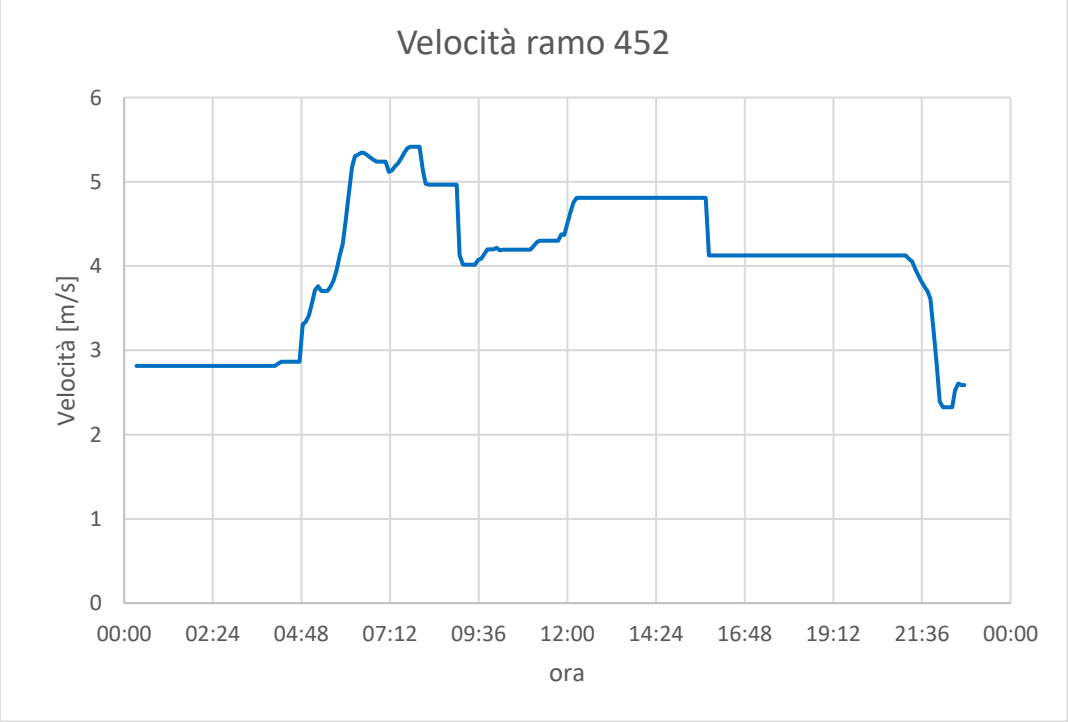

Fig. 7.3, Velocità ramo 452

Il tratto selezionato è uno dei punti nevralgici della rete; è in una zona centrale della mappa, trasporta l'acqua in uscita da Moncalieri e da BIT ed è collocato immediatamente dopo a una stazione di ripompaggio (RP1). Nella gestione della rete è fondamentale che non si verifichino guasti in questa sezione, altrimenti potrebbero esserci problemi per gran parte delle utenze nella parte sud della rete.

I valori massimi, con una portata di oltre 9500 m^3/h e una velocità superiore a 5 m/s, si raggiungono durante il picco e durano un paio d'ore. Nel proseguimento della giornata, si hanno valori più bassi con una media di 8000 m^3/h e velocità intorno ai 4.5 m/s, ma comunque abbastanza elevati. Nelle ore notturne e serali abbiamo un calo notevole con una portata di circa 5000 m^3/h e 3 m/s. La velocità così elevata nelle ore del picco indica che in questi istanti la quantità d'acqua trasportata è vicina a quella massima trasportabile dalle tubazioni. Nel resto della giornata si ha ancora del margine, soprattutto nelle ore notturne.

Si può concludere che, nelle zone servite dal ramo, non è possibile allacciare un numero consistente di nuove utenze poiché si è raggiunto il valore massimo di portata nelle ore di massima richiesta. Una soluzione, vista la grande differenza tra le ore notturne e il picco, potrebbe essere quella di collocare un accumulo a valle del tratto, così da alleggerire il carico nelle ore di punta e incrementare la portata nelle ore notturne dove è meno sfruttato. Così facendo si potrebbe avere valori più o meno simili lungo tutta la giornata, con meno stress alle tubazioni e la possibilità di aumentare la quantità totale d'acqua trasportata.

Il prossimo punto è quello indicato con il trattino rosso in Fig. 7.1. Nel modello è indicato come il ramo 591.

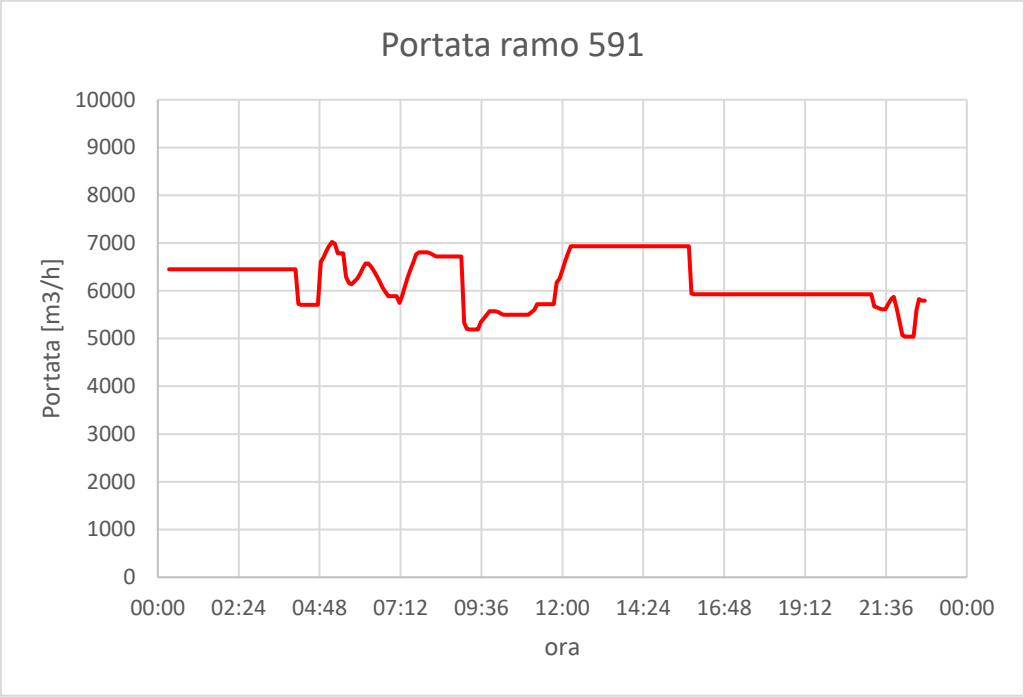

Fig. 7.4, Portata ramo 591

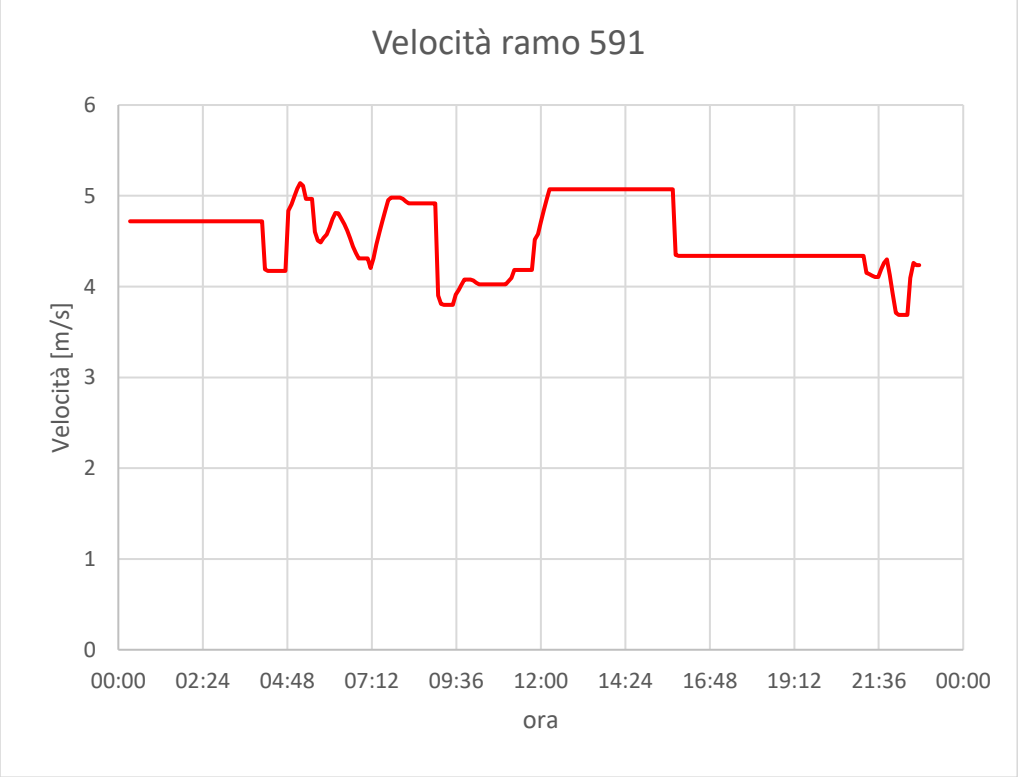

Fig. 7.5, Velocità ramo 591

Il ramo 591 è collocato a Nord del ripompaggio RP2 dove si uniscono due dorsali centrali della rete.

In Fig. 7.4 si nota una portata elevata in tutta la giornata con valori massimi di 7000 m^3/h. Anche se notevolmente inferiore ai picchi massimi del tratto esaminato in precedenza, la situazione è abbastanza critica in quanto la velocità è costantemente superiore ai 4 m/s con picchi intorno ai 5 m/s. Non sono presenti istanti in cui ci sono valori massimi, ma restano praticamente costanti in tutta la giornata.

Anche in questo tratto siamo al limite della portata trasportabile, però a differenza del ramo precedentemente analizzato, non ci sono orari nella giornata in cui ci sono valori bassi. Questo indica che porre un accumulo a valle del tratto risulterebbe inutile per alleggerire il carico delle tubazioni. Se si volesse allacciare nuove utenze nelle vicinanze, non è possibile alimentarle da questo tratto, ma è necessario usare altri rami o un diverso settaggio dei pompaggi nell'anello.

Il terzo punto selezionato è indicato con un trattino verde in Fig. 7.1. Nel modello è indicato come il ramo 129. In questa zona si sono notati valori di portata bassissimi in tutti gli orari studiati.

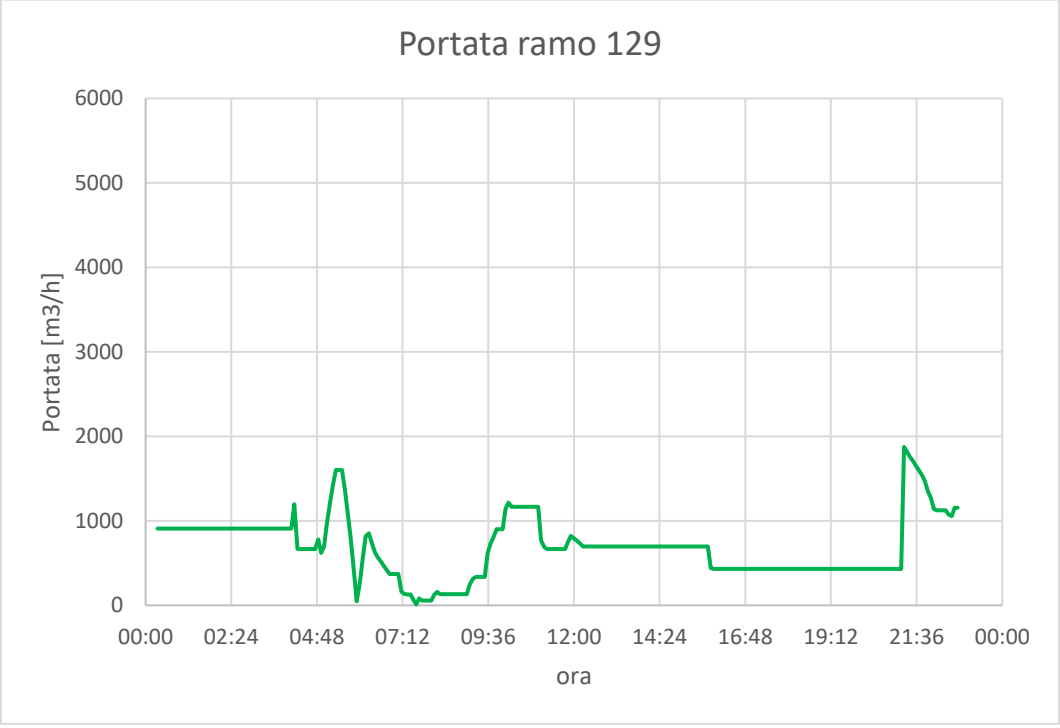

Fig. 7.6, Portata ramo 129

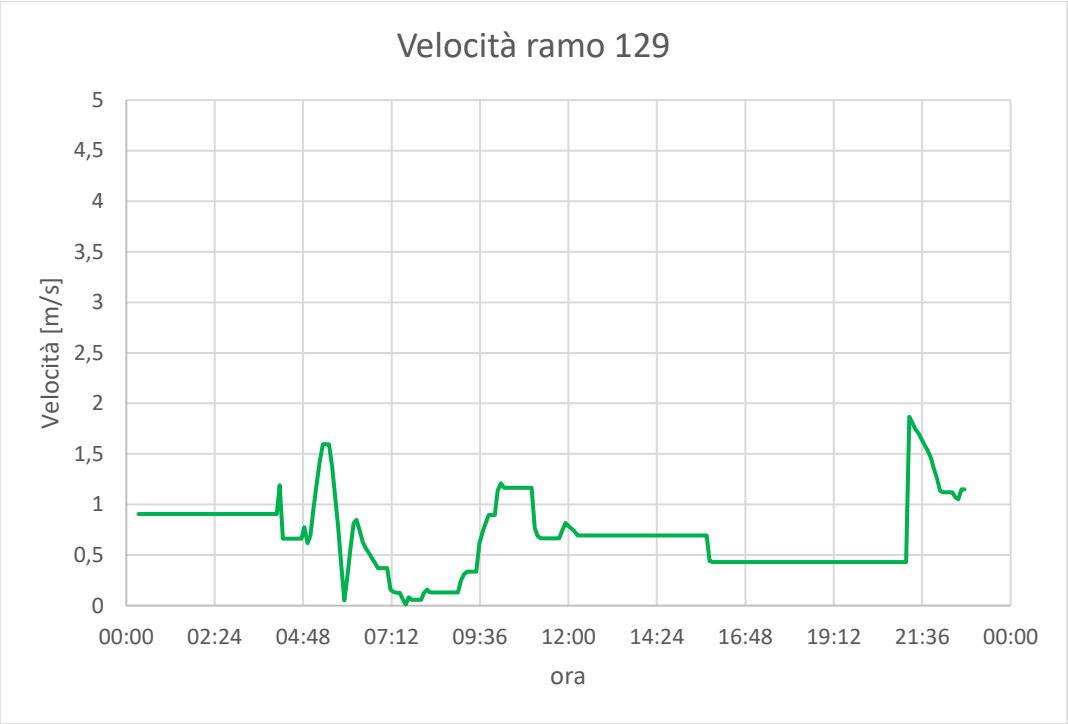

Fig. 7.7, Velocità ramo 129

Questo ramo è posto a nord della mappa, nella dorsale più a ovest. La situazione di questo tratto è opposta ai due casi precedenti; infatti, la portata è veramente bassa in tutta la giornata ed in alcuni orari è addirittura nulla. Di conseguenza la velocità dell'acqua è veramente ridotta, quasi sempre sotto ad 1 m/s.

Questo tratto è parecchio esteso e non viene apparentemente sfruttato. Nella gestione della rete non è un punto critico, ma può essere un ramo interessante per modificare il flusso d'acqua e alleggerire il carico di altre sezioni oppure per espandere la rete allacciando nuove utenze nella zona.

8. Conclusioni

Lo scopo di questo elaborato è stato quello di analizzare come reagisce la rete di teleriscaldamento di Torino di fronte ad un carico molto elevato, proponendo una metodologia per studiare il comportamento della rete di trasporto applicando un modello termo-fluidodinamico.

I dati delle utenze forniti al fine di compiere tale analisi coprono circa il 70% della volumetria allacciata al teleriscaldamento, perciò si possono considerare attendibili i risultati trovati, seppur con qualche imprecisione. Per quanto riguarda le centrali, i dati sono a disposizione per ogni impianto collegato alla rete.

Nella rete di Torino vengono usate tre tecnologie per soddisfare la domanda di energia: cogenerazione, accumuli e caldaie. L'uso di quest'ultime è ridotto e perfino nel giorno più freddo della stagione invernale non va oltre il 25% dell'intera potenza prodotta. Ciò indica una discreta ottimizzazione delle risorse ed un uso intelligente dell'energia primaria. L'uso di accumuli permette di spostare la produzione in orari più convenienti e sfruttarla quando la richiesta è al massimo evitando l'uso massiccio dei sistemi di integrazione. Un maggior numero di m^3 di serbatoi installati permetterebbe di ridurre ulteriormente la percentuale di potenza erogata dalle caldaie.

Il primo risultato dell'elaborato è stato ottenuto confrontando il profilo di produzione di potenza delle centrali con quello di potenza scambiata nelle SST. I MWh prodotti sono 16650, mentre vengono assorbiti 15860 MWh: il 96% dell'energia prodotta raggiunge le utenze, e il 4% viene perso nel trasporto, che corrisponde a una media di circa 30 MWh persi ogni ora, cioè un valore standard e abbastanza contenuto. Le perdite però non sono costanti, ma variano in percentuale durante la giornata; nelle ore notturne raggiungono circa l'8% della potenza prodotta, mentre nelle ore pomeridiane sono quasi nulle, con momenti in cui la potenza assorbita nelle SST è maggiore rispetto a quella erogata. Si tratta di un fenomeno limitato con una differenza che si aggira su poche decine di MWh ed è possibile grazie all'inerzia termica della rete. Nelle ore del picco si ha un andamento particolare: lo scarto tra i due profili è massimo, con una differenza in termini energetici di circa 350 MWh corrispondenti al 15% della produzione, ed è dovuto a treni d'acqua freddi che raggiungono gli impianti. Questo provoca un aumento ulteriore del carico alle centrali che devono sopperire, oltre che alla grandissima richiesta mattutina, a queste anomale perdite nella rete; nel picco mattutino, quindi, viene prodotta più potenza di quella che

effettivamente richiedono le utenze. Uno studio approfondito potrebbe consentire di diminuire la potenza erogata e di conseguenza minimizzare ulteriormente l'uso delle caldaie di integrazione. Una soluzione potrebbe essere quella di preriscaldare le tubature nelle ore notturne o solamente nei momenti precedenti all'accensione delle SST, per evitare che questi treni di acqua più fredda si miscelino con acqua più calda diminuendo notevolmente la temperatura di arrivo in centrale.

La seconda parte dello studio si è concentrata sull'uso del modello fluidodinamico per simulare il comportamento della rete. I risultati hanno mostrato come la portata si distribuisca nelle tubazioni, evidenziando la direzione preferenziale negli anelli, i tratti poco sfruttati e quelli in cui circolano quantità d'acqua molto elevate. Lo studio di quest'ultimi è fondamentale nella gestione della rete.

Non sono state riscontrate anomalie nella mappa, ad eccezione del quartiere di Mirafiori Nord dove sono presenti rami senza nessun baricentro attivo, in cui la circolazione è praticamente nulla.

L'analisi dei punti critici ha stabilito che nella parte sud della rete, specialmente nell'anello in cui sono poste le stazioni di ripompaggio RP1 e RP2, non sarebbe possibile allacciare un numero significativo di ulteriori utenze in quanto, nei tratti esaminati, la portata raggiunge valori massimi al limite della capacità delle tubazioni. Se si avesse la necessità di espandere la rete in quella zona, sorgerebbe l'obbligo di rivedere i settaggi dei ripompaggi per distribuire in modo diverso la portata oppure effettuare modifiche sui diametri delle tubazioni.
La situazione è diversa nella parte nord della rete, dove circola una quantità inferiore d'acqua. In queste zone non è emerso nessun ramo con velocità molto elevate, perciò si può concludere che c'è ancora margine di espansione. In particolare, è stato selezionato un tratto che viene sfruttato in minima parte ed è risultato ideale per allacciare nuove utenze, in quanto attualmente si registrano velocità inferiori ad 1 m/s e portate che non superano i 1000 m^3/h.

Si è ipotizzato infine il luogo ideale per localizzare un nuovo accumulo; posizionarlo a valle del ramo con portate critiche in uscita da RP1, consentirebbe di diminuire la quantità d'acqua trasportata nel momento di massima richiesta, sfruttando periodi di attività minore, come per esempio le ore notturne. Questo permetterebbe di avere valori massimi inferiori, diminuendo notevolmente lo sforzo in queste tubature, e di avere la possibilità di trasportare complessivamente più acqua nel corso della giornata, per poter allacciare nuove utenze a valle

del tratto, senza ricorrere a cambiamenti nella gestione della rete oppure ad un ulteriore ottimizzazione nella produzione.

Elenco delle figure

Fig. 1.1, Schema rete teleriscaldamento 3
Fig. 1.2, Schema cadute pressione nella rete 5
Fig. 1.3, Mappa della rete di Torino. Fonte IREN Energia S.p.A. 6

Fig. 3.1, Esempio dell'uso del binary search 12
Fig. 3.2, Confronto iterazioni necessarie 13

Fig. 4.1 Andamento portata per l'utenza del BCT_412 19
Fig. 4.2, Andamento temperature per l'utenza del BCT_412 20
Fig. 4.3, Andamento potenza per l'utenza del BCT_412 21
Fig. 4.4, Andamento portata per la grande utenza del BCT_15B 22
Fig. 4.5, Andamento temperature per la grande utenza del BCT_15B 22
Fig. 4.6, Andamento di portata per il baricentro 412 24
Fig. 4.7, Andamento delle temperature per il baricentro 412 25
Fig. 4.8, Andamento della potenza per il baricentro 412 26
Fig. 4.9, Andamento portata baricentro 33 27
Fig. 4.10, Andamento temperature baricentro 33 27
Fig. 4.11, Andamento portata baricentro 55 28
Fig. 4.12, Andamento temperature baricentro 55 28
Fig. 4.13, Andamento portata baricentro 15B 29
Fig. 4.14, Andamento temperature baricentro 15B 29
Fig. 4.15, Andamento portate centrali 30
Fig. 4.16, Curva di carico 32
Fig. 4.17, Suddivisione potenza 34
Fig. 4.18, Suddivisione potenza durante il picco 35

Fig. 5.1, Confronto tra portate 37
Fig. 5.2, Confronto tra erogazione, accumuli e utenze 38
Fig. 5.3, Confronto potenza prodotta e richiesta 39

Fig. 6.1, Portata utenza standard 43
Fig. 6.2, Rappresentazione mappa rete di Torino. 43
Fig. 6.3, Distribuzione percentuale dati forniti 44
Fig. 6.4, Distribuzione volumetria baricentri. 45
Fig. 6.5, Portate baricentri ore 4:50 46
Fig. 6.6, portate baricentri ore 6:30 47
Fig. 6.7, Portate baricentri ore 9:20. 47
Fig. 6.8, Portate baricentri ore 13:50. 48
Fig. 6.9, Portate baricentri ore 22:20. 48
Fig. 6.10, Profili differenze di pressione 49
Fig. 6.11, Distribuzione temperatura di mandata 51
Fig. 6.12, Distribuzione portata alle 4:50 52
Fig. 6.13, Distribuzione portata alle 6:30 53
Fig. 6.14, Distribuzione portata alle 9:20 54
Fig. 6.15, Distribuzione portata alle 13:50 55
Fig. 6.16, Distribuzione portata alle 18:10 55
Fig. 6.17, Distribuzione portata alle 22:20 56
Fig. 6.18, Distribuzione velocità alle 4:50 58
Fig. 6.19, Distribuzione velocità alle 6:30. 59
Fig. 6.20 , Distribuzione velocità alle 9:20. 60
Fig. 6.21, Distribuzione velocità alle 13:50. 60
Fig. 6.22 , Distribuzione velocità alle 18:10. 61
Fig. 6.23, Distribuzione velocità alle 22:20. 61
Fig. 6.24, Distribuzione portata rete di ritorno alle 4:50. 63
Fig. 6.25, Distribuzione portata rete di ritorno alle 6:30. 64
Fig. 6.26, Distribuzione portata rete di ritorno alle 9:20. 64
Fig. 6.27, Distribuzione portata rete di ritorno alle 13:50. 65
Fig. 6.28, Distribuzione portata rete di ritorno alle 18:10. 65
Fig. 6.29, Distribuzione portata rete di ritorno alle 22:20. 66
Fig. 6.30, Distribuzione temperatura rete di ritorno alle 6:30 67
Fig. 6.31, Distribuzione temperatura rete di ritorno alle 9:20. 68
Fig. 6.32, Distribuzione temperatura rete di ritorno alle 13:50. 68
Fig. 6.33, Distribuzione temperatura rete di ritorno alle 18:10. 69
Fig. 6.34, Distribuzione velocità rete di ritorno alle 13:50 70

Fig. 7.1, Punti critici 71
Fig. 7.2, Portata ramo 452 72
Fig. 7.3, Velocità ramo 452 72
Fig. 7.4, Portata ramo 591 74
Fig. 7.5, Velocità ramo 591 74
Fig. 7.6, Portata ramo 129 75
Fig. 7.7, Velocità ramo 129 76

Bibliografia e sitografia

[1] https://www.engie.it/teleriscaldamento

[2] IREN Energia, «1982-2012: 30 Anni di Teleriscaldamento a Torino».

[3] https://www.gruppoiren.it/distribuzione-calore

[4]http://www.irenenergia.it/ChiSiamo/Attivita/Teleriscaldamento/Dove_Siamo/Impianti_Torino.html

[5] Elisa G, et al., Thermo-fluid dynamic model of large district heating networks for the analysis of primary energy savings, Energy (2017), http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.177

[6] https://www.tutorialspoint.com/data_structures_algorithms/binary_search_algorithm.html

[7] https://devopedia.org/binary-search

Ringraziamenti

Desidero ringraziare il prof. Vittorio Verda e l'ing Elisa Guelpa, relatori di questa tesi, per la disponibilità avuta nel corso di questi mesi, aiutandomi ogni volta che ne ho avuto bisogno.

Ringrazio l'ing. Guido Noce, la dott.ssa Luisa Debernardi e l'ing Sonia Bertocci che mi hanno accolto con grande gentilezza nei loro uffici e sono stati sempre disponibili a darmi tutte le informazioni necessarie al mio studio senza le quali non lo avrei mai potuto portare a termine.

Un ringraziamento speciale alla mia famiglia, in particolare a mia madre e mio padre: è grazie al loro sostegno e al loro incoraggiamento se oggi sono riuscito a raggiungere questo traguardo.

Voglio ringraziare Serena, la persona che più mi è stata vicina nella mia vita, per la grande pazienza con la quale mi ha sopportato nei momenti più impegnativi del mio percorso e senza la quale non avrei avuto la forza necessaria per continuarlo.

Ringrazio, infine, i miei amici e i miei compagni di università che mi hanno accompagnato ogni mattina in classe, hanno alleggerito e reso indimenticabili con la loro compagnia questi cinque anni.