



## Ricerca di Sistema elettrico

# Analisi di una rete di teleriscaldamento reale e progettazione di una sottostazione di scambio termico bidirezionale per reti di teleriscaldamento

M. A. Ancona, L. Branchini, F. Melino



ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA  
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

ANALISI DI UNA RETE DI TELERISCALDAMENTO REALE E PROGETTAZIONE DI UNA SOTTOSTAZIONE DI SCAMBIO TERMICO BIDIREZIONALE PER RETI DI TELERISCALDAMENTO

M. A. Ancona, L. Branchini, F. Melino (Dipartimento di Ingegneria Industriale – DIN – Università di Bologna)

Settembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

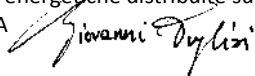
Piano Annuale di Realizzazione 2017

Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici

Progetto: D1 - Tecnologie per costruire gli edifici del futuro

Obiettivo: Ottimizzazione delle prestazioni di reti energetiche distribuite su scala distrettuale o territoriale

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA

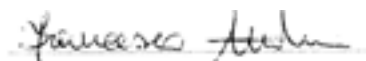


Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Analisi di una rete di teleriscaldamento reale e progettazione di una sottostazione di scambio termico bidirezionale per reti di teleriscaldamento"

Responsabile scientifico ENEA: Ing. Biagio Di Pietra



Responsabile scientifico DIN – Università di Bologna: Ing. Francesco Melino





# Indice

|   |           |
|---|-----------|
| <b>SOMMARIO .....</b>   | <b>5</b>  |
| <b>1 INTRODUZIONE .....</b>   | <b>6</b>  |
| <b>2 DESCRIZIONE RETE DI TELERISCALDAMENTO DI FIUMICINO.....</b>                                      | <b>8</b>  |
| <b>3 MODELLO RETE .....</b>   | <b>13</b> |
| <b>4 VALIDAZIONE .....</b>  | <b>25</b> |
| <b>5 ANALISI SULLA TEMPERATURA DI MANDATA DELLA RETE .....</b>  | <b>30</b> |
| <b>6 RETE MODIFICATA.....</b>   | <b>32</b> |
| <b>7 ANALISI DATI DICEMBRE 2017.....</b>  | <b>35</b> |
| <b>8 SIMULAZIONI .....</b>  | <b>40</b> |
| 8.1 POSSIBILI SCENARI OTTIMIZZATI .....   | 43        |
| <b>9 ANALISI DEL FUNZIONAMENTO DELLA RETE DA FEBBRAIO AD APRILE 2018 .....</b>                        | <b>46</b> |
| <b>10 PROGETTAZIONE DI UNA SOTTOSTAZIONE BIDIREZIONALE PER RETI DI TELERISCALDAMENTO ATTIVE .....</b> | <b>56</b> |
| 10.1 CONDIZIONI AL CONTORNO .....   | 57        |
| <b>11 DIMENSIONAMENTO DELLA SOTTOSTAZIONE.....</b>  | <b>58</b> |
| 11.1 MODELLO DI CALCOLO PER GLI SCAMBIATORI.....  | 59        |
| 11.2 SCAMBIATORE S1 .....   | 62        |
| 11.3 SCAMBIATORE S2 .....   | 65        |
| 11.4 SCAMBIATORE S3 .....   | 68        |
| <b>12 LOGICA DI CONTROLLO .....</b>   | <b>72</b> |
| 12.1 GRANDEZZE DI SET-UP .....  | 74        |
| 12.2 GRANDEZZE MISURATE E SENSORI DI MISURA.....  | 74        |
| 12.3 COMPONENTI DI CONTROLLO .....  | 74        |
| 12.4 COMPONENTI IDRAULICI.....  | 75        |
| 12.5 CONTROLLO DELLE VALVOLE.....   | 75        |
| 12.5.1 Valvola C1' .....  | 75        |
| 12.5.2 Valvola C1 .....   | 75        |
| 12.5.3 Valvola C4.....  | 76        |
| 12.5.4 Valvola C2' .....  | 76        |
| 12.5.5 Valvola C2.....  | 76        |
| 12.5.6 Valvola C3.....  | 76        |
| 12.5.7 Pompa P.....   | 76        |
| <b>13 LAYOUT DELLA SOTTOSTAZIONE .....</b>  | <b>77</b> |
| <b>14 CONCLUSIONI.....</b>  | <b>83</b> |
| <b>15 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....</b>   | <b>87</b> |
| <b>16 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI .....</b>   | <b>88</b> |
| <b>17 INDICE DELLE FIGURE .....</b>   | <b>89</b> |
| <b>18 INDICE DELLE TABELLE.....</b>   | <b>91</b> |
| <b>19 APPENDICE A.....</b>  | <b>92</b> |
| <b>20 APPENDICE B.....</b>  | <b>98</b> |

## Sommario

Il presente documento è il risultato della collaborazione tra l'ENEA e il Dipartimento di Ingegneria Industriale (DIN) dell'Università di Bologna, finalizzata all'*Analisi di una rete di teleriscaldamento reale ed alla progettazione di una sottostazione di scambio termico bidirezionale per reti di teleriscaldamento attive*. Tale collaborazione nasce all'interno dell'Accordo di Programma che il Ministero dello Sviluppo Economico ed ENEA hanno stipulato nel 2018 finalizzato all'esecuzione delle linee di attività del Piano Triennale della Ricerca e Sviluppo di Interesse Generale per il Sistema Elettrico Nazionale.

L'accordo di collaborazione tra l'ENEA e il Dipartimento di Ingegneria Industriale (DIN) dell'Università di Bologna si riferisce al Piano Annuale di Realizzazione 2017, per quanto attiene all'Area "*Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici*"; nello specifico, si riferisce al progetto "*D1 - Tecnologie per costruire gli edifici del futuro*".

Più in dettaglio, lo studio svolto è suddiviso in due parti, così come di seguito illustrato.

### **PARTE I – Analisi della rete dell'aeroporto - Leonardo da Vinci di Fiumicino**

Tale sezione è dedicata allo studio, mediante il software IHENA 2.0 della rete di teleriscaldamento dell'aeroporto Leonardo da Vinci di Fiumicino. Più in dettaglio, dal Capitolo 2 al Capitolo 9 verranno illustrate la metodologia di realizzazione del modello di calcolo della rete, le ipotesi di studio e le simulazioni svolte. Tali simulazioni riguardano sia l'attuale funzionamento della rete di teleriscaldamento in oggetto che diverse ipotesi di gestione ottimizzata individuate alla luce delle criticità riscontrate.

### **PARTE II – Progettazione di una sottostazione di scambio termico attivo**

La seconda sezione del documento è invece dedicata alla progettazione di una sottostazione per reti di teleriscaldamento attive. Più in dettaglio, dal Capitolo 10 al Capitolo 13 sono descritte le ipotesi progettuali ed i criteri di dimensionamento sulla base delle condizioni al contorno in cui la sottostazione opererà. Inoltre, verrà presentata la logica di controllo che permetterà – congiuntamente con il sistema di misura progettato – la completa automazione della sottostazione.

## 1 Introduzione

Il presente documento è il risultato della collaborazione tra l'ENEA e il Dipartimento di Ingegneria Industriale (DIN) dell'Università di Bologna, finalizzata all'*Analisi di una rete di teleriscaldamento reale ed alla progettazione di una sottostazione di scambio termico bidirezionale per reti di teleriscaldamento attive*. Tale collaborazione nasce all'interno dell'Accordo di Programma che il Ministero dello Sviluppo Economico ed ENEA hanno stipulato nel 2018 finalizzato all'esecuzione delle linee di attività del Piano Triennale della Ricerca e Sviluppo di Interesse Generale per il Sistema Elettrico Nazionale.

L'accordo di collaborazione tra l'ENEA e il Dipartimento di Ingegneria Industriale (DIN) dell'Università di Bologna si riferisce al Piano Annuale di Realizzazione 2017, per quanto attiene all'Area "*Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici*"; nello specifico, si riferisce al progetto "*D1 - Tecnologie per costruire gli edifici del futuro*".

Proseguendo lo studio delle precedenti annualità, i temi sviluppati nell'ambito dell'accordo di collaborazione tra ENEA e il Dipartimento DIN dell'Università di Bologna, riguardano le reti di teleriscaldamento, sia in assetto tradizionale che di tipo smart.

Lo studio presentato rientra nell'ambito della ricerca di soluzioni finalizzate al conseguimento di una maggiore efficienza energetica nonché di una riduzione dei costi di produzione.

In questo ambito, la ricerca condotta è orientata verso la razionalizzazione delle risorse energetiche ed in particolare affronta metodi e strategie di *upgrading* dei sistemi attualmente presenti con particolare attenzione alle reti termiche di trasporto dell'energia.

A tal proposito, si ritiene utile evidenziare che una delle strategie più efficaci per la riduzione dei consumi di energia primaria e/o per l'incremento delle efficienze di conversione è quella di operare sui sistemi di produzione e distribuzione dell'energia attualmente in funzione, implementando nuove strategie di gestione ottimizzata. Tali strategie permettono – declinate nell'ambito delle reti di teleriscaldamento – di ridurre le dispersioni di calore e pertanto il fabbisogno di energia primaria in centrale, così come il consumo di energia elettrica per le operazioni di pompaggio.

Un secondo approccio – completamente integrabile con il precedente – è la possibilità di convertire reti di teleriscaldamento esistenti in reti attive (smart) al fine di favorire la diffusione di sistemi di generazione distribuita, anche basati su sorgenti rinnovabili.

La diffusione della generazione distribuita è in linea con l'obiettivo di porre le basi per la creazione di gruppi di utenze medio/piccoli virtualmente ad "isola".

Lo studio riportato nel presente documento, inoltre, è in linea con le direttive dell'Unione Europea contenute nel Programma Europeo Horizon 2020, nonché con il concetto di smart city che riguarda la conciliazione e l'armonizzazione di obiettivi quali lo sviluppo di infrastrutture, la sostenibilità ambientale e l'oculato sfruttamento delle risorse naturali allo scopo di incrementare il benessere dei cittadini migliorandone la qualità di vita.

# PARTE I

## 2 Descrizione rete di teleriscaldamento di Fiumicino

La rete di teleriscaldamento in esame, a servizio di diversi utilizzatori presso il sito aeroportuale Leonardo da Vinci di Fiumicino (RM) e schematizzata in **Figura 1**, utilizza acqua surriscaldata come fluido termovettore ed è costituita dai seguenti elementi principali:

- centrale termica (PG 314) e collettori di distribuzione;
- centrale di cogenerazione Fiumicino Energia;
- tubazioni di distribuzione;
- camere di ispezione;
- derivazioni secondarie;
- sottostazioni di scambio termico;
- centrali ad assorbimento per la produzione di acqua refrigerata.

Il progetto della rete, risalente alla metà degli anni '90, prevedeva la realizzazione di una rete di distribuzione costituita da due anelli: un *anello stagionale* ed un *anello annuale*. L'anello stagionale presenta tubazioni di diametro nominale DN 350 e viene utilizzato per servire utenze termiche durante la stagione invernale, caratterizzate da sistemi di distribuzione quali fancoils, radiatori, batterie di preriscaldamento delle UTA (Unità Trattamento Aria), etc.; d'altra parte, l'anello annuale presenta tubazioni con diametro nominale DN 200 ed è preposto al soddisfacimento del fabbisogno termico delle batterie di post-riscaldamento delle UTA e di acqua calda sanitaria. Entrambi gli anelli hanno diametro costante e vengono alimentati da un collettore principale (denominato collettore principale di mandata) situato all'interno della centrale termica PG314. Le reti di distribuzione si sviluppano all'interno di apposite gallerie tecniche, che presentano lungo il proprio percorso alcune camere di ispezione (si veda **Figura 2**) a partire dalle quali vengono derivate le alimentazioni per le singole sottostazioni di scambio termico presenti all'interno degli edifici (**Figura 3**). Ciascuna sottostazione è costituita da scambiatori di calore prevalentemente a fascio tubiero, ai fini della produzione di acqua calda a bassa temperatura per il riscaldamento ambientale (tipicamente 75-80 °C) e della produzione di acqua calda sanitaria o vapore ad uso alimentare.

Si riportano di seguito i principali dati di progetto:

- salto termico di progetto: 60 °C (passando da una temperatura sulla mandata pari a 150 °C ad una temperatura di 90 °C sul ritorno della rete);
- potenza complessivamente installata presso le sottostazioni: circa 80 MW<sub>th</sub>;
- potenza totale dei sistemi di generazione: circa 85 MW<sub>th</sub>;
- potenzialità di pompaggio: 5 gruppi di pompaggio ciascuno in grado di elaborare in condizioni nominali una portata pari a 300 m<sup>3</sup>/h.

In base ai dati di esercizio disponibili [1], tuttavia, si registra un forte sottoutilizzo della rete in oggetto e dei sistemi di produzione installati, che risultano pertanto fortemente sovradimensionati rispetto ai fabbisogni termici delle utenze allacciate. Le condizioni effettive di esercizio, infatti, risultano essere:

- salto termico di esercizio: 45-50 °C (passando da una temperatura sulla mandata pari a 145 °C ad una temperatura di 95 °C sul ritorno della rete);
- potenza utilizzata: un gruppo termico da 19 MW più circa il 50 % di un gruppo da 9 MW nelle condizioni di picco invernale;
- portata circolante: un gruppo di pompaggio a portata nominale (300 m<sup>3</sup>/h) più un secondo gruppo di pompaggio a portata ridotta (circa pari a 100 m<sup>3</sup>/h) per un totale di circa 400 m<sup>3</sup>/h nelle condizioni di picco invernale;
- salto di pressione tra i collettori di mandata e di ritorno della rete pari a 1.4-1.5 bar.

Il progetto della rete, inoltre, non prevedeva dispositivi per la taratura o il bilanciamento delle portate alle singole sottostazioni di scambio termico, la cui regolazione era effettuata tramite valvole a due vie sugli scambiatori della sottocentrale. Di conseguenza, la gestione prevista da progetto era della tipologia a

portata variabile sugli anelli, mantenendo – in corrispondenza della centrale – un salto di pressione costante tra mandata e ritorno della rete. Non erano infine presenti, poiché non necessari per il corretto funzionamento della rete, dispositivi di controllo della temperatura di ritorno dell'acqua surriscaldata in corrispondenza degli scambiatori acqua surriscaldata/vapore situati presso i sistemi di produzione.

La rete di distribuzione non ha subito particolari modifiche nel corso degli anni, pertanto l'attuale percorso delle tubazioni e la struttura degli anelli risultano essere sostanzialmente quelli originari; l'unica variazione registrata consiste nel fatto che, per esigenze di gestione, alcune utenze tipicamente stagionali vengono alimentate dalla rete annuale o viceversa. Numero e caratteristiche delle sottostazioni, invece, nel tempo hanno subito qualche modifica a seguito di ristrutturazione e/o ampliamento di alcuni edifici. In particolare, la volumetria connessa alla rete risulta aumentata a seguito della costruzione del Terminal 1 (anno 2000), che viene alimentato dalla sottocentrale tecnica PG344. Inoltre, una buona parte degli edifici principali, in un primo momento destinati ad attività aeroportuali e di servizio, è stata progressivamente riconvertita in spazi commerciali. La modifica di destinazione d'uso, unitamente all'aumento del numero di passeggeri ed operatori, ha comportato un notevole incremento dei carichi endogeni con conseguente riduzione del fabbisogno termico in regime invernale e, viceversa, aumento dei fabbisogni elettrici e per il raffrescamento in regime estivo.

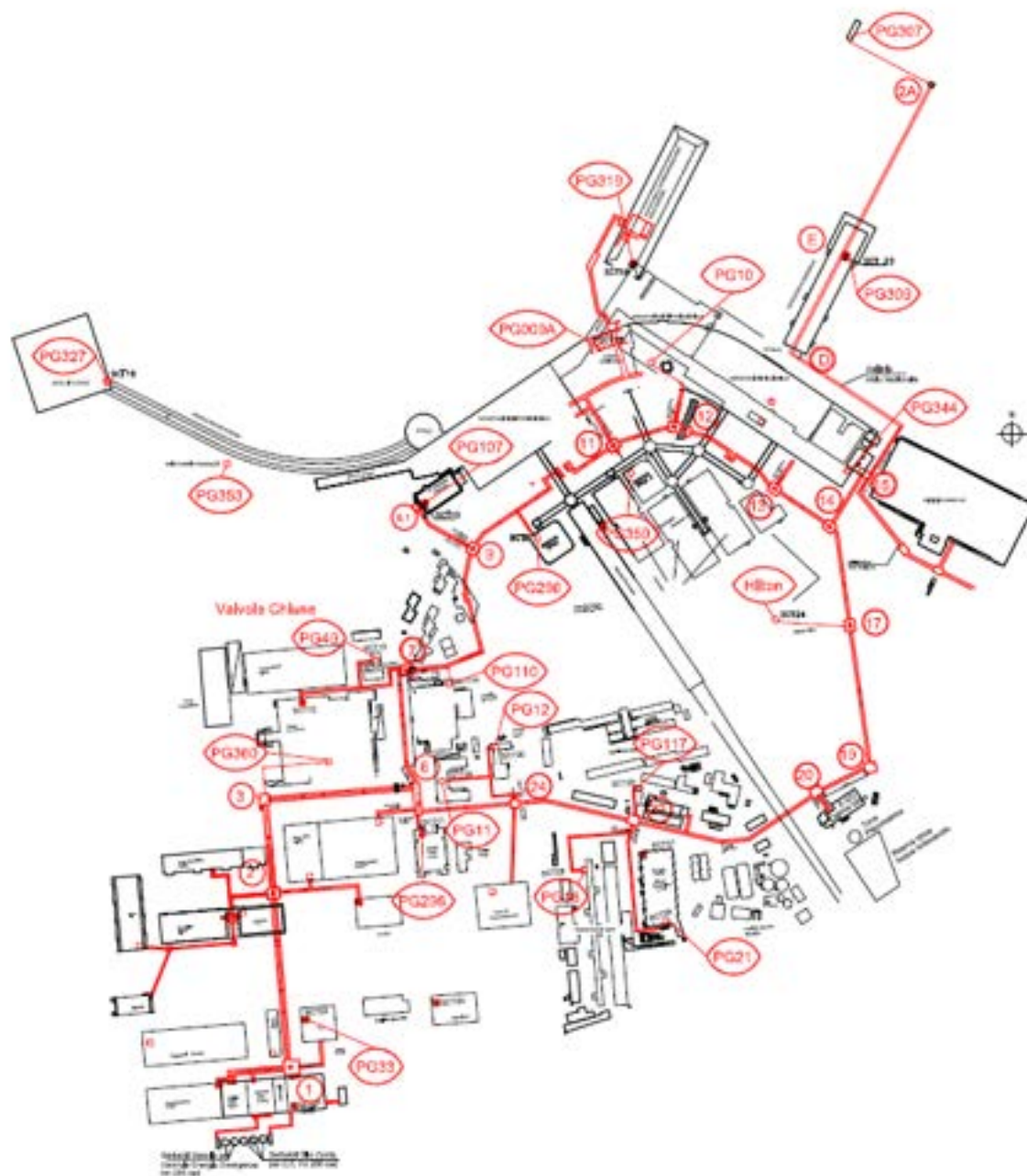
Nel 2008 è stato modificato il sistema di produzione dell'acqua surriscaldata, con l'introduzione di un nuovo impianto cogenerativo in sostituzione delle caldaie a vapore presenti. Il nuovo impianto di produzione dell'acqua surriscaldata è costituito da tre gruppi cogenerativi per una potenza installata complessiva pari a 17 MW<sub>th</sub>, operanti con un salto termico di progetto pari a 50 °C (da 130 °C ad 80 °C). L'impianto presenta inoltre un gruppo di pompaggio con portata nominale pari a circa 300 m<sup>3</sup>/h.

Le attuali condizioni di esercizio della rete in regime invernale risultano essere le seguenti [1]:

- salto termico di esercizio: 40-45 °C (passando da una temperatura sulla mandata pari a 135 °C ad una temperatura di 95 °C sul ritorno della rete);
- potenza termica utilizzata: 3 gruppi di generazione per un totale di 13-14 MW<sub>th</sub>;
- portata circolante: 250-260 m<sup>3</sup>/h (un solo gruppo di pompaggio) nelle condizioni di picco invernale;
- salto di pressione tra i collettori di mandata e di ritorno della rete pari a 1.1 bar.

Le diverse tipologie di utilizzatori di acqua surriscaldata comprendono scambiatori di calore stagionali per (i) batterie di preriscaldamento, (ii) riscaldamento ambienti (tramite radiatori, ventilconvettori, ecc.) e (iii) batterie di post-riscaldamento, scambiatori di calore annuali per produzione di acqua calda sanitaria e vapore e gruppi assorbitori di calore per la produzione di acqua refrigerata (climatizzazione intermedia ed estiva).

I due anelli di distribuzione dell'acqua surriscaldata che compongono la rete in esame, ovvero l'anello stagionale e l'anello annuale, sono separati ma connessi attraverso numerose valvole di by-pass. Inoltre, ogni sottostazione può essere alimentata da entrambi i circuiti e la scelta viene effettuata in base alle esigenze di gestione. Il sistema di gestione delle valvole, sia di by-pass che di alimentazione alle sottocentrali, non è attualmente remotizzato. Di conseguenza, le informazioni ad esse relative sono frutto di un'analisi sul campo, come presentato in [1].



**Figura 1** – Planimetria della rete di teleriscaldamento dell'aeroporto Leonardo da Vinci di Roma Fiumicino [1].

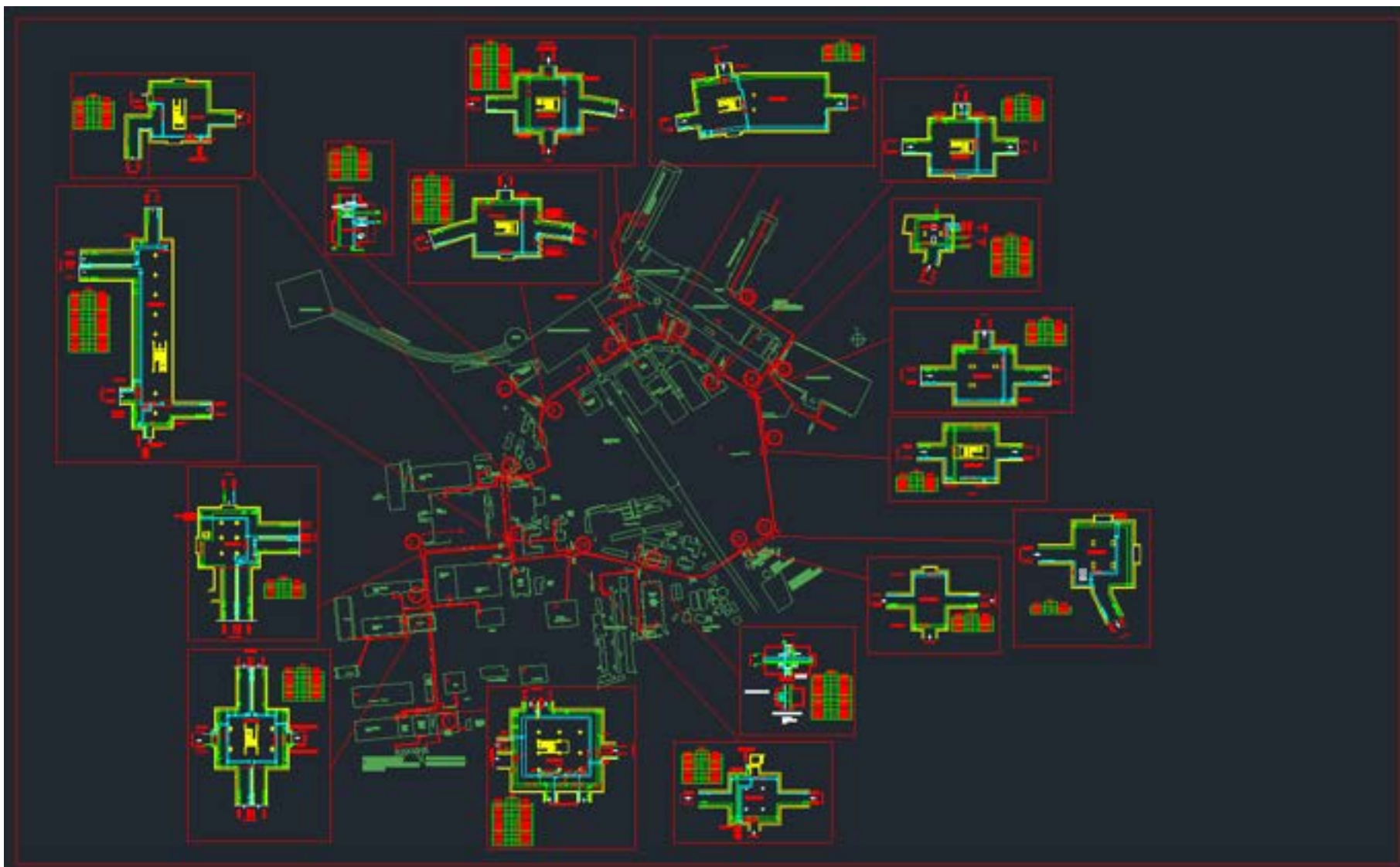


Figura 2 – Planimetria della rete con focus sulle camere di ispezione [2].



Figura 3 – Planimetria della rete con focus sulle sottostazioni d'utenza [2].

### 3 Modello rete

Con l'obiettivo di analizzare ed evidenziare le eventuali criticità relative alla rete di teleriscaldamento in esame, si è proceduto con la realizzazione ed implementazione di un modello fisico-matematico della rete all'interno del software IHENA 2.0 (Intelligent Heat Energy Network Analysis) [3] – sviluppato dal Dipartimento di Ingegneria industriale (DIN) dell'Università di Bologna. Pertanto, la mappa della rete dell'Aeroporto di Roma-Fiumicino è stata ricostruita – in termini di tracciato (coordinate di ciascun nodo della rete, lunghezza dei rami della rete, ecc.) e dati geometrici relativi alle tubazioni – in base alle informazioni disponibili in [1] e ad alcune necessarie assunzioni. Infatti, visti la vastità della rete di teleriscaldamento, la sua data di costruzione non recentissima e le modifiche subite nel tempo, le schede tecniche dell'impianto e i successivi studi non forniscono tutte le informazioni necessarie alla completezza del modello. Inoltre, la rete presenta diversi possibili punti di funzionamento, che dipendono dal periodo dell'anno e dallo stato di apertura delle valvole, nonché dai diametri delle tubazioni, spesso incerti proprio nei punti più critici. Ai fini della realizzazione del modello, si è pertanto fatto riferimento alla configurazione invernale di design descritta in [1], che prevede una potenza termica complessivamente fornita alle utenze pari a 86 MW.

Come noto, la rete è composta da due anelli, rispettivamente stagionale ed annuale con diametri DN350 e DN200, dai quali partono le diverse diramazioni per l'alimentazione alle utenze. Sulla base delle informazioni ricevute, si evince che:

- alcune utenze vengono raggiunte da diramazioni provenienti da entrambi gli anelli e possono quindi essere alimentate da entrambi gli anelli a seconda delle esigenze;
- alcune utenze vengono raggiunte solo da diramazioni provenienti da uno dei due anelli;
- alcune utenze vengono raggiunte nell'ultimo tratto solo dalla diramazione proveniente da uno dei due anelli ma possono essere di fatto alimentate da entrambi grazie alla presenza di appositi by-pass.

Considerando quanto appena riportato, ai fini di rendere il modello realizzato il più flessibile e generale possibile, si è scelto di prevedere la possibilità che ciascuna utenza venga alimentata direttamente da entrambi gli anelli, così come mostrato in **Figura 4**. Ciò di fatto si traduce nell'aggiunta di alcuni rami e nello sdoppiamento (fittizio) di alcune utenze, rispetto alla configurazione reale della rete (linee tratteggiate in nero in **Figura 4**). A tale proposito si sottolinea che i rami e le utenze aggiunte possono poi essere chiuse all'interno del software IHENA 2.0, in modo tale da simulare la rete nella configurazione e nel funzionamento attuale.

Il modello di rete realizzato è quindi composto da 222 rami e 197 nodi, comprendenti 1 sorgente (la centrale di produzione), 152 miscelatori e 44 utenze, per una lunghezza complessiva della rete (comprendente sia il percorso di mandata che quello di ritorno) pari a poco più di 30 km. Per completezza, si riporta in **Tabella 1** il dettaglio relativo alla corrispondenza tra numeri identificativi delle camere (relazione tecnica [1]) e numeri identificativi delle diverse utenze per il modello realizzato, insieme ai valori di potenza termica richiesta da ciascuna utenza in condizioni di design.

Sebbene siano noti i diametri della quasi totalità dei rami della rete (ad eccezione, in qualche caso, dei tratti finali verso le utenze), per quanto riguarda le caratteristiche delle tubazioni – quali materiale, spessori della condotta e dell'isolante, coefficienti di scambio termico, ecc. – invece, le informazioni a disposizione non sono esaustive. Pertanto, sulla base di materiali tipicamente usati per queste applicazioni e di un'analisi di brochure commerciali, sono stati fissati i parametri elencati in **Tabella 2**, da cui è possibile ricavare gli andamenti mostrati in **Figura 5**. Per completezza, in **Appendice A** si riporta il dettaglio per ciascun ramo della rete relativo a diametri, spessori, caratteristiche dell'isolante, ecc.

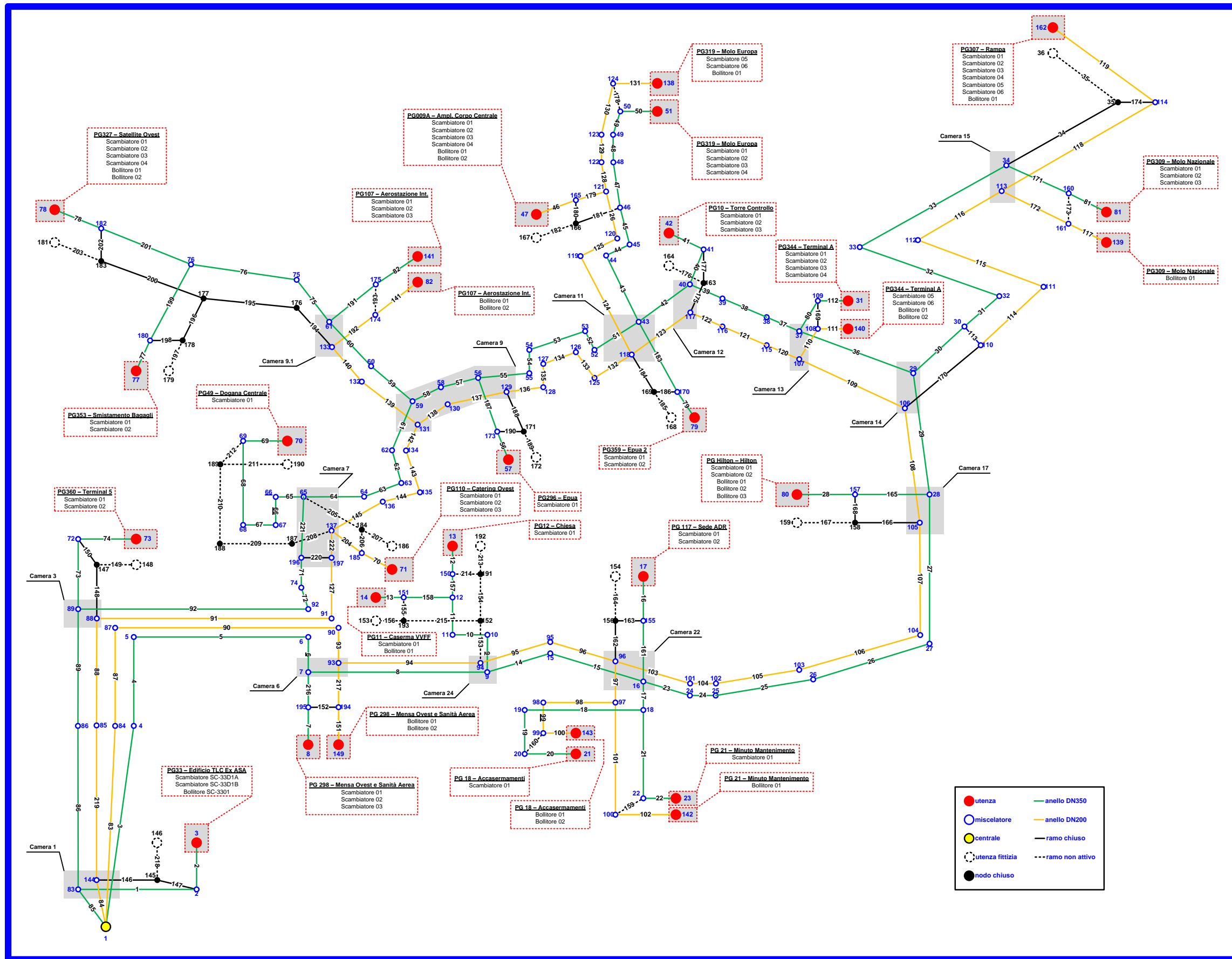


Figura 4 – Modello rete di teleriscaldamento Aeroporto di Roma Fiumicino (86MW).

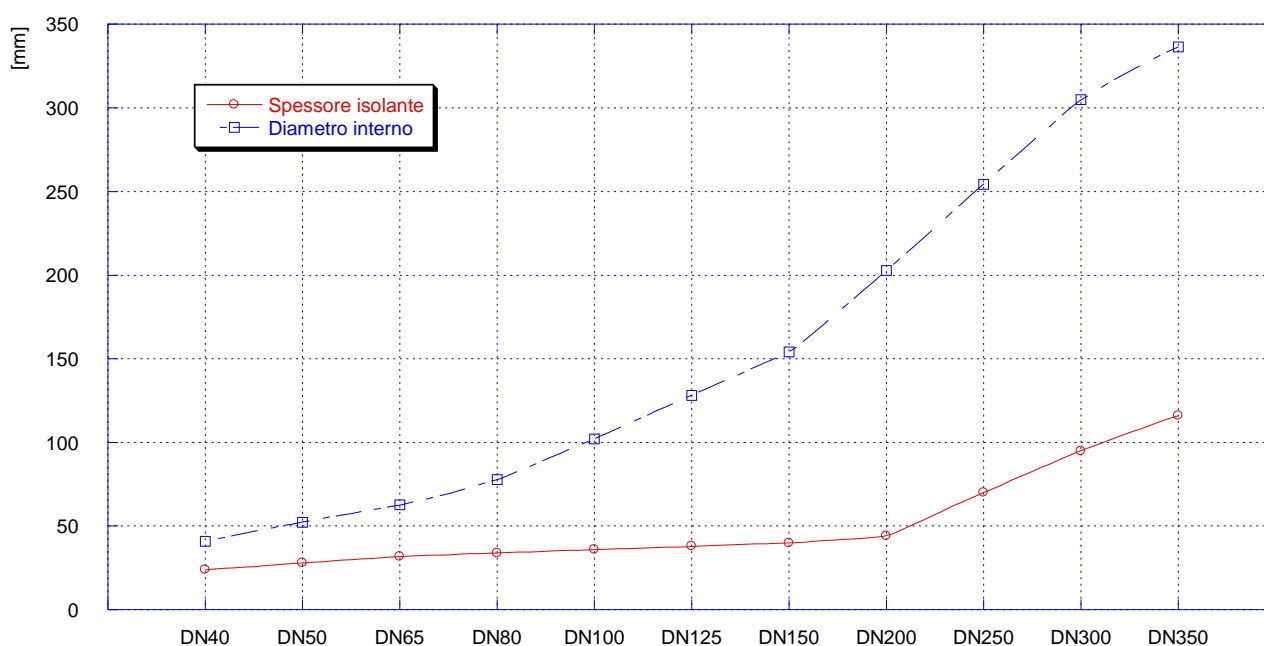
Tabella 1 – Corrispondenza tra ID camere [1] e ID delle utenze nel modello implementato all'interno del software IHENA (86MW).

| CAMERA | CENTRALE TECNICA | DENOMINAZIONE        |                   | Q <sub>th</sub> richiesta [kW] | T <sub>in</sub> [°C] | T <sub>out</sub> [°C] | ṁ [kg/s] | ṁ [m <sup>3</sup> /h] | UTENZA IHENA | Q <sub>th</sub> richiesta IHENA [kW] | ṁ richiesta IHENA [kg/s] | DT equivalente [°C] |
|--------|------------------|----------------------|-------------------|--------------------------------|----------------------|-----------------------|-----------|------------------------|--------------|--------------------------------------|---------------------------|---------------------|
| 1      | PG33             | Edificio TLC Ex ASA  | Scambiatore 33D1A | 1044.0                         | 150.0                | 90.0                  | 4.16      | 15.0                   | 3            | 2,088.00                             | 8.46                      | 58.98               |
| 1      | PG33             | Edificio TLC Ex ASA  | Scambiatore 33D1B | 1044.0                         | 150.0                | 90.0                  | 4.16      | 15.0                   |              |                                      |                           |                     |
| 1      | PG33             | Edificio TLC Ex ASA  | Bollitore 3301    | 12.0                           | 150.0                | 130.0                 | 0.14      | 0.5                    | 146          | 12.00                                | 0.14                      | 20.00               |
| 3      | PG360            | Terminal 5           | Scambiatore 01    | 1798.0                         | 150.0                | 90.0                  | 7.16      | 25.8                   | 73           | 1,798.00                             | 7.16                      | 60.00               |
| 3      | PG360            | Terminal 5           | Scambiatore 02    | 1798.0                         | 150.0                | 90.0                  | 7.16      | 25.8                   | 148          | 1,798.00                             | 7.16                      | 60.00               |
| 7      | PG49             | Dogana Centrale      | Scambiatore 401   | 58.0                           | 150.0                | 90.0                  | 0.23      | 0.8                    | 70           | 29.00                                | 0.12                      | 60.00               |
|        |                  |                      |                   |                                |                      |                       |           |                        | 190          | 29.00                                | 0.12                      | 60.00               |
| 7      | PG110            | Catering Ovest       | Scambiatore 01    | 1740.0                         | 150.0                | 90.0                  | 6.93      | 24.9                   | 71           | 2,610.00                             | 10.39                     | 60.00               |
| 7      | PG110            | Catering Ovest       | Scambiatore 02    | 1740.0                         | 150.0                | 90.0                  | 6.93      | 24.9                   |              |                                      |                           |                     |
| 7      | PG110            | Catering Ovest       | Scambiatore 03    | 1740.0                         | 150.0                | 90.0                  | 6.93      | 24.9                   | 186          | 2,610.00                             | 10.39                     | 60.00               |
| 9      | PG296            | Epuia                | Scambiatore 01    | 1740                           | 150.0                | 90.0                  | 6.93      | 24.9                   | 57           | 870.00                               | 3.46                      | 60.00               |
|        |                  |                      |                   |                                |                      |                       |           |                        | 172          | 870.00                               | 3.46                      | 60.00               |
| 9.1    | PG107            | Aerostazione Int.    | Scambiatore 03    | 4640                           | 150                  | 90                    | 18.47     | 66.5                   | 141          | 13,920.00                            | 55.42                     | 60.00               |
| 9.1    | PG107            | Aerostazione Int.    | Scambiatore 02    | 4640                           | 150                  | 90                    | 18.47     | 66.51                  |              |                                      |                           |                     |
| 9.1    | PG107            | Aerostazione Int.    | Scambiatore 01    | 4640                           | 150                  | 90                    | 18.47     | 66.51                  |              |                                      |                           |                     |
| 9.1    | PG107            | Aerostazione Int.    | Bollitore 02      | 93                             | 150                  | 130                   | 1.11      | 4.00                   | 82           | 186.00                               | 2.22                      | 20.00               |
| 9.1    | PG107            | Aerostazione Int.    | Bollitore 01      | 93                             | 150                  | 130                   | 1.11      | 4.00                   |              |                                      |                           |                     |
| 9.1    | PG327            | Satellite Ovest      | Scambiatore 03    | 1995                           | 150                  | 90                    | 7.94      | 28.60                  | 78           | 8,978.00                             | 35.75                     | 60.00               |
| 9.1    | PG327            | Satellite Ovest      | Bollitore 02      | 70                             | 150                  | 130                   | 0.84      | 3.01                   |              |                                      |                           |                     |
| 9.1    | PG327            | Satellite Ovest      | Scambiatore 04    | 1995                           | 150                  | 90                    | 7.94      | 28.60                  |              |                                      |                           |                     |
| 9.1    | PG327            | Satellite Ovest      | Scambiatore 02    | 2494                           | 150                  | 90                    | 9.93      | 35.75                  |              |                                      |                           |                     |
| 9.1    | PG327            | Satellite Ovest      | Scambiatore 01    | 2494                           | 150                  | 90                    | 9.93      | 35.75                  | 181          | 116.00                               | 1.39                      | 20.00               |
| 9.1    | PG327            | Satellite Ovest      | Bollitore 01      | 46                             | 150                  | 130                   | 0.55      | 1.98                   |              |                                      |                           |                     |
| 9.1    | PG353            | Smistamento Bagagli  | Scambiatore 02    | 599                            | 150                  | 90                    | 2.38      | 8.59                   | 77           | 599.00                               | 2.38                      | 60.00               |
| 9.1    | PG353            | Smistamento Bagagli  | Scambiatore 01    | 599                            | 150                  | 90                    | 2.38      | 8.59                   | 179          | 599.00                               | 2.38                      | 60.00               |
| 11     | PG359            | Epuia 2              | Scambiatore 01    | 599                            | 150                  | 90                    | 2.38      | 8.59                   | 79           | 599.00                               | 2.38                      | 60.00               |
| 11     | PG359            | Epuia 2              | Scambiatore 02    | 599                            | 150                  | 90                    | 2.38      | 8.59                   | 168          | 599.00                               | 2.38                      | 60.00               |
| 11     | PG009A           | Ampl. Corpo Centrale | Scambiatore 02    | 1696                           | 150                  | 90                    | 6.75      | 24.31                  | 167          | 186.00                               | 2.22                      | 20.00               |
| 11     | PG009A           | Ampl. Corpo Centrale | Scambiatore 01    | 1696                           | 150                  | 90                    | 6.75      | 24.31                  |              |                                      |                           |                     |
| 11     | PG009A           | Ampl. Corpo Centrale | Scambiatore 03    | 748                            | 150                  | 90                    | 2.98      | 10.72                  | 47           | 4,888.00                             | 19.46                     | 60.00               |
| 11     | PG009A           | Ampl. Corpo Centrale | Scambiatore 04    | 748                            | 150                  | 90                    | 2.98      | 10.72                  |              |                                      |                           |                     |
| 11     | PG009A           | Ampl. Corpo Centrale | Bollitore 02      | 93                             | 150                  | 130                   | 1.11      | 4.00                   |              |                                      |                           |                     |
| 11     | PG009A           | Ampl. Corpo Centrale | Bollitore 01      | 93                             | 150                  | 130                   | 1.11      | 4.00                   |              |                                      |                           |                     |
| 11     | PG319            | Molo Europa          | Scambiatore 01    | 1508                           | 150                  | 90                    | 6.00      | 21.61                  | 51           | 6,032.00                             | 24.02                     | 60.00               |
| 11     | PG319            | Molo Europa          | Scambiatore 02    | 1508                           | 150                  | 90                    | 6.00      | 21.61                  |              |                                      |                           |                     |
| 11     | PG319            | Molo Europa          | Scambiatore 03    | 1508                           | 150                  | 90                    | 6.00      | 21.61                  |              |                                      |                           |                     |
| 11     | PG319            | Molo Europa          | Scambiatore 04    | 1508                           | 150                  | 90                    | 6.00      | 21.61                  |              |                                      |                           |                     |
| 11     | PG319            | Molo Europa          | Scambiatore 06    | 1160                           | 150                  | 90                    | 4.62      | 16.63                  | 138          | 2,413.00                             | 10.35                     | 55.71               |
| 11     | PG319            | Molo Europa          | Scambiatore 05    | 1160                           | 150                  | 90                    | 4.62      | 16.63                  |              |                                      |                           |                     |
| 11     | PG319            | Molo Europa          | Bollitore 01      | 93                             | 150                  | 130                   | 1.11      | 4.00                   |              |                                      |                           |                     |
| 12     | PG10             | Torre Controllo      | Scambiatore 02    | 1392                           | 150                  | 90                    | 5.54      | 19.95                  | 42           | 2,146.00                             | 8.54                      | 60.00               |
| 12     | PG10             | Torre Controllo      | Scambiatore 03    | 1508                           | 150                  | 90                    | 6.00      | 21.61                  |              |                                      |                           |                     |
| 12     | PG10             | Torre Controllo      | Scambiatore 01    | 1392                           | 150                  | 90                    | 5.54      | 19.95                  | 164          | 2,146.00                             | 8.54                      | 60.00               |

| CAMERA | CENTRALE TECNICA | DENOMINAZIONE              |                | Q <sub>th</sub> richiesta [kW] | T <sub>in</sub> [°C] | T <sub>out</sub> [°C] | ṁ [kg/s] | ṁ [m <sup>3</sup> /h] | UTENZA IHENA | Q <sub>th</sub> richiesta IHENA [kW] | ṁ richiesta IHENA [kg/s] | DT equivalente [°C] |
|--------|------------------|----------------------------|----------------|--------------------------------|----------------------|-----------------------|-----------|------------------------|--------------|--------------------------------------|---------------------------|---------------------|
| 13     | PG344            | Terminal A                 | Scambiatore 02 | 2494                           | 150                  | 90                    | 9.93      | 35.75                  | 31           | 9,976.00                             | 39.72                     | 60.00               |
| 13     | PG344            | Terminal A                 | Scambiatore 01 | 2494                           | 150                  | 90                    | 9.93      | 35.75                  |              |                                      |                           |                     |
| 13     | PG344            | Terminal A                 | Scambiatore 03 | 2494                           | 150                  | 90                    | 9.93      | 35.75                  |              |                                      |                           |                     |
| 13     | PG344            | Terminal A                 | Scambiatore 04 | 2494                           | 150                  | 90                    | 9.93      | 35.75                  |              |                                      |                           |                     |
| 13     | PG344            | Terminal A                 | Scambiatore 05 | 998                            | 150                  | 90                    | 3.97      | 14.30                  | 140          | 2,088.00                             | 9.05                      | 55.14               |
| 13     | PG344            | Terminal A                 | Scambiatore 06 | 998                            | 150                  | 90                    | 3.97      | 14.30                  |              |                                      |                           |                     |
| 13     | PG344            | Terminal A                 | Bollitore 01   | 46                             | 150                  | 130                   | 0.55      | 1.98                   |              |                                      |                           |                     |
| 13     | PG344            | Terminal A                 | Bollitore 02   | 46                             | 150                  | 130                   | 0.55      | 1.98                   |              |                                      |                           |                     |
| 15     | PG309            | Molo Nazionale             | Scambiatore 01 | 696                            | 150                  | 90                    | 2.77      | 9.98                   | 81           | 2,320.00                             | 9.24                      | 60.00               |
| 15     | PG309            | Molo Nazionale             | Scambiatore 02 | 696                            | 150                  | 90                    | 2.77      | 9.98                   |              |                                      |                           |                     |
| 15     | PG309            | Molo Nazionale             | Scambiatore 03 | 928                            | 150                  | 90                    | 3.69      | 13.30                  |              |                                      |                           |                     |
| 15     | PG309            | Molo Nazionale             | Bollitore 01   | 93                             | 150                  | 130                   | 1.11      | 4.00                   | 139          | 93.00                                | 1.11                      | 20.00               |
| 15     | PG307            | Rampa                      | Scambiatore 01 | 1624                           | 150                  | 90                    | 6.47      | 23.28                  | 36           | 765.00                               | 3.32                      | 54.97               |
| 15     | PG307            | Rampa                      | Scambiatore 02 | 1624                           | 150                  | 90                    | 6.47      | 23.28                  | 162          | 4,640.00                             | 18.47                     | 60.00               |
| 15     | PG307            | Rampa                      | Scambiatore 03 | 696                            | 150                  | 90                    | 2.77      | 9.98                   |              |                                      |                           |                     |
| 15     | PG307            | Rampa                      | Scambiatore 04 | 696                            | 150                  | 90                    | 2.77      | 9.98                   |              |                                      |                           |                     |
| 15     | PG307            | Rampa                      | Scambiatore 05 | 365                            | 150                  | 90                    | 1.45      | 5.23                   |              |                                      |                           |                     |
| 15     | PG307            | Rampa                      | Scambiatore 06 | 365                            | 150                  | 90                    | 1.45      | 5.23                   |              |                                      |                           |                     |
| 15     | PG307            | Rampa                      | Bollitore 01   | 35                             | 150                  | 130                   | 0.42      | 1.51                   |              |                                      |                           |                     |
| 17     | PG Hilton        | Hilton                     | Scambiatore 01 | 1508                           | 150                  | 90                    | 6.00      | 21.61                  | 80           | 3,016.00                             | 12.01                     | 60.00               |
| 17     | PG Hilton        | Hilton                     | Scambiatore 02 | 1508                           | 150                  | 90                    | 6.00      | 21.61                  |              |                                      |                           |                     |
| 17     | PG Hilton        | Hilton                     | Bollitore 01   | 46                             | 150                  | 130                   | 0.55      | 1.98                   |              |                                      |                           |                     |
| 17     | PG Hilton        | Hilton                     | Bollitore 02   | 46                             | 150                  | 130                   | 0.55      | 1.98                   |              |                                      |                           |                     |
| 17     | PG Hilton        | Hilton                     | Bollitore 03   | 46.4                           | 150                  | 130                   | 0.55      | 2.00                   | 159          | 138.40                               | 1.65                      | 20.00               |
| 22     | PG117            | Sede ADR                   | Scambiatore 01 | 812                            | 150                  | 90                    | 3.23      | 11.64                  | 17           | 812.00                               | 3.23                      | 60.00               |
| 22     | PG117            | Sede ADR                   | Scambiatore 02 | 812                            | 150                  | 90                    | 3.23      | 11.64                  | 154          | 812.00                               | 3.23                      | 60.00               |
| 22     | PG21             | Minuto Mantenimento        | Scambiatore 01 | 232                            | 150                  | 90                    | 0.92      | 3.33                   | 23           | 232.00                               | 0.92                      | 60.00               |
| 22     | PG21             | Minuto Mantenimento        | Bollitore 01   | 19                             | 150                  | 130                   | 0.23      | 0.82                   | 142          | 19.00                                | 0.23                      | 20.00               |
| 22     | PG18             | Accasermamenti             | Scambiatore 01 | 1740                           | 150                  | 90                    | 6.93      | 24.94                  | 21           | 1,740.00                             | 6.93                      | 60.00               |
| 22     | PG18             | Accasermamenti             | Bollitore 01   | 70                             | 150                  | 130                   | 0.84      | 3.01                   | 143          | 140.00                               | 1.67                      | 20.00               |
| 22     | PG18             | Accasermamenti             | Bollitore 02   | 70                             | 150                  | 130                   | 0.84      | 3.01                   |              |                                      |                           |                     |
| 24     | PG12             | Chiesa                     | Scambiatore 01 | 58                             | 150                  | 90                    | 0.23      | 0.83                   | 13           | 29.00                                | 0.12                      | 60.00               |
|        |                  |                            |                |                                |                      |                       |           |                        | 192          | 29.00                                | 0.12                      | 60.00               |
| 24     | PG11             | Caserma VVFF               | Bollitore 01   | 75                             | 150                  | 130                   | 0.90      | 3.23                   | 14           | 348.00                               | 1.39                      | 60.00               |
| 24     | PG11             | Caserma VVFF               | Scambiatore 01 | 348                            | 150                  | 90                    | 1.39      | 4.99                   | 153          | 75.00                                | 0.90                      | 20.00               |
| 6      | PG298            | Mensa Ovest e Sanità Aerea | Scambiatore 01 | 1392                           | 150                  | 90                    | 5.54      | 19.95                  | 8            | 2,552.00                             | 10.16                     | 60.00               |
| 6      | PG298            | Mensa Ovest e Sanità Aerea | Scambiatore 02 | 580                            | 150                  | 90                    | 2.31      | 8.31                   |              |                                      |                           |                     |
| 6      | PG298            | Mensa Ovest e Sanità Aerea | Scambiatore 03 | 580                            | 150                  | 90                    | 2.31      | 8.31                   |              |                                      |                           |                     |
| 6      | PG298            | Mensa Ovest e Sanità Aerea | Bollitore 01   | 93                             | 150                  | 130                   | 1.11      | 4.00                   | 149          | 185.80                               | 2.22                      | 20.00               |
| 6      | PG298            | Mensa Ovest e Sanità Aerea | Bollitore 02   | 92.8                           | 150                  | 130                   | 1.11      | 3.99                   |              |                                      |                           |                     |

**Tabella 2 – Parametri relativi ai diametri impiegati per le tubazioni all'interno della rete in esame.**

| DN    | Diametro interno condotta [mm] | Spessore condotta [mm] | Spessore isolante [mm] | Coefficiente conduzione condotta [W/m °C] | Coefficiente conduzione isolante [W/m °C] | Scabrezza [mm] |
|-------|--------------------------------|------------------------|------------------------|---|---|----------------|
| DN40  | 40.94                          | 3.68                   | 24.00                  | 55.000                                    | 0.050                                     | 0.03           |
| DN50  | 52.48                          | 3.91                   | 28.00                  | 55.000                                    | 0.050                                     | 0.03           |
| DN65  | 62.68                          | 5.16                   | 32.00                  | 55.000                                    | 0.050                                     | 0.03           |
| DN80  | 77.92                          | 5.49                   | 34.00                  | 55.000                                    | 0.050                                     | 0.03           |
| DN100 | 102.26                         | 6.02                   | 36.00                  | 55.000                                    | 0.050                                     | 0.03           |
| DN125 | 128.20                         | 6.55                   | 38.00                  | 55.000                                    | 0.050                                     | 0.03           |
| DN150 | 154.08                         | 7.11                   | 40.00                  | 55.000                                    | 0.050                                     | 0.03           |
| DN200 | 202.74                         | 8.18                   | 44.00                  | 55.000                                    | 0.050                                     | 0.03           |
| DN250 | 254.46                         | 9.27                   | 70.00                  | 55.000                                    | 0.050                                     | 0.03           |
| DN300 | 304.86                         | 9.52                   | 95.00                  | 55.000                                    | 0.050                                     | 0.03           |
| DN350 | 336.56                         | 9.52                   | 116.00                 | 55.000                                    | 0.050                                     | 0.03           |



**Figura 5 – Andamento del diametro interno delle tubazioni e dello spessore di isolante in funzione del diametro nominale.**

Il modello appena descritto è stato quindi implementato all'interno del software IHENA 2.0 ed analizzato in condizioni di design (potenza termica complessivamente fornita alle utenze pari a 86 MW). Si assume che la temperatura di mandata della rete in corrispondenza della sorgente sia pari a 150 °C e che la rete operi con un  $\Delta T$  pari a 60 °C. Per quanto riguarda la pressione di mandata, vista la carenza di informazioni precise sul funzionamento attuale della rete, si è fissata ad un valore pari a 10.75 bar all'uscita dalla centrale, mentre la pressione al vaso di espansione è uguale a 7.40 bar. Tali assunzioni sono state scelte in modo tale da garantire un minimo salto di pressione pari a 0.5 bar in corrispondenza dell'utenza più sfavorita (utenza #162), ovvero di quell'utenza il cui percorso per raggiungerla presenta le maggiori perdite di carico.

I risultati della simulazione condotta hanno evidenziato che – nelle condizioni attuali di gestione della rete di teleriscaldamento in esame – la potenza termica che è necessario produrre in centrale per garantire un fabbisogno complessivo delle utenze pari a 86.131 MW risulta essere pari a poco più di 88 MW. In altre

parole, le dissipazioni termiche in condizioni di design della rete risultano essere pari a 2.213 MW. La portata complessivamente circolante in rete è pari a 354 kg/s e le spese di pompaggio si attestano **attorno** ad un valore di 140 kW<sub>e</sub>. In **Figura 6**, in **Figura 7**, in **Figura 8** e in **Figura 9** sono presentate le distribuzioni rispettivamente di velocità, portate, perdite di carico e diametri lungo la rete. Come si può osservare da **Figura 6**, le velocità variano molto a seconda del ramo considerato, in un range che va da circa 0.1 m/s a circa 3.2 m/s. Tale risultato rappresenta una delle maggiori criticità della rete, per il cui corretto funzionamento si auspicherebbe la maggior uniformità possibile nella distribuzione delle velocità.

Per quanto riguarda le portate in massa, si registra un range che va da 0.23 kg/s, in corrispondenza di alcune diramazioni finali verso le utenze e di alcuni tratti degli anelli, a poco più di 158 kg/s (**Figura 7**), in corrispondenza di uno dei rami uscenti dalla centrale. Le perdite di carico lungo la rete, invece, risultano essere piuttosto contenute (si veda **Figura 8**) e sono comprese tra un minimo di 0.01 bar e un massimo di circa 1.8 bar. Infine, la distribuzione dei diametri di **Figura 9** mostra i due anelli rispettivamente con DN350 e DN200, dai quali si diramano i rami a diametro minore che vanno verso le utenze.

Per concludere, in **Figura 10** e in **Figura 11** si presentano i risultati relativi al percorso critico, ovvero al percorso che dalla centrale di produzione dell'energia termica conduce all'utenza più sfavorita in termini di perdite di carico (utenza #162). In dettaglio, il percorso critico è evidenziato in verde in **Figura 10**, mentre in **Figura 11** è presentato l'andamento della pressione in funzione della distanza dalla centrale, sia sul percorso di mandata (in blu) che sul percorso di ritorno (in rosso).

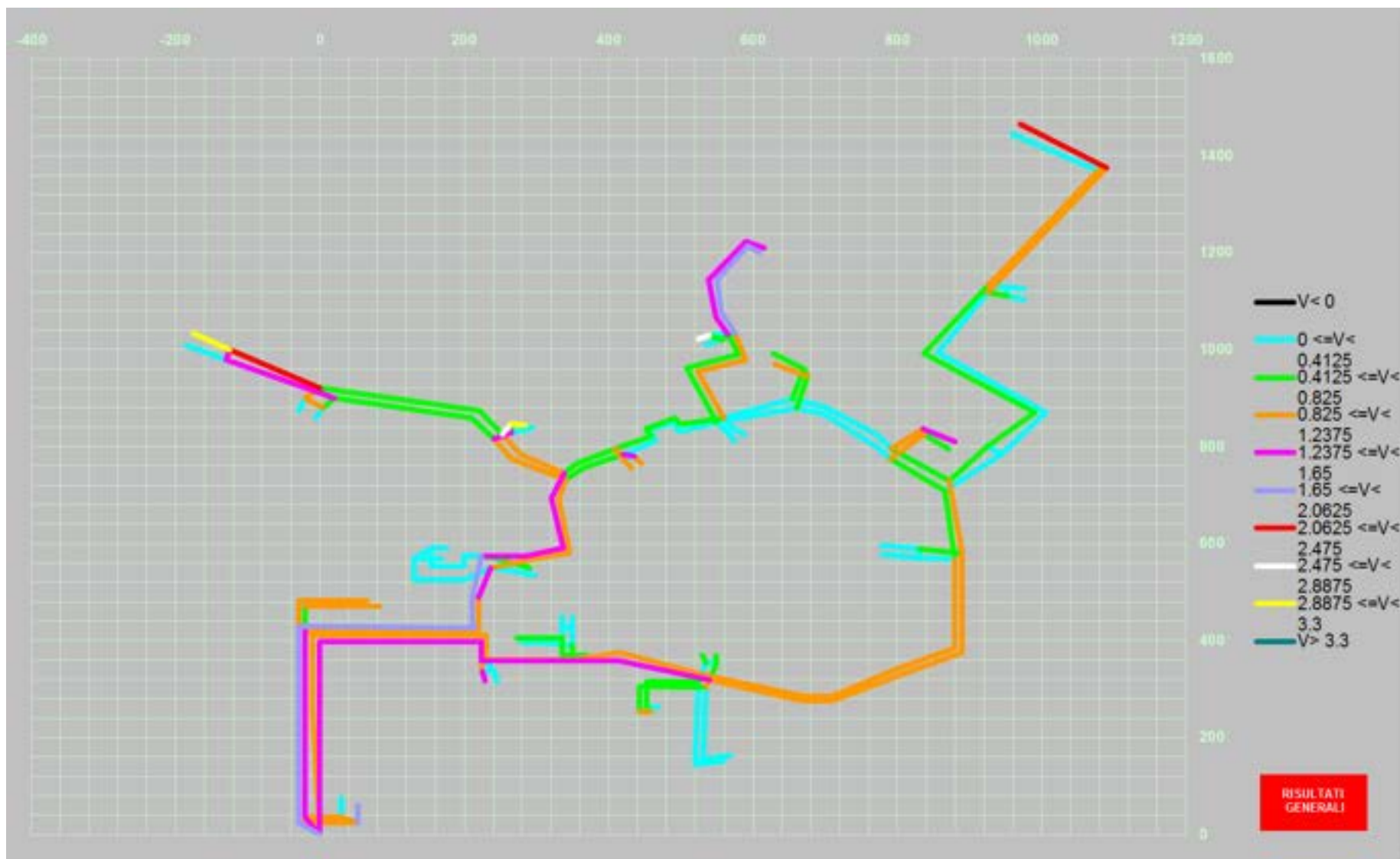


Figura 6 – Distribuzione delle velocità [m/s] lungo la rete.

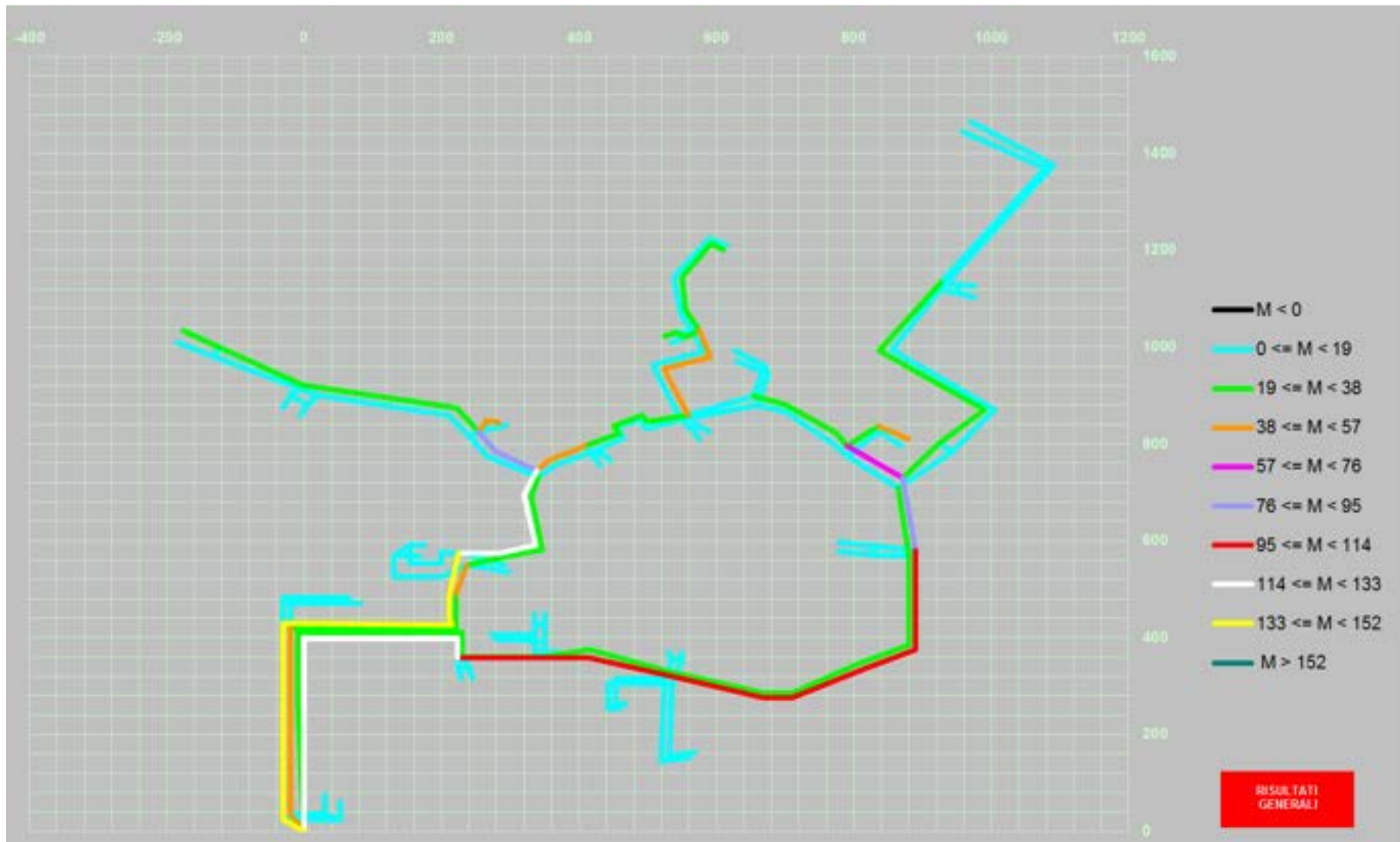


Figura 7 – Distribuzione delle portate [kg/s] lungo la rete.

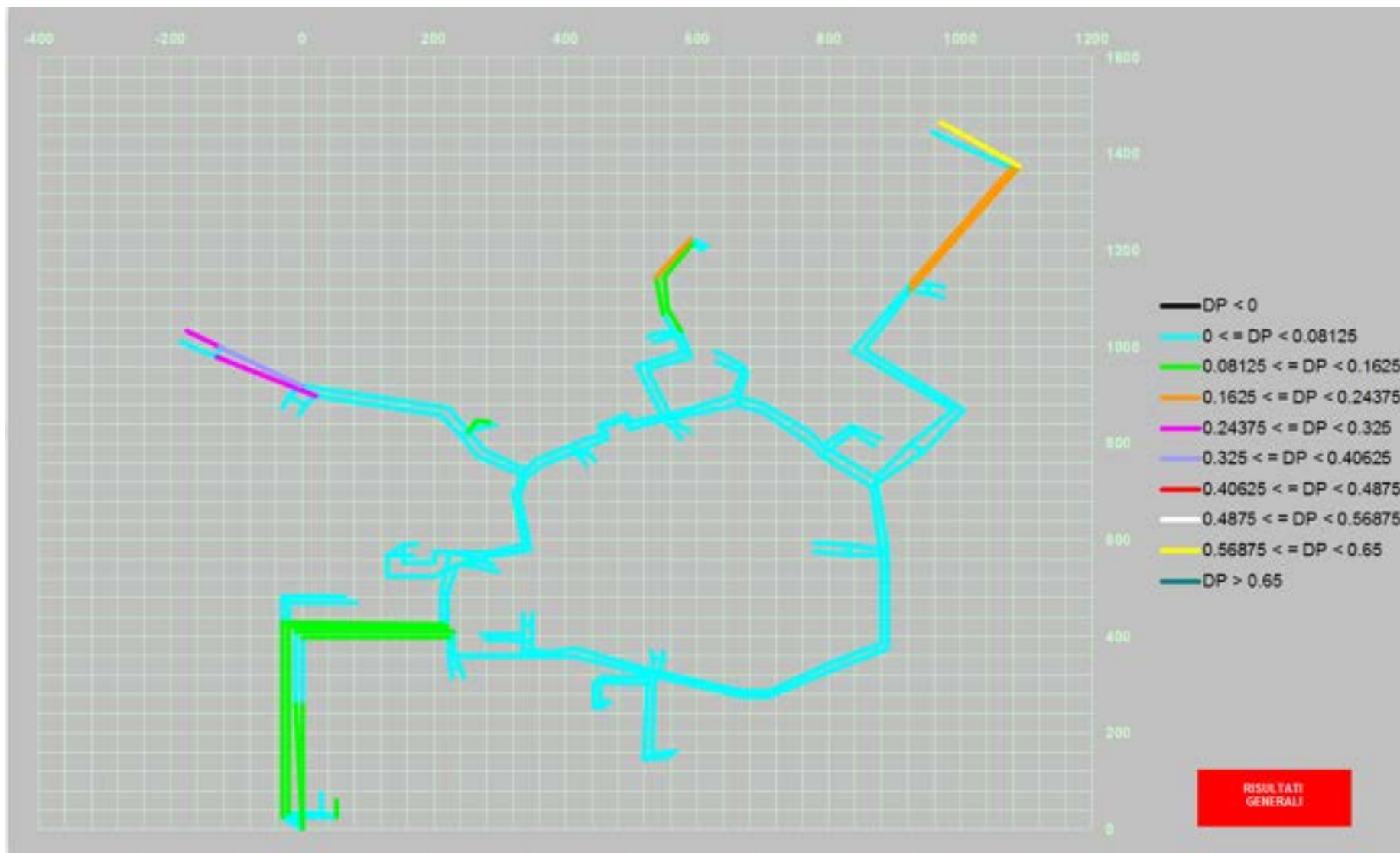


Figura 8 – Distribuzione delle perdite di carico [bar] lungo la rete.

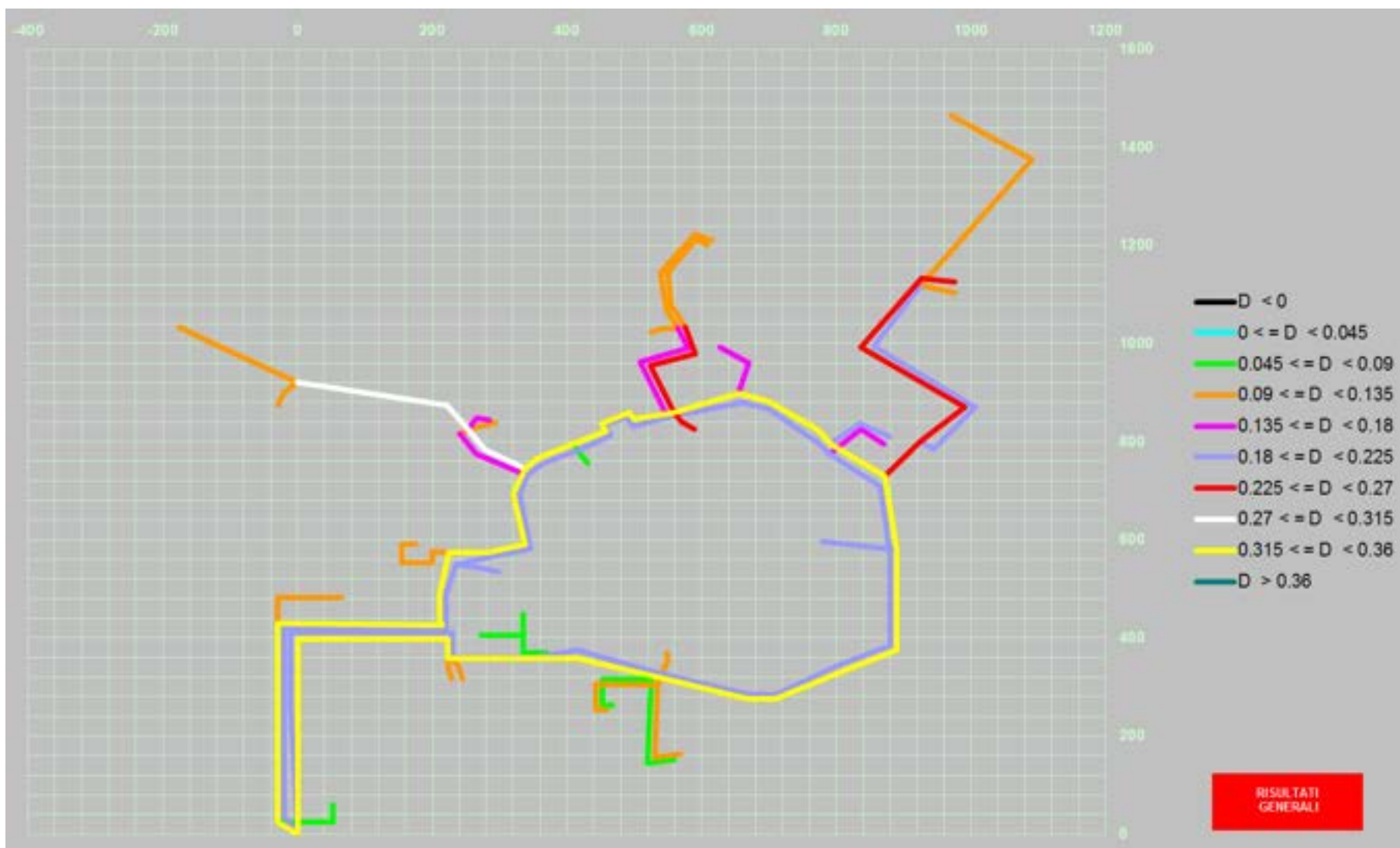


Figura 9 – Distribuzione dei diametri [m] lungo la rete.

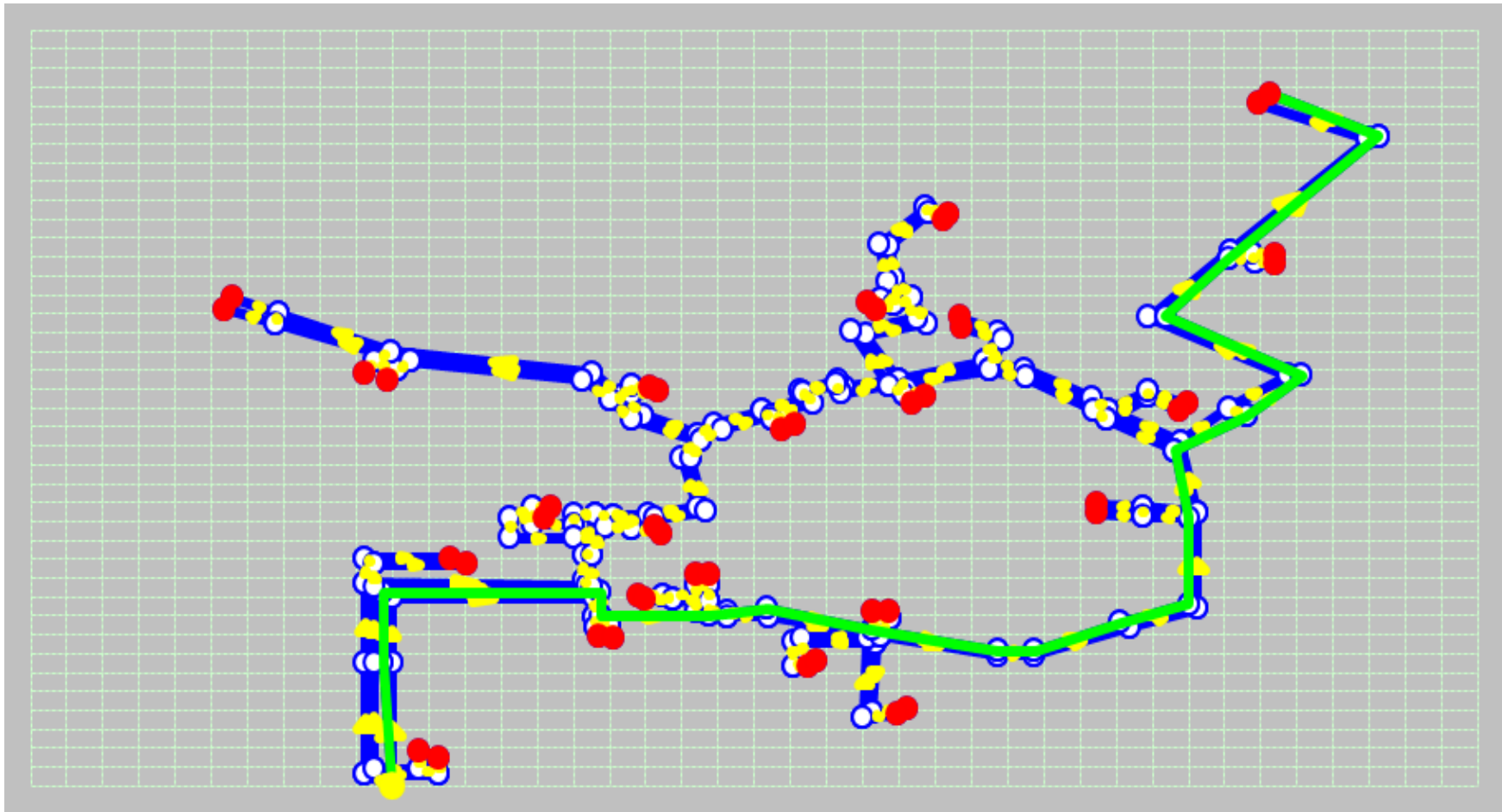
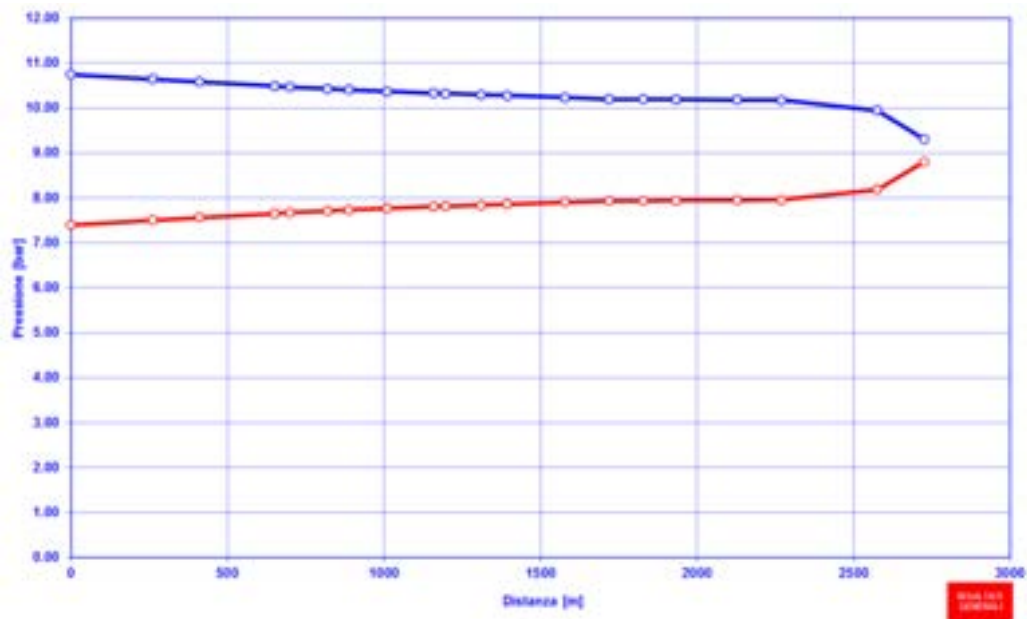


Figura 10 – Percorso critico (dalla centrale di produzione all'utenza #162).



**Figura 11** – Andamento della pressione lungo il percorso critico (mandata della rete in blu e ritorno della rete in rosso) in funzione della distanza dalla centrale.

## 4 Validazione

Il modello di rete elaborato è stato validato tramite confronto tra i risultati forniti dal software IHENA ed i dati reali misurati, presentati in [1] relativamente alla configurazione base della rete in regime invernale. In particolare, sono stati presi come riferimento i carichi delle utenze e il regime di funzionamento della rete per il giorno 1 febbraio 2011 (ore 7:30) [1]. Sulla base delle planimetrie [4-6] e delle informazioni – contenute all'interno della relazione tecnica [1] – relative all'apertura e alla chiusura delle valvole, si è compreso come nella configurazione base della rete in regime invernale risultino attivi entrambi gli anelli (e non solo quello stagionale così come sarebbe logico pensare), anche se alcune utenze sono servite soltanto da uno di essi. È il caso ad esempio del Molo Ovest (PG 327 e PG353), parte dell'Aerostazione Internazionale (PG107), dall'area Chiesa-Caserma (PG12 e PG11), dell'Edificio TLC (PG33), del Terminal 5 (PG360), della Mensa (PG298), dell'area Epuia (PG 296), dell'Hotel Hilton (PG Hilton) e della Torre di Controllo (PG10), utenze che sono alimentate solamente dalle tubazioni che si diramano dall'anello stagionale. Ne risulta pertanto una configurazione della rete come quella presentata in **Figura 12**. In **Tabella 3** si riporta inoltre il dettaglio relativo alla corrispondenza tra numeri identificativi delle camere [1] e numeri identificativi delle diverse utenze per il modello realizzato, insieme ai valori di potenza termica richiesta da ciascuna utenza utilizzati ai fini della validazione. Come mostrato in tabella, le utenze che nel momento considerato presentano un fabbisogno sono 26, per una potenza termica complessivamente richiesta pari a circa 11 MW<sub>th</sub>.

Per quanto riguarda, invece, i dati di input relativi al funzionamento della centrale di produzione per tale assetto della rete, si fa riferimento ai seguenti valori:

- pressione minima al collettore generale di ritorno in centrale PG314: 7.0 bar;
- temperatura di mandata al collettore generale di mandata in centrale PG314: 138 °C;
- salto di pressione tra i collettori di mandata e di ritorno della rete pari a 1.1 bar.

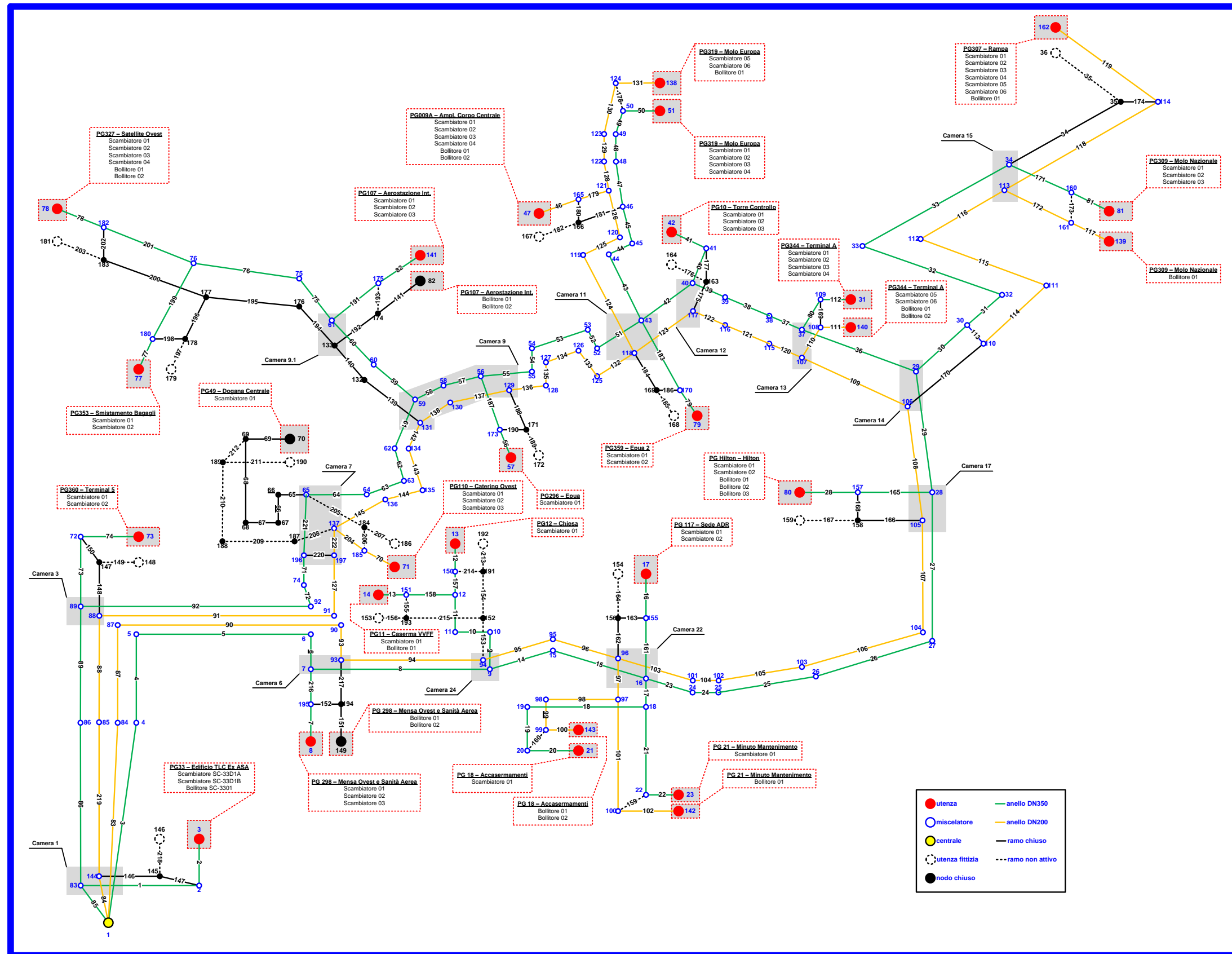


Figura 12 – Configurazione della rete di teleriscaldamento dell’Aeroporto Leonardo da Vinci di Roma Fiumicino nel regime di funzionamento denominato *rete base invernale*.

**Tabella 3 – Principali dati caratteristici delle utenze (potenza termica richiesta, salti di temperatura, ecc.) nel regime di funzionamento denominato rete base invernale.**

| CAMERA | CENTRALE TECNICA | DENOMINAZIONE        |                   | Q <sub>th</sub> richiesta [kW] | T <sub>in</sub> [°C] | T <sub>out</sub> [°C] | ṁ [kg/s] | ṁ [m <sup>3</sup> /h] | UTENZA IHENA | Q <sub>th</sub> richiesta IHENA [kW] | ṁ richiesta IHENA [kg/s] | DT equivalente [°C] |
|--------|------------------|----------------------|-------------------|--------------------------------|----------------------|-----------------------|-----------|------------------------|--------------|--------------------------------------|---------------------------|---------------------|
| 1      | PG33             | Edificio TLC Ex ASA  | Scambiatore 33D1A | 143.7                          | 134.9                | 90.0                  | 0.76      | 2.8                    | 3            | 181.20                               | 0.96                      | 44.90               |
| 1      | PG33             | Edificio TLC Ex ASA  | Scambiatore 33D1B | 0.0                            | 35.0                 | 35.0                  | 0.00      | 0.0                    |              |                                      |                           |                     |
| 1      | PG33             | Edificio TLC Ex ASA  | Bollitore 3301    | 37.5                           | 134.9                | 90.0                  | 0.20      | 0.7                    | 146          | 0                                    | 0                         | 0                   |
| 3      | PG360            | Terminal 5           | Scambiatore 01    | 211.6                          | 136.5                | 90.0                  | 1.09      | 3.9                    | 73           | 424.10                               | 2.18                      | 46.50               |
| 3      | PG360            | Terminal 5           | Scambiatore 02    | 212.5                          | 136.5                | 90.0                  | 1.09      | 3.9                    | 148          | 0                                    | 0                         | 0                   |
| 7      | PG49             | Dogana Centrale      | Scambiatore 401   | 0.0                            | 35.0                 | 35.0                  | 0.00      | 0.0                    | 70           | 0                                    | 0                         | 0                   |
|        |                  |                      |                   |                                |                      |                       |           |                        | 190          | 0                                    | 0                         | 0                   |
| 7      | PG110            | Catering Ovest       | Scambiatore 01    | 497.0                          | 136.3                | 115.0                 | 5.57      | 20.1                   | 71           | 990.60                               | 11.11                     | 21.30               |
| 7      | PG110            | Catering Ovest       | Scambiatore 02    | 493.6                          | 136.3                | 115.0                 | 5.54      | 19.9                   |              |                                      |                           |                     |
| 7      | PG110            | Catering Ovest       | Scambiatore 03    | 0.0                            | 35.0                 | 35.0                  | 0.00      | 0.0                    | 186          | 0                                    | 0                         | 0                   |
| 9      | PG296            | Epuia                | Scambiatore 01    | 357.7                          | 135.2                | 68.0                  | 1.27      | 4.6                    | 57           | 357.70                               | 1.27                      | 67.20               |
|        |                  |                      |                   |                                |                      |                       |           |                        | 172          | 0                                    | 0                         | 0                   |
| 9.1    | PG107            | Aerostazione Int.    | Scambiatore 03    | 0.0                            | 35                   | 35                    | 0.00      | 0.0                    | 141          | 2447.9                               | 15.72                     | 37.20               |
| 9.1    | PG107            | Aerostazione Int.    | Scambiatore 02    | 1219.6                         | 136.2                | 99                    | 7.83      | 28.20                  |              |                                      |                           |                     |
| 9.1    | PG107            | Aerostazione Int.    | Scambiatore 01    | 1228.3                         | 136.2                | 99                    | 7.89      | 28.40                  |              |                                      |                           |                     |
| 9.1    | PG107            | Aerostazione Int.    | Bollitore 02      | 0.0                            | 35                   | 35                    | 0.00      | 0.00                   | 82           | 0                                    | 0                         | 0                   |
| 9.1    | PG107            | Aerostazione Int.    | Bollitore 01      | 0.0                            | 35                   | 35                    | 0.00      | 0.00                   |              |                                      |                           |                     |
| 9.1    | PG327            | Satellite Ovest      | Scambiatore 03    | 0.0                            | 35                   | 35                    | 0.00      | 0.00                   | 78           | 417.4                                | 2.28                      | 43.70               |
| 9.1    | PG327            | Satellite Ovest      | Bollitore 02      | 0.0                            | 35                   | 35                    | 0.00      | 0.00                   |              |                                      |                           |                     |
| 9.1    | PG327            | Satellite Ovest      | Scambiatore 04    | 0.0                            | 35                   | 35                    | 0.00      | 0.00                   |              |                                      |                           |                     |
| 9.1    | PG327            | Satellite Ovest      | Scambiatore 02    | 417.4                          | 133.7                | 90                    | 2.28      | 8.21                   |              |                                      |                           |                     |
| 9.1    | PG327            | Satellite Ovest      | Scambiatore 01    | 0.0                            | 35                   | 35                    | 0.00      | 0.00                   | 181          | 0                                    | 0                         | 0                   |
| 9.1    | PG327            | Satellite Ovest      | Bollitore 01      | 0.0                            | 35                   | 35                    | 0.00      | 0.00                   |              |                                      |                           |                     |
| 9.1    | PG353            | Smistamento Bagagli  | Scambiatore 02    | 0.0                            | 35                   | 35                    | 0.00      | 0.00                   | 77           | 145                                  | 0.77                      | 44.70               |
| 9.1    | PG353            | Smistamento Bagagli  | Scambiatore 01    | 145                            | 134.7                | 90                    | 0.77      | 2.79                   | 179          | 0                                    | 0                         | 0                   |
| 11     | PG359            | Epuia 2              | Scambiatore 01    | 309.5                          | 134.1                | 58                    | 0.97      | 3.50                   | 79           | 618.4                                | 1.94                      | 76.10               |
| 11     | PG359            | Epuia 2              | Scambiatore 02    | 308.9                          | 134.1                | 58                    | 0.97      | 3.49                   | 168          | 0                                    | 0                         | 0                   |
| 11     | PG009A           | Ampl. Corpo Centrale | Scambiatore 02    | 421.1                          | 130.3                | 90                    | 2.50      | 8.99                   | 167          | 0                                    | 0                         | 0                   |
| 11     | PG009A           | Ampl. Corpo Centrale | Scambiatore 01    | 0.0                            | 35                   | 35                    | 0.00      | 0.00                   |              |                                      |                           |                     |
| 11     | PG009A           | Ampl. Corpo Centrale | Scambiatore 03    | 0.0                            | 35                   | 35                    | 0.00      | 0.00                   | 47           | 710.7                                | 4.50                      | 37.70               |
| 11     | PG009A           | Ampl. Corpo Centrale | Scambiatore 04    | 259.6                          | 130.3                | 90                    | 1.54      | 5.54                   |              |                                      |                           |                     |
| 11     | PG009A           | Ampl. Corpo Centrale | Bollitore 02      | 0.0                            | 35                   | 35                    | 0.00      | 0.00                   |              |                                      |                           |                     |
| 11     | PG009A           | Ampl. Corpo Centrale | Bollitore 01      | 30                             | 130.3                | 115                   | 0.47      | 1.69                   |              |                                      |                           |                     |
| 11     | PG319            | Molo Europa          | Scambiatore 01    | 422.6                          | 130.9                | 90                    | 2.47      | 8.89                   | 51           | 422.6                                | 2.47                      | 40.90               |
| 11     | PG319            | Molo Europa          | Scambiatore 02    | 0.0                            | 35                   | 35                    | 0.00      | 0.00                   |              |                                      |                           |                     |
| 11     | PG319            | Molo Europa          | Scambiatore 03    | 0.0                            | 35                   | 35                    | 0.00      | 0.00                   |              |                                      |                           |                     |
| 11     | PG319            | Molo Europa          | Scambiatore 04    | 0.0                            | 35                   | 35                    | 0.00      | 0.00                   |              |                                      |                           |                     |
| 11     | PG319            | Molo Europa          | Scambiatore 06    | 0.0                            | 35                   | 35                    | 0.00      | 0.00                   | 138          | 245.7                                | 1.97                      | 29.84               |
| 11     | PG319            | Molo Europa          | Scambiatore 05    | 205                            | 128.8                | 90                    | 1.26      | 4.54                   |              |                                      |                           |                     |
| 11     | PG319            | Molo Europa          | Bollitore 01      | 40.7                           | 128.8                | 115                   | 0.70      | 2.54                   |              |                                      |                           |                     |
| 12     | PG10             | Torre Controllo      | Scambiatore 02    | 416.5                          | 131.9                | 90                    | 2.37      | 8.55                   | 42           | 843.90                               | 4.81                      | 41.90               |
| 12     | PG10             | Torre Controllo      | Scambiatore 03    | 427.4                          | 131.9                | 90                    | 2.44      | 8.77                   |              |                                      |                           |                     |
| 12     | PG10             | Torre Controllo      | Scambiatore 01    | 0.0                            | 35                   | 35                    | 0.00      | 0.00                   | 164          | 0                                    | 0                         | 0                   |

| CAMERA | CENTRALE TECNICA | DENOMINAZIONE              |                | Q <sub>th</sub> richiesta [kW] | T <sub>in</sub> [°C] | T <sub>out</sub> [°C] | ṁ [kg/s] | ṁ [m <sup>3</sup> /h] | UTENZA IHENA | Q <sub>th</sub> richiesta IHENA [kW] | ṁ richiesta IHENA [kg/s] | DT equivalente [°C] |
|--------|------------------|----------------------------|----------------|--------------------------------|----------------------|-----------------------|-----------|------------------------|--------------|--------------------------------------|---------------------------|---------------------|
| 13     | PG344            | Terminal A                 | Scambiatore 02 | 100.7                          | 133.2                | 104                   | 0.82      | 2.97                   | 31           | 302.1                                | 2.47                      | 29.20               |
| 13     | PG344            | Terminal A                 | Scambiatore 01 | 0.0                            | 35                   | 35                    | 0.00      | 0.00                   |              |                                      |                           |                     |
| 13     | PG344            | Terminal A                 | Scambiatore 03 | 100.5                          | 133.2                | 104                   | 0.82      | 2.96                   |              |                                      |                           |                     |
| 13     | PG344            | Terminal A                 | Scambiatore 04 | 100.9                          | 133.2                | 104                   | 0.83      | 2.97                   |              |                                      |                           |                     |
| 13     | PG344            | Terminal A                 | Scambiatore 05 | 119.5                          | 131.8                | 104                   | 1.03      | 3.70                   | 140          | 219.8                                | 2.02                      | 25.97               |
| 13     | PG344            | Terminal A                 | Scambiatore 06 | 76.6                           | 131.8                | 104                   | 0.66      | 2.37                   |              |                                      |                           |                     |
| 13     | PG344            | Terminal A                 | Bollitore 01   | 23.7                           | 131.8                | 115                   | 0.34      | 1.21                   |              |                                      |                           |                     |
| 13     | PG344            | Terminal A                 | Bollitore 02   | 0.0                            | 35                   | 35                    | 0.00      | 0.00                   |              |                                      |                           |                     |
| 15     | PG309            | Molo Nazionale             | Scambiatore 01 | 0.0                            | 35                   | 35                    | 0.00      | 0.00                   | 81           | 208.5                                | 2.05                      | 24.30               |
| 15     | PG309            | Molo Nazionale             | Scambiatore 02 | 120.4                          | 129.3                | 105                   | 1.18      | 4.26                   |              |                                      |                           |                     |
| 15     | PG309            | Molo Nazionale             | Scambiatore 03 | 88.1                           | 129.3                | 105                   | 0.87      | 3.12                   |              |                                      |                           |                     |
| 15     | PG309            | Molo Nazionale             | Bollitore 01   | 19.4                           | 129.8                | 115                   | 0.31      | 1.13                   | 139          | 19.4                                 | 0.31                      | 14.80               |
| 15     | PG307            | Rampa                      | Scambiatore 01 | 0.0                            | 35                   | 35                    | 0.00      | 0.00                   | 36           | 0                                    | 0                         | 0                   |
| 15     | PG307            | Rampa                      | Scambiatore 02 | 39.4                           | 129                  | 90                    | 0.24      | 0.87                   | 162          | 156.6                                | 1.70                      | 22.05               |
| 15     | PG307            | Rampa                      | Scambiatore 03 | 5.1                            | 129                  | 90                    | 0.03      | 0.11                   |              |                                      |                           |                     |
| 15     | PG307            | Rampa                      | Scambiatore 04 | 0.0                            | 35                   | 35                    | 0.00      | 0.00                   |              |                                      |                           |                     |
| 15     | PG307            | Rampa                      | Scambiatore 05 | 54.2                           | 129                  | 110                   | 0.68      | 2.45                   |              |                                      |                           |                     |
| 15     | PG307            | Rampa                      | Scambiatore 06 | 54.6                           | 129                  | 110                   | 0.69      | 2.47                   |              |                                      |                           |                     |
| 15     | PG307            | Rampa                      | Bollitore 01   | 3.3                            | 129                  | 115                   | 0.06      | 0.20                   |              |                                      |                           |                     |
| 17     | PG Hilton        | Hilton                     | Scambiatore 01 | 441.1                          | 135.1                | 100                   | 3.00      | 10.81                  | 80           | 906.9                                | 6.31                      | 34.32               |
| 17     | PG Hilton        | Hilton                     | Scambiatore 02 | 438.1                          | 135.1                | 100                   | 2.98      | 10.73                  |              |                                      |                           |                     |
| 17     | PG Hilton        | Hilton                     | Bollitore 01   | 27.7                           | 135.1                | 115                   | 0.33      | 1.19                   |              |                                      |                           |                     |
| 17     | PG Hilton        | Hilton                     | Bollitore 02   | 0.0                            | 35                   | 35                    | 0.00      | 0.00                   |              |                                      |                           |                     |
| 17     | PG Hilton        | Hilton                     | Bollitore 03   | 0.0                            | 35                   | 35                    | 0.00      | 0.00                   | 159          | 0                                    | 0                         | 0                   |
| 22     | PG117            | Sede ADR                   | Scambiatore 01 | 273.8                          | 136.1                | 90                    | 1.42      | 5.11                   | 17           | 516.3                                | 2.68                      | 46.10               |
| 22     | PG117            | Sede ADR                   | Scambiatore 02 | 242.5                          | 136.1                | 90                    | 1.26      | 4.52                   | 154          | 0                                    | 0                         | 0                   |
| 22     | PG21             | Minuto Mantenimento        | Scambiatore 01 | 58.6                           | 129.9                | 90                    | 0.35      | 1.26                   | 23           | 58.6                                 | 0.35                      | 39.90               |
| 22     | PG21             | Minuto Mantenimento        | Bollitore 01   | 14.8                           | 127.6                | 115                   | 0.28      | 1.01                   | 142          | 14.8                                 | 0.28                      | 12.60               |
| 22     | PG18             | Accasermamenti             | Scambiatore 01 | 232.4                          | 134.8                | 90                    | 1.24      | 4.46                   | 21           | 232.4                                | 1.24                      | 44.80               |
| 22     | PG18             | Accasermamenti             | Bollitore 01   | 1.3                            | 118.3                | 115                   | 0.09      | 0.34                   | 143          | 1.3                                  | 0.09                      | 3.30                |
| 22     | PG18             | Accasermamenti             | Bollitore 02   | 0.0                            | 35                   | 35                    | 0.00      | 0.00                   |              |                                      |                           |                     |
| 24     | PG12             | Chiesa                     | Scambiatore 01 | 34.7                           | 132.1                | 90                    | 0.20      | 0.71                   | 13           | 34.7                                 | 0.20                      | 42.10               |
| 24     | PG11             | Caserma VVFF               | Bollitore 01   | 29.8                           | 134.8                | 115                   | 0.36      | 1.29                   | 14           | 106.7                                | 0.77                      | 33.12               |
| 24     | PG11             | Caserma VVFF               | Scambiatore 01 | 76.9                           | 134.8                | 90                    | 0.41      | 1.48                   | 153          | 0                                    | 0                         | 0                   |
| 6      | PG298            | Mensa Ovest e Sanità Aerea | Scambiatore 01 | 427.4                          | 136.8                | 90                    | 2.18      | 7.85                   | 8            | 427.4                                | 2.18                      | 46.80               |
| 6      | PG298            | Mensa Ovest e Sanità Aerea | Scambiatore 02 | 0.0                            | 35                   | 35                    | 0.00      | 0.00                   |              |                                      |                           |                     |
| 6      | PG298            | Mensa Ovest e Sanità Aerea | Scambiatore 03 | 0.0                            | 35                   | 35                    | 0.00      | 0.00                   |              |                                      |                           |                     |
| 6      | PG298            | Mensa Ovest e Sanità Aerea | Bollitore 01   | 0.0                            | 35                   | 35                    | 0.00      | 0.00                   | 149          | 0                                    | 0                         | 0                   |
| 6      | PG298            | Mensa Ovest e Sanità Aerea | Bollitore 02   | 0.0                            | 35                   | 35                    | 0.00      | 0.00                   |              |                                      |                           |                     |

I risultati della validazione per le principali grandezze di interesse sono presentati in **Tabella 4**, in cui vengono riportati il valore reale misurato, il valore risultato della simulazione con il software IHENA e lo scarto percentuale tra i due valori. Come si può osservare, vi è una buona corrispondenza tra i risultati della simulazione e i valori misurati con uno scarto percentuale minimo pari allo 0.00 % – in corrispondenza della temperatura di mandata della centrale e delle pressioni di mandata e di ritorno in centrale – ed uno scarto percentuale massimo pari al 7.21 % – registrato per la temperatura di ritorno sul ramo D.

**Tabella 4** – Risultati della validazione della rete in esame nel regime di funzionamento denominato *rete base invernale*.

|   | <b>Rete reale<br/>(valore misurato)</b> | <b>IHENA<br/>(risultato simulazione)</b> | <b>Scarto percentuale</b> |
|---|---|--|---------------------------|
| <b>Temperatura mandata AS in centrale [°C]</b>            | 138.00                                  | 138.00                                   | 0.00 %                    |
| <b>Temperatura ritorno ramo A [°C]</b>                    | 91.50                                   | 91.33                                    | 0.19 %                    |
| <b>Temperatura ritorno ramo B [°C]</b>                    | 96.30                                   | 95.68                                    | 0.64 %                    |
| <b>Temperatura ritorno ramo D [°C]</b>                    | 99.00                                   | 91.86                                    | 7.21 %                    |
| <b>Temperatura ritorno ramo E [°C]</b>                    | 108.30                                  | 110.99                                   | - 2.48 %                  |
| <b>Temperatura ritorno generale collettore PG314 [°C]</b> | 96.10                                   | 96.16                                    | - 0.06 %                  |
| <b>Pressione collettore di mandata [bar]</b>              | 8.10                                    | 8.10                                     | 0.00 %                    |
| <b>Pressione collettore generale ritorno [bar]</b>        | 7.00                                    | 7.00                                     | 0.00 %                    |
| <b>Portata complessiva ritorno in camera [kg/s]</b>       | 73.06                                   | 72.63                                    | 0.58 %                    |
| <b>Portata ritorno ramo A [kg/s]</b>                      | 27.78                                   | 28.20                                    | - 1.52 %                  |
| <b>Portata ritorno ramo B [kg/s]</b>                      | 24.72                                   | 24.46                                    | 1.06 %                    |
| <b>Portata ritorno ramo D [kg/s]</b>                      | 8.06                                    | 7.76                                     | 3.67 %                    |
| <b>Portata ritorno ramo E [kg/s]</b>                      | 12.50                                   | 12.21                                    | 2.32 %                    |

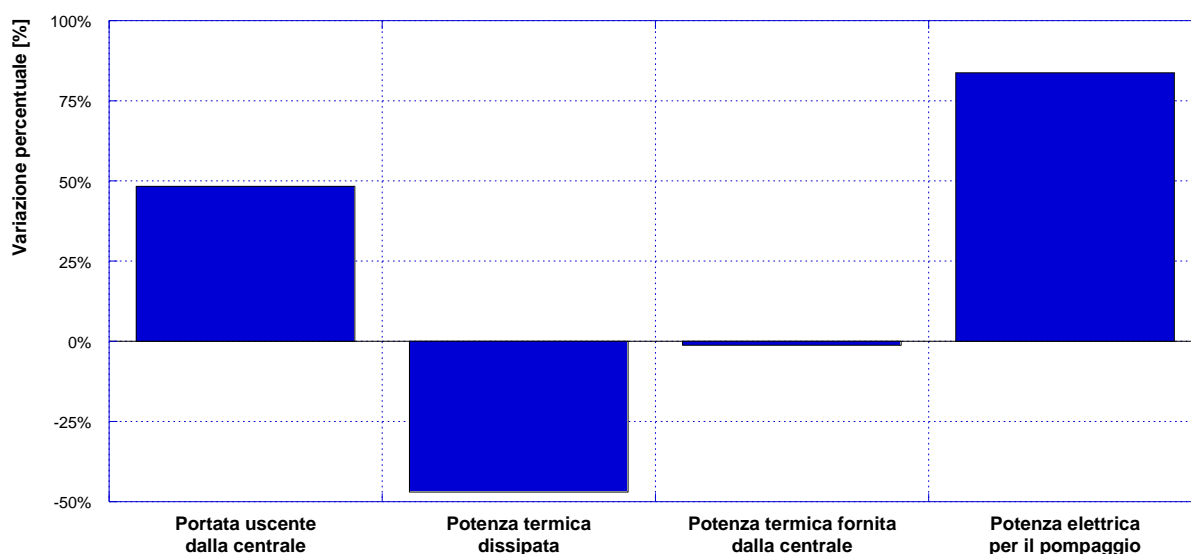
## 5 Analisi sulla temperatura di mandata della rete

Come risulta evidente da quanto presentato nei precedenti capitoli, la rete di teleriscaldamento in esame è stata progettata per essere gestita con una temperatura di mandata elevata (150 °C, si veda **Capitolo 3**) ed un salto di temperatura in corrispondenza di ciascuna utenza pari a circa 50÷60 °C. Al fine di diminuire le dissipazioni termiche lungo la rete, è stata dunque analizzata la possibilità di diminuirne le temperature di esercizio. In particolare, facendo riferimento all'assetto di design della rete (**Capitolo 3**), si è fissata una temperatura di mandata della rete in corrispondenza della centrale pari a 80 °C ed un salto di temperatura tra mandata e ritorno della rete in corrispondenza di ciascuna utenza pari a 30 °C. Tale valore, che risulta evidentemente ridotto rispetto ai 50÷60 °C di design, è dovuto alla volontà di non abbassare in maniera eccessiva la temperatura nei rami di ritorno della rete. Conseguentemente alla modifica di queste condizioni al contorno e mantenendo inalterati i fabbisogni termici delle utenze, la portata richiesta da ciascuna utenza – e dunque anche quella complessivamente circolante in rete – risultano aumentate. Si rende pertanto necessario un adeguamento della pressione di mandata della rete in esame, al fine di scongiurare l'inversione di flusso in alcuni rami della rete, a causa delle elevate perdite di carico. Nel dettaglio, la pressione di mandata è stata fissata in modo tale da ottenere un salto di pressione minimo sull'utenza più sfavorita (ID #162) pari a 0.5 bar e risulta essere pari a 18.51 bar, contro i 10.75 bar della configurazione di design. Non sono state, invece, apportate variazioni alla pressione del vaso di espansione, ovvero in corrispondenza della centrale sulla direttrice di ritorno della rete.

I risultati ottenuti dalla simulazione della rete così come appena presentata sono elencati in **Tabella 5**. Mentre in **Figura 13** si riporta un confronto – in termini di variazione percentuale – rispetto al caso di riferimento (rete in condizioni di design).

**Tabella 5 – Risultati ottenuti per la rete in esame gestita con bassa temperatura di mandata (80 °C).**

|  | Unità  | Valore |
|--|--------|--------|
| <b>Portata in massa totale uscente dalla centrale</b>            | [kg/s] | 686    |
| <b>Potenza termica fornita alle utenze</b>                       | [kW]   | 86131  |
| <b>Potenza termica dissipata nell'attraversamento della rete</b> | [kW]   | 1174   |
| <b>Potenza termica fornita dalla centrale</b>                    | [kW]   | 87306  |
| <b>Potenza elettrica spesa per il pompaggio</b>                  | [kW]   | 863    |



**Figura 13 – Variazioni percentuali – tra caso con temperatura di mandata pari a 80 °C e caso di design – di portata totale uscente dalla centrale, dissipazioni termiche lungo la rete, potenza termica fornita dalla centrale e spese per il pompaggio.**

Come si può osservare, la portata complessivamente uscente dalla centrale risulta essere quasi raddoppiata rispetto alla configurazione di design, attestandosi ad un valore di 686 kg/s. Tale risultato, come già detto, è dovuto alla diminuzione del salto di temperatura tra mandata e ritorno della rete. Di conseguenza, la potenza elettrica necessaria per il pompaggio passa dai 140 kW del caso di design agli 863 kW della rete a bassa temperatura, con un aumento di poco inferiore all'84 %. L'abbassamento della temperatura di mandata della rete comporta, tuttavia, benefici in termini di dissipazioni termiche lungo la rete, che diminuiscono di circa il 47 %, passando da 2.2 MW (design) a 1.2 MW (rete a bassa temperatura). Pertanto, ne risulterà diminuita anche la potenza termica che deve essere fornita dalla centrale per soddisfare i fabbisogni delle utenze allacciate alla rete: essa infatti diminuisce di un valore pari all'1.2 %.

## 6 Rete modificata

Sulla base di informazioni aggiuntive (si veda a tal proposito [Figura 14](#)), si è venuti a conoscenza di recenti modifiche apportate alla rete di teleriscaldamento in esame che hanno condotto alla modifica della mappa della rete all'interno del modello precedentemente illustrato. In particolare, così come è possibile osservare in [Figura 15](#), sono state apportate le seguenti modifiche:

- aggiunta di un gruppo frigorifero ad assorbimento in corrispondenza del Terminal A. Non essendo in possesso di informazioni dettagliate riguardo all'anello di alimentazione di tale utenza, si è considerato – al pari delle altre utenze e come descritto in precedenza – uno sdoppiamento fittizio che permetta una possibile alimentazione all'assorbitore sia dall'anello stagionale che da quello annuale. Tale utenza aggiuntiva è pertanto rappresentata dai nodi 198 e 199 in [Figura 15](#);
- eliminazione dell'utenza PG353 e introduzione del Molo E, rappresentato dal nodo 77 in [Figura 15](#). Anche in questo caso per completezza si è deciso di “sdoppiare l'utenza” in modo tale da consentire una maggior flessibilità per le analisi successive. I rami e i nodi non esistenti nella rete reale sono rappresentati da una linea nera tratteggiata in [Figura 15](#), mentre le linee nere continue rappresentano rami esistenti ma normalmente chiusi secondo l'attuale gestione della rete. Si evidenzia il fatto che non è disponibile alcuna informazione sulla tipologia di scambiatori installati presso il Molo E;
- l'utenza precedentemente denominata PG49 risulta attualmente identificata come PG118 ed è costituita da un bollitore (nodo 70 in [Figura 15](#)), invece che da uno scambiatore.

Per quanto riguarda i diametri e tutti i parametri caratteristici delle tubazioni che costituiscono i rami aggiuntivi, si è proceduto come esposto precedentemente nel [Capitolo 3](#) e dettagliato in [Appendice B](#).

Le modifiche appena descritte sono state implementate all'interno del software IHENA 2.0, portando alla creazione di un nuovo modello della rete costituito da 224 rami e 199 nodi, di cui 1 sorgente, 152 miscelatori e 46 utenze. La lunghezza complessiva della rete, comprendente sia le tubazioni di mandata che quelle di ritorno, risulta di poco superiore ai 31 km.

Una volta implementata la nuova geometria della rete all'interno di IHENA 2.0, si è proceduto con la definizione degli scenari da analizzare, così come verrà dettagliato nei seguenti capitoli.



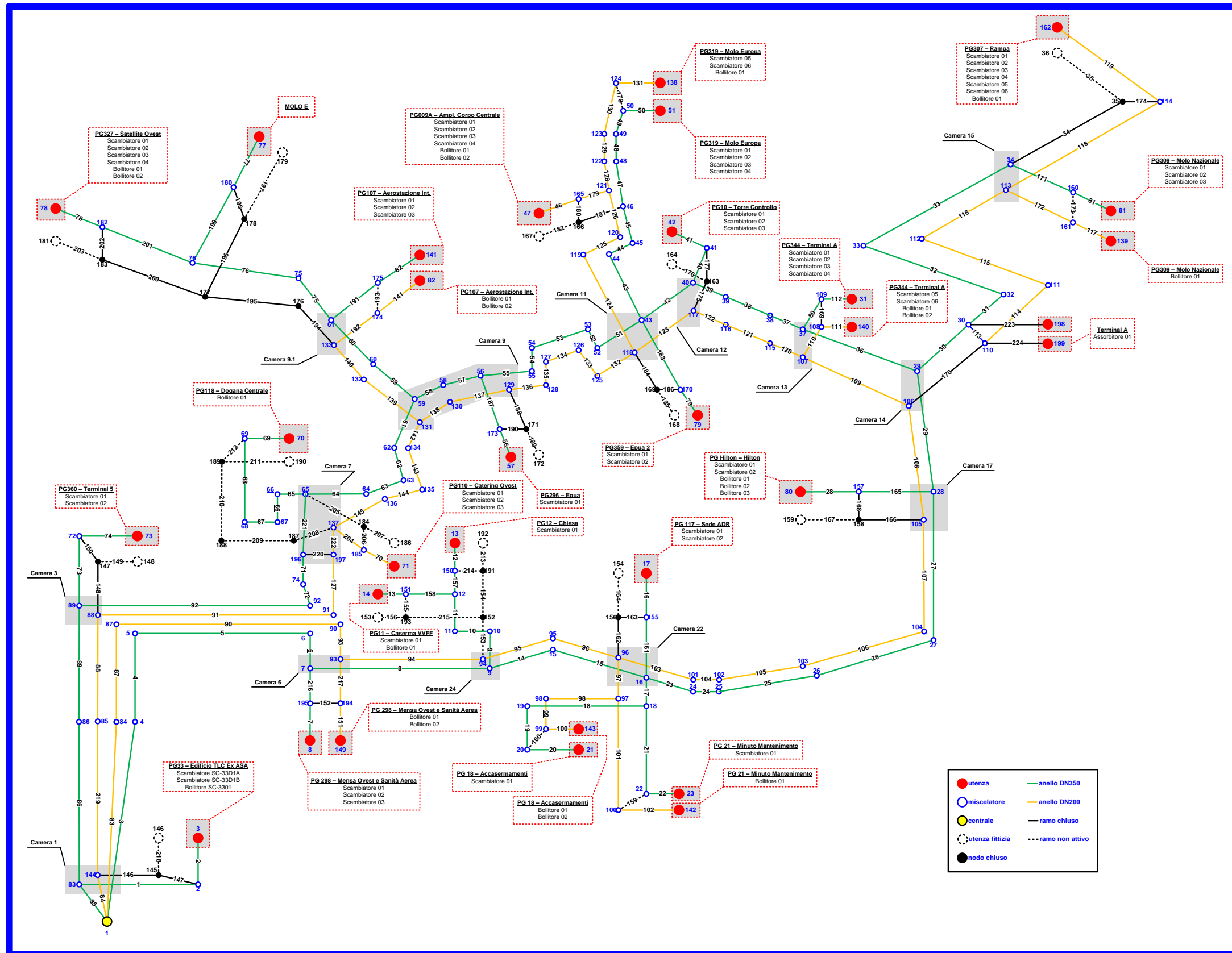
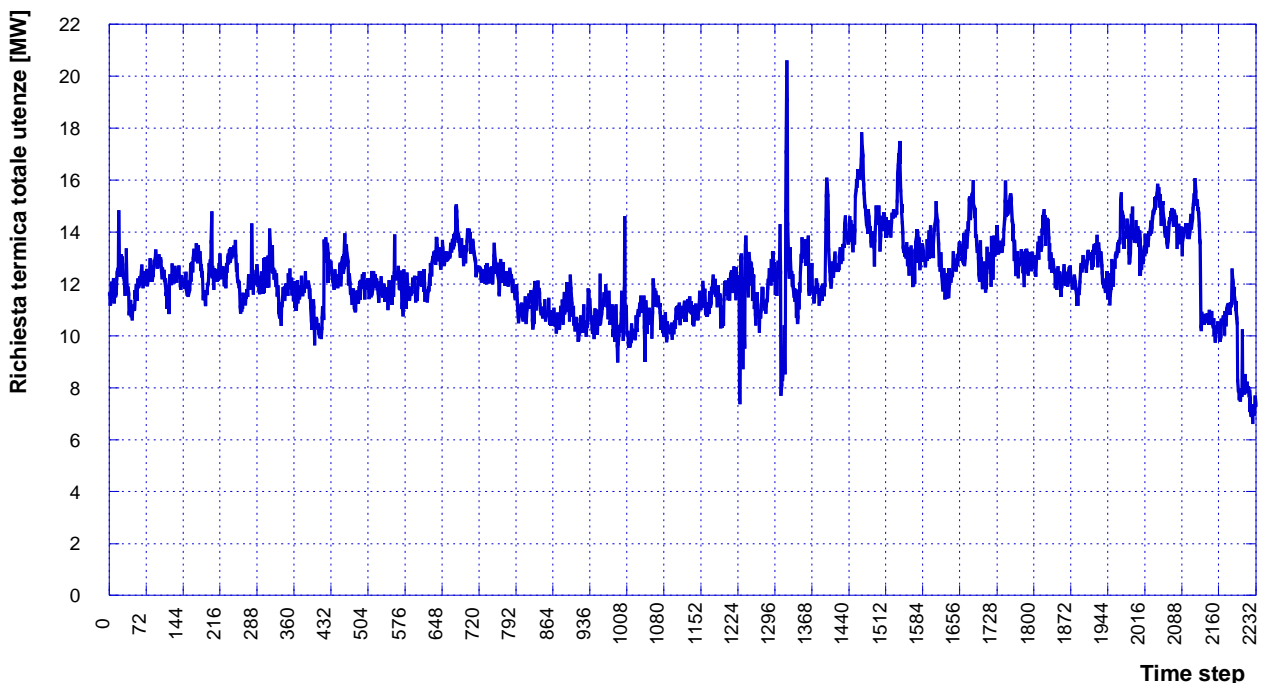


Figura 15 – Mappa della rete modificata secondo le informazioni aggiuntive ricevute.

## 7 Analisi dati Dicembre 2017

Con l'obiettivo di analizzare le attuali modalità di funzionamento e gestione della rete di teleriscaldamento in esame, si è presa in considerazione la situazione relativa al mese di dicembre 2017. In dettaglio, sulla base dei sensori di misura installati presso la rete di Fiumicino e delle informazioni rese disponibili dai gestori della stessa, è stato possibile ricavare – per tutto il mese di dicembre 2017 – il profilo di richiesta di potenza termica di ciascuna camera presente lungo la rete con un intervallo di misura pari 20 minuti (2232 time step in totale). A partire da tali profili, si è quindi risaliti al profilo di potenza termica complessivamente richiesto dal totale delle utenze allacciate alla rete, presentato in funzione del time step in **Figura 16**. Si segnala tuttavia, che – sulla base di quanto concordato con ENEA – si è deciso di non considerare, per le successive analisi, i dati relativi ai giorni dal 21 dicembre in poi, in quanto stando alle informazioni disponibili sembrerebbero corrispondenti una situazione di richiesta termica anomala e pertanto non rappresentativi del funzionamento medio della rete in esame.

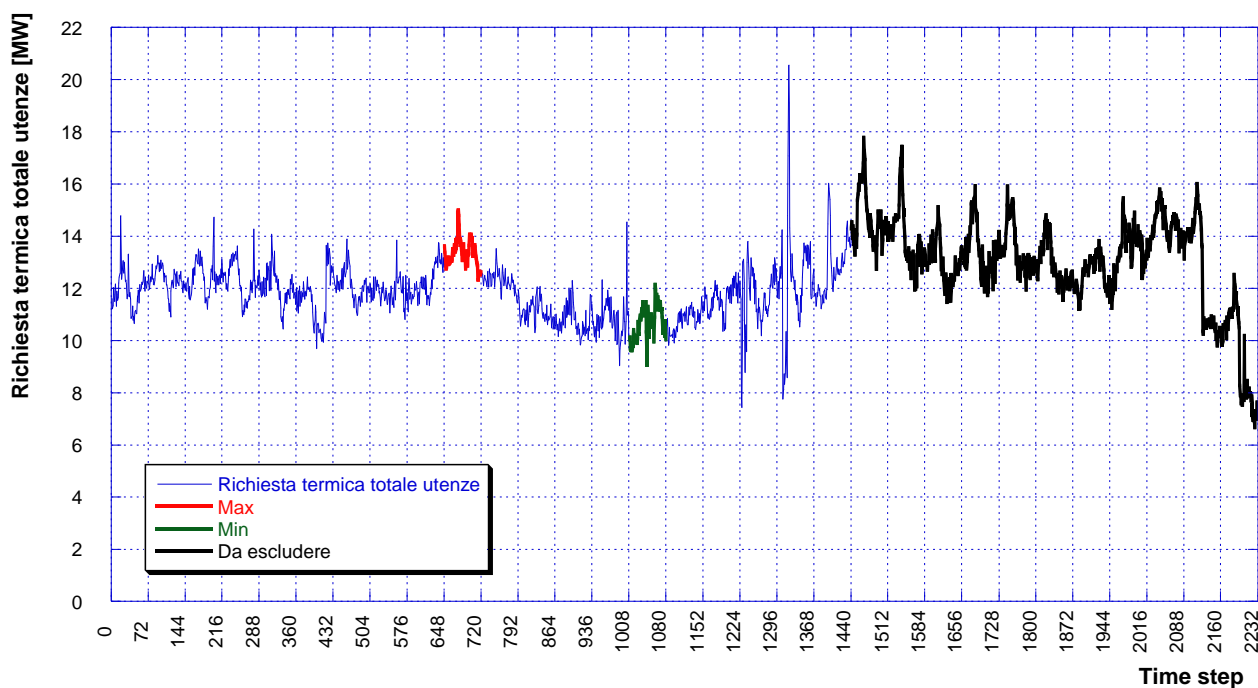
Ai fini delle simulazioni da condurre si è quindi scelto di individuare – tra i primi 20 giorni del mese – due giorni che possano essere definiti “estremi” in termini di richiesta energetica delle utenze, in modo tale da analizzare il comportamento termoidraulico della rete in condizioni il più possibile diverse. A tale proposito è stata calcolata (si veda **Tabella 6**), per ciascun giorno utile del mese, l'energia termica giornalmente richiesta dal totale delle utenze, consentendo quindi di selezionare i giorni di massima (10 dicembre 2017) e minima (15 dicembre 2017) energia termica richiesta. Per completezza e per maggior chiarezza, in **Figura 17** è riportato nuovamente l'andamento dell'energia termica richiesta dalle utenze in funzione del time step, con evidenziati il giorno di massima richiesta termica (in rosso), il giorno di minima richiesta termica (in verde) ed i giorni non utili ai fini delle successive valutazioni (in nero).



**Figura 16** – Richiesta termica totale utenze mese di dicembre 2017.

**Tabella 6** – Energia termica totale richiesta giornalmente dalle utenze nel mese di dicembre 2017 (primi 20 giorni).

| Giorno | Energia termica totale giorno [MWh] |
|--------|-------------------------------------|
| 1      | 286.3                               |
| 2      | 296.1                               |
| 3      | 298.0                               |
| 4      | 295.3                               |
| 5      | 288.8                               |
| 6      | 277.3                               |
| 7      | 290.5                               |
| 8      | 285.2                               |
| 9      | 293.7                               |
| 10     | 320.5                               |
| 11     | 295.6                               |
| 12     | 266.2                               |
| 13     | 259.4                               |
| 14     | 259.1                               |
| 15     | 256.2                               |
| 16     | 258.3                               |
| 17     | 278.8                               |
| 18     | 279.4                               |
| 19     | 294.8                               |
| 20     | 306.0                               |



**Figura 17** – Richiesta termica totale utenze mese di dicembre 2017, con evidenziati il giorno di massima richiesta termica (in rosso), il giorno di minima richiesta termica (in verde) ed i giorni non utili ai fini delle successive valutazioni (in nero).

Prendendo in considerazione solo i giorni di massima e minima richiesta termica, a partire dai profili su base 20 minuti sono stati ricavati i profili di richiesta termica su base oraria, per ciascuna camera dislocata lungo la rete e, successivamente, per ciascuna utenza connessa. Più in dettaglio, essendo noti unicamente i dati relativi alle camere, le quali in alcuni casi possono servire più utenze, si è resa necessaria una ripartizione della potenza complessiva richiesta da ciascuna camera tra le utenze che da essa si diramano. Il criterio scelto per tale suddivisione è stato quello di mantenere le stesse percentuali del caso di design, documentate in [1] ed elencate in **Tabella 7**. Come si può facilmente notare, il numero di utenze che presentano una richiesta di energia termica nel mese di dicembre 2017 è inferiore rispetto a quanto visto sia in condizioni di design della rete che nello scenario simulato per la validazione (**Capitolo 4**). Si registra infatti, durante il mese di dicembre, la completa chiusura di 12 utenze. In **Figura 18** è quindi presentata la mappa della rete modificata, con – evidenziati in nero – tutti i rami ed i nodi che risultano chiusi a dicembre 2017.

**Tabella 7 – Ripartizione della richiesta termica di ciascuna camera tra le utenze.**

| Camera          | ID utenza | Quota parte di potenza richiesta dalla camera che va verso l'utenza |
|-----------------|-----------|---|
| 1 (PG33)        | 3         | 100.00 %  |
| 9.1 (PG107)     | 141       | 98.68 %   |
|                 | 82        | 1.32 %  |
| 9.1 (Molo E)    | 77        | 100.00 %  |
| 9 (PG296)       | 57        | 100.00 %  |
| 12 (PG10)       | 42        | 100.00 %  |
| 13 (PG344)      | 31        | 82.69 %   |
|                 | 140       | 17.31 %   |
| 14 (Terminal A) | 198       | 50.00 %   |
|                 | 199       | 50.00 %   |
| 15 (PG307)      | 162       | 100.00 %  |
| 15 (PG309)      | 81        | 96.15 %   |
|                 | 139       | 3.85 %  |
| 17 (PGHilton)   | 80        | 100.00 %  |
| 24 (PG11+PG12)  | 13        | 12.06 %   |
|                 | 14        | 87.94 %   |
| 6 (PG298)       | 8         | 93.21 %   |
|                 | 149       | 6.79 %  |

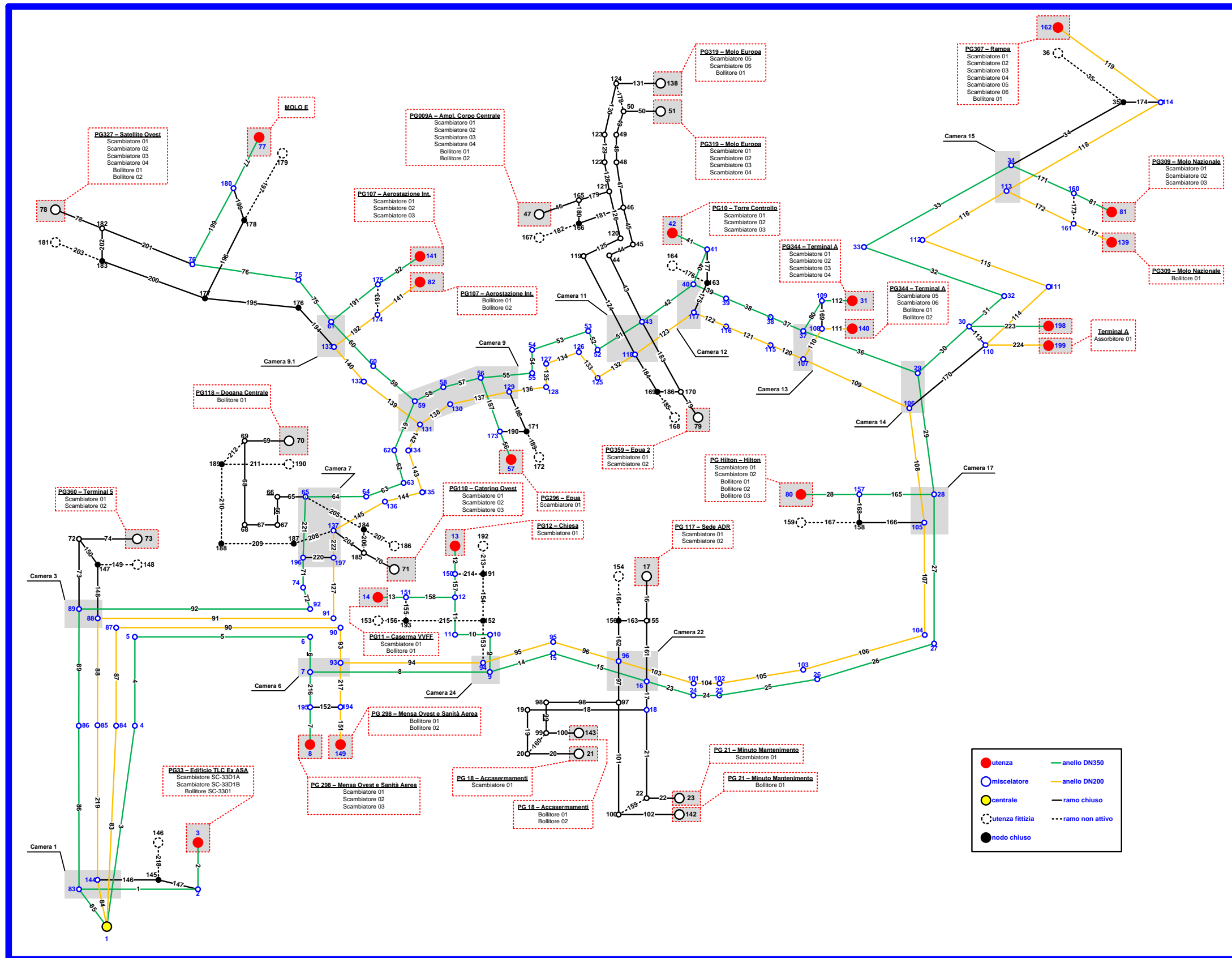
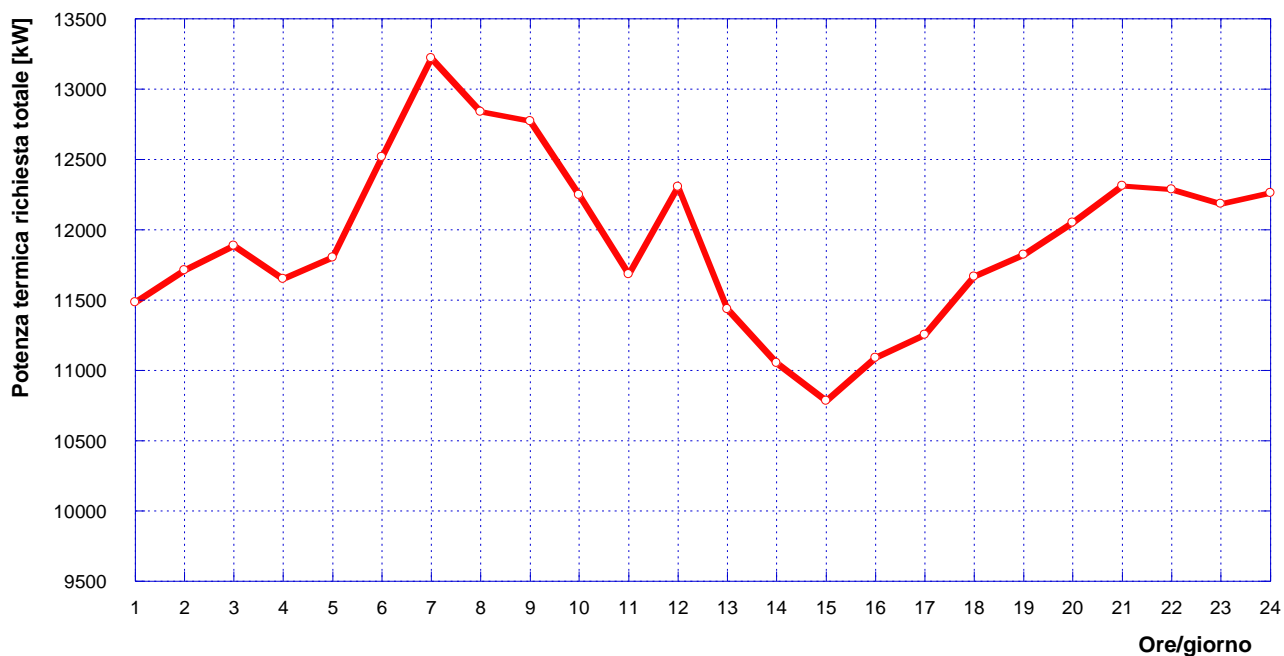
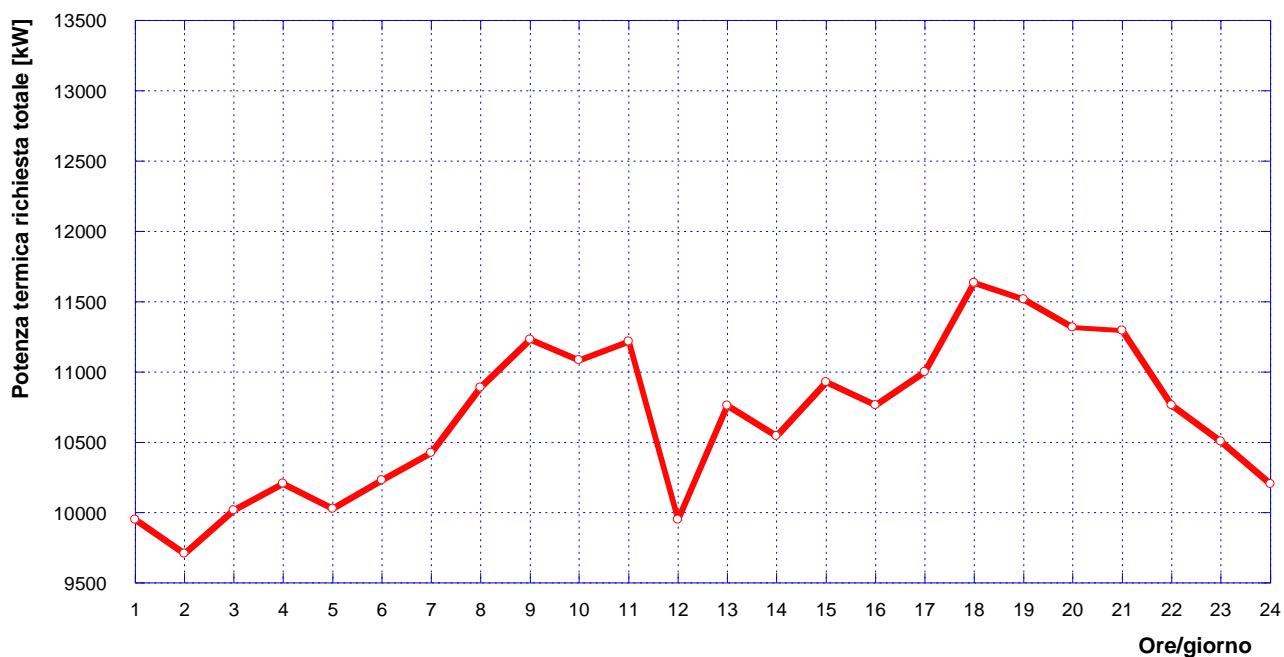


Figura 18 – Rete modificata con chiusure.

L'andamento giornaliero della potenza termica complessivamente richiesta dalle utenze allacciate alla rete è presentato in **Figura 19**, per il giorno di massima richiesta di energia termica, e in **Figura 20**, per il giorno di minima richiesta. Come si può osservare, l'andamento della richiesta termica risulta abbastanza irregolare, con un valore massimo – pari a poco più di 13.2 MW – in corrispondenza delle ore 7:00 del 10 dicembre 2017 (giorno di massima richiesta termica) ed un valore minimo – pari a circa 9.7 MW – alle ore 2:00 del 15 dicembre 2017 (giorno di minima richiesta termica).



**Figura 19** – Profilo giornaliero di potenza termica complessivamente richiesta dalle utenze – giorno di massima richiesta (10 dicembre 2017).



**Figura 20** – Profilo giornaliero di potenza termica complessivamente richiesta dalle utenze – giorno di minima richiesta (15 dicembre 2017).

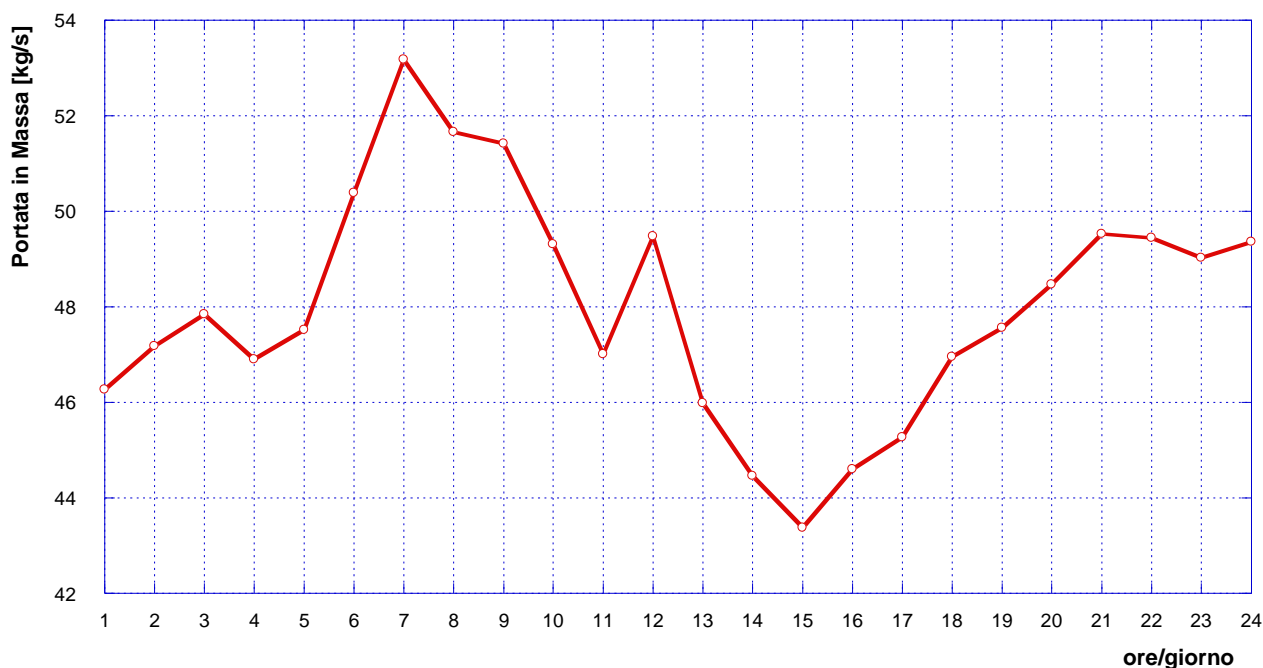
## 8 Simulazioni

Sulla base dei profili di richiesta delle utenze allacciate alla rete, determinati come descritto nel capitolo precedente, il comportamento della rete di teleriscaldamento a servizio dell’Aeroporto di Roma Fiumicino è stato simulato ed analizzato. Per una prima valutazione termoidraulica della rete, non avendo a disposizione dati precisi sulle pressioni di mandata della rete e al vaso di espansione, si è fatto riferimento alle condizioni di design presentate in [1]. Pertanto, le simulazioni sono state condotte imponendo una pressione di mandata della rete pari a 10.75 bar ed una pressione in corrispondenza del vaso di espansione (ritorno in centrale) pari a 7.4 bar. La temperatura di mandata della rete è inoltre mantenuta inalterata rispetto alle condizioni di design e risulta dunque essere pari a 150 °C. Per quanto riguarda la modalità di gestione della rete, infine, si è optato per un regime di funzionamento a DeltaT costante, che in base alle informazioni disponibili dovrebbe rappresentare correttamente l’attuale gestione della rete in esame.

I risultati delle simulazioni sono presentati in **Figura 21**, in **Figura 22** e in **Figura 23** per quanto riguarda il giorno di massima richiesta di energia termica. Nel dettaglio, in **Figura 21** è riportato l’andamento della portata totale circolante nella rete nel giorno di massima richiesta di energia termica da parte delle utenze, risultante dalle simulazioni svolte con IHENA. Come si può facilmente notare, dal momento che la rete viene gestita a DeltaT costante e portata variabile, l’andamento della portata in massa segue quello della potenza termica complessivamente richiesta dalle utenze (si veda a tale proposito **Figura 19**). Il valore massimo di portata in massa si registra pertanto in corrispondenza delle ore 7:00 e risulta essere pari a 53.2 kg/s, mentre il valore minimo si registra alle ore 15:00 e risulta essere pari a 43.4 kg/s.

In **Figura 22** è invece presentato l’istogramma relativo agli andamenti della potenza termica fornita alle utenze e di quella dissipata nell’attraversamento della rete. Come si può notare, durante l’arco della giornata le dissipazioni termiche si mantengono circa costanti, variando all’interno del range compreso tra 1217 kW e 1299 kW. Nel complesso, quindi, la potenza termica che la centrale deve fornire alla rete nel giorno di massima richiesta energetica è compresa tra 10.8 MW e 13.2 MW.

I risultati relativi alla potenza elettrica per il pompaggio sono, infine, presentati in **Figura 23**: tale potenza risulta essere estremamente contenuta, variando in un intervallo compreso tra 17 kW e circa 21 kW.



**Figura 21** – Andamento della portata in massa in uscita dalla centrale nel giorno di massima richiesta di energia termica.

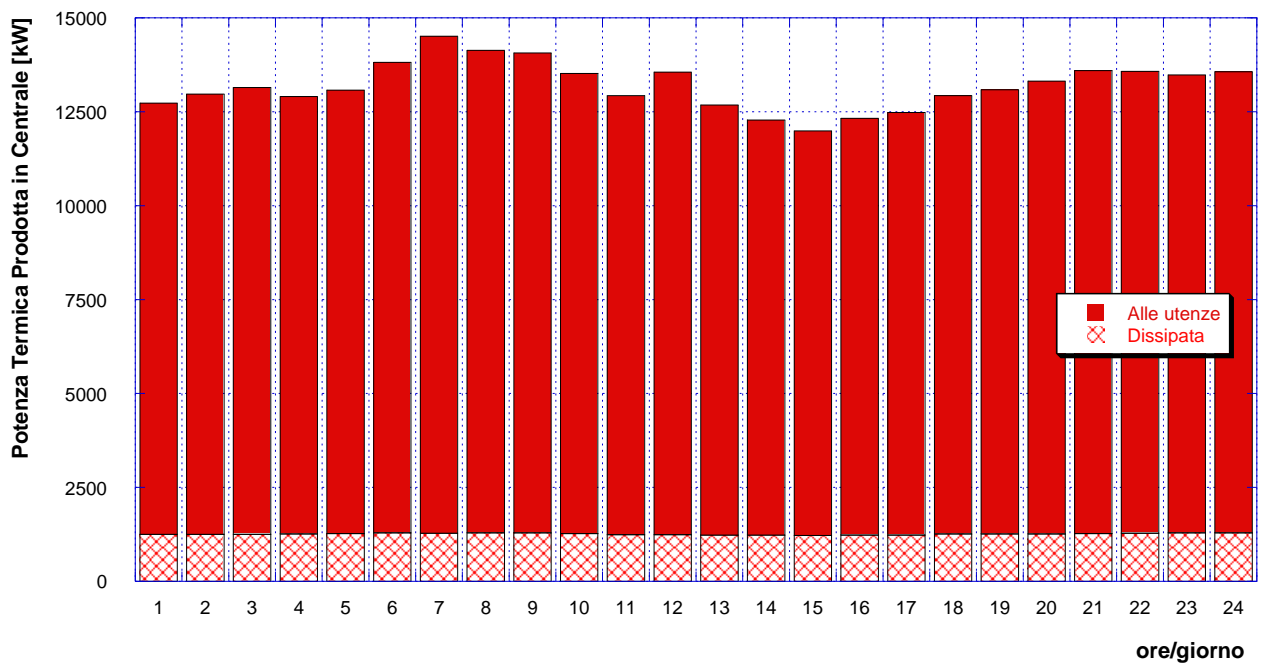


Figura 22 – Andamento della potenza termica fornita alle utenze e dissipata in rete nel giorno di massima richiesta di energia termica.

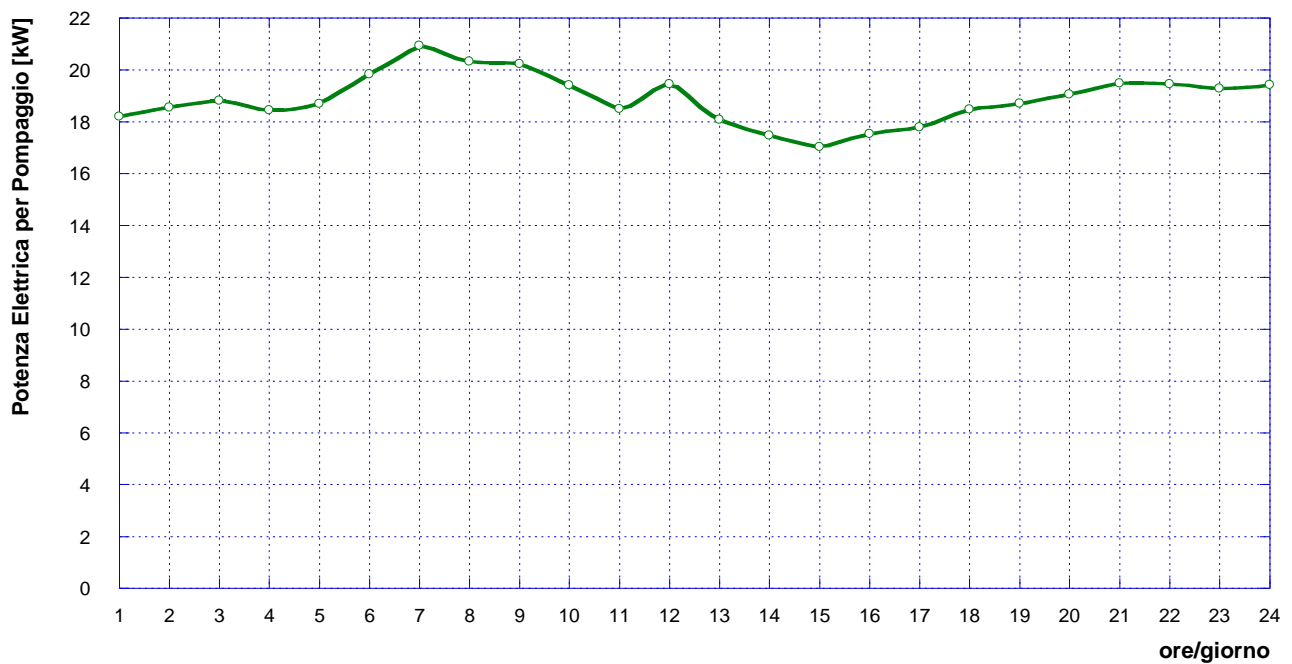
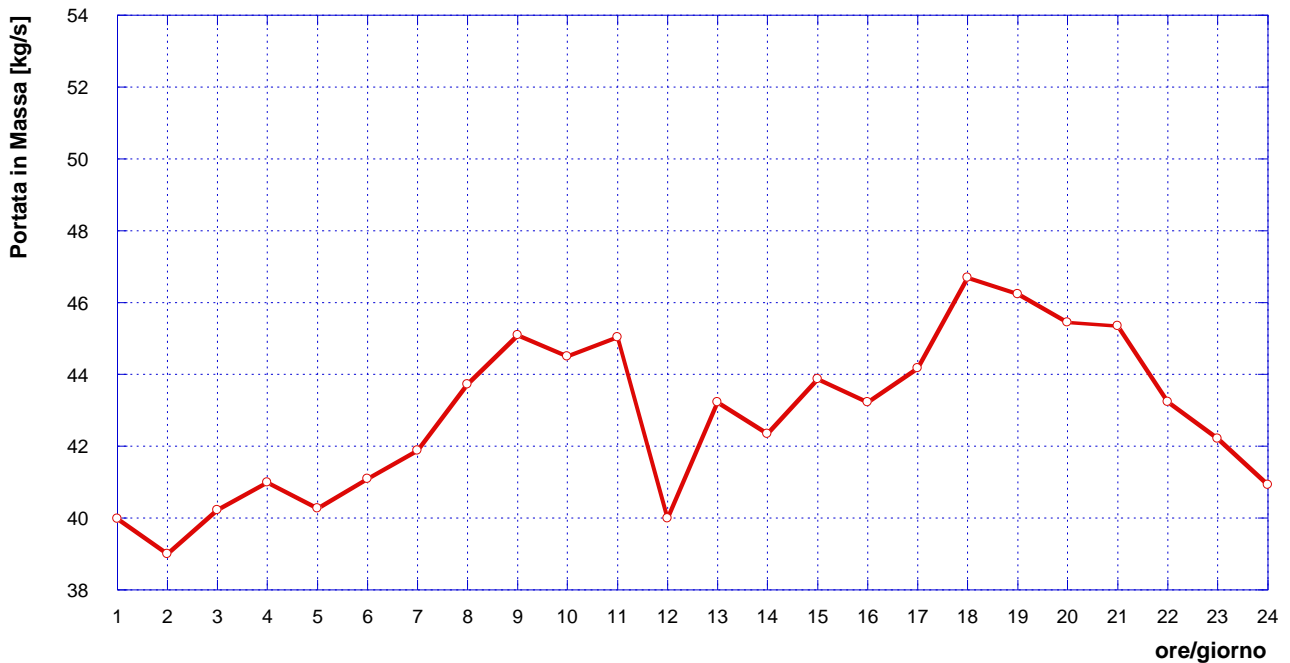


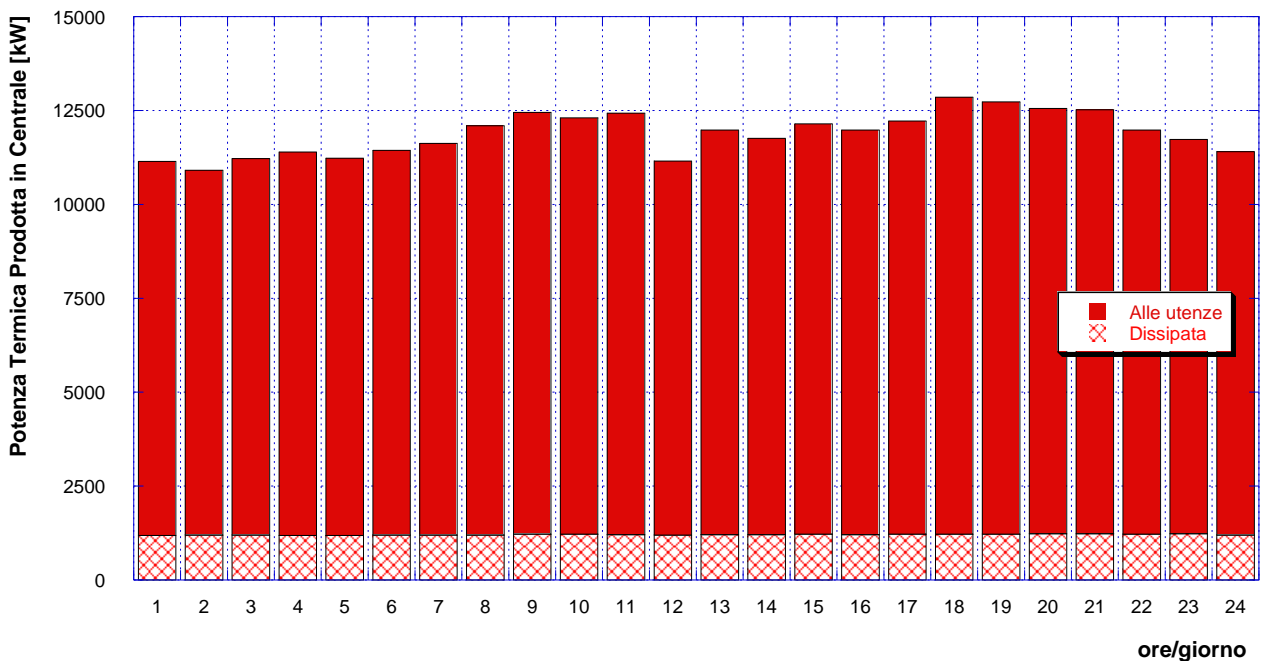
Figura 23 – Andamento della potenza elettrica richiesta dalla stazione di pompaggio nel giorno di massima richiesta di energia termica.

Relativamente al giorno di minima richiesta di energia termica, i risultati sono presentati in [Figura 24](#), in [Figura 25](#) ed in [Figura 26](#). Nel dettaglio, in [Figura 24](#) è presentato il profilo orario della portata in massa complessivamente circolante all'interno della rete. Come si può notare, si riscontrano due picchi, il primo tra le 9:00 e le 11:00 del mattino (pari ad un valore di poco superiore a 45 kg/s) e il secondo verso le ore 18:00 (pari a 46.7 kg/s). L'andamento della potenza termica complessivamente prodotta dalla centrale,

suddivisa tra potenza termica fornita alle utenze e potenza termica dissipata in rete, nel giorno di minima richiesta viene presentato in **Figura 25**. Come per il caso del giorno di massima energia termica richiesta, si può osservare che le dissipazioni termiche si mantengono circa costanti nel corso della giornata, al variare della richiesta termica delle utenze, attestandosi mediamente attorno ad un valore di 1.2 MW (pari a circa il 10 % della produzione della centrale).

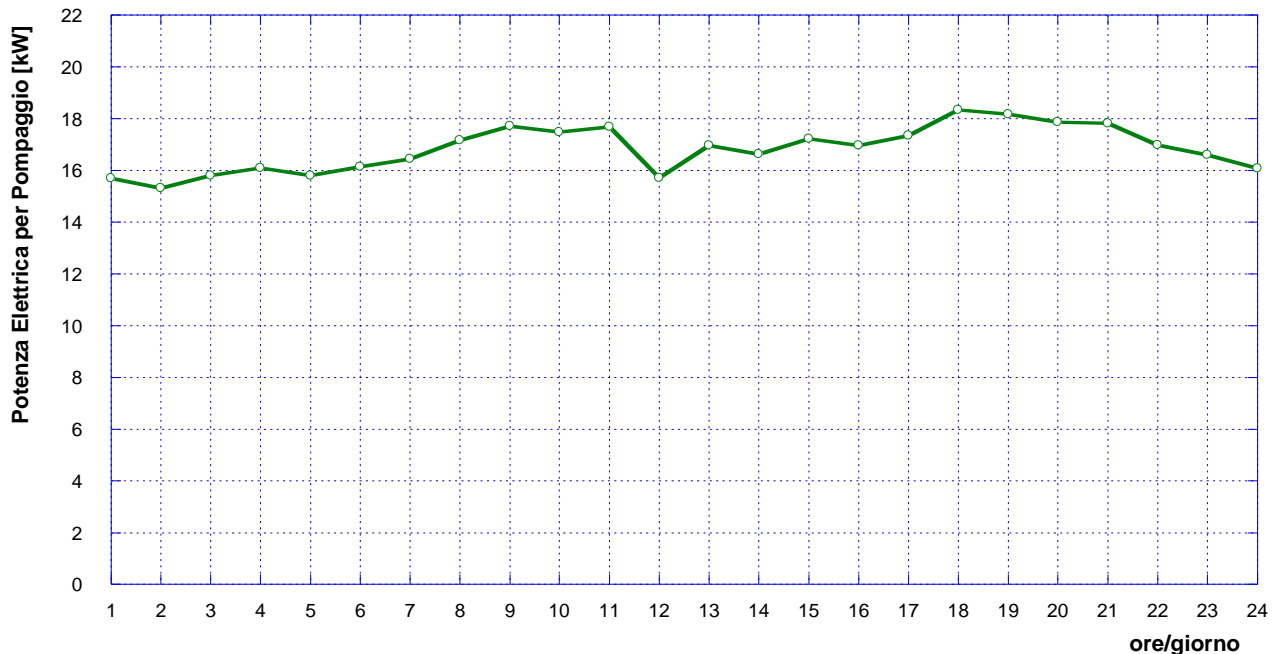


**Figura 24** – Andamento della portata in massa in uscita dalla centrale nel giorno di minima richiesta di energia termica.



**Figura 25** – Andamento della potenza termica fornita alle utenze e dissipata in rete nel giorno di minima richiesta di energia termica.

Infine, in **Figura 26** è mostrato l'andamento orario della potenza elettrica spesa per il pompaggio, che varia tra un valore minimo pari a 15.3 kW (in corrispondenza delle ore 2:00) ed un valore massimo pari a 18.3 kW (in corrispondenza delle ore 18:00).



**Figura 26** – Andamento della potenza elettrica richiesta dalla stazione di pompaggio nel giorno di minima richiesta di energia termica.

Le simulazioni effettuate hanno permesso di mettere in luce alcune criticità nel funzionamento attuale della rete. Innanzitutto, la rete risulta essere estremamente sovradimensionata rispetto ai fabbisogni attuali delle utenze ad essa allacciate: rispetto ai circa 86 MW di design, infatti, nel mese di dicembre 2017 la richiesta di potenza termica da parte della rete si è attestata tra i 10 e i 15 MW. Conseguentemente, le velocità dell'acqua nell'attraversare la rete risultano estremamente basse.

### 8.1 Possibili scenari ottimizzati

Con l'obiettivo di ottimizzare la gestione della rete, ovvero di minimizzare le dispersioni di energia termica e/o le spese per il pompaggio, senza tuttavia modificare strutturalmente la rete o la centrale di produzione, sono stati ipotizzati ed analizzati i seguenti scenari:

- **Caso A:** tale scenario consiste nell'ottimizzazione della pressione di mandata della rete, che viene fissata in modo tale da ottenere un salto di pressione minimo tra mandata e ritorno della rete – ovvero in corrispondenza dell'utenza critica (utenza #77) – pari a 0.5 bar.
- **Caso B1:** si ipotizza di chiudere completamente l'anello con DN 350, considerando quindi che tutte le utenze vengano alimentate da diramazioni provenienti dall'anello con DN 200 (eventualmente utilizzando gli opportuni by-pass). In questo caso non si ipotizza una modifica nel valore della pressione di mandata della rete, che pertanto rimane costante al valore di 10.75 bar.
- **Caso B2:** come per lo scenario precedente, si ipotizza di chiudere completamente l'anello con DN 350, considerando quindi che tutte le utenze vengano alimentate da diramazioni provenienti dall'anello con DN 200. Inoltre, il valore della pressione di mandata della rete è il risultato di un'ottimizzazione

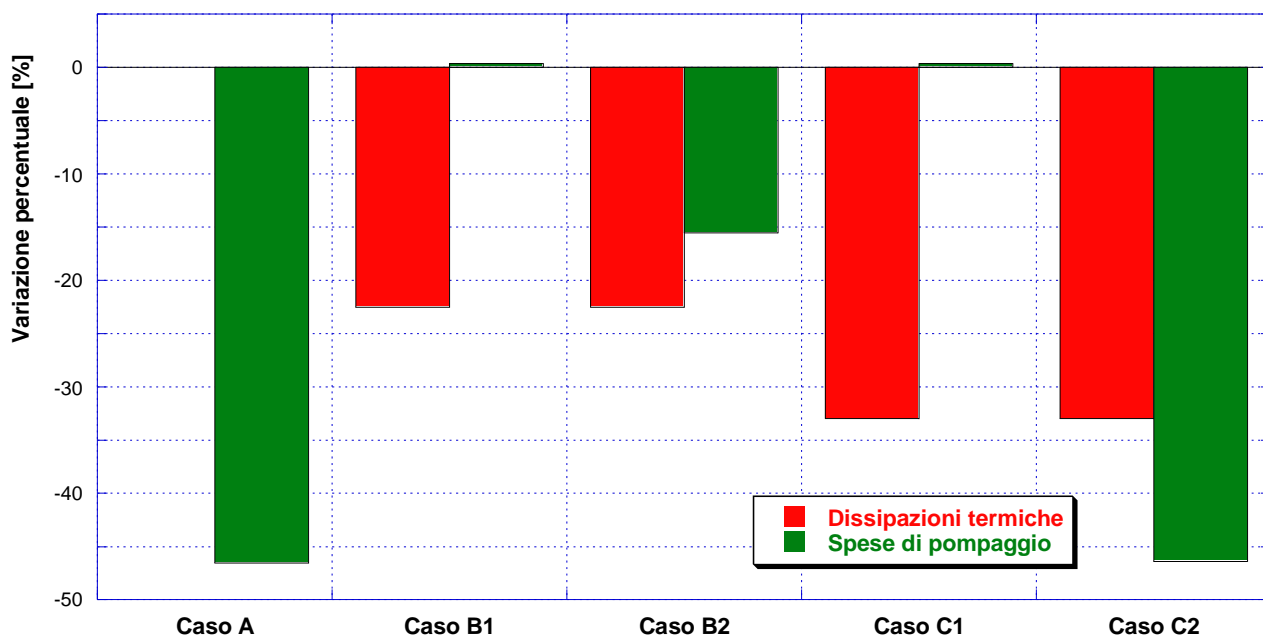
effettuata con l'obiettivo di ottenere un salto di pressione pari a 0.5 bar in corrispondenza dell'utenza critica.

- **Caso C1:** questo scenario prevede la completa chiusura dell'anello con DN 200 e, pertanto, tutte le utenze vengono alimentate da diramazioni provenienti dall'anello con DN 350 (eventualmente utilizzando gli opportuni by-pass). In questo caso non si ipotizza una modifica nel valore della pressione di mandata della rete, che pertanto rimane costante al valore di 10.75 bar.
- **Caso C2:** analogamente al caso precedente, si ipotizza di chiudere completamente l'anello con DN 200, considerando quindi che tutte le utenze vengano alimentate da diramazioni provenienti dall'anello con DN 350. Inoltre, il valore della pressione di mandata della rete è il risultato di un'ottimizzazione effettuata con l'obiettivo di ottenere un salto di pressione pari a 0.5 bar in corrispondenza dell'utenza critica.

Per ciascuno dei casi appena descritti, le simulazioni sono state svolte in corrispondenza del punto di massima portata complessivamente immessa in rete dalla centrale, ovvero in corrispondenza delle ore 7:00 del giorno di massima richiesta di energia termica (10 dicembre 2017). I principali risultati ottenuti sono elencati in **Tabella 8**. Si presentano in **Figura 27**, invece, le variazioni percentuali ottenute, per le dissipazioni termiche e le spese di pompaggio, nei diversi casi analizzati rispetto al caso di partenza non ottimizzato.

**Tabella 8 – Principali risultati delle simulazioni relative agli scenari ottimizzati.**

|  | Caso A | Caso B1 | Caso B2 | Caso C1 | Caso C2 |
|--|--------|---------|---------|---------|---------|
| <b>Portata in massa totale [kg/s]</b>                      | 52.2   | 52.2    | 52.2    | 52.2    | 52.2    |
| <b>Potenza termica fornita alle utenze dalla rete [kW]</b> | 13222  | 13222   | 13222   | 13222   | 13222   |
| <b>Potenza termica fornita dalla centrale [kW]</b>         | 14512  | 14222   | 14222   | 14086   | 14086   |
| <b>Potenza spesa per il pompaggio [kW]</b>                 | 11     | 21      | 18      | 21      | 11      |
| <b>Potenza termica dissipata lungo la rete [kW]</b>        | 1290   | 1000    | 1000    | 864     | 864     |
| <b>Pressione di Mandata [bar]</b>                          | 9.19   | 10.75   | 10.22   | 10.75   | 9.19    |



**Figura 27 – Variazioni percentuali di dissipazioni termiche lungo la rete e spese per il pompaggio, ottenute per i casi ottimizzati rispetto al caso di riferimento di partenza (ore 7:00 del 10 dicembre 2017).**

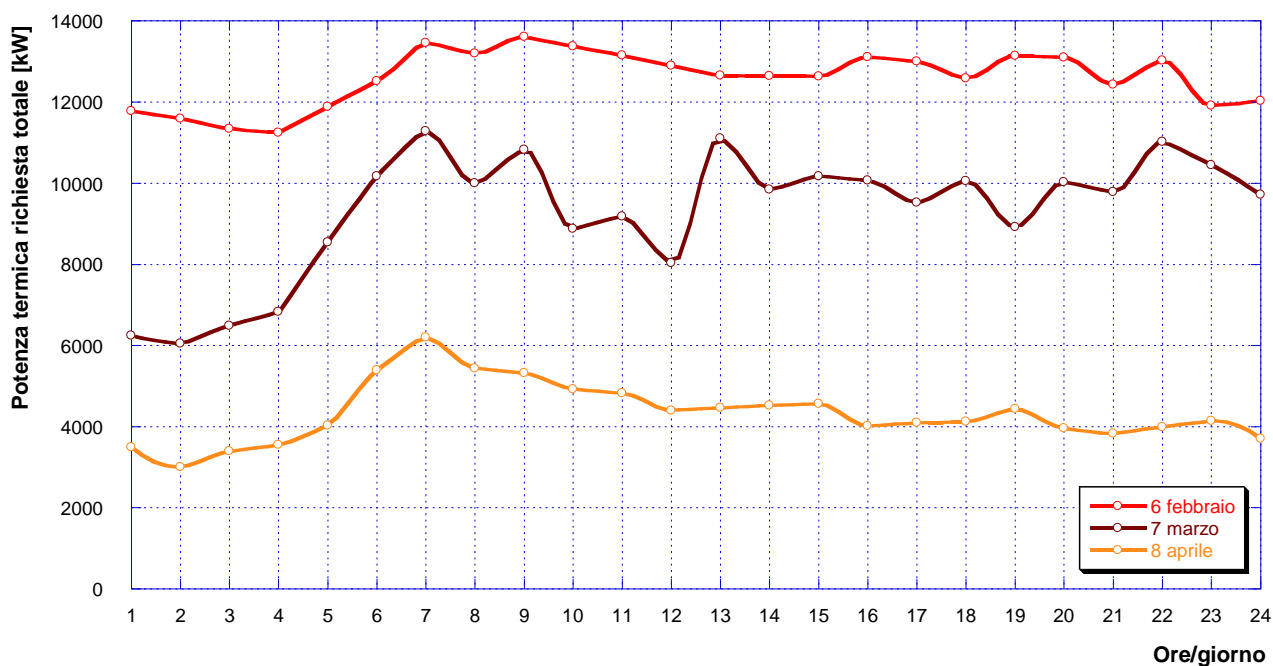
Come si può notare, il caso A, grazie alla diminuzione della pressione di mandata della rete al valore di 9.19 bar, permette di ottenere un decremento delle spese per il pompaggio di poco inferiore al 50 %, mentre le dissipazioni termiche risultano pressoché inalterate. Viceversa, la completa chiusura dell'anello con DN 350 comporta, nel Caso B1, una diminuzione pari a circa il 22.5 % delle dispersione termiche in rete, ma un lievissimo aumento delle spese di pompaggio (inferiore allo 0.5 %).

L'ottimizzazione della pressione di mandata della rete operata nel Caso B2 consente invece di ottenere lo stesso vantaggio – in termini di diminuzione delle dispersioni termiche in rete – rispetto al Caso B1 e contemporaneamente di ridurre le spese necessarie per il pompaggio di circa il 15.5 %. Il salto di pressione fissato al valore di 0.5 bar in corrispondenza dell'utenza critica si ottiene per una pressione di mandata della rete pari a 10.22 bar.

Analogamente, la completa chiusura dell'anello con DN 200 senza un'ottimizzazione della pressione (Caso C1) comporta un lieve incremento della potenza necessaria per il pompaggio, ma consente di diminuire le dissipazioni termiche in rete di circa il 33 %. Ottimizzando la pressione di mandata della rete in funzione dell'utenza critica, si ottiene invece una diminuzione delle spese per il pompaggio di un valore poco superiore al 46 %; le dissipazioni termiche lungo la rete restano inalterate rispetto al Caso C1.

## 9 Analisi del funzionamento della rete da febbraio ad aprile 2018

Con l'obiettivo di analizzare il funzionamento della rete in esame in condizioni di richiesta termica delle utenze il più possibile varia e grazie all'acquisizione di nuovi dati da parte dei gestori della centrale della rete stessa, sono stati presi in considerazione i profili di richiesta termica nei giorni 6 febbraio, 7 marzo e 8 aprile 2018. L'andamento orario della potenza termica complessivamente richiesta dalle utenze allacciate alla rete durante queste giornate è presentato in **Figura 28**. Evidentemente, il profilo di richiesta termica varia notevolmente al variare della giornata considerata passando da una giornata con consumi tipicamente invernali (6 febbraio) ad una giornata con un andamento tipico della mezza stagione (8 aprile). Come si può notare, il profilo giornaliero di potenza termica richiesta dalle utenze presenta il picco in corrispondenza delle ore 07:00 durante il 7 marzo e l'8 aprile, mentre alle ore 09:00 il 6 febbraio. Più in dettaglio, il profilo di richiesta termica relativo al 6 febbraio risulta essere abbastanza costante, attestandosi tra un punto di minima richiesta con valore superiore a 11000 kW e un punto di massima richiesta poco inferiore ai 14000 kW (in corrispondenza delle ore 09:00). Per quanto riguarda il profilo di richiesta termica relativo al 7 marzo, invece, si riscontra un andamento variabile compreso tra circa 6000 kW (ore 02:00) e circa 11000 kW (ore 07:00). Infine, la potenza termica richiesta dal totale delle utenze connesse alla rete durante la giornata dell'8 aprile varia tra un valore minimo di poco superiore a 3000 kW ed un valore massimo di poco superiore a 6000 kW.



**Figura 28** – Profilo giornaliero di potenza termica complessivamente richiesta dalle utenze – giorni 6 febbraio 2018, 7 marzo 2018 e 8 aprile 2018.

Analogamente a quanto descritto nel capitolo precedente, per ciascuna giornata in esame è stato implementato all'interno del software IHENA il modello di rete corrispondente, ovvero quello che ne raffigura le modalità di funzionamento, diverse al variare del giorno analizzato. Il risultato dell'implementazione di tali modelli all'interno di IHENA è presentato in **Figura 29**, in **Figura 30** ed in **Figura 31** rispettivamente per le giornate del 6 febbraio, 7 marzo ed 8 aprile. Una volta definiti caso per caso i rami e le utenze non alimentate, si è quindi proceduto con le simulazioni del comportamento della rete nei tre giorni in esame. Si sottolinea, inoltre, che la modalità di gestione della rete – sulla base delle informazioni ricevute – è tale per cui non vengono mantenuti costanti né il salto di temperatura sulle utenze né la

portata circolante in rete. Pertanto, per ciascuna utenza è stato considerato l'andamento reale del salto di temperatura, così come misurato dai gestori della rete.

I risultati delle simulazioni sono presentati da **Figura 32** a **Figura 36**. Nel dettaglio, in **Figura 32** sono presentati i risultati relativi al profilo orario della portata in massa complessivamente circolante in rete nei tre giorni analizzati. Come si può facilmente notare, dal momento che la rete viene gestita a salto di temperatura e portata variabili, l'andamento della portata in massa non segue esattamente quello della potenza termica complessivamente richiesta dalle utenze (si veda **Figura 28**), pur risultando in ogni caso molto prossimo ad esso. Relativamente alla potenza elettrica necessaria per il pompaggio, i profili orari nei tre giorni analizzati sono presentati in **Figura 33**. Si può osservare come la potenza elettrica necessaria alla stazione di pompaggio risulti sempre piuttosto contenuta: durante la giornata del 6 febbraio si registra una variazione tra un valore minimo pari a circa 21 kW (in corrispondenza delle ore 04:00) ed un valore massimo pari a poco meno di 27 kW (in corrispondenza delle ore 09:00); durante la giornata del 7 marzo si registra una variazione tra un valore minimo pari a 11.5 kW (in corrispondenza delle ore 02:00) ed un valore massimo pari a 21.9 kW (in corrispondenza delle ore 07:00); durante la giornata dell'8 aprile si registra una variazione tra un valore minimo di poco superiore a 7 kW (in corrispondenza delle ore 02:00) ed un valore massimo pari a circa 13.4 kW (in corrispondenza delle ore 07:00).

In **Figura 34** è mostrato l'andamento della potenza termica fornita alle utenze e dissipata in rete nel giorno 6 febbraio 2018. Come si può notare, durante l'arco della giornata le dissipazioni termiche si mantengono circa costanti, variando all'interno del range compreso tra 1732 kW e poco meno di 1847 kW. Nel complesso, quindi, la potenza termica che la centrale deve fornire alla rete nella giornata del 6 febbraio è compresa tra 12.9 MW e 15.3 MW. L'andamento della potenza termica fornita alle utenze e dissipata in rete nel giorno 7 marzo 2018 è invece presentato in **Figura 35**: anche in questo caso le dissipazioni termiche si attestano attorno ad un valore abbastanza costante, compreso tra 1478 kW e 1648 kW. La potenza termica che la centrale deve complessivamente fornire alla rete nella giornata del 7 marzo è compresa tra 7.5 MW e 12.9 MW. Infine, in **Figura 36** è mostrato l'andamento della potenza termica fornita alle utenze e dissipata in rete nel giorno 8 aprile 2018. Durante questa giornata di mezza stagione la richiesta termica da parte delle utenze non risulta essere particolarmente elevata, mentre cresce il peso delle dissipazioni termiche sul totale della produzione della centrale. Si può, infatti, osservare che le dispersioni termiche in rete variano in un range compreso tra 1480 kW e 1593 kW, mentre il totale della potenza prodotta e fornita dalla centrale è compreso tra 4.5 MW e 7.8 MW. Ne risulta pertanto che le dissipazioni termiche rappresentano circa il 20-30 % della potenza complessivamente prodotta.

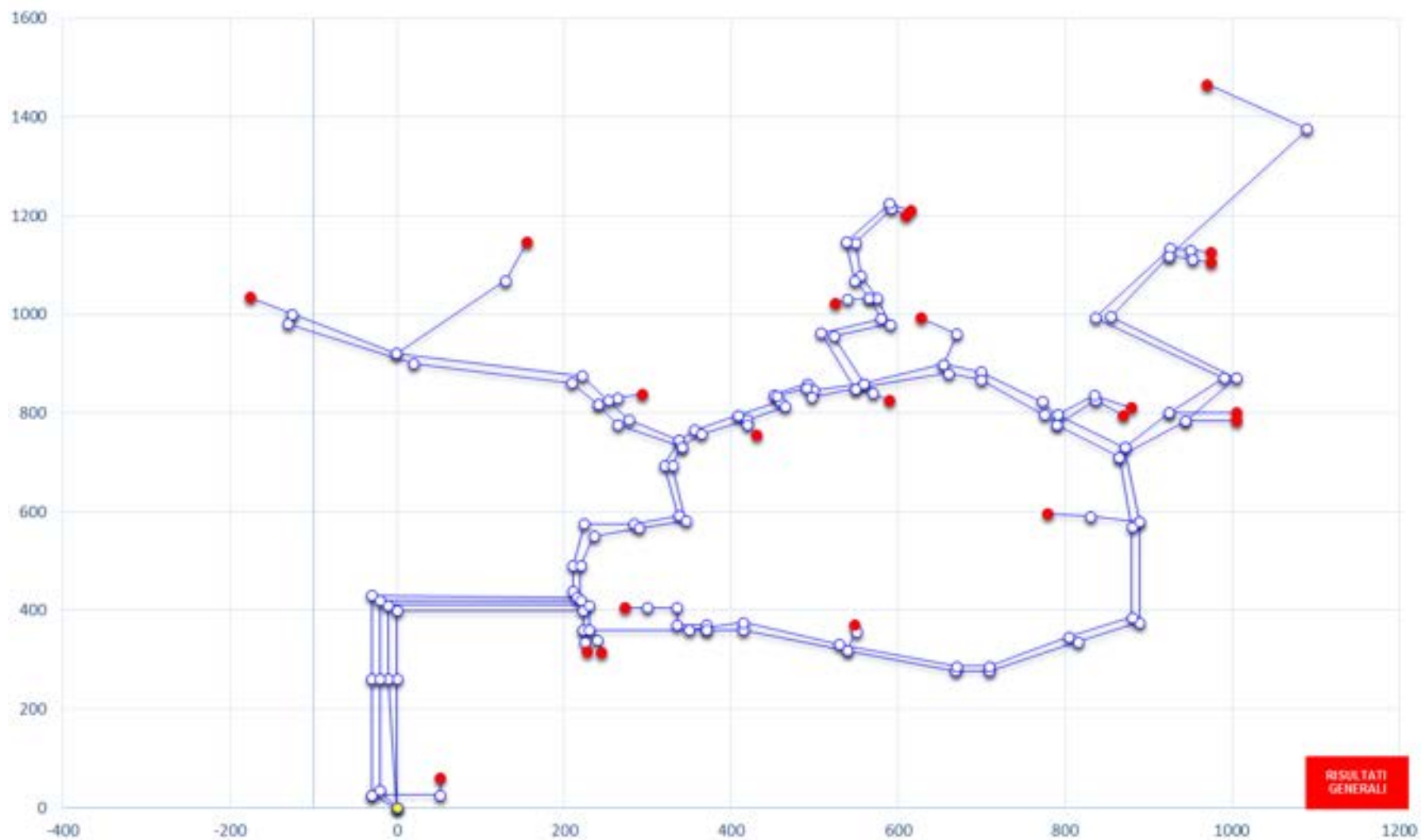


Figura 29 – Configurazione rappresentativa del funzionamento della rete di teleriscaldamento in esame durante la giornata del 6 febbraio 2018.

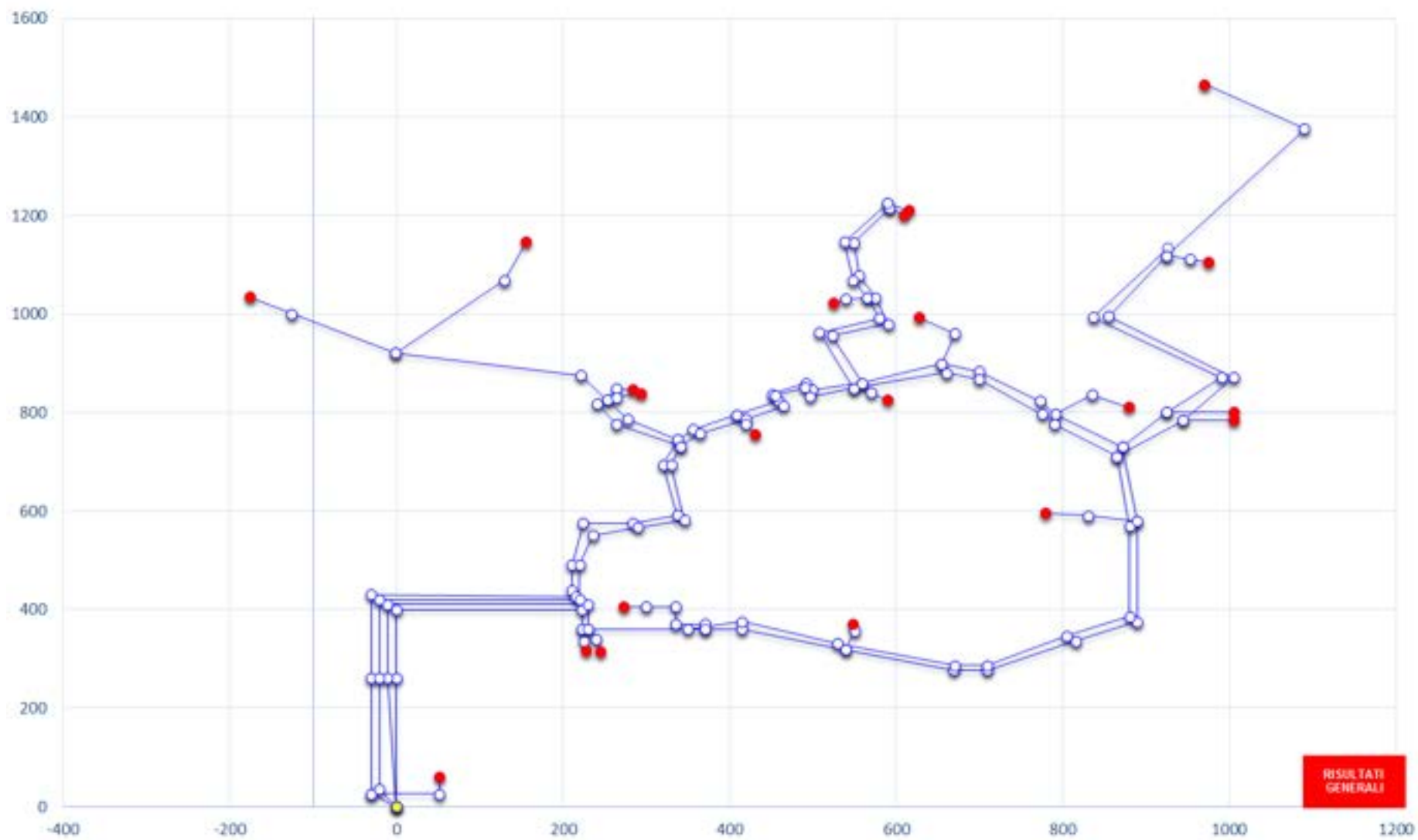


Figura 30 – Configurazione rappresentativa del funzionamento della rete di teleriscaldamento in esame durante la giornata del 7 marzo 2018.

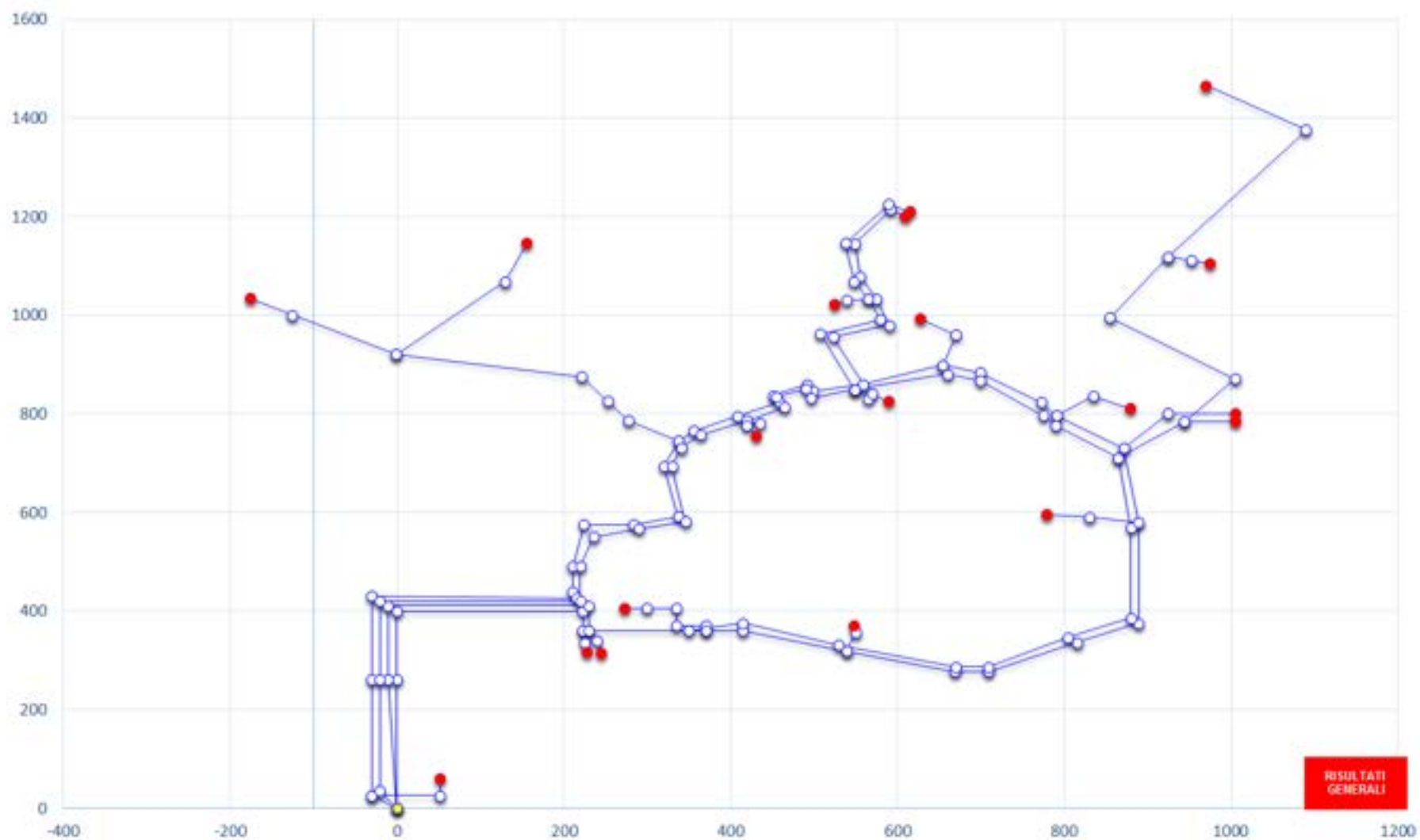


Figura 31 – Configurazione rappresentativa del funzionamento della rete di teleriscaldamento in esame durante la giornata dell'8 aprile 2018.

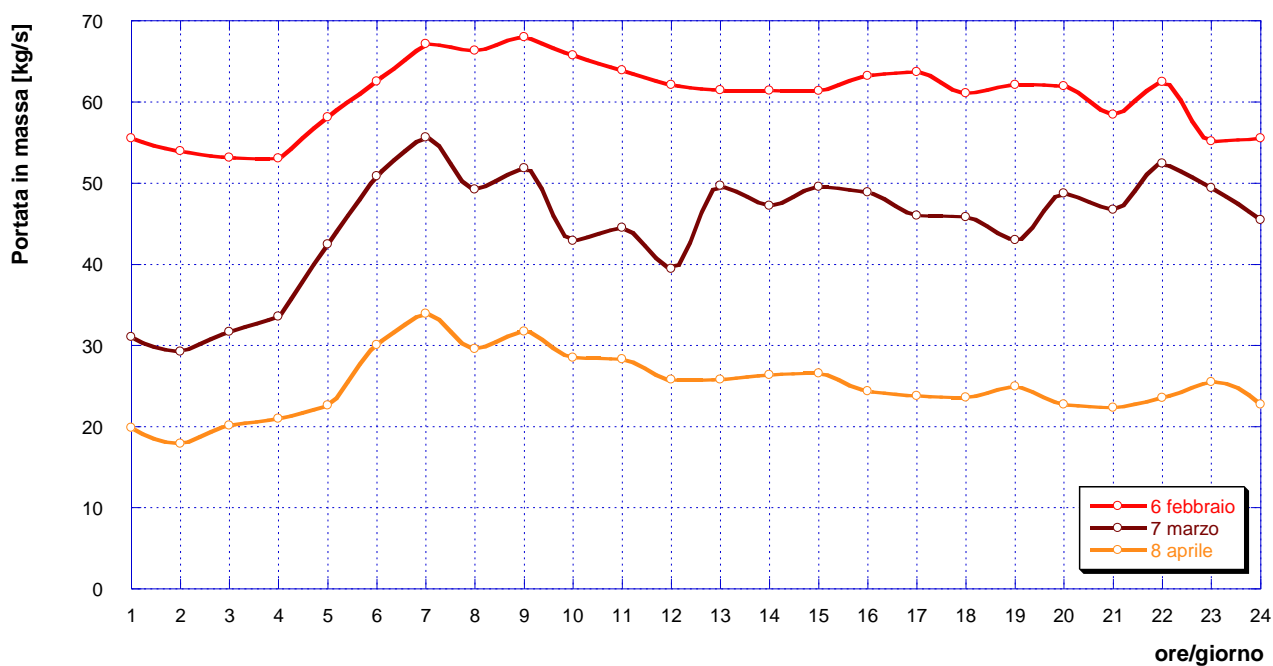


Figura 32 – Andamento della portata in massa in uscita dalla centrale – giorni 6 febbraio 2018, 7 marzo 2018 e 8 aprile 2018.

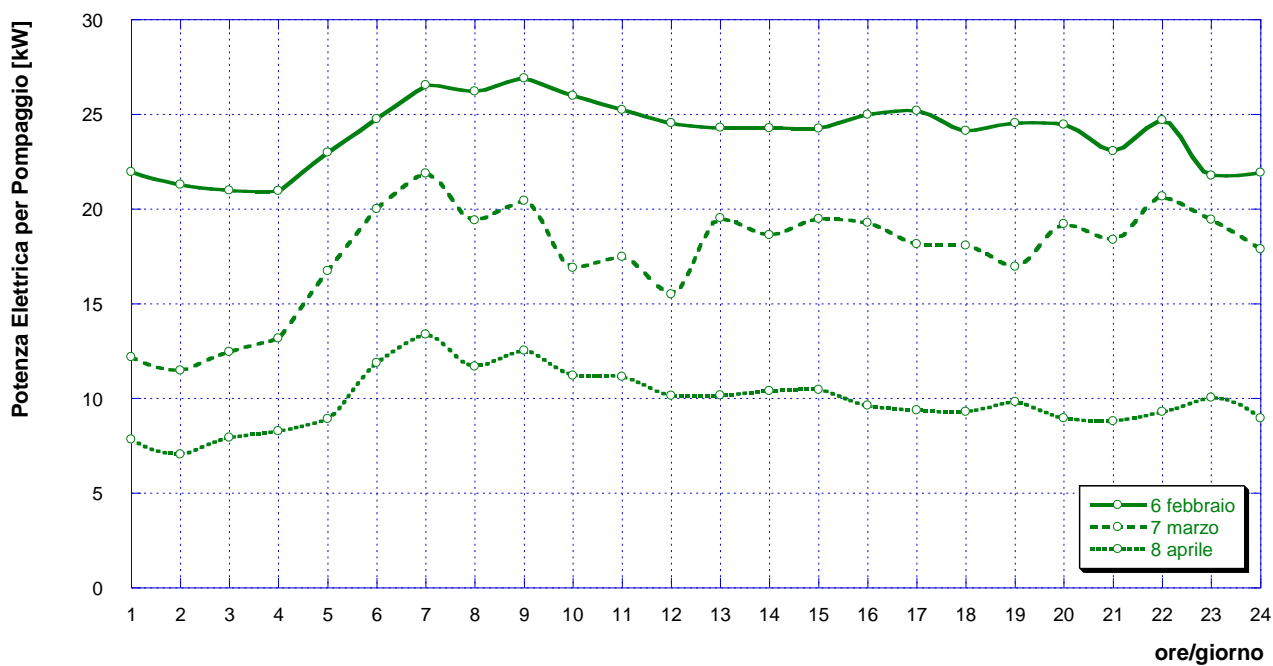


Figura 33 – Andamento della potenza elettrica richiesta dalla stazione di pompaggio – giorni 6 febbraio 2018, 7 marzo 2018 e 8 aprile 2018.

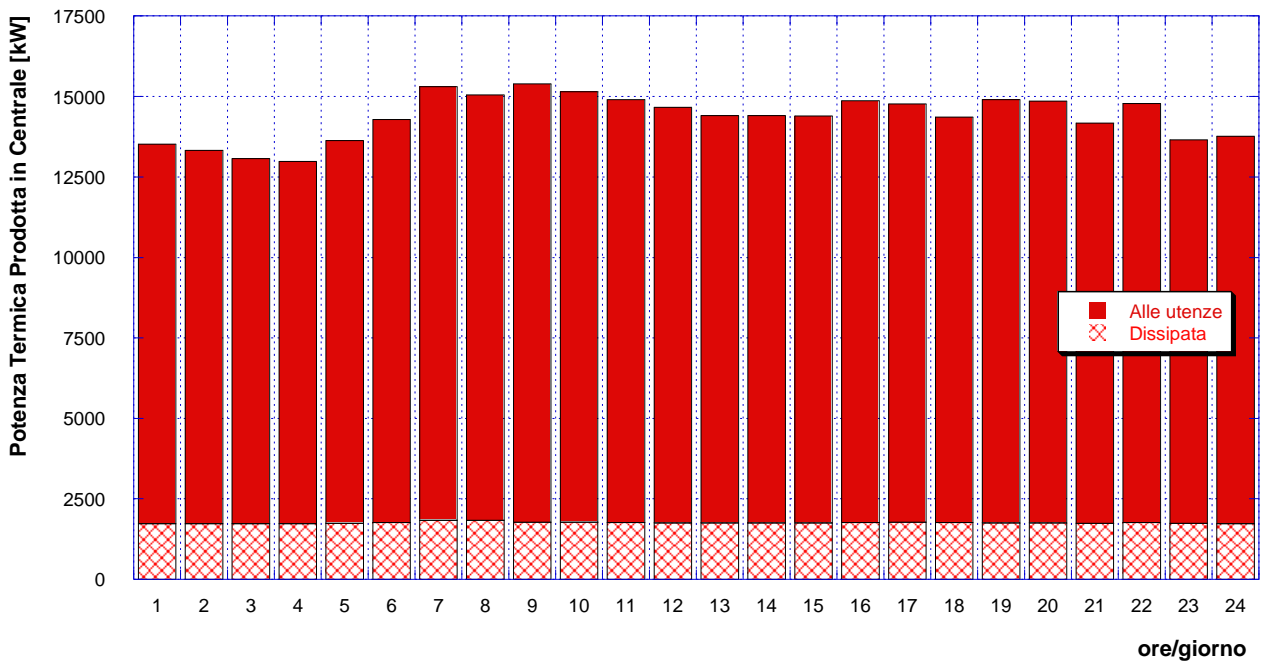


Figura 34 – Andamento della potenza termica fornita alle utenze e dissipata in rete nel giorno 6 febbraio 2018.

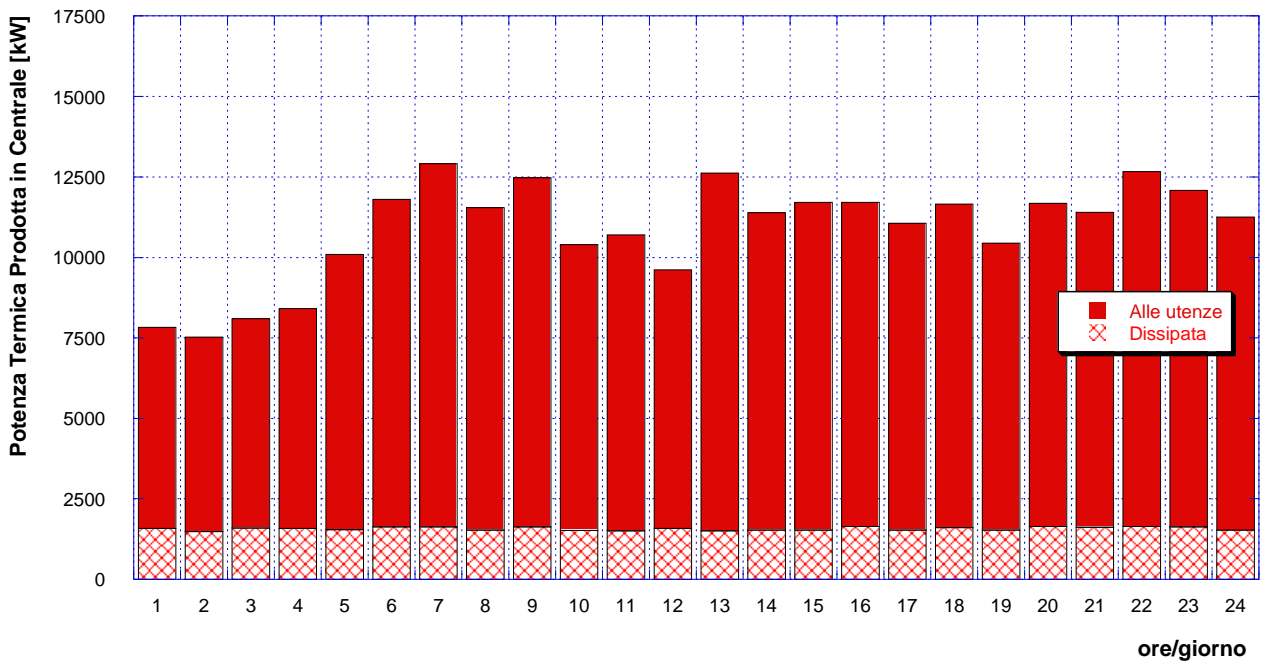
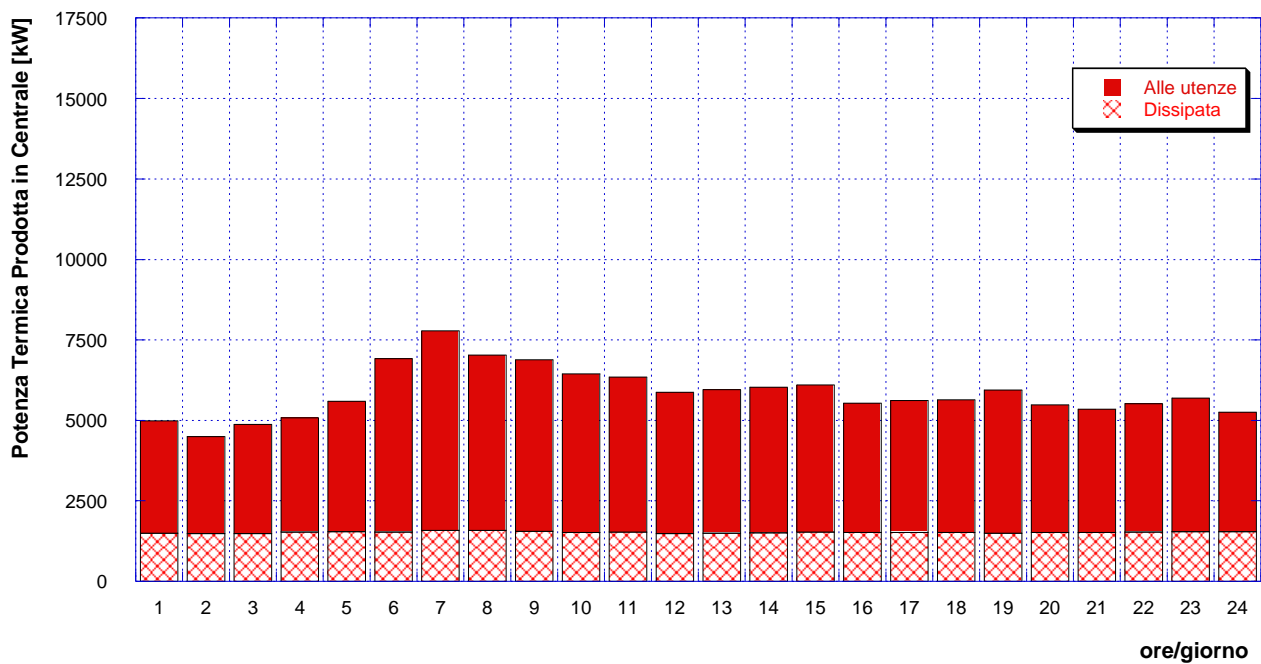


Figura 35 – Andamento della potenza termica fornita alle utenze e dissipata in rete nel giorno 7 marzo 2018.

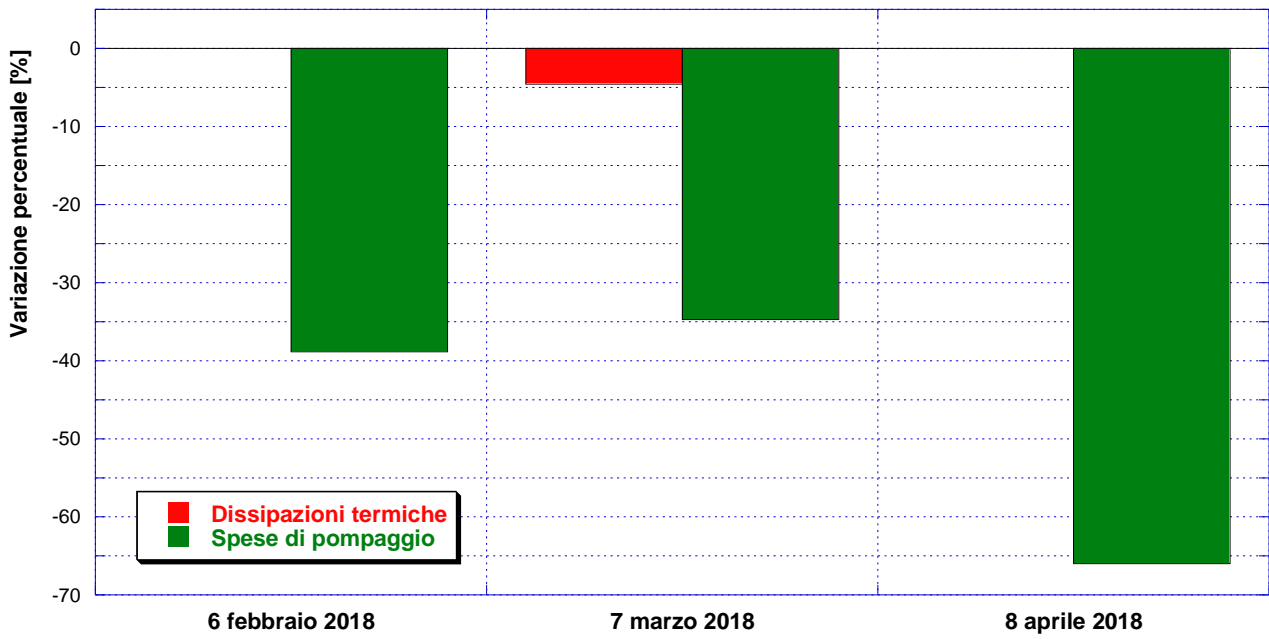


**Figura 36** – Andamento della potenza termica fornita alle utenze e dissipata in rete nel giorno 8 aprile 2018.

Analogamente a quanto fatto in relazione al mese di dicembre, è stata effettuata un’analisi volta all’ottimizzazione della pressione di mandata della rete, con l’obiettivo di minimizzare le dispersioni di energia termica e/o le spese per il pompaggio, senza tuttavia modificare strutturalmente la rete stessa o la centrale di produzione. Per ciascuna delle tre giornate in esame, pertanto, è stata selezionata l’ora di picco di richiesta termica delle utenze (che corrisponde anche all’ora in cui si registra una massima portata e quindi massime perdite di carico lungo la rete) ed è stata determinata la pressione di mandata che consenta di ottenere un salto di pressione minimo tra mandata e ritorno della rete – ovvero in corrispondenza dell’utenza critica – pari a 0.5 bar. Si sottolinea che, anche se la rete viene operata con modalità diverse nelle diverse giornate analizzate – ovvero variano il numero di utenze alimentate e l’apertura/chiusura di alcuni rami che compongono la rete – l’utenza critica risulta sempre essere l’utenza #77. In **Tabella 9** sono elencati i principali risultati relativi all’ottimizzazione di pressione, mentre in **Figura 37** sono mostrate le variazioni percentuali – tra caso ottimizzato e corrispondente caso di riferimento – di dissipazioni termiche lungo la rete e spese per il pompaggio, ottenute per ciascuna giornata analizzata (6 febbraio, 7 marzo ed 8 aprile 2018) nelle rispettive ore di picco di richiesta termica. Dalla **Figura 37** si può osservare come una gestione ottimale delle pressioni possa portare grandi benefici soprattutto in relazione alla potenza elettrica necessaria per il pompaggio, che viene ridotta di quasi il 39 % per il 6 febbraio, di circa il 35 % per il 7 marzo e di quasi il 66 % per l’8 aprile. Le dissipazioni termiche lungo la rete risultano, invece, ridotte di quasi il 5 % per il 7 marzo e inalterate nelle altre due giornate analizzate.

**Tabella 9** – Risultati ottimizzazione pressione di mandata pompaggio – giorni 6 febbraio 2018, 7 marzo 2018 e 8 aprile 2018 – nelle rispettive ore di picco di richiesta termica.

|   | 6 febbraio h 9:00 | 7 marzo h 7:00 | 8 aprile h 7:00 |
|---|-------------------|----------------|-----------------|
| <b>Portata in massa totale [kg/s]</b>               | 68.0              | 55.6           | 33.9            |
| <b>Potenza termica fornita alle utenze [kW]</b>     | 13604             | 11279          | 6194            |
| <b>Potenza termica fornita dalla centrale [kW]</b>  | 15387             | 12842          | 7787            |
| <b>Potenza spesa per il pompaggio [kW]</b>          | 16                | 14             | 5               |
| <b>Potenza termica dissipata lungo la rete [kW]</b> | 1783              | 1563           | 1593            |
| <b>Pressione di Mandata [bar]</b>                   | 9.45              | 9.58           | 8.54            |



**Figura 37** – Variazioni percentuali – tra caso ottimizzato e caso di riferimento – di dissipazioni termiche lungo la rete e spese per il pompaggio, ottenute per ciascuna giornata analizzata (6 febbraio, 7 marzo ed 8 aprile) nelle rispettive ore di picco di richiesta termica.

# PARTE II

## 10 Progettazione di una sottostazione bidirezionale per reti di teleriscaldamento attive

Come già anticipato nell'introduzione, oggetto della Parte II della presente relazione è la progettazione di una sottostazione di scambio bidirezionale per reti di teleriscaldamento attive. Sulla base della suddetta progettazione, la sottostazione in oggetto sarà realizzata e successivamente testata da altri soggetti diversi dal Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Bologna.

La sottostazione oggetto di questo studio è progettata per consentire uno scambio bidirezionale di energia termica tra l'utenza attiva (prosumer) e una rete di teleriscaldamento di tipo smart (ovvero attiva). Si ipotizza, infatti, la presenza di un sistema di generazione termica distribuita presso l'utenza (escluso dal progetto), in grado di soddisfare completamente o in parte la richiesta di quest'ultima. L'eventuale surplus di energia termica prodotto dal sistema di generazione distribuita può essere immesso nella rete di distribuzione principale. Così come concordato con ENEA e in base a progetti precedentemente svolti [3, 7-9], lo schema adottato per la sottostazione in esame è quello della tipologia "ritorno su mandata". In **Figura 38** è presentato un layout semplificato della sottostazione, ovvero privo della componentistica idraulica non utile al fine della gestione e del controllo dello scambio attivo. Nel dettaglio, la progettazione ha riguardato la sola sottostazione di scambio attivo i cui confini sono rappresentati dal rettangolo viola in **Figura 38**. Si osserva la presenza di tre circuiti principali: il circuito primario è collegato al ramo di mandata (in rosso) e a quello di ritorno (in blu) della rete di teleriscaldamento principale; il circuito secondario, rappresentato in verde, è quello relativo all'utenza; infine, il circuito terziario, raffigurato in nero e grigio, è collegato al sistema di generazione distribuita permettendo lo scambio bidirezionale tra rete principale e utenza. Lo scambio termico tra i vari circuiti avviene tramite tre scambiatori di calore (S1, S2, S3 in **Figura 38**). Nelle sezioni di interesse del sistema sono installati sensori di temperatura e di portata. La presenza di valvole di intercettazione, di deviazione e di miscelazione permette il controllo del funzionamento del sistema. Si noti infine la presenza di una pompa di circolazione (sezione 3) che permette la reimmissione sul ramo di mandata dell'acqua prelevata dal ramo di ritorno della rete di teleriscaldamento principale. La richiesta dell'utenza (sezioni 8-9-10) può essere soddisfatta dal sistema di generazione distribuita e/o dalla rete di distribuzione principale, tramite gli scambiatori di calore S1 e S2. Quando il sistema di generazione non è in funzione o produce una potenza termica insufficiente a soddisfare completamente la richiesta dell'utenza, la quota parte di potenza termica mancante viene fornita dalla rete di distribuzione principale e ceduta all'utenza tramite lo scambiatore S1. Al contrario, quando il sistema di generazione distribuita produce una potenza termica maggiore di quella richiesta dall'utenza, la sottostazione permette – se i livelli di temperatura lo consentono – di cedere questo surplus alla rete tramite lo scambiatore S3. In questo caso lo scambiatore S1 non scambia calore. Come accennato in precedenza, lo schema adottato è del tipo "ritorno su mandata": infatti, una parte dell'acqua della rete distribuzione viene prelevata dal ramo di ritorno (sezione 3) e reimessa sul ramo di mandata, dopo aver attraversato lo scambiatore di calore S3 (sezione 4) raggiungendo la stessa temperatura della mandata. È importante sottolineare come lo scambio "attivo" tra sottostazione e rete sia permesso solo nel caso in cui la portata d'acqua prelevata da quest'ultima (sezione 3) possa raggiungere almeno la temperatura di mandata. In caso contrario, per evitare sensibili variazioni (ovvero riduzioni) del valore della temperatura del ramo di mandata della rete principale, non viene prelevata acqua dal ramo di ritorno.

Nel seguito del presente capitolo e nei successivi verrà descritto il progetto realizzato in tutte le sue parti.

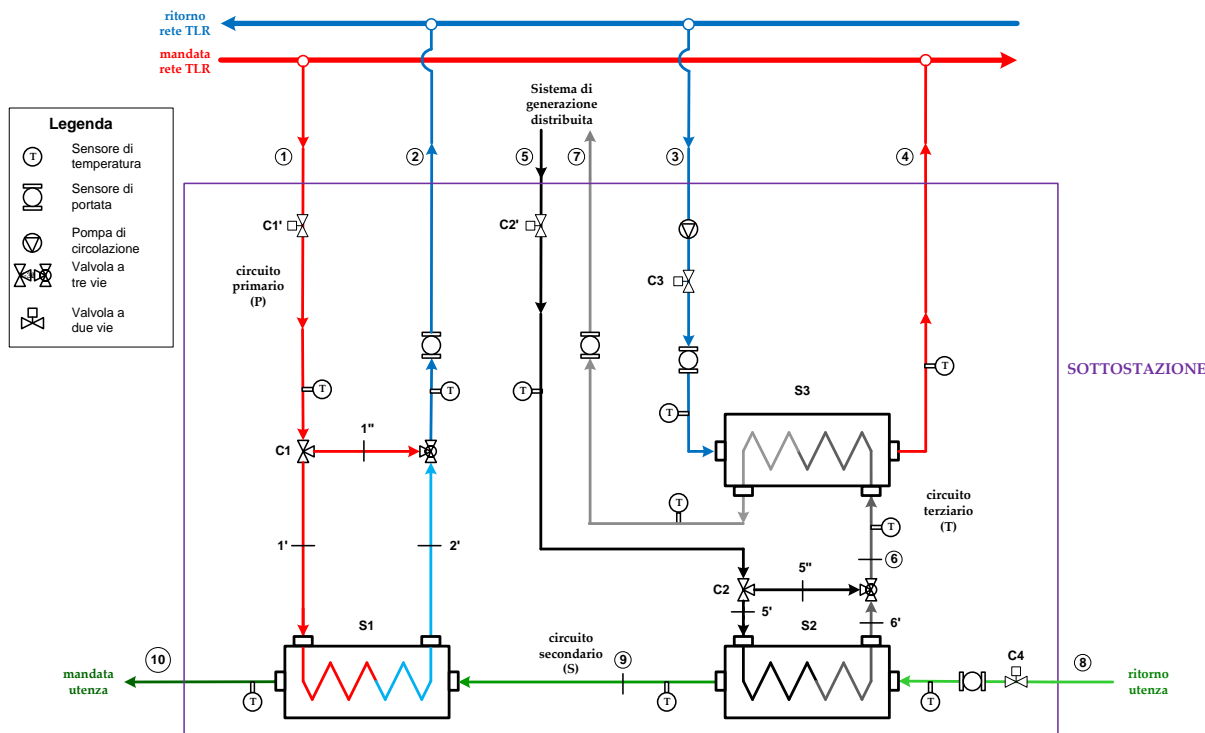


Figura 38 – Layout semplificato sottostazione.

### 10.1 Condizioni al contorno

La sottostazione in oggetto è progettata con l'obiettivo di essere installata presso un laboratorio che dovrebbe occuparsi della fase di sperimentazione. Il presente paragrafo illustra in modo sintetico le condizioni al contorno, fornite a chi scrive, di cui si è tenuto conto al fine della progettazione. Si sottolinea che tali condizioni hanno determinato le scelte progettuali di seguito illustrate ed in particolare la potenza termica di design della sottostazione. Più in dettaglio, la rete di distribuzione considerata (TLR in Figura 38) prevede temperature delle direttrici di mandata e di ritorno rispettivamente pari a 80 °C e 50 °C. Il sistema di generazione distribuita può fornire potenza termica fino ad un massimo di 60 kW sotto forma di acqua a 90 °C, mentre – per quanto riguarda il circuito dell'utenza – la temperatura in ingresso può oscillare da 30 °C a 50 °C. Sempre con riferimento alla Figura 38, relativamente alle portate sono stati considerati i seguenti vincoli:

- la portata nelle sezioni 1 e 5 deve essere compresa tra un minimo di 0.22 kg/s fino ad un massimo pari a circa 2.22 kg/s;
- la portata nelle sezioni 3 e 8 deve essere compresa tra un minimo di 0.22 kg/s fino ad un massimo pari a circa 0.69 kg/s.

In aggiunta, la portata nella sezione 1 deve essere mantenuta costante, la potenza termica richiesta dall'utenza in condizioni di progetto è pari a 40 kW mentre quella prodotta dal sistema di generazione distribuita è di 60 kW. Infine si segnalano valori di pressione del circuito di mandata e di ritorno della rete rispettivamente di poco superiori ai 3.0 bar e di poco inferiori ad 1.5 bar.

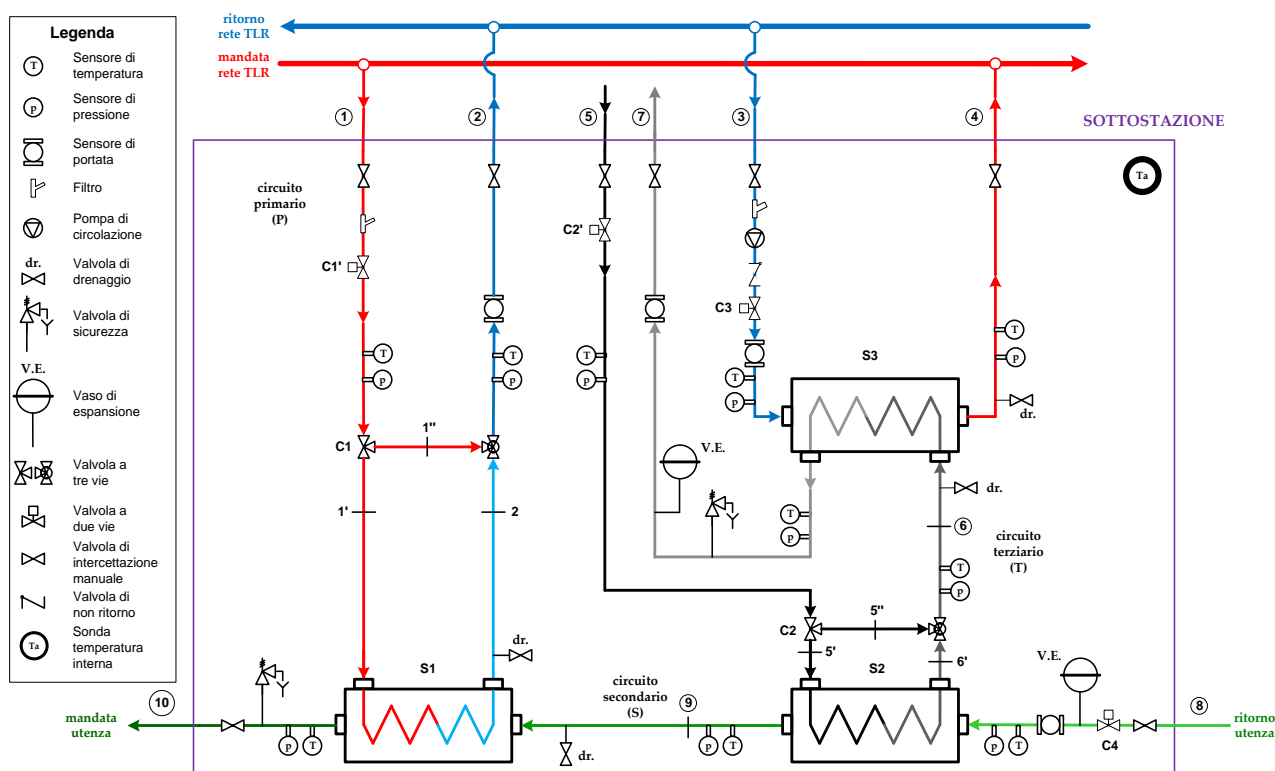
## 11 Dimensionamento della sottostazione

Sulla base dei vincoli e delle condizioni al contorno appena illustrate, considerando le specifiche impiantistiche usualmente adottate in termini di teleriscaldamento, e reperibili in letteratura [10-14], nonché le analisi già sviluppate dagli Autori in [3, 7-9], in accordo con ENEA sono stati assunti i seguenti valori:

- temperatura in condizioni di design della sezione 8: 40 °C;
- temperatura obiettivo per la mandata dell'utenza: 60 °C;
- portata del circuito utenza: 0.50 kg/s;
- portata prelevata dalla rete (sezione 1): 0.50 kg/s;
- portata del circuito di generazione distribuita (sezione 5): 1.25 kg/s.

In **Figura 39** è rappresentato lo schema della sottostazione che include la componentistica necessaria per il controllo e per la sicurezza. Tutti i sensori di pressione presenti in figura sono riportati per completezza anche se non sono ritenuti strettamente necessari al controllo. Inoltre, si evidenzia che la pressione dei circuiti dell'acqua sarà controllata da chi svolgerà la fase di sperimentazione. Per questo motivo, nelle prossime figure i sensori di pressione non saranno più indicati.

Inoltre, poiché durante la fase di test la sottostazione potrebbe essere installata all'aperto si rende necessario l'inserimento della stessa in un case per la protezione dagli agenti atmosferici. Il case deve essere coibentato e si prevede di installare un sensore di temperatura al suo interno.



**Figura 39 – Layout sottostazione completo.**

In aggiunta a quanto indicato in **Figura 39**, va considerato quanto segue:

- tutti i componenti presenti sono da considerarsi conformi alla classificazione PN16. Tale valore è stato scelto in luogo del PN25 in accordo con ENEA per contenere il costo totale della sottostazione;

- le flange (ovvero le connessioni tra la sottostazione e i circuiti di prova) devono essere tali da connettersi a flessibili con uscita femmina da 2 pollici tipo cam-lock (come richiesto dal soggetto responsabile dei test);
- tutte le tubazioni (in acciaio nero zincato) sono state dimensionate per semplicità realizzativa con diametro identico e pari a un pollice ed un quarto;
- la pompa sul ramo 3 deve essere tale da fornire l'incremento di pressione necessario al passaggio dalla direttrice di ritorno della rete a quella di mandata;
- tutte le tubazioni ed i componenti della sottostazione si prevedono non coibentati, avendo previsto, come già spiegato, la coibentazione del case che contiene la sottostazione stessa.

### 11.1 Modello di calcolo per gli scambiatori

Al fine di valutare le prestazioni degli scambiatori presenti nella sottostazione, è stato predisposto un modello di calcolo in grado di descrivere il loro comportamento sia in condizioni di progetto sia in off-design.

In generale il funzionamento nominale di uno scambiatore di calore è regolato dalle seguenti espressioni:

$$Q = \dot{m}_c \Delta h_c$$

$$Q = \dot{m}_f \Delta h_f$$

$$Q = UA\Delta T_{ml}$$

dove  $Q$  è la potenza termica scambiata (kW),  $\dot{m}_c$  e  $\dot{m}_f$  sono le portate in massa rispettivamente del fluido caldo e di quello freddo (kg/s),  $\Delta h_c$  e  $\Delta h_f$  e variazioni di entalpia dei due fluidi (kJ/kg),  $U$  il coefficiente globale di scambio termico (kW/m<sup>2</sup>K),  $A$  la superficie di scambio (m<sup>2</sup>) e  $\Delta T_{ml}$  la differenza media logaritmica (K). In un processo isobaro nel quale il fluido non subisce un cambiamento di fase, la variazione di entalpia può essere espressa come il prodotto tra il calore specifico a pressione costante del fluido e la variazione di temperatura. Quindi le equazioni di bilancio relative ai due fluidi possono essere riscritte come segue:

$$Q = \dot{m}_c c_{pc} \Delta T_c$$

$$Q = \dot{m}_f c_{pf} \Delta T_f$$

dove  $\dot{m}_c$  e  $\dot{m}_f$  rappresentano rispettivamente la portata in massa del fluido caldo e di quello freddo,  $c_{pc}$  e  $c_{pf}$  il calore specifico a pressione costante del fluido caldo e del fluido freddo (kJ/kgK),  $\Delta T_c$  e  $\Delta T_f$  indicano il salto di temperatura subito dal fluido caldo e da quello freddo (K).

Considerando uno scambiatore in controcorrente e il relativo diagramma di scambio termico mostrato in **Figura 40**, la differenza media logaritmica è definita come segue:

$$\Delta T_{ml} = \frac{\tau_{lc} - \tau_{lf}}{\log \frac{\tau_{lc}}{\tau_{lf}}}$$

dove:

$$\tau_{lc} = T_{ci} - T_{fu}$$

$$\tau_{lf} = T_{cu} - T_{fi}$$

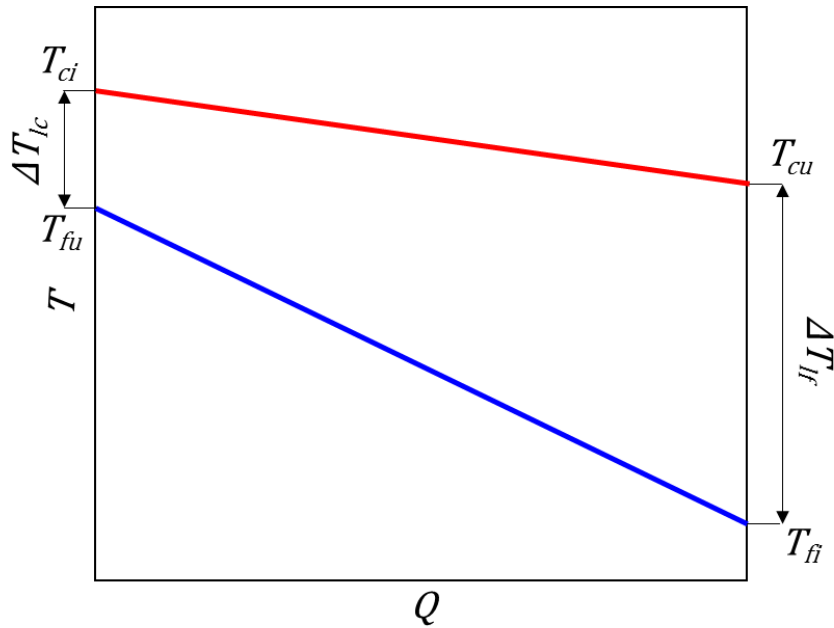


Figura 40 – Diagramma di scambio termico di uno scambiatore in controcorrente.

Il coefficiente globale di scambio termico per una lastra piana è espresso dalla seguente equazione:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_c} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_f}}$$

dove  $\alpha_c$  e  $\alpha_f$  sono i coefficienti di scambio termico convettivo del fluido caldo e di quello freddo ( $W/m^2K$ ),  $\lambda$  è la conduttività termica del materiale che costituisce i condotti dello scambiatore ( $W/mK$ ), mentre  $s$  rappresenta lo spessore della lastra (m). Nella maggioranza dei casi il rapporto  $s/\lambda$  è trascurabile rispetto agli altri termini. L'equazione di bilancio termico di uno scambiatore può essere riscritta facendo riferimento alla capacità termica oraria del fluido ( $\dot{C}$ ) espressa in kW/K, definita come il prodotto tra la portata in massa e il calore specifico a pressione costante.

$$\begin{aligned} \dot{C} &= \dot{m}c_p & \dot{C}_{max} &= \max(\dot{m}_c c_{pc}, \dot{m}_f c_{pf}) \\ Q &= \dot{C}_{min} \Delta T_{max} = \dot{C}_{max} \Delta T_{min} & \dot{C}_{min} &= \min(\dot{m}_c c_{pc}, \dot{m}_f c_{pf}) \\ & & \Delta T_{max} &= \max(\Delta T_c, \Delta T_f) \\ & & \Delta T_{min} &= \min(\Delta T_c, \Delta T_f) \end{aligned}$$

In condizioni di progetto, inoltre, il comportamento di uno scambiatore può essere descritto dal metodo  $\epsilon$ -NTU, in cui il termine  $\epsilon$  rappresenta l'efficienza di scambio termico – definita come il rapporto tra il calore scambiato e il calore che potrebbe essere scambiato se il fluido con capacità termica inferiore si portasse alla temperatura di ingresso del fluido con capacità termica maggiore, ovvero se lo scambiatore avesse un'area di scambio infinito – mentre il termine NTU (Number of Transfer Unit) è il numero di unità di trasporto. Entrambi i termini sono adimensionali. L'efficienza di uno scambiatore in controcorrente e il parametro NTU sono definiti come segue:

$$\epsilon = \frac{Q}{Q_{th}} = \frac{\dot{C}_{min} \Delta T_{max}}{\dot{C}_{min} (T_{ci} - T_{fi})} = \frac{\Delta T_{max}}{(T_{ci} - T_{fi})}$$

$$NTU = \frac{UA}{\dot{C}_{min}} = \frac{\Delta T_{max}}{\Delta T_{ml}}$$

A questo punto l'efficienza dello scambiatore può essere espressa in funzione delle capacità termiche dei fluidi e del parametro NTU:

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp\left(-\left(1 - \frac{\dot{C}_{min}}{\dot{C}_{max}}\right)NTU\right)}{1 - \frac{\dot{C}_{min}}{\dot{C}_{max}} \exp\left(-\left(1 - \frac{\dot{C}_{min}}{\dot{C}_{max}}\right)NTU\right)}$$

Per descrivere il comportamento dello scambiatore in condizioni fuori progetto si adotta il metodo noto come "Thermal Resistance Scaling" che permette di caratterizzare lo scambiatore partendo dai parametri calcolati in condizioni di design. Il primo step prevede di calcolare la resistenza termica totale dello scambiatore in condizioni di progetto ( $R_{TD}$ ), espressa in K/kW:

$$R_{T,D} = \frac{1}{(UA)_D}$$

in cui il pedice  $D$  si riferisce alle condizioni di design.

Tenendo conto dei fattori di resistenza termica per convezione (lato caldo e freddo) e conduzione, è possibile calcolare le singole resistenze termiche, la cui somma equivale alla resistenza termica totale:

$$\begin{aligned} R_{lc,D} &= R_{T,D} f_{lc} & f_{lc} &= 0.43 \\ R_{C,D} &= R_{T,D} f_C & f_C &= 0.13 \\ R_{lf,D} &= R_{T,D} f_{lf} & f_{lf} &= 0.43 \end{aligned}$$

dove  $f_{lc}$ ,  $f_C$  e  $f_{lf}$  sono rispettivamente i fattori di resistenza termica per convezione lato caldo, conduzione e convezione lato freddo (adimensionali), mentre  $R_{lc,D}$ ,  $R_{C,D}$  e  $R_{lf,D}$  rappresentano le resistenze termiche in condizioni di design (K/kW). Considerando che la resistenza termica per conduzione resta invariata in off-design, il passo successivo consiste nel calcolo delle resistenze termiche per convezione in condizioni di off-design tramite le seguenti relazioni:

$$R_{lc,OD} = R_{lc,D} \left( \frac{\dot{m}_{lc,D}}{\dot{m}_{lc,OD}} \right)^{0.8}$$

$$R_{C,OD} = R_{C,D}$$

$$R_{lf,OD} = R_{lf,D} \left( \frac{\dot{m}_{lf,D}}{\dot{m}_{lf,OD}} \right)^{0.8}$$

Quindi la resistenza termica totale in condizioni di off-design può essere espressa come la somma delle singole resistenze:

$$R_{T,OD} = R_{lc,OD} + R_{C,OD} + R_{lf,OD}$$

di conseguenza è possibile ricavare il coefficiente di scambio termico globale in off-design come segue:

$$(UA)_{OD} = \frac{1}{R_{T,OD}}$$

A questo punto, utilizzando le equazioni precedentemente introdotte per il calcolo delle prestazioni dello scambiatore in condizioni di progetto, è possibile ricavare i parametri caratteristici in off-design.

A titolo esemplificativo si riporta il dettaglio dei passaggi seguiti per calcolare le prestazioni dello scambiatore di calore S1:

1. partendo dai parametri noti relativamente al lato caldo, cioè portata e temperature di ingresso e uscita, è possibile calcolare la potenza termica disponibile in condizioni di design:

$$Q_{S1} = \dot{m}_1 c_L (T_1 - T_2')$$

2. conoscendo la potenza termica disponibile, la portata e la temperatura in ingresso del fluido freddo è possibile calcolare la temperatura in uscita:

$$T_{10} = T_9 + \frac{Q_{S1}}{c_L \dot{m}_8}$$

dove  $c_L$  è il calore specifico dell'acqua

3. da questi parametri è possibile calcolare la differenza media logaritmica, le capacità termiche, il parametro NTU, l'efficienza dello scambiatore ( $\epsilon$ ), il coefficiente globale di scambio termico (UA) e le resistenze termiche per convezione e conduzione;
4. determinati i parametri in condizioni di progetto, si possono valutare quelli in off-design. Per prima cosa bisogna determinare la portata inviata allo scambiatore dalla valvola C1 ( $\dot{m}_1$ ). Partendo da un valore di primo tentativo di  $\dot{m}_1$ , vengono calcolate le resistenze termiche, il coefficiente di scambio termico globale, le capacità termiche, l'efficienza e il parametro NTU, infine viene determinata la temperatura in uscita del fluido freddo ( $T_{10}$ ). Il processo iterativo continua fino a quando il valore della  $T_{10}$  non coincide con quello obiettivo (60 °C);
5. individuato il valore della portata inviata allo scambiatore S1, si può ricavare la temperatura di uscita del fluido caldo ( $T_2'$ ).

I paragrafi successivi illustrano il dimensionamento dei tre scambiatori a piastre, che compongono la sottostazione.

## 11.2 Scambiatore S1

Lo scambiatore di calore S1 è dimensionato in modo da soddisfare completamente la richiesta dell'utenza in assenza del sistema di generazione distribuita. Il suo dimensionamento tiene conto della richiesta dell'utenza in condizioni di design (portata pari a 0.50 kg/s, temperatura di ingresso di 40 °C e temperatura in uscita di 60 °C). In [Figura 41](#) è rappresentato lo schema relativo allo scambiatore S1.

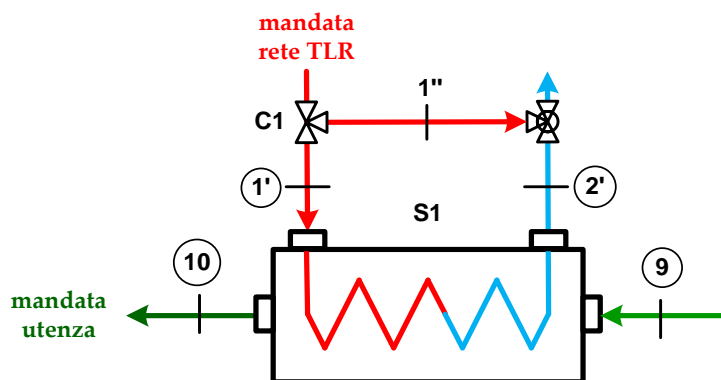


Figura 41 – Schema relativo allo scambiatore S1.

In **Tabella 10** vengono inoltre riportati i valori dei parametri, relativi allo scambiatore S1, in condizioni di design. Come si può vedere, la richiesta termica dell'utenza ( $Q$ ) è pari a 42 kW, mentre il coefficiente globale di scambio termico ( $UA$ ) in condizioni di design corrisponde a 2.90 kW/°C.

Tabella 10 – Scambiatore S1 in condizioni di design.

|                |            |             |           |
|----------------|------------|-------------|-----------|
| $\dot{m}_{1'}$ | 0.33 kg/s  | $\dot{m}_9$ | 0.50 kg/s |
| $T_{1'}$       | 80 °C      | $T_9$       | 40 °C     |
| $T_{2'}$       | 50 °C      | $T_{10}$    | 60 °C     |
| $Q$            | 42 kW      |             |           |
| $UA$           | 2.90 kW/°C |             |           |

Per valutare le prestazioni dello scambiatore anche in condizioni di off-design, è stata effettuata un'analisi parametrica al variare della temperatura di ingresso dell'utenza ( $T_9$ ). I parametri mantenuti costanti nell'analisi sono: la portata dell'utenza ( $\dot{m}_9$ ) pari a 0.50 kg/s, la temperatura di mandata della rete di teleriscaldamento ( $T_{1'}$ ) e quella di mandata dell'utenza ( $T_{10}$ ), rispettivamente pari a 80 °C e 60 °C.

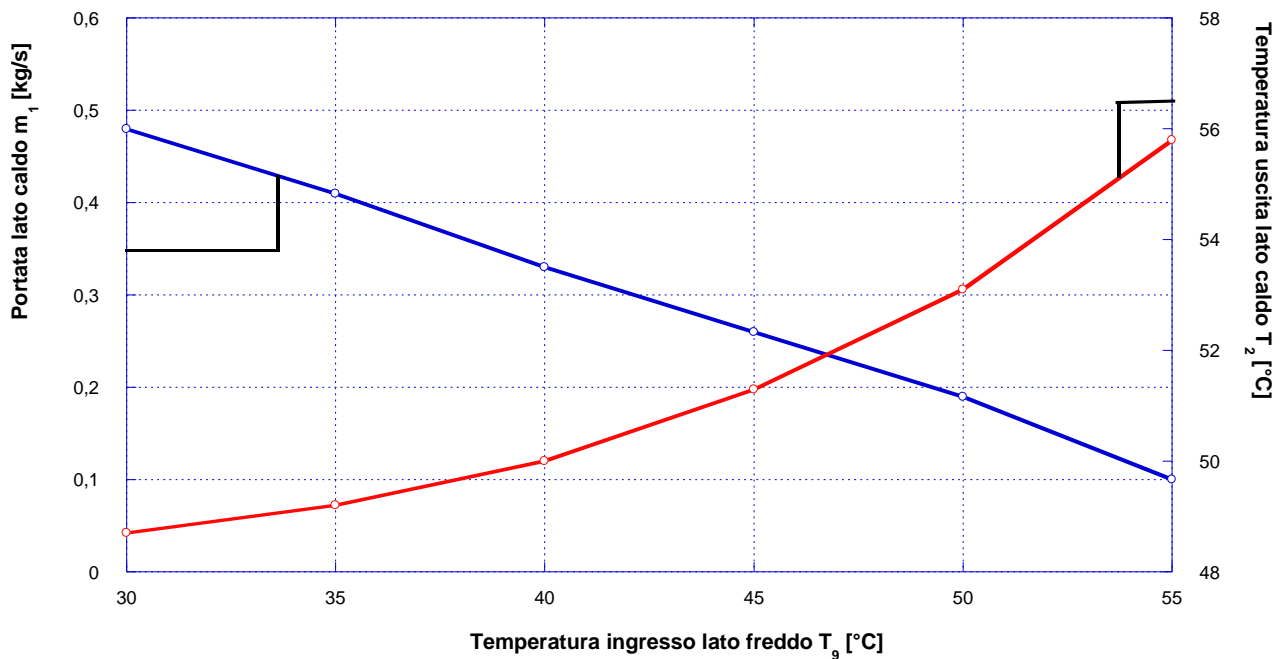
Nella **Tabella 11** sono riportati i principali risultati; tra essi il Caso 3 è quello rappresentativo delle condizioni di design.

Tabella 11 – Risultati analisi parametrica al variare della  $T_9$ .

|                       | Caso 1 | Caso 2 | Caso 3 | Caso 4 | Caso 5 | Caso 6 |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $T_9$ [°C]            | 30.0   | 35.0   | 40.0   | 45.0   | 50.0   | 55.0   |
| $T_{10}$ [°C]         | 60.0   | 60.0   | 60.0   | 60.0   | 60.0   | 60.0   |
| $\dot{m}_9$ [kg/s]    | 0.50   | 0.50   | 0.50   | 0.50   | 0.50   | 0.50   |
| $\dot{m}_{1'}$ [kg/s] | 0.48   | 0.41   | 0.33   | 0.26   | 0.19   | 0.10   |
| $T_{1'}$ [°C]         | 80.0   | 80.0   | 80.0   | 80.0   | 80.0   | 80.0   |
| $T_{2'}$ [°C]         | 48.7   | 49.2   | 50.0   | 51.3   | 53.1   | 55.8   |
| $Q$ [kW]              | 63.77  | 52.35  | 41.92  | 31.45  | 20.97  | 10.54  |
| $UA$ [kW/°C]          | 3.25   | 3.09   | 2.90   | 2.66   | 2.31   | 1.75   |

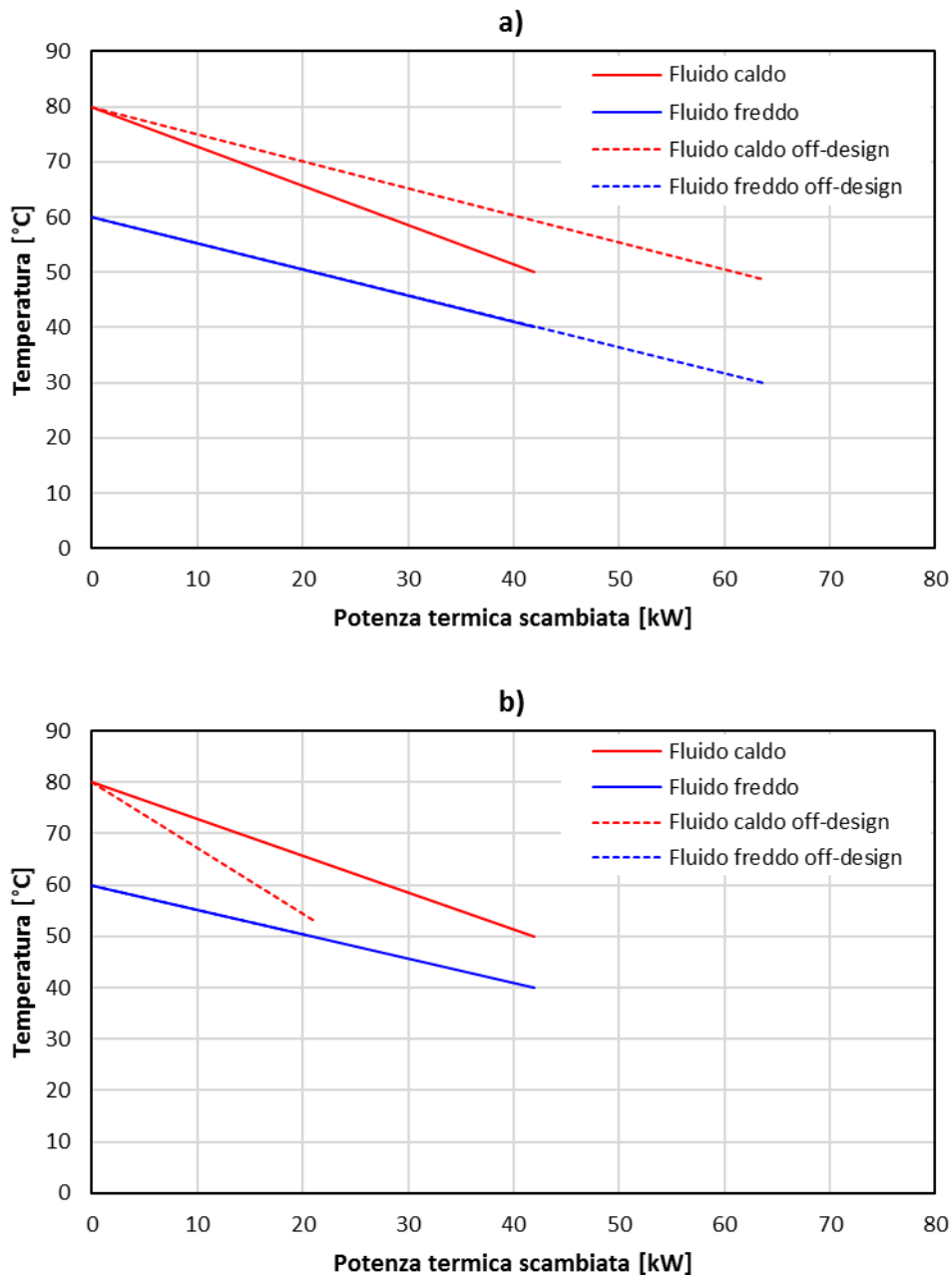
Nella **Figura 42** sono riportati gli andamenti della portata ( $\dot{m}_{1'}$ ) inviata dalla valvola C1 allo scambiatore S1 e della temperatura dell'acqua in uscita lato caldo ( $T_{2'}$ ) in funzione della temperatura dell'acqua in ingresso lato freddo ( $T_9$ ). Si può notare come l'aumento dell' $T_9$  si traduca in una diminuzione della portata  $\dot{m}_{1'}$  che passa da un massimo di circa 0.50 kg/s ad un minimo di 0.10 kg/s. Contestualmente si osserva un

progressivo aumento della  $T_2$ , che raggiunge un massimo di circa 56 °C quando la temperatura dell'utenza in ingresso allo scambiatore ( $T_9$ ) è di 55 °C.



**Figura 42** – Andamenti della portata ( $\dot{m}_1$ ) e della temperatura in uscita lato caldo ( $T_2$ ) in funzione della temperatura in ingresso lato freddo ( $T_9$ ).

Nella **Figura 43** sono rappresentati i diagrammi di scambio termico relativi allo scambiatore di calore S1. I diagrammi mostrano l'andamento della temperatura in funzione della potenza termica scambiata per entrambi i flussi che attraversano lo scambiatore. Le linee continue e tratteggiate rappresentano rispettivamente lo scambio termico in condizioni di progetto (Caso 3) e di off-design (Caso 1 e Caso 5). Le linee in rosso si riferiscono al fluido caldo, in questo caso rappresentato dall'acqua prelevata dal ramo di mandata della rete di teleriscaldamento. Le linee blu invece si riferiscono al fluido freddo, cioè l'utenza. Nel dettaglio, la **Figura 43a** mostra il confronto tra il caso in cui l'utenza entra nello scambiatore S1 in condizioni di progetto, quindi a una temperatura di 40 °C (linee continue), e quello in cui l'utenza presenta una temperatura iniziale di 30 °C (linee tratteggiate). La **Figura 43b** confronta invece lo scambio in condizioni di progetto con quello in cui l'utenza ha una temperatura iniziale di 50 °C. È da sottolineare che la portata inviata dalla valvola C1 allo scambiatore varia a seconda dei casi analizzati. La valvola C1, visibile in **Figura 41**, permette infatti di regolare la portata da inviare allo scambiatore assicurando così che i vincoli sulle temperature siano rispettati.



**Figura 43** – Diagrammi di scambio termico dello scambiatore S1: a) temperatura di ingresso utenza a 30 °C; b) temperatura di ingresso utenza a 50 °C.

### 11.3 Scambiatore S2

Lo scambiatore di calore S2 è dimensionato in modo da soddisfare completamente la richiesta dell'utenza, in condizioni di design (come per lo scambiatore S1), sfruttando l'energia termica prodotta dal sistema di generazione distribuita. In **Figura 44** è rappresentato lo schema dello scambiatore S2.

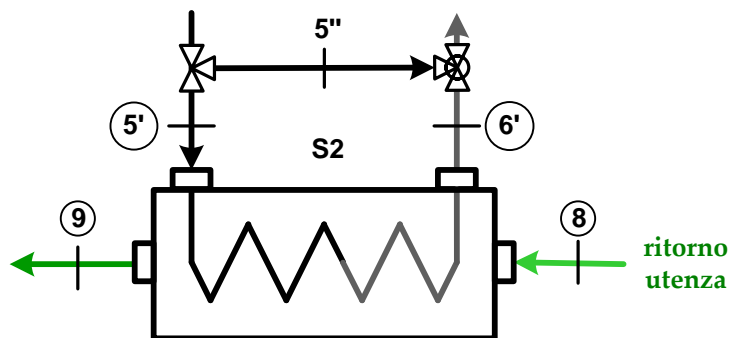


Figura 44 – Schema relativo allo scambiatore S2.

In **Tabella 12** vengono riportati i valori dei parametri relativi allo scambiatore S2, in condizioni di design. Si può vedere che la richiesta termica dell’utenza (Q) è pari a 42 kW analogamente a quanto visto per lo scambiatore S1. Il coefficiente globale di scambio termico (UA) in condizioni di design, invece, corrisponde a 1.20 kW/°C.

Tabella 12 – Scambiatore S2 in condizioni design.

|                |           |             |           |
|----------------|-----------|-------------|-----------|
| $\dot{m}_{5'}$ | 1.03 kg/s | $\dot{m}_8$ | 0.50 kg/s |
| $T_{5'}$       | 90 °C     | $T_8$       | 40 °C     |
| $T_{6'}$       | 80 °C     | $T_9$       | 60 °C     |
| <b>Q</b>       |           | 42 kW       |           |
| <b>UA</b>      |           | 1.20 kW/°C  |           |

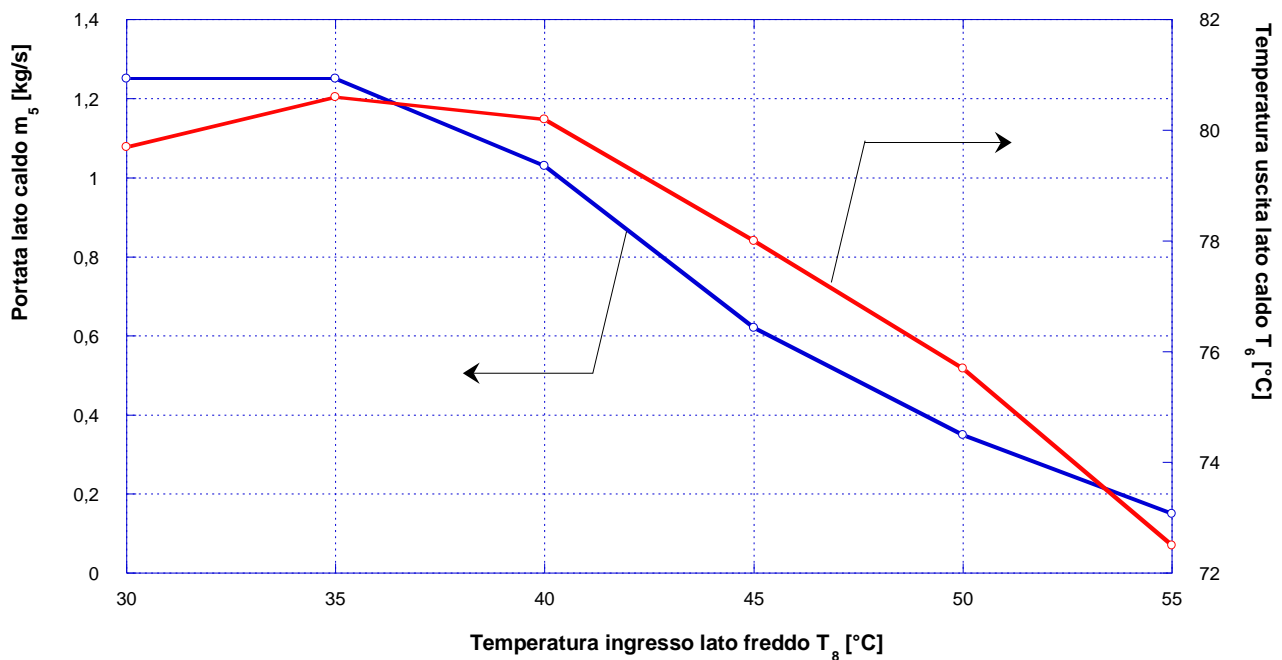
Come precedentemente detto per lo scambiatore S1, anche le prestazioni dello scambiatore S2 in condizioni di off-design sono state valutate tramite un’analisi parametrica. Mantenendo costanti i valori della portata dell’utenza ( $\dot{m}_8$ , pari a 0.50 kg/s) e della temperatura di mandata del sistema di generazione distribuita ( $T_{5'}$ , pari a 90 °C), si studia l’influenza della variazione della temperatura di ritorno dall’utenza ( $T_8$ ) avendo come obiettivo il raggiungimento dei 60°C per la mandata verso l’utenza stessa ( $T_9$ ). Nella **Tabella 13** sono riportati i principali risultati: ancora una volta il Caso 3 è rappresentativo delle condizioni di design.

Tabella 13 – Risultati analisi parametrica al variare della  $T_8$ .

|                       | Caso 1 | Caso 2 | Caso 3 | Caso 4 | Caso 5 | Caso 6 |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $T_8$ [°C]            | 30.0   | 35.0   | 40.0   | 45.0   | 50.0   | 55.0   |
| $T_9$ [°C]            | 55.5   | 58.4   | 60.0   | 59.9   | 60.1   | 60.1   |
| $\dot{m}_8$ [kg/s]    | 0.50   | 0.50   | 0.50   | 0.50   | 0.50   | 0.50   |
| $\dot{m}_{5'}$ [kg/s] | 1.25   | 1.25   | 1.03   | 0.62   | 0.35   | 0.15   |
| $T_{5'}$ [°C]         | 90.0   | 90.0   | 90.0   | 90.0   | 90.0   | 90.0   |
| $T_{6'}$ [°C]         | 79.7   | 80.6   | 80.2   | 78.0   | 75.7   | 72.5   |
| <b>Q</b> [kW]         | 53.30  | 48.86  | 41.86  | 31.24  | 21.07  | 10.67  |
| <b>UA</b> [kW/°C]     | 1.28   | 1.28   | 1.20   | 0.99   | 0.76   | 0.46   |

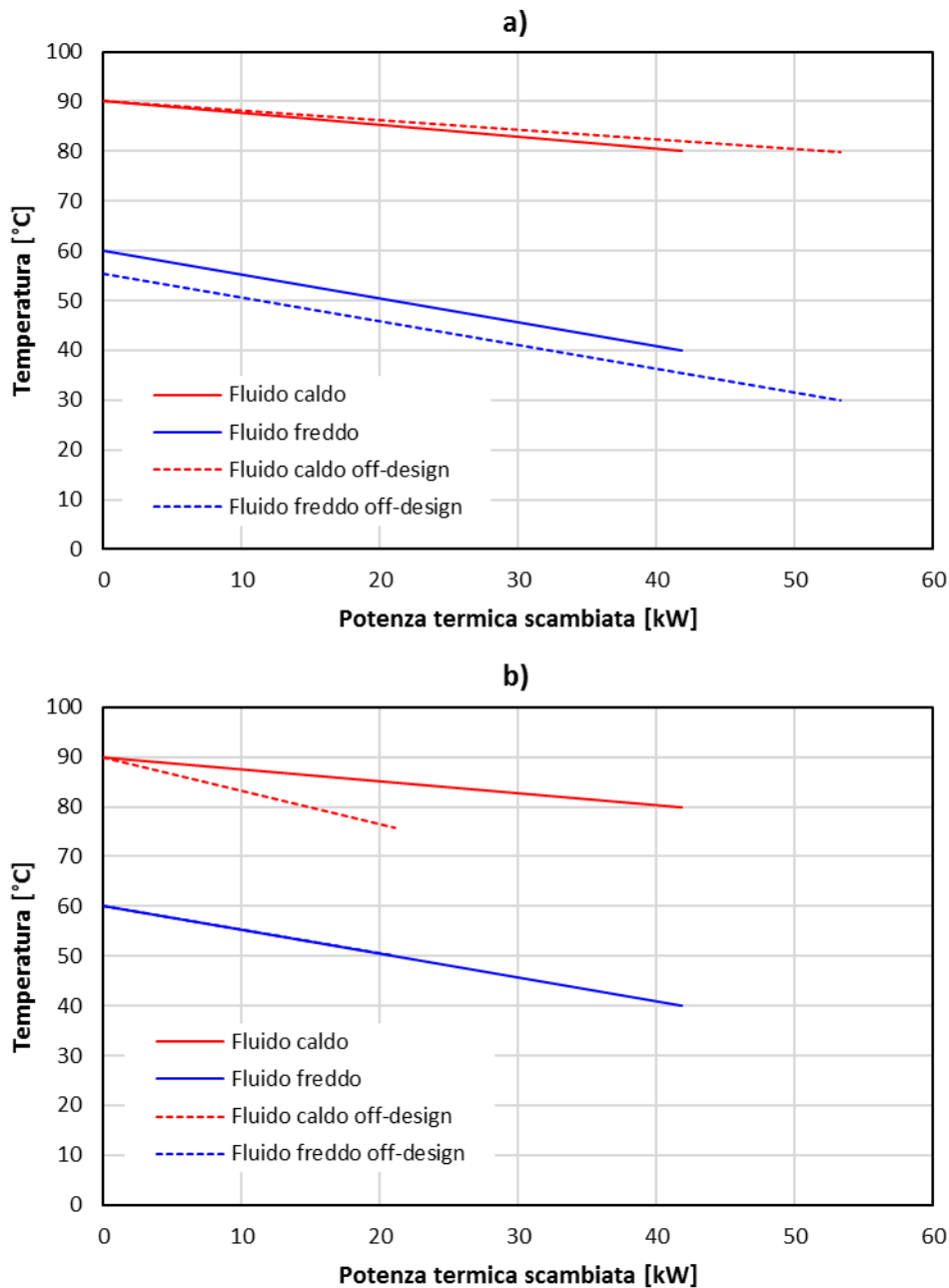
Dalla **Tabella 13** si può notare come nel Caso 1 e nel Caso 2 non si riescano a raggiungere i 60 °C richiesti dall’utenza. Ciò significa che sarà necessario il funzionamento dello scambiatore S1 per compensare questa

manca. Gli andamenti di alcuni dei parametri riportati nella **Tabella 13** sono rappresentati in **Figura 45**. Nello specifico sono raffigurati gli andamenti della portata di acqua calda, proveniente dal sistema di generazione distribuita ed inviata dalla valvola C2 allo scambiatore S2 ( $\dot{m}_5$ ) e della temperatura in uscita ( $T_6$ ) in funzione della temperatura dell'utenza in ingresso ( $T_8$ ). Per quanto riguarda la portata, si può notare come rimanga costante e pari al valore di 1.25 kg/s per valori di  $T_8$  minori di 35 °C. Si ricorda che la portata che circola nel circuito del sistema di generazione distribuita sia pari a 1.25 kg/s; di conseguenza, quando la  $T_8$  risulta inferiore a 35 °C tutta la portata di acqua calda disponibile ( $\dot{m}_5$ ) viene inviata allo scambiatore S2. Quando invece il valore di  $T_8$  sale, la portata  $\dot{m}_5$  diminuisce. Lo stesso comportamento si riscontra nell'andamento della temperatura in uscita lato caldo ( $T_6$ ).



**Figura 45** – Andamenti della portata ( $\dot{m}_5$ ) e della temperatura in uscita lato caldo ( $T_6$ ) in funzione della temperatura in ingresso lato freddo ( $T_8$ ).

In **Figura 46** sono rappresentati i diagrammi di scambio termico relativi allo scambiatore di calore S2. Le linee continue e tratteggiate rappresentano rispettivamente lo scambio termico in condizioni di progetto (Caso 3) e di off-design (Caso 1 e Caso 5). Inoltre, le linee in rosso si riferiscono al fluido caldo – in questo caso rappresentato dall'acqua proveniente dal sistema di generazione distribuita – mentre le linee blu si riferiscono al fluido freddo, cioè l'utenza. Nel dettaglio, la **Figura 46a** mostra il confronto tra il caso in cui l'utenza entra nello scambiatore S2 in condizioni di progetto, quindi a una temperatura di 40 °C (linee continue), e quello in cui l'utenza presenta una temperatura iniziale di 30 °C. La **Figura 46b** confronta invece lo scambio termico in condizioni di progetto con il caso in cui l'utenza ha una temperatura iniziale di 50 °C. Come per lo scambiatore S1, la valvola C2, visibile in **Figura 44**, permette di regolare la portata da inviare allo scambiatore per rispettare i vincoli di temperatura richiesti.



**Figura 46** – Diagrammi di scambio termico dello scambiatore S2: a) temperatura di ingresso utenza a 30 °C; b) temperatura di ingresso utenza a 50 °C.

### 11.4 Scambiatore S3

Lo scambiatore di calore S3 permette lo scambio termico tra il sistema di generazione distribuita e la rete di distribuzione principale. In condizioni di design, S3 è dimensionato in modo che la massima potenza termica producibile dal sistema di generazione possa essere ceduta alla rete, quindi bypassando completamente lo scambio con l'utenza attraverso lo scambiatore S2. In queste condizioni, lo scambiatore deve garantire uno scambio termico pari a 60 kW. In **Figura 47** è rappresentato lo schema dello scambiatore S3.

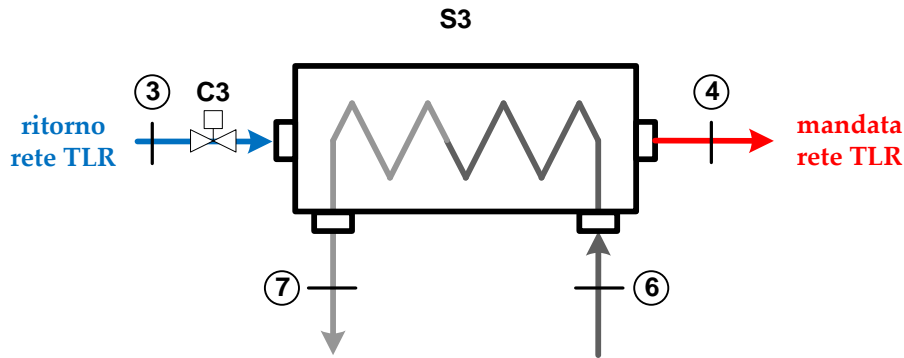


Figura 47 – Schema relativo allo scambiatore S3.

I valori dei parametri relativi alle condizioni di design dello scambiatore S3 sono riportati in **Tabella 14**. La potenza termica ceduta alla rete di distribuzione è pari a 60 kW, valore corrispondente alla potenza termica massima producibile dal sistema di generazione distribuita. In queste condizioni, il coefficiente globale di scambio termico (UA) corrisponde a 3.37 °C/kW.

Tabella 14 – Scambiatore S3 in condizioni di design.

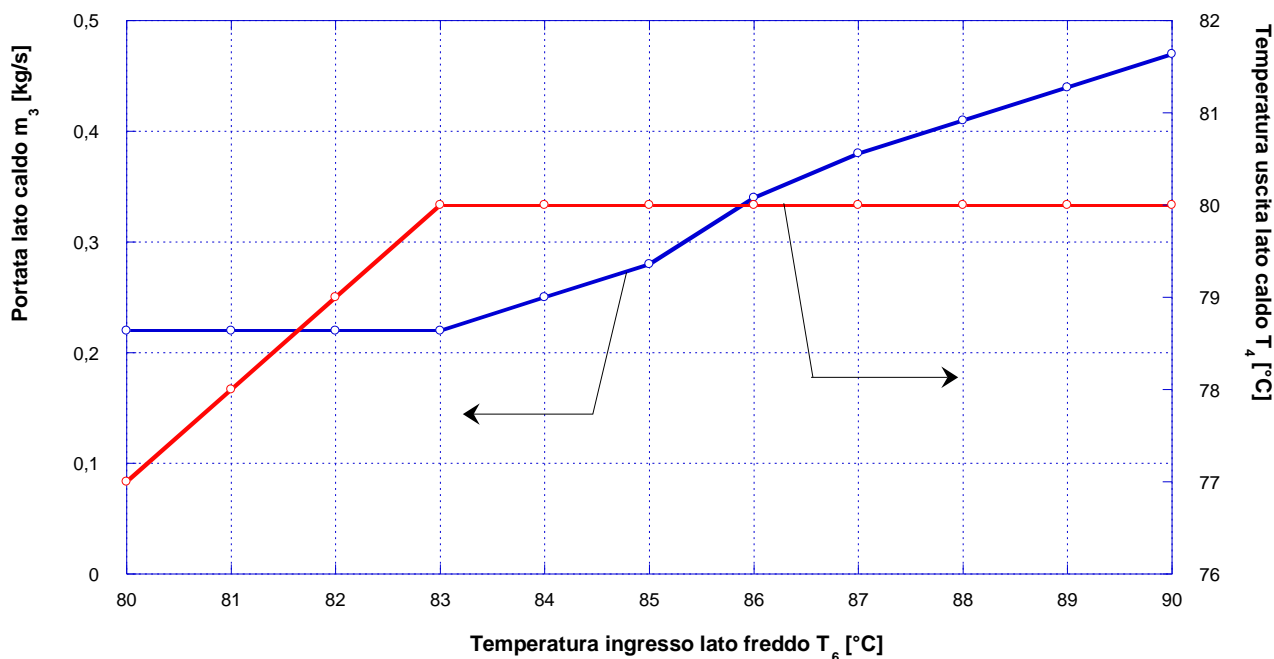
|             |            |             |           |
|-------------|------------|-------------|-----------|
| $\dot{m}_3$ | 0.48 kg/s  | $\dot{m}_6$ | 1.25 kg/s |
| $T_3$       | 50 °C      | $T_6$       | 90 °C     |
| $T_4$       | 80 °C      | $T_7$       | 78 °C     |
| <b>Q</b>    | 60 kW      |             |           |
| <b>UA</b>   | 3.37 kW/°C |             |           |

Come per gli scambiatori S1 e S2, le prestazioni di S3 in condizioni fuori progetto sono state valutate tramite un'analisi parametrica. In questo caso si analizza l'influenza della temperatura di ingresso allo scambiatore S3 lato caldo ( $T_6$ ) mantenendo costanti la portata proveniente dal sistema di generazione distribuita ( $\dot{m}_6$  pari a 1.25 kg/s) e la temperatura di ritorno della rete di teleriscaldamento ( $T_3$  pari a 50 °C). La valvola C3, visibile in **Figura 47**, permette di regolare la portata prelevata dal ramo di ritorno della rete di teleriscaldamento affinché, attraversando lo scambiatore S3, possa incrementare la propria temperatura fino a raggiungere gli 80 °C corrispondenti al livello di temperatura sul ramo di mandata della rete principale. Si ricorda che la portata minima prelevabile dal ramo di ritorno è pari a 0.22 kg/s. Quindi, se per soddisfare i vincoli di temperatura fosse necessaria una portata inferiore a questo valore la valvola chiuderebbe completamente, rendendo così inattivo lo scambiatore S3. In **Tabella 15** sono riportati i principali risultati; tra essi il Caso 11 è quello rappresentativo delle condizioni di design.

Tabella 15 – Risultati analisi parametrica al variare della  $T_6$ .

|                    | Caso 1 | Caso 2 | Caso 3 | Caso 4 | Caso 5 | Caso 6 | Caso 7 | Caso 8 | Caso 9 | Caso 10 | Caso 11 |
|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| $T_6$ [°C]         | 80.0   | 81.0   | 82.0   | 83.0   | 84.0   | 85.0   | 86.0   | 87.0   | 88.0   | 89.0    | 90.0    |
| $T_7$ [°C]         | 75.2   | 76.0   | 76.8   | 77.7   | 77.9   | 78.1   | 77.7   | 77.9   | 78.1   | 78.3    | 78.5    |
| $\dot{m}_6$ [kg/s] | 1.25   | 1.25   | 1.25   | 1.25   | 1.25   | 1.25   | 1.25   | 1.25   | 1.25   | 1.25    | 1.25    |
| $\dot{m}_3$ [kg/s] | 0.22   | 0.22   | 0.22   | 0.22   | 0.25   | 0.28   | 0.34   | 0.38   | 0.41   | 0.44    | 0.47    |
| $T_3$ [°C]         | 50.0   | 50.0   | 50.0   | 50.0   | 50.0   | 50.0   | 50.0   | 50.0   | 50.0   | 50.0    | 50.0    |
| $T_4$ [°C]         | 77.0   | 78.0   | 79.0   | 80.0   | 80.0   | 80.0   | 80.0   | 80.0   | 80.0   | 80.0    | 80.0    |
| <b>Q</b> [kW]      | 25.08  | 25.92  | 26.76  | 27.60  | 31.83  | 36.06  | 43.3   | 47.42  | 51.52  | 55.6    | 59.67   |
| <b>UA</b> [kW/°C]  | 2.47   | 2.47   | 2.47   | 2.47   | 2.63   | 2.77   | 3.01   | 3.11   | 3.21   | 3.30    | 3.37    |

Si può notare come nei primi 3 casi la temperatura nella sezione 4 sia inferiore al valore richiesto (ovvero 80 °C), a causa del vincolo della portata minima prelevabile dalla rete (sezione 3). Ne segue che tali casi saranno esclusi dalla logica di gestione del sistema. La **Figura 48** mostra l'andamento della portata prelevata dal ramo di ritorno della rete di distribuzione principale ( $\dot{m}_3$ ) e della temperatura in uscita dallo scambiatore lato freddo ( $T_4$ ), in funzione della temperatura dell'acqua proveniente dal sistema di generazione distribuita ( $T_6$ ). Si può notare che la portata  $\dot{m}_3$  (in blu) presenta un primo tratto in cui mostra un valore costante pari a 0.22 kg/s, ovvero indipendente dalla  $T_6$ . Questo avviene perché la portata minima prelevabile dal ramo di ritorno della rete principale di distribuzione è proprio di 0.22 kg/s (vedi **Paragrafo 10.1**). Quindi, se l'acqua nella sezione 6 presenta una temperatura inferiore a 83 °C, con una portata fissa di 1.25 kg/s, il vincolo sulla portata minima nella sezione 3 non permette all'acqua (lato freddo) di raggiungere gli 80 °C caratteristici del ramo di mandata della rete di TLR (sezione 4). Si può infatti vedere come inizialmente il valore della  $T_4$  (in rosso) risulti inferiore agli 80 °C desiderati, mentre quando la  $T_6$  è maggiore di 83 °C la  $T_4$  è costante ed uguale a 80 °C. Si può infine notare come con l'aumento della  $T_6$  aumenti anche la  $\dot{m}_3$ . Infatti, maggiore è la temperatura dell'acqua in ingresso lato caldo ( $T_6$ ), maggiore deve essere la portata prelevata dal ramo di ritorno ( $\dot{m}_3$ ) per evitare di raggiungere temperature in uscita ( $T_4$ ) superiori agli 80 °C desiderati.



**Figura 48** – Andamenti della portata ( $\dot{m}_3$ ) e della temperatura in uscita lato caldo ( $T_4$ ) in funzione della temperatura in ingresso lato freddo ( $T_6$ ).

In **Figura 49** è rappresentato il diagramma di scambio termico relativo allo scambiatore di calore S3. In particolare, si mostra il confronto tra le condizioni di progetto (Caso 11) e di off-design. Il caso di off-design scelto per il confronto è il Caso 4 perché, come visibile nella **Tabella 15**, è il caso che presenta il minor valore di  $T_6$  soddisfacendo però il vincolo di temperatura imposto sul ramo di mandata della rete principale di teleriscaldamento ( $T_4$ ). Le linee continue rappresentano lo scambio termico in condizioni di progetto (Caso 11) mentre quelle tratteggiate sono relative all'off-design. Inoltre, le linee in rosso si riferiscono al fluido caldo – in questo caso rappresentato dall'acqua proveniente dal sistema di generazione distribuita – mentre le linee blu si riferiscono al fluido freddo, ovvero all'acqua prelevata dal ramo di ritorno della rete di teleriscaldamento.

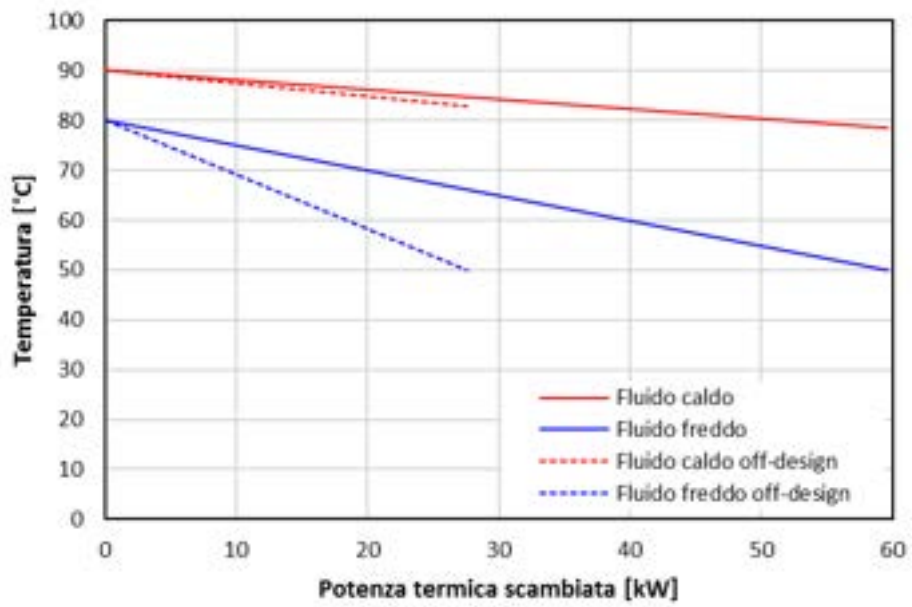


Figura 49 – Diagrammi di scambio termico dello scambiatore S3.

## 12 Logica di controllo

Al fine di soddisfare le richieste dell'utenza, consentire uno scambio di energia termica bidirezionale e contemporaneamente rispettare i vincoli su temperature e portate imposti dalle condizioni al contorno, è stato sviluppato un modello per il controllo della sottostazione attiva oggetto di progettazione. In riferimento a ciò, in **Figura 50** si mostra lo screenshot relativo all'interfaccia Excel del modello di calcolo – scritto in ambiente VBA (Visual Basic for Application) – creato per simulare il comportamento del software di gestione della sottostazione. Più in dettaglio, il modello di calcolo sviluppato prevede la possibilità di impostazione o modifica da parte dell'utente di alcune variabili cosiddette di set-up (si vedano le grandezze su sfondo blu in **Figura 50**), che costituiscono i vincoli esterni che è necessario rispettare. Tenendo in considerazione tali valori delle variabili di set-up e sulla base dei dati misurati, il software è in grado di calcolare alcune grandezze derivate (si vedano le grandezze su sfondo viola in **Figura 50**) e di stabilire le modalità di gestione della sottostazione (apertura/chiusura delle valvole, funzionamento della pompa, ecc.). Come si può notare, in **Figura 50** è possibile osservare i collegamenti funzionali (rappresentati da linee nere tratteggiate) tra la componentistica di controllo e i sistemi di misura, questi ultimi rappresentati dai valori di temperatura e portata su sfondo rosso riquadrato in giallo. Si sottolinea, invece, che nel software di gestione non sono stati inseriti i componenti idraulici non espressamente finalizzati al controllo del sistema (come ad esempio valvole di intercettazione, vasi di espansione, ecc.). Per completezza, infine, i valori di temperatura e portata vengono riportati in tutte le sezioni della sottostazione, anche laddove non utili al controllo (su semplice sfondo rosso).

Nel prosieguo del capitolo verrà discussa in dettaglio la logica di funzionamento sviluppata.

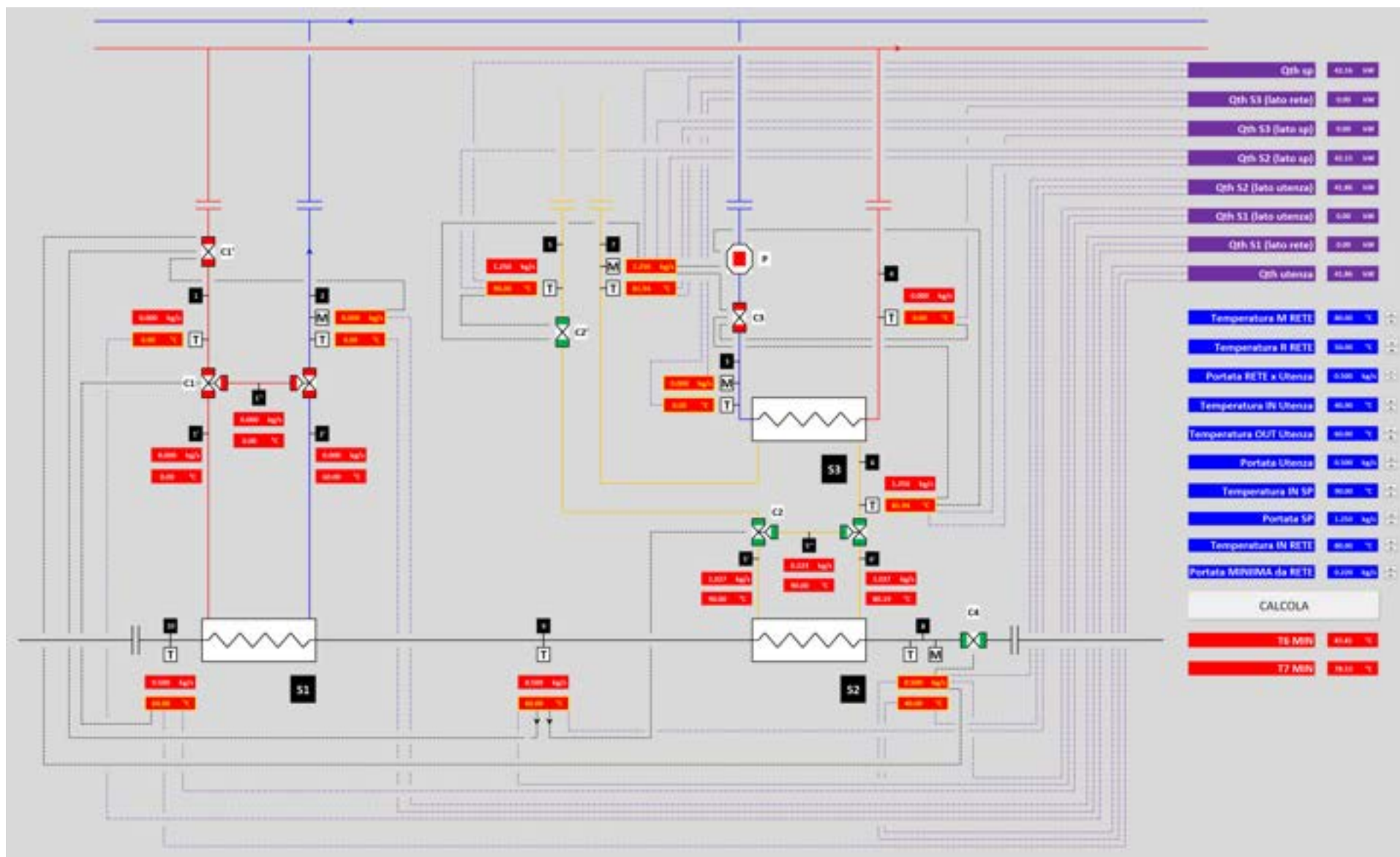


Figura 50 – Screenshot dell'interfaccia Excel relativa al codice di calcolo sviluppato per il controllo della sottostazione.

### 12.1 Grandezze di set-up

Come già anticipato, le grandezze di set-up sono valori di temperatura e portata che possono essere impostati dall'utente all'interno del software sviluppato per il controllo. Di seguito si riportano le grandezze di set-up previste e i loro corrispondenti valori nominali:

- portata del sistema di produzione: ( $M_{SP, set-up}$ ): 1.25 kg/s;
- portata prelevata dalla rete per scambio tradizionale ( $M_{TLR, set-up}$ ): 0.50 kg/s;
- portata del circuito utenza ( $M_{U, set-up}$ ): 0.50 kg/s;
- portata minima di immissione in rete per scambio attivo ( $M_{IM-MIN, set-up}$ ): 0.22 kg/s;
- temperatura obiettivo mandata utenza ( $T_{U, set-up}$ ): 60 °C;
- temperatura immissione in rete per scambio attivo ( $T_{IM, set-up}$ ): 80 °C;
- temperatura rete ramo di ritorno ( $T_{R, set-up}$ ): 50 °C;
- temperatura minima sistema di produzione ( $T_{SPmin, set-up}$ ): 65 °C;
- potenza termica massima del sistema di produzione ( $Q_{SP, max}$ ): 60 kW.

### 12.2 Grandezze misurate e sensori di misura

Le grandezze (temperature e portate) che devono essere misurate per il controllo e la gestione della sottostazione sono (si faccia riferimento alla [Figura 50](#)):

- portata sezione 2 ( $M_2$ );
- portata sezione 3 ( $M_3$ );
- portata sezione 7 ( $M_7$ );
- portata sezione 8 ( $M_8$ );
- temperatura sezione 1 ( $T_1$ );
- temperatura sezione 2 ( $T_2$ );
- temperatura sezione 3 ( $T_3$ );
- temperatura sezione 4 ( $T_4$ );
- temperatura sezione 5 ( $T_5$ );
- temperatura sezione 6 ( $T_6$ );
- temperatura sezione 7 ( $T_7$ );
- temperatura sezione 8 ( $T_8$ );
- temperatura sezione 9 ( $T_9$ );
- temperatura sezione 10 ( $T_{10}$ ).

Tutti i valori delle grandezze di sopra riportate dovranno essere registrati dal sistema di controllo ed esportabili. Il time step di acquisizione delle grandezze in oggetto (finalizzato al controllo del sistema) dovrà essere compatibile con l'inerzia delle valvole di regolazione. Per quanto riguarda invece il time step di registrazione è possibile prevedere tempi superiori purché i valori registrati siano medie sul time step invece che valori istantanei.

Sulla base di quanto sopra riportato, è pertanto possibile prevedere la seguente strumentazione di misura:

- n° 1 contacalorie (misura  $M_2$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ );
- n° 1 contacalorie (misura  $M_3$ ,  $T_3$ ,  $T_4$ );
- n° 1 contacalorie (misura  $M_7$ ,  $T_5$ ,  $T_7$ );
- n° 1 contacalorie (misura  $M_8$ ,  $T_8$ ,  $T_{10}$ );
- n° 1 sensore di temperatura (misura  $T_6$ );
- n° 1 sensore di temperatura (misura  $T_9$ ).

### 12.3 Componenti di controllo

I componenti necessari al controllo e/o alla gestione della sottostazione sono (si faccia riferimento alla [Figura 50](#)):

- n°1 valvola a due vie (C1');

- n°1 valvola a due vie (C2');
- n°1 valvola a due vie (C3);
- n°1 valvola a due vie (C4);
- n°1 valvola a tre vie (C1);
- n°1 valvola a tre vie (C2);
- n°1 pompa (P).

#### 12.4 Componenti idraulici

Per quanto riguarda la componentistica idraulica non finalizzata al controllo del sistema, con riferimento alla **Figura 39**, può essere considerato quanto segue:

- n°2 filtri;
- n°4 valvole di drenaggio;
- n°2 valvole di sicurezza sulla pressione;
- n°2 vasi di espansione;
- n°1 valvola di non ritorno;
- n°8 valvole di intercettazione manuale;
- n°8 attacchi compatibili con flessibili con uscita femmina da 2 pollici tipo cam-lock.

#### 12.5 Controllo delle valvole

Le valvole basano il loro funzionamento sulla lettura delle temperature e delle portate nei vari rami del circuito interessati. Le valvole presenti nella sottostazione possono essere divise per le differenti logiche di funzionamento in 3 gruppi:

##### 1. Valvole C1', C2', C4

Queste valvole hanno la funzione primaria di controllare la portata sul circuito corrispondente mantenendola costante ai valori di set-up impostati.

##### 2. Valvole C1, C2

Queste valvole permettono la regolazione della portata (del fluido caldo) da inviare agli scambiatori di calore corrispondenti sulla base del raggiungimento della temperatura obiettivo del fluido freddo in uscita.

##### 3. Valvola C3

Questa valvola permette la regolazione della portata prelevata dal ramo di ritorno della rete di teleriscaldamento ai fini dello scambio attivo.

Di seguito vengono descritte nel dettaglio le logiche di controllo delle valvole presenti nella sottostazione.

##### 12.5.1 Valvola C1'

La valvola C1' mantiene costante e pari al valore di set-up ( $M_{TLR,set-up}$ ) la portata  $M_1$  o esclude lo scambio termico su S1 quando non necessario per il raggiungimento della temperatura obiettivo dell'utenza ( $T_{U,set-up}$ ). Più in dettaglio:

- se  $T_9 \geq T_{U,set-up}$ , la valvola C1' chiude completamente;
- se  $T_9 < T_{U,set-up}$  controlla  $M_1 = M_{TLR,set-up}$ ;
- se  $M_8 = 0$  chiude completamente.

##### 12.5.2 Valvola C1

La valvola C1 regola la portata proveniente dal ramo di mandata della rete di teleriscaldamento da inviare allo scambiatore di calore S1, basandosi sulla temperatura nella sezione 10. La regolazione avviene deviando una parte del flusso lungo un ramo che bypassa lo scambiatore S1. In questo modo si cerca di mantenere costante il valore della temperatura di mandata dell'utenza ( $T_{10} = T_{U,set-up}$ ). Nel dettaglio:

- se  $T_{10} > T_{U,set-up}$ , devia parzialmente/totalmente il fluido, riducendo la portata del fluido caldo verso S1;
- se  $T_{10} < T_{U,set-up}$ , la valvola C1 aumenta la portata inviata a S1;

- se  $T_{10} = T_{U, \text{set-up}}$ , la valvola C1 mantiene la posizione corrente di apertura;
- se la valvola C1' è chiusa allora C1 non lavora.

### 12.5.3 Valvola C4

La valvola C4 mantiene costante e pari al valore di set-up ( $M_{U, \text{set-up}}$ ) la portata  $M_8$ .

### 12.5.4 Valvola C2'

La valvola C2' mantiene costante e pari al valore di set-up ( $M_{SP, \text{set-up}}$ ) la portata  $M_5$  o esclude lo scambio termico su S2 ed S3 quando la temperatura  $T_5$  è inferiore al valore di set-up definito ( $T_{SPmin, \text{set-up}}$ ). Ne segue che:

- se  $T_5 \leq T_{SPmin, \text{set-up}}$ , la valvola C2' chiude completamente;
- se  $T_5 > T_{SPmin, \text{set-up}}$ , controlla  $M_5 = M_{SP, \text{set-up}}$ .

### 12.5.5 Valvola C2

La valvola C2 regola la portata proveniente dal sistema di generazione distribuita da inviare allo scambiatore di calore S2, basandosi sulla temperatura nella sezione 9 (al fine di ottenere  $T_9 = T_{U, \text{set-up}}$ ). La regolazione avviene deviando una parte del flusso lungo un ramo che bypassa lo scambiatore S2. In questo modo si cerca di mantenere costante il valore della temperatura di mandata dell'utenza o comunque di sfruttare al massimo la potenza termica prodotta dal sistema di generazione. Nel dettaglio:

- se  $T_9 > T_{U, \text{set-up}}$ , devia parzialmente/totalmente il fluido, riducendo la portata del fluido caldo verso S2;
- se  $T_9 < T_{U, \text{set-up}}$ , la valvola C2 aumenta la portata inviata a S2;
- se  $T_9 = T_{U, \text{set-up}}$ , la valvola C2 mantiene la posizione corrente di apertura;
- se la valvola C2' è chiusa allora C2 non lavora.

### 12.5.6 Valvola C3

La valvola C3 regola la portata ( $M_3$ ) prelevata dal ramo di ritorno della rete di teleriscaldamento da inviare allo scambiatore di calore S3. Inoltre, esclude lo scambio termico su S3 nel caso in cui la temperatura  $T_6$  risulti inferiore ad un valore minimo calcolato dal software come segue:

$$T_{6, \text{min}} = T_{SPmin, \text{set-up}} + (M_{IM-MIN, \text{set-up}}/M_{SP, \text{set-up}}) \times (T_{IM, \text{set-up}} - T_{R, \text{set-up}})$$

Più in dettaglio, solo nel caso in cui  $T_6 > T_{6, \text{min}}$ :

- se  $T_4 < T_{IM, \text{set-up}}$ , la valvola C3 riduce la portata inviata a S3;
- se  $T_4 > T_{IM, \text{set-up}}$ , la valvola C3 aumenta la portata inviata a S3;
- se  $T_4 = T_{IM, \text{set-up}}$ , la valvola C3 mantiene la posizione corrente di apertura.

Inoltre dovrà risultare:

- se  $M_5 = 0$ , la valvola C3 chiude completamente.

### 12.5.7 Pompa P

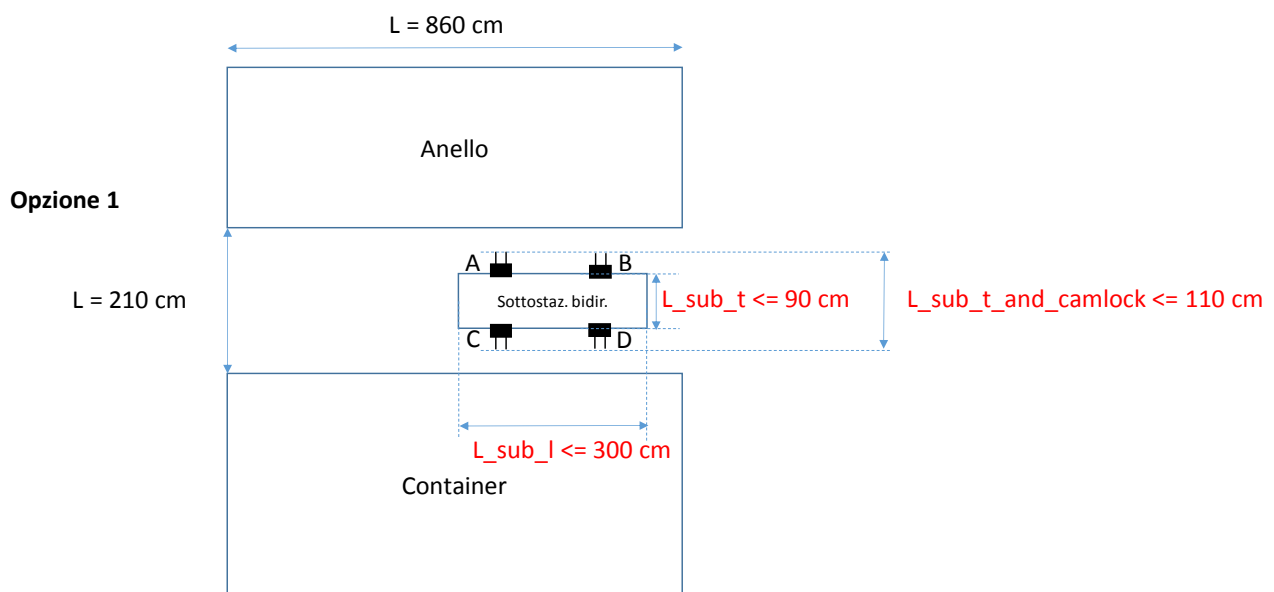
Il suo funzionamento, previsto a giri costanti, è attivato dal sistema di controllo quando sono verificate tutte le seguenti condizioni:

- se la valvola C3 è aperta;
- se  $T_6 \geq T_{6, \text{min}}$

## 13 Layout della sottostazione

La determinazione del layout finale della sottostazione ha richiesto di tener conto di alcuni vincoli imposti dal soggetto che realizzerà la fase di test, a proposito della posizione degli attacchi tra sottostazione e rete e degli ingombri del case. Tali vincoli sono presentati in **Figura 51**.

Sulla base della figura ricevuta, si osserva che le dimensioni in pianta della sottostazione non possono superare gli 0.90 metri in larghezza e i 3.00 metri in lunghezza. In altezza è richiesta invece una dimensione massima pari a 2.00 metri.



- A) 1 in + 1 out con rete TLR per scambio tradizionale;
- B) 1 in + 1 out con rete TLR per scambio attivo;
- C) 1 in + 1 out con il circuito che simula il sistema di produzione;
- D) 1 in + 1 out con il circuito che simula l'utenza

**Figura 51** – Vincoli al layout della sottostazione.

Sulla base dei vincoli appena evidenziati, in una prima fase sono state elaborate due ipotesi relative all'assetto della sottostazione, la cui rappresentazione 3D è mostrata rispettivamente in **Figura 52** ed in **Figura 53**.

In aggiunta, in **Figura 54**, in **Figura 55** e in **Figura 56** si presenta un'ipotesi di modello CAD comprensivo di un case di protezione e coibentazione.

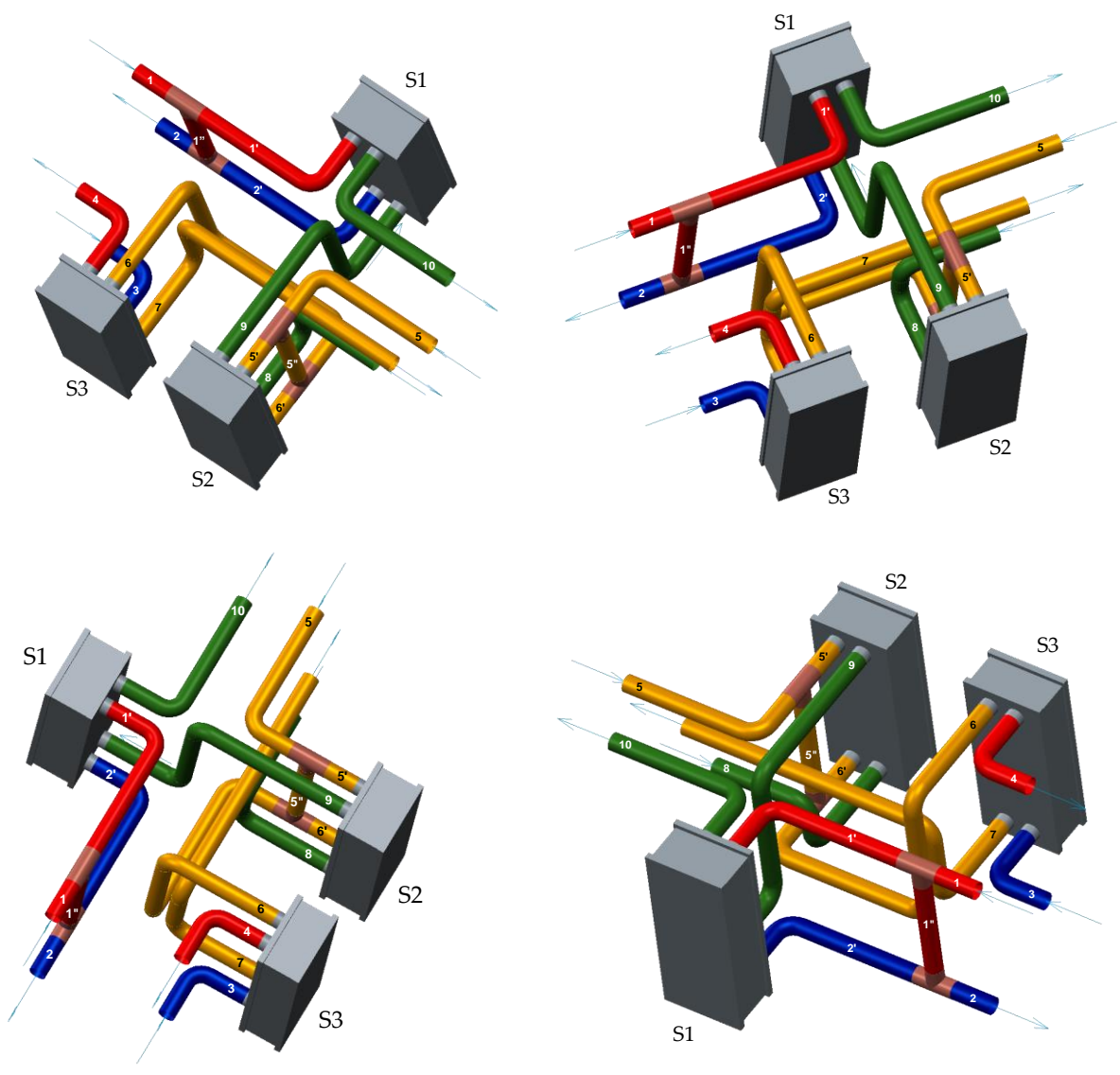
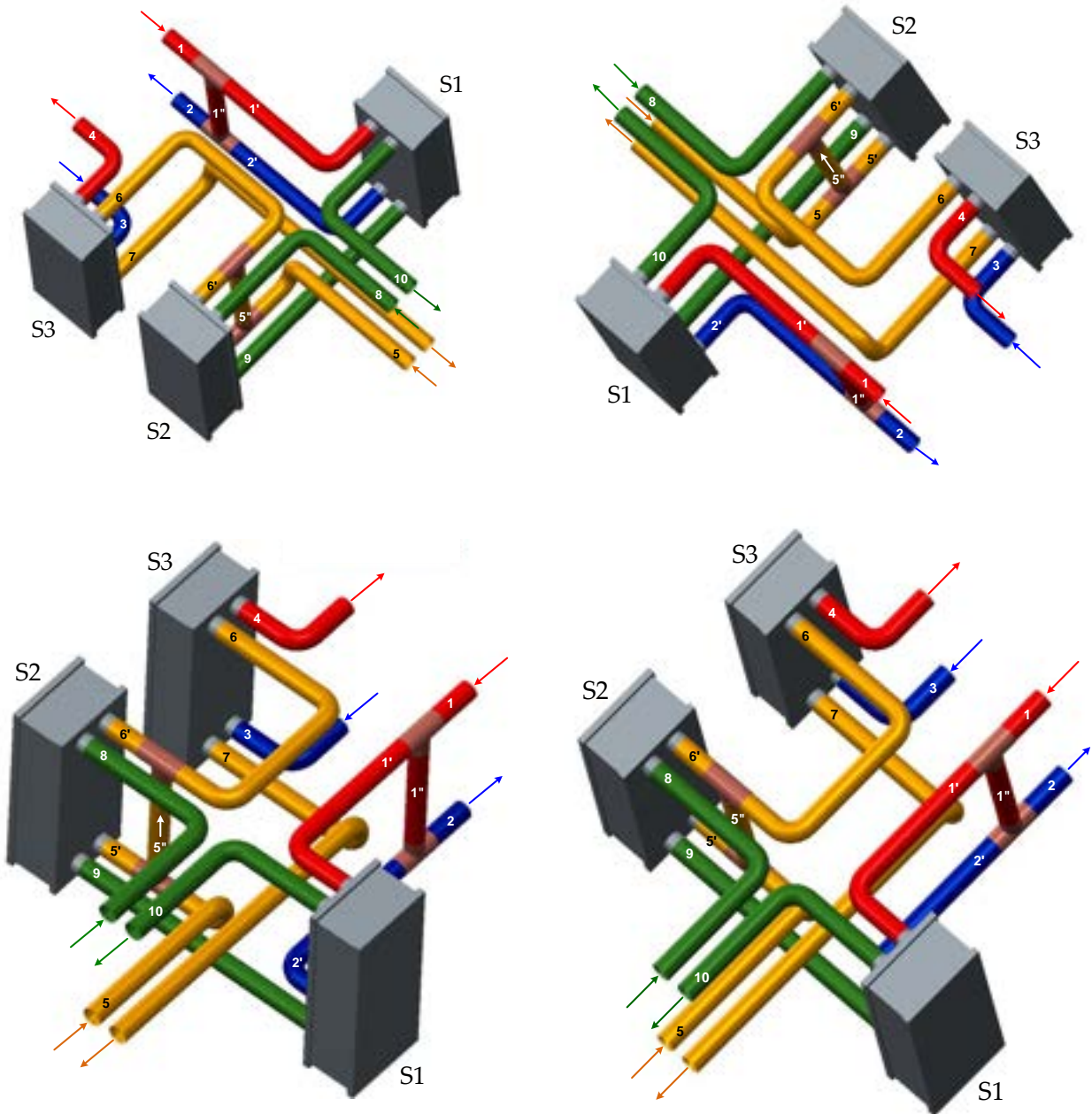


Figura 52 – Rappresentazione 3D (ipotesi I)



**Figura 53 – Rappresentazione 3D (ipotesi II).**

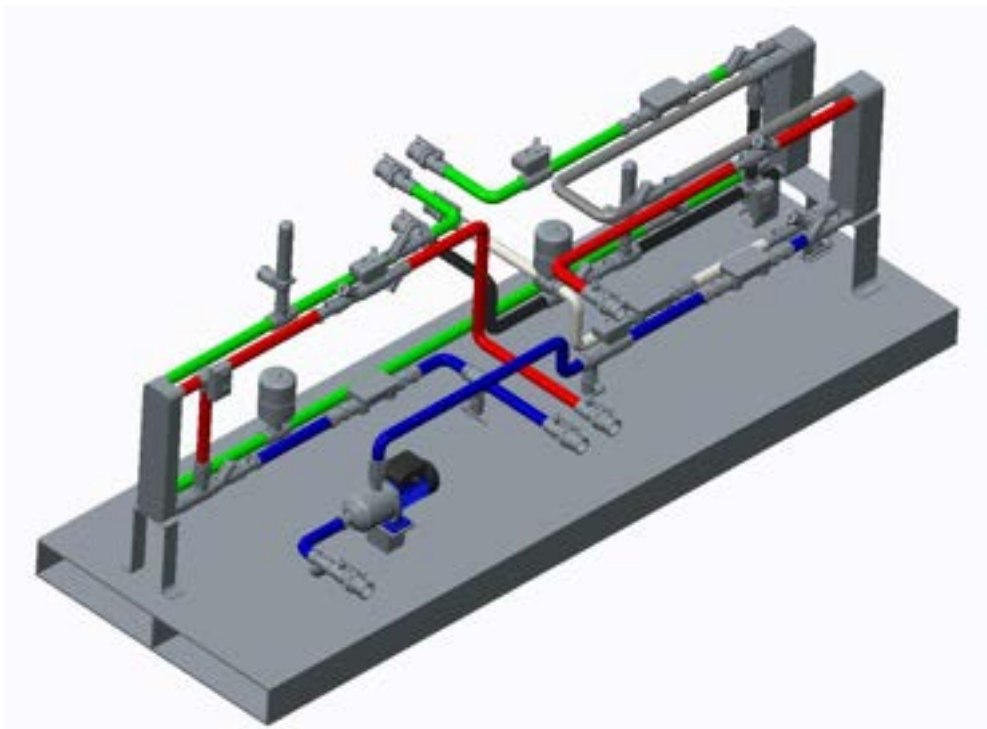
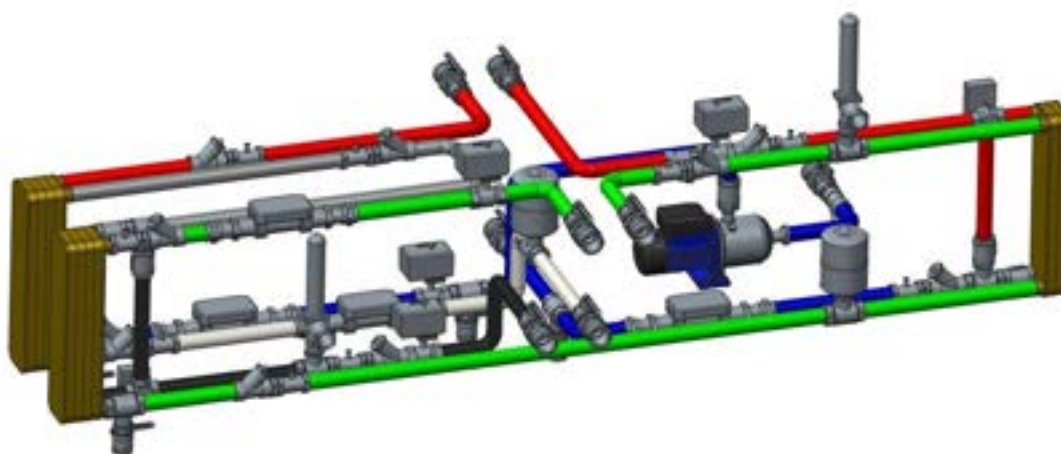
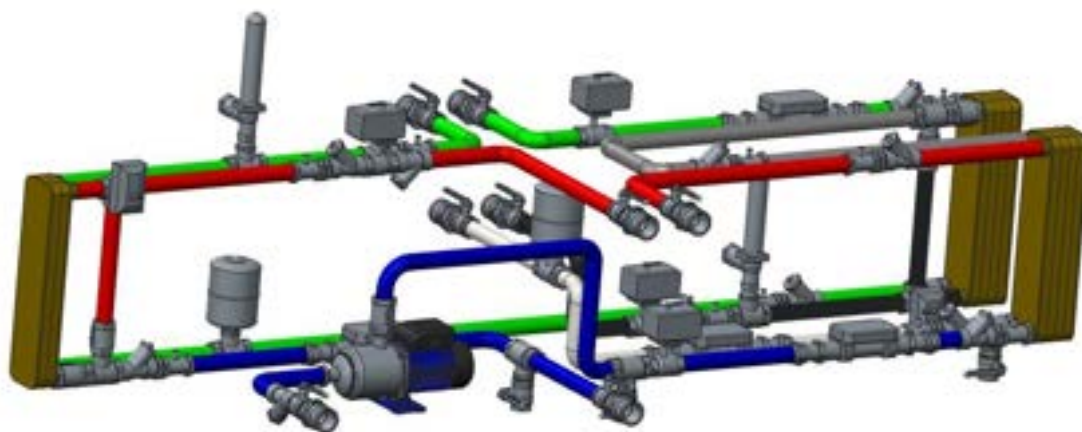
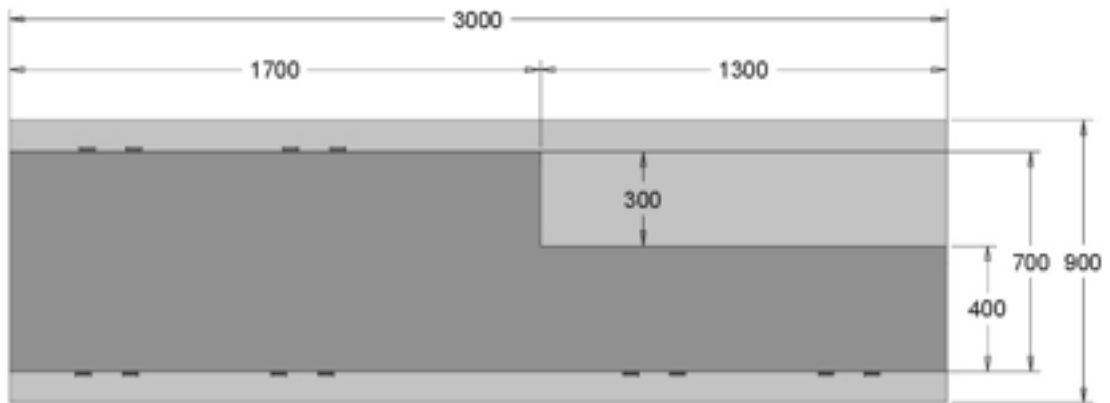


Figura 54 – Modello CAD della sottostazione attiva (senza case).



**Figura 55** – Modello CAD della sottostazione attiva (vista dall'alto).

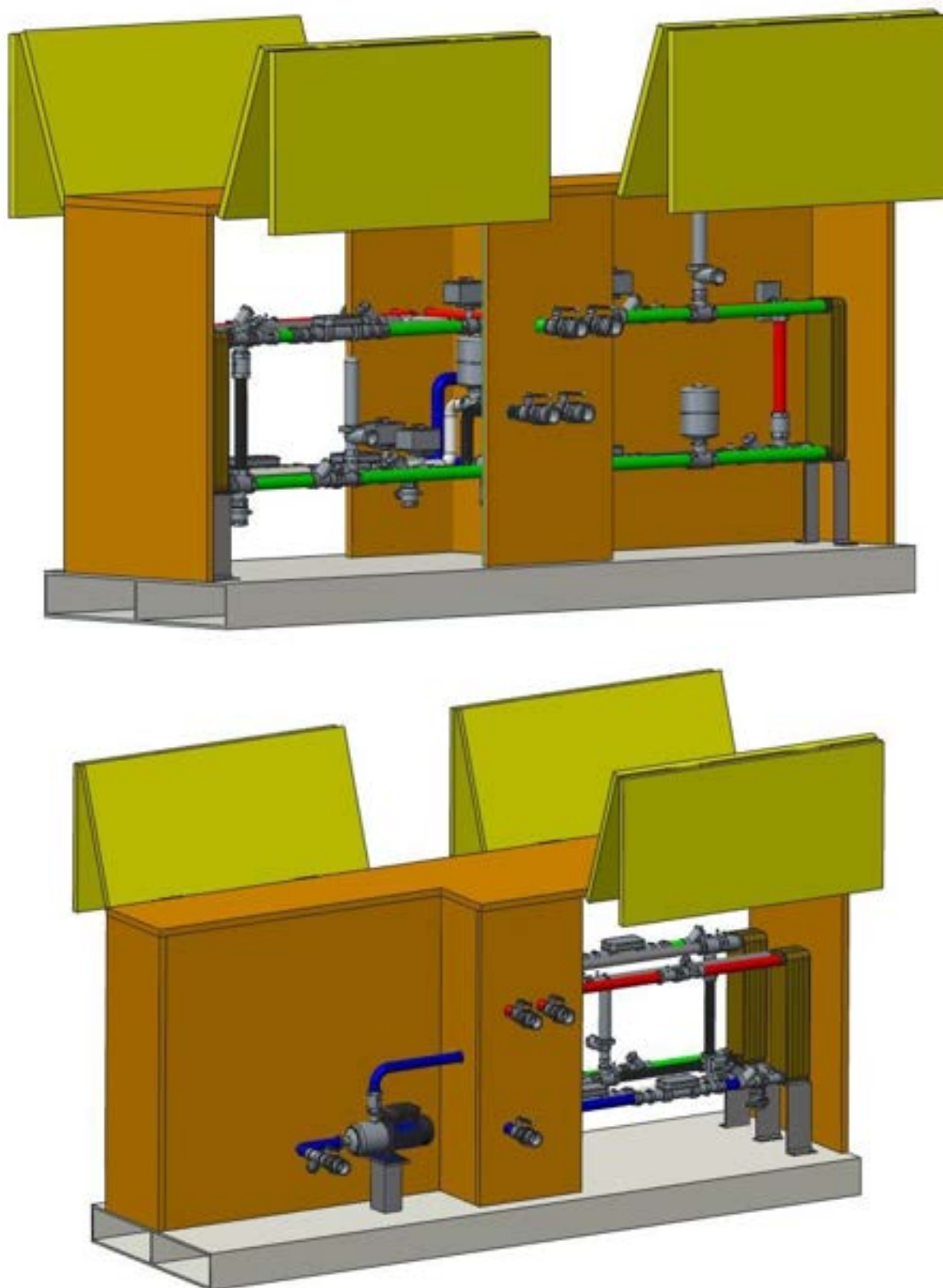


Figura 56 – Modello CAD della sottostazione attiva (vista d'insieme).

## 14 Conclusioni

Il presente documento è il risultato della collaborazione tra l'ENEA e il Dipartimento di Ingegneria Industriale (DIN) dell'Università di Bologna, finalizzata all'Analisi di una rete di teleriscaldamento reale ed alla progettazione di una sottostazione di scambio termico bidirezionale per reti di teleriscaldamento attive. Tale collaborazione nasce all'interno dell'Accordo di Programma che il Ministero dello Sviluppo Economico ed ENEA hanno stipulato nel 2018 finalizzato all'esecuzione delle linee di attività del Piano Triennale della Ricerca e Sviluppo di Interesse Generale per il Sistema Elettrico Nazionale.

L'accordo di collaborazione tra l'ENEA e il Dipartimento di Ingegneria Industriale (DIN) dell'Università di Bologna si riferisce al Piano Annuale di Realizzazione 2017, per quanto attiene all'Area "Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici"; nello specifico, si riferisce al progetto "D1 - Tecnologie per costruire gli edifici del futuro".

Più in dettaglio, lo studio svolto è suddiviso in due parti, così come di seguito illustrato.

### PARTE A – Analisi della rete dell'aeroporto - Leonardo da Vinci di Fiumicino.

In questa fase, con l'obiettivo di analizzare ed evidenziare le eventuali criticità relative alla rete di teleriscaldamento in esame, si è proceduto con la realizzazione ed implementazione di un modello fisico-matematico della rete all'interno del software IHENA 2.0 (Intelligent Heat Energy Network Analysis), sviluppato dal Dipartimento di Ingegneria industriale (DIN) dell'Università di Bologna. La rete dell'Aeroporto di Roma-Fiumicino è stata ricostruita – in termini di tracciato (coordinate di ciascun nodo della rete, lunghezza dei rami della rete, ecc.) e dati geometrici relativi alle tubazioni – in base alle informazioni disponibili. Ai fini della realizzazione del modello, si è pertanto fatto riferimento alla configurazione di design (*rete base invernale*), che prevede una potenza termica complessivamente fornita alle utenze pari a 86 MW. La rete è composta da due anelli, (denominati rispettivamente *stagionale* ed *annuale* con diametri DN350 e DN200), dai quali partono le diverse diramazioni per l'alimentazione alle utenze. Il modello di rete realizzato è quindi composto da 222 rami e 197 nodi, comprendenti 1 sorgente (la centrale di produzione), 152 miscelatori e 44 utenze, per una lunghezza complessiva della rete (comprendente sia il percorso di mandata che quello di ritorno) pari a poco più di 30 km. Il modello di rete elaborato è stato inoltre validato tramite confronto tra i risultati forniti dal software IHENA ed i dati reali misurati, forniti da ENEA, relativamente alla configurazione base della rete in regime invernale. In particolare, sono stati presi come riferimento i carichi delle utenze e il regime di funzionamento della rete per il giorno 1 febbraio 2011 (ore 7:30). I risultati della validazione mostrano una buona corrispondenza tra i risultati della simulazione e i valori misurati con uno scarto percentuale minimo pari allo 0.00 % - in corrispondenza della temperatura di mandata della centrale e delle pressioni di mandata e di ritorno in centrale – ed uno scarto percentuale massimo pari al 7.21 % – registrato per la temperatura su uno dei rami di ritorno.

Per tener conto, inoltre, delle modifiche effettuate nel corso degli anni, è stato realizzato un nuovo modello della rete (**Figura 15**) costituito da 224 rami e 199 nodi, di cui 1 sorgente, 152 miscelatori e 46 utenze. La lunghezza complessiva della rete, comprendente sia le tubazioni di mandata che quelle di ritorno, risulta di poco superiore ai 31 km. Con l'obiettivo di analizzare le attuali modalità di funzionamento e gestione della rete di teleriscaldamento in esame, è stata in seguito presa in considerazione la situazione relativa al mese di dicembre 2017 (si veda **Figura 17**). In particolare sono stati simulati ed analizzati il giorno di massima richiesta termica (320.5 MWh/giorno, in rosso) e quello di minima richiesta termica (256.2 MWh/giorno, in verde). I risultati sono presentati da **Figura 21** a **Figura 26** e mostrano diverse criticità legate al sovradimensionamento della rete (rispetto ai circa 86 MW di design, infatti, nel mese di dicembre 2017 la richiesta di potenza termica da parte della rete si è attestata tra i 10 e i 15 MW):

- le velocità dell'acqua che percorre la rete risultano estremamente basse, anche inferiori allo 0.1 m/s;
- la pressione di mandata risulta elevata rispetto alle esigenze della rete con conseguente elevato consumo di energia elettrica per il pompaggio;
- le dissipazioni termiche si mantengono circa costanti al variare della richiesta dell'utenza, attorno al 10 % della produzione in centrale.

Conseguentemente, con l'obiettivo di ottimizzare la gestione della rete, ovvero di minimizzare le dispersioni di energia termica e/o le spese per il pompaggio, senza tuttavia modificare strutturalmente la rete o la centrale di produzione, sono stati ipotizzati ed analizzati i seguenti scenari:

- **Caso A:** tale scenario consiste nell'ottimizzazione della pressione di mandata della rete, che viene fissata in modo tale da ottenere un salto di pressione minimo tra mandata e ritorno della rete – ovvero in corrispondenza dell'utenza critica – pari a 0.5 bar.
- **Caso B1:** si ipotizza di chiudere completamente l'anello DN350, considerando quindi che tutte le utenze vengano alimentate da diramazioni provenienti dall'anello DN200 (eventualmente utilizzando gli opportuni by-pass). In questo caso non si ipotizza una modifica nel valore della pressione di mandata della rete, che pertanto rimane costante al valore di 10.75 bar.
- **Caso B2:** come per lo scenario precedente, si ipotizza di chiudere completamente l'anello DN350, considerando quindi che tutte le utenze vengano alimentate da diramazioni provenienti dall'anello DN200. Inoltre, il valore della pressione di mandata della rete è il risultato di un'ottimizzazione effettuata con l'obiettivo di ottenere un salto di pressione pari a 0.5 bar in corrispondenza dell'utenza critica.
- **Caso C1:** questo scenario prevede la completa chiusura dell'anello DN200 e, pertanto, tutte le utenze vengono alimentate da diramazioni provenienti dall'anello DN350 (eventualmente utilizzando gli opportuni by-pass). In questo caso non si ipotizza una modifica nel valore della pressione di mandata della rete, che pertanto rimane costante al valore di 10.75 bar.
- **Caso C2:** analogamente al caso precedente, si ipotizza di chiudere completamente l'anello DN200, considerando quindi che tutte le utenze vengano alimentate da diramazioni provenienti dall'anello DN350. Inoltre, il valore della pressione di mandata della rete è il risultato di un'ottimizzazione effettuata con l'obiettivo di ottenere un salto di pressione pari a 0.5 bar in corrispondenza dell'utenza critica.

Per ciascuno dei casi appena descritti, le simulazioni sono state svolte in corrispondenza del punto di massima portata complessivamente immessa in rete dalla centrale, ovvero in corrispondenza delle ore 7:00 del giorno di massima richiesta di energia termica (10 dicembre 2017). I principali risultati ottenuti sono elencati in **Tabella 8**.

In aggiunta ai casi descritti, sono stati analizzati ulteriori scenari sulla base dei dati disponibili per i giorni del 6 febbraio, del 7 marzo e del 8 aprile 2018. Tali analisi rappresentano una ulteriore conferma dei risultati ottenuti.

#### **PARTE B – Progettazione di una sottostazione di scambio termico attivo.**

In tale fase si è proceduto alla progettazione di una sottostazione di scambio termico per consentire uno scambio bidirezionale di energia termica tra l'utenza attiva (prosumer) e una rete di teleriscaldamento di tipo smart (ovvero attiva). Si ipotizza infatti la presenza di un sistema di generazione termica distribuita presso l'utenza (non oggetto della presente attività), in grado di soddisfare completamente o in parte la richiesta di quest'ultima. L'eventuale surplus di energia termica prodotto dal sistema di generazione distribuita può essere immesso nella rete di distribuzione principale. A tal fine, lo schema scelto per lo scambio bidirezionale – in accordo con ENEA – è quello della tipologia *ritorno su mandata*. In **Figura 39** è dunque presentato lo schema della sottostazione che include la componentistica necessaria per il controllo e per la sicurezza. Si osserva la presenza di tre circuiti principali: il circuito primario è collegato al ramo di mandata (in rosso) e a quello di ritorno (in blu) della rete di teleriscaldamento principale; il circuito secondario, rappresentato in verde, è quello relativo all'utenza; infine il circuito terziario, raffigurato in nero e grigio, è collegato al sistema di generazione distribuita permettendo lo scambio bidirezionale tra rete principale e utenza. Lo scambio termico tra i vari circuiti avviene mediante tre scambiatori di calore (S1, S2, S3).

Si sottolinea che la sottostazione in oggetto è progettata con l'obiettivo di essere installata presso un laboratorio che dovrebbe occuparsi della fase di sperimentazione. Conseguentemente, ai fini della progettazione è stato necessario considerare i seguenti vincoli:

- la rete di distribuzione considerata (TLR in **Figura 39**) prevede temperature del ramo di mandata e di ritorno rispettivamente pari a 80 e 50 °C;
- il sistema di generazione distribuita può fornire potenza termica fino ad un massimo di 60 kW sotto forma di acqua a 90 °C;
- per quanto riguarda il circuito dell'utenza, la temperatura in ingresso può oscillare da 30 a 50 °C;
- la portata nelle sezioni 1 e 5 deve essere compresa tra un minimo di 0.22 kg/s fino ad un massimo pari a circa 2.22 kg/s;
- la portata nelle sezioni 3 e 8 deve essere compresa tra un minimo di 0.22 kg/s fino ad un massimo pari a circa 0.69 kg/s.

In aggiunta, la portata della sezione 1 deve essere mantenuta costante, la potenza termica richiesta dall'utenza in condizioni di progetto è pari a 40 kW mentre quella prodotta dal sistema di generazione distribuita è di 60 kW. Infine si segnalano valori di pressione del circuito di mandata e di ritorno della rete rispettivamente di poco superiori ai 3.0 bar e di poco inferiori ad 1.5 bar.

Sulla base dei vincoli e delle condizioni al contorno appena illustrate e considerando le specifiche impiantistiche usualmente adottate in termini di teleriscaldamento, e reperibili in letteratura, in accordo con ENEA sono state fatte ulteriori assunzioni così come dettagliato nel rapporto esteso.

Al fine di valutare le prestazioni degli scambiatori presenti nella sottostazione, è stato inoltre predisposto un modello di calcolo in grado di descrivere il loro comportamento sia in condizioni di progetto sia in off-design. L'applicazione di tale modello ha consentito la definizione delle caratteristiche ottimali degli scambiatori di calore.

Al fine di soddisfare le richieste dell'utenza, consentire uno scambio di energia termica bidirezionale e contemporaneamente rispettare i vincoli su temperature e portate imposti dalle condizioni al contorno, è stato infine sviluppato un modello per il controllo della sottostazione attiva oggetto di design. In riferimento a ciò, in **Figura 50** si mostra lo screenshot relativo all'interfaccia del modello di calcolo – scritto in ambiente VBA – creato per progettare e simulare il comportamento del software di gestione della sottostazione. Più in dettaglio, il modello di calcolo sviluppato prevede la possibilità di impostazione o modifica da parte dell'utente di alcune variabili cosiddette di set-up (si vedano le grandezze su sfondo blu in **Figura 50**), che costituiscono i vincoli esterni che è necessario rispettare. Tenendo in considerazione tali valori delle variabili di set-up e sulla base dei dati misurati, il software è in grado di calcolare alcune grandezze derivate (si vedano le grandezze su sfondo viola in **Figura 50**) e di stabilire le modalità di gestione della sottostazione (apertura/chiusura delle valvole, funzionamento della pompa, ecc.).

Di seguito vengono descritte nel dettaglio le logiche di controllo delle valvole presenti nella sottostazione:

- La valvola C1' mantiene costante e pari al valore di set-up ( $M_{TLR,set-up}$ ) la portata  $M_1$  o esclude lo scambio termico su S1 quando non necessario per il raggiungimento della temperatura obiettivo dell'utenza ( $T_{U,set-up}$ ). Più in dettaglio: se  $T_9 \geq T_{U,set-up}$ , la valvola C1' chiude completamente, se  $T_9 < T_{U,set-up}$  controlla  $M_1 = M_{TLR,set-up}$ , se  $M_8 = 0$  chiude completamente.
- La valvola C1 regola la portata proveniente dal ramo di mandata della rete di teleriscaldamento da inviare allo scambiatore di calore S1, basandosi sulla temperatura nella sezione 10. La regolazione avviene deviando una parte del flusso lungo un ramo che bypassa lo scambiatore S1. In questo modo si cerca di mantenere costante il valore della temperatura di mandata dell'utenza ( $T_{10} = T_{U,set-up}$ ). Nel dettaglio: se  $T_{10} > T_{U,set-up}$ , la valvola devia parzialmente/totalmente il fluido, riducendo la portata del fluido caldo verso S1; se  $T_{10} < T_{U,set-up}$ , la valvola C1 aumenta la portata inviata a S1; se  $T_{10} = T_{U,set-up}$ , la valvola C1 mantiene la posizione corrente di apertura; se la valvola C1' è chiusa allora C1 non lavora.
- La valvola C4 mantiene costante e pari al valore di set-up ( $M_{U,set-up}$ ) la portata  $M_8$ .
- La valvola C2' mantiene costante e pari al valore di set-up ( $M_{SP,set-up}$ ) la portata  $M_5$  o esclude lo scambio termico su S2 ed S3 quando la temperatura  $T_5$  è inferiore al valore di set-up definito ( $T_{SPmin,set-up}$ ). Ne segue: se  $T_5 \leq T_{SPmin,set-up}$ , la valvola C2' chiude completamente; se  $T_5 > T_{SPmin,set-up}$ , controlla  $M_5 = M_{SP,set-up}$ .
- La valvola C2 regola la portata proveniente dal sistema di generazione distribuita da inviare allo scambiatore di calore S2, basandosi sulla temperatura nella sezione 9 (al fine di ottenere  $T_9 = T_{U,set-up}$ ).

La regolazione avviene deviando una parte del flusso lungo un ramo che bypassa lo scambiatore S2. In questo modo si cerca di mantenere costante il valore della temperatura di mandata dell'utenza o comunque di sfruttare al massimo la potenza termica prodotta dal sistema di generazione. Nel dettaglio: se  $T_9 > T_{U,set-up}$ , devia parzialmente/totalmente il fluido, riducendo la portata del fluido caldo verso S2; se  $T_9 < T_{U,set-up}$ , la valvola C2 aumenta la portata inviata a S2; se  $T_9 = T_{U,set-up}$ , la valvola C2 mantiene la posizione corrente di apertura; se la valvola C2' è chiusa allora C2 non lavora.

- La valvola C3 regola la portata ( $M_3$ ) prelevata dal ramo di ritorno della rete di teleriscaldamento da inviare allo scambiatore di calore S3. Inoltre, esclude lo scambio termico su S3 nel caso in cui la temperatura  $T_6$  risulti inferiore ad un valore minimo calcolato dal software come segue:  

$$T_{6,min} = T_{SPmin,set-up} + (M_{IM-MIN,set-up}/M_{SP,set-up}) \times (T_{IM,set-up} - T_{R,set-up})$$

Più in dettaglio, solo nel caso in cui  $T_6 > T_{6,min}$ : se  $T_4 < T_{IM,set-up}$ , la valvola C3 riduce la portata inviata a S3; se  $T_4 > T_{IM,set-up}$ , la valvola C3 aumenta la portata inviata a S3; se  $T_4 = T_{IM,set-up}$ , la valvola C3 mantiene la posizione corrente di apertura; se  $M_5 = 0$ , la valvola C3 chiude completamente.

- Il funzionamento della pompa, previsto a giri costanti, è attivato dal sistema di controllo quando sono verificate tutte le seguenti condizioni: se la valvola C3 è aperta; se  $T_6 \geq T_{6,min}$ .

La determinazione del layout finale della sottostazione ha richiesto di tener conto di alcuni vincoli imposti dal soggetto che realizzerà la fase di test, a proposito della posizione degli attacchi tra sottostazione e rete e degli ingombri del case (Figura 51). In dettaglio, le dimensioni in pianta della sottostazione non possono superare gli 0.90 metri in larghezza e i 3.00 metri in lunghezza. In altezza è richiesta invece una dimensione massima pari a 2.00 metri.

Sulla base di tali vincoli, sono state elaborate due ipotesi relative all'assetto della sottostazione (Figura 52 e Figura 53) ed è stato realizzato un modello CAD – comprensivo di case di protezione e coibentazione – presentato da Figura 54 a Figura 56.

## 15 Riferimenti Bibliografici

- [1] Anali Fluidodinamica della rete acqua surriscaldata – Relazione Tecnica – service srl – marzo 2011
- [2] Planimetrie 01 e 02 – rete tubazione acqua surriscaldata con e senza camere (file dwg) – service srl – marzo 2011
- [3] Ancona M. A., Melino F., *“Analisi di soluzioni tecniche e gestionali che favoriscano l’implementazione di nuovi servizi energetici nelle reti termiche in presenza di sistemi di generazione distribuita”*, Report Ricerca di Sistema Elettrico, Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA, Piano Annuale di Realizzazione 2013, Area: Razionalizzazione e risparmio nell’uso dell’energia, Progetto: C.1. Risparmio di energia elettrica nei settori: civile, industria e servizi, Report RdS/PAR2013/053
- [4] Planimetria 03 – rete base invernale – regime delle portate – service srl – marzo 2011
- [5] Planimetria 04 – rete base invernale – regime delle temperature – service srl – marzo 2011
- [6] Planimetria 05 – rete base invernale – regime delle pressioni – service srl – marzo 2011
- [7] Ancona M. A., Melino F., *“Analisi di soluzioni progettuali per la trasformazione di reti di teleriscaldamento esistenti in reti poligenerative con presenza di scambio attivo”*, Report Ricerca di Sistema Elettrico, Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA, Piano Annuale di Realizzazione 2014, Area: Razionalizzazione e risparmio nell’uso dell’energia, Progetto: C.1. Risparmio di energia elettrica nei settori: civile, industria e servizi, Report RdS/PAR2014/019
- [8] Ancona M. A., Branchini L., Melino F., *“Analisi di strategie per la gestione ottimizzata di reti complesse di distribuzione dell’energia termica”*, Report Ricerca di Sistema Elettrico, Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – CNR, Piano Annuale di Realizzazione 2015, Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici, Progetto: Tecnologie per costruire gli edifici del futuro, Report RdS/PAR2015/151, [http://www.enea.it/it/Ricerca\\_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/adp-mise-enea-2015-2017/edifici-intelligenti/rds\\_par2015-151.pdf/view](http://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/adp-mise-enea-2015-2017/edifici-intelligenti/rds_par2015-151.pdf/view)
- [9] Ancona M. A., Branchini L., Melino F., *“Analisi di strategie per la gestione ottimizzata di reti complesse di distribuzione dell’energia elettrica e termica”*, Report Ricerca di Sistema Elettrico, Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – CNR, Piano Annuale di Realizzazione 2016, Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici, Progetto: Tecnologie per costruire gli edifici del futuro, Report RdS/PAR2016/XXX *in press*
- [10] Ancona M. A., Bianchi M., Branchini L., Melino F., *“District Heating Network Design and Analysis”*, 68th Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association - ATI 2013, September 11-13, 2014 – Energy Procedia, Volume 45, pp. 1225-1234
- [11] Ancona M. A., Melino F., Peretto A., *“An Optimization Procedure for District Heating Networks”*, 6th International Conference on Applied Energy – ICAE 2014, May 30-June 2, 2014, Taipei, Taiwan – Energy Procedia, Volume 61, pp. 278-281
- [12] Ancona M. A., Branchini L., Di Pietra B., Melino F., Puglisi G., Zanghirella F., *“Utilities Substations in Smart District Heating Networks”*, 69th Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association – ATI2014, September 10 – 12, 2014, Milan, Italy, – Energy Procedia, Volume 81, pp. 597-605
- [13] Ancona M. A., Branchini L., De Pascale A., Melino F., *“Smart District Heating: Distributed Generation Systems’ Effects on the Network”*, 7th International Conference on Applied Energy – ICAE 2015, March 28-31, 2015, Abu Dhabi, United Arab Emirates – Energy Procedia, Volume 75, pp. 1208-1213
- [14] Ancona M. A., Melino F., *“Techno-Economic Analysis on Smart District Heating Networks”*, Conference on Thermal Energy Systems: Production, Storage, Utilization and the Environment – ASME-ATI-UIT 2015, May 17–20, 2015, Napoli, Italy, Proceedings of ASME-ATI-UIT, ISBN 978-88-98273-17-1

## 16 Abbreviazioni ed acronimi

|                 |  |
|-----------------|--|
| $A$             | superficie di scambio termico [m <sup>2</sup> ]                  |
| $\dot{C}$       | capacità termica oraria [kW/K]                                   |
| $c_L$           | calore specifico dell'acqua [kJ/kgK]                             |
| $c_{pc}$        | calore specifico a pressione costante del fluido caldo [kJ/kgK]  |
| $c_{pf}$        | calore specifico a pressione costante del fluido freddo [kJ/kgK] |
| $f_c$           | fattore di resistenza termica per conduzione [-]                 |
| $f_{fc}$        | fattore di resistenza termica per convezione lato caldo [-]      |
| $f_{ff}$        | fattore di resistenza termica per convezione lato freddo [-]     |
| $\Delta h_c$    | variazione di entalpia del fluido caldo [kJ/kg]                  |
| $\Delta h_f$    | variazione di entalpia del fluido freddo [kJ/kg]                 |
| $\Delta T_c$    | salto di temperatura subito dal fluido caldo [K]                 |
| $\Delta T_f$    | salto di temperatura subito dal fluido freddo [K]                |
| $\Delta T_{ml}$ | differenza media logaritmica [K]                                 |
| $\dot{m}_c$     | portata in massa del fluido caldo [kg/s]                         |
| $\dot{m}_f$     | portata in massa del fluido freddo [kg/s]                        |
| $Q$             | potenza termica [kW]   |
| $R$             | resistenza termica [K/kW]  |
| $s$             | spessore [m]   |
| $T$             | temperatura [K]  |
| $U$             | coefficiente globale di scambio termico [kW/m <sup>2</sup> K]    |

### **Simboli greci**

|               |  |
|---------------|--|
| $\alpha_c$    | coefficiente di scambio termico convettivo del fluido caldo [W/m <sup>2</sup> K]       |
| $\alpha_f$    | coefficiente di scambio termico convettivo del fluido freddo [W/m <sup>2</sup> K]      |
| $\varepsilon$ | efficienza di scambio termico [-]  |
| $\lambda$     | conduttività termica del materiale che costituisce i condotti dello scambiatore [W/mK] |

### **Acronimi**

|       |  |
|-------|--|
| D     | design                                   |
| IHENA | Intelligent Heat Energy Network Analysis |
| NTU   | Number of Transfer Unit                  |
| SP    | Sistema di Produzione                    |
| TLR   | Teleriscaldamento                        |
| U     | utenza                                   |
| UTA   | Unità Trattamento Aria                   |

## 17 Indice delle figure

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Planimetria della rete di teleriscaldamento dell’aeroporto Leonardo da Vinci di Roma Fiumicino [1].....   | 10 |
| Figura 2 – Planimetria della rete con focus sulle camere di ispezione [2]. .....   | 11 |
| Figura 3 – Planimetria della rete con focus sulle sottostazioni d’utenza [2].....  | 12 |
| Figura 4 – Modello rete di teleriscaldamento Aeroporto di Roma Fiumicino (86MW). .....   | 14 |
| Figura 5 – Andamento del diametro interno delle tubazioni e dello spessore di isolante in funzione del diametro nominale.....  | 17 |
| Figura 6 – Distribuzione delle velocità [m/s] lungo la rete.....   | 19 |
| Figura 7 – Distribuzione delle portate [kg/s] lungo la rete.....   | 20 |
| Figura 8 – Distribuzione delle perdite di carico [bar] lungo la rete.....  | 21 |
| Figura 9 – Distribuzione dei diametri [m] lungo la rete. ....  | 22 |
| Figura 10 – Percorso critico (dalla centrale di produzione all’utenza #162). .....   | 23 |
| Figura 11 – Andamento della pressione lungo il percorso critico (mandata della rete in blu e ritorno della rete in rosso) in funzione della distanza dalla centrale.....   | 24 |
| Figura 12 – Configurazione della rete di teleriscaldamento dell’Aeroporto Leonardo da Vinci di Roma Fiumicino nel regime di funzionamento denominato <i>rete base invernale</i> . .....  | 26 |
| Figura 13 – Variazioni percentuali – tra caso con temperatura di mandata pari a 80 °C e caso di design – di portata totale uscente dalla centrale, dissipazioni termiche lungo la rete, potenza termica fornita dalla centrale e spese per il pompaggio.....     | 30 |
| Figura 14 – Planimetria rete a seguito delle modifiche apportate, con dettaglio delle camere.....  | 33 |
| Figura 15 – Mappa della rete modificata secondo le informazioni aggiuntive ricevute.....   | 34 |
| Figura 16 – Richiesta termica totale utenze mese di dicembre 2017. ....  | 35 |
| Figura 17 – Richiesta termica totale utenze mese di dicembre 2017, con evidenziati il giorno di massima richiesta termica (in rosso), il giorno di minima richiesta termica (in verde) ed i giorni non utili ai fini delle successive valutazioni (in nero)..... | 36 |
| Figura 18 – Rete modificata con chiusure. ....   | 38 |
| Figura 19 – Profilo giornaliero di potenza termica complessivamente richiesta dalle utenze – giorno di massima richiesta (10 dicembre 2017).....   | 39 |
| Figura 20 – Profilo giornaliero di potenza termica complessivamente richiesta dalle utenze – giorno di minima richiesta (15 dicembre 2017).....  | 39 |
| Figura 21 – Andamento della portata in massa in uscita dalla centrale nel giorno di massima richiesta di energia termica.....  | 40 |
| Figura 22 – Andamento della potenza termica fornita alle utenze e dissipata in rete nel giorno di massima richiesta di energia termica. ....   | 41 |
| Figura 23 – Andamento della potenza elettrica richiesta dalla stazione di pompaggio nel giorno di massima richiesta di energia termica. ....   | 41 |
| Figura 24 – Andamento della portata in massa in uscita dalla centrale nel giorno di minima richiesta di energia termica.....   | 42 |
| Figura 25 – Andamento della potenza termica fornita alle utenze e dissipata in rete nel giorno di minima richiesta di energia termica. ....  | 42 |
| Figura 26 – Andamento della potenza elettrica richiesta dalla stazione di pompaggio nel giorno di minima richiesta di energia termica. ....  | 43 |
| Figura 27 – Variazioni percentuali di dissipazioni termiche lungo la rete e spese per il pompaggio, ottenute per i casi ottimizzati rispetto al caso di riferimento di partenza (ore 7:00 del 10 dicembre 2017). .....   | 44 |
| Figura 28 – Profilo giornaliero di potenza termica complessivamente richiesta dalle utenze – giorni 6 febbraio 2018, 7 marzo 2018 e 8 aprile 2018. ....  | 46 |
| Figura 29 – Configurazione rappresentativa del funzionamento della rete di teleriscaldamento in esame durante la giornata del 6 febbraio 2018.....   | 48 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 30 – Configurazione rappresentativa del funzionamento della rete di teleriscaldamento in esame durante la giornata del 7 marzo 2018. ....  | 49 |
| Figura 31 – Configurazione rappresentativa del funzionamento della rete di teleriscaldamento in esame durante la giornata dell’8 aprile 2018. ....  | 50 |
| Figura 32 – Andamento della portata in massa in uscita dalla centrale – giorni 6 febbraio 2018, 7 marzo 2018 e 8 aprile 2018. ....  | 51 |
| Figura 33 – Andamento della potenza elettrica richiesta dalla stazione di pompaggio – giorni 6 febbraio 2018, 7 marzo 2018 e 8 aprile 2018. ....  | 51 |
| Figura 34 – Andamento della potenza termica fornita alle utenze e dissipata in rete nel giorno 6 febbraio 2018. ....  | 52 |
| Figura 35 – Andamento della potenza termica fornita alle utenze e dissipata in rete nel giorno 7 marzo 2018. ....   | 52 |
| Figura 36 – Andamento della potenza termica fornita alle utenze e dissipata in rete nel giorno 8 aprile 2018. ....  | 53 |
| Figura 37 – Variazioni percentuali – tra caso ottimizzato e caso di riferimento – di dissipazioni termiche lungo la rete e spese per il pompaggio, ottenute per ciascuna giornata analizzata (6 febbraio, 7 marzo ed 8 aprile) nelle rispettive ore di picco di richiesta termica. .... | 54 |
| Figura 38 – Layout semplificato sottostazione. ....   | 57 |
| Figura 39 – Layout sottostazione completo. ....   | 58 |
| Figura 40 – Diagramma di scambio termico di uno scambiatore in controcorrente. ....   | 60 |
| Figura 41 – Schema relativo allo scambiatore S1. ....   | 63 |
| Figura 42 – Andamenti della portata ( $\dot{m}_1$ ) e della temperatura in uscita lato caldo ( $T_2$ ) in funzione della temperatura in ingresso lato freddo ( $T_9$ ). ....  | 64 |
| Figura 43 – Diagrammi di scambio termico dello scambiatore S1: a) temperatura di ingresso utenza a 30 °C; b) temperatura di ingresso utenza a 50 °C. ....   | 65 |
| Figura 44 – Schema relativo allo scambiatore S2. ....   | 66 |
| Figura 45 – Andamenti della portata ( $\dot{m}_5$ ) e della temperatura in uscita lato caldo ( $T_6$ ) in funzione della temperatura in ingresso lato freddo ( $T_8$ ). ....  | 67 |
| Figura 46 – Diagrammi di scambio termico dello scambiatore S2: a) temperatura di ingresso utenza a 30 °C; b) temperatura di ingresso utenza a 50 °C. ....   | 68 |
| Figura 47 – Schema relativo allo scambiatore S3. ....   | 69 |
| Figura 48 – Andamenti della portata ( $\dot{m}_3$ ) e della temperatura in uscita lato caldo ( $T_4$ ) in funzione della temperatura in ingresso lato freddo ( $T_6$ ). ....  | 70 |
| Figura 49 – Diagrammi di scambio termico dello scambiatore S3. ....   | 71 |
| Figura 50 – Screenshot dell’interfaccia Excel relativa al codice di calcolo sviluppato per il controllo della sottostazione. ....   | 73 |
| Figura 51 – Vincoli al layout della sottostazione. ....   | 77 |
| Figura 52 – Rappresentazione 3D (ipotesi I). ....   | 78 |
| Figura 53 – Rappresentazione 3D (ipotesi II). ....  | 79 |
| Figura 54 – Modello CAD della sottostazione attiva (senza case). ....   | 80 |
| Figura 55 – Modello CAD della sottostazione attiva (vista dall’alto). ....  | 81 |
| Figura 56 – Modello CAD della sottostazione attiva (vista d’insieme). ....  | 82 |

## 18 Indice delle tabelle

|  |    |
|--|----|
| Tabella 1 – Corrispondenza tra ID camere [1] e ID delle utenze nel modello implementato all’interno del software IHENA (86MW). .....   | 15 |
| Tabella 2 – Parametri relativi ai diametri impiegati per le tubazioni all’interno della rete in esame. ....  | 17 |
| Tabella 3 – Principali dati caratteristici delle utenze (potenza termica richiesta, salti di temperatura, ecc.) nel regime di funzionamento denominato <i>rete base invernale</i> . .... | 27 |
| Tabella 4 – Risultati della validazione della rete in esame nel regime di funzionamento denominato <i>rete base invernale</i> . ....   | 29 |
| Tabella 5 – Risultati ottenuti per la rete in esame gestita con bassa temperatura di mandata (80 °C). ....   | 30 |
| Tabella 6 – Energia termica totale richiesta giornalmente dalle utenze nel mese di dicembre 2017 (primi 20 giorni). ....   | 36 |
| Tabella 7 – Ripartizione della richiesta termica di ciascuna camera tra le utenze. ....  | 37 |
| Tabella 8 – Principali risultati delle simulazioni relative agli scenari ottimizzati. ....   | 44 |
| Tabella 9 – Risultati ottimizzazione pressione di mandata pompaggio – giorni 6 febbraio 2018, 7 marzo 2018 e 8 aprile 2018 – nelle rispettive ore di picco di richiesta termica. ....    | 53 |
| Tabella 10 – Scambiatore S1 in condizioni di design. ....  | 63 |
| Tabella 11 – Risultati analisi parametrica al variare della $T_9$ . ....   | 63 |
| Tabella 12 – Scambiatore S2 in condizioni design. ....   | 66 |
| Tabella 13 – Risultati analisi parametrica al variare della $T_8$ . ....   | 66 |
| Tabella 14 – Scambiatore S3 in condizioni di design. ....  | 69 |
| Tabella 15 – Risultati analisi parametrica al variare della $T_6$ . ....   | 69 |
| Tabella 16 – Elenco dettagliato delle caratteristiche relative ai rami che compongono la rete in esame nella configurazione di design (86 MW – rete base invernale). ....                | 92 |
| Tabella 17 – Elenco dettagliato delle caratteristiche relative ai rami che compongono la rete in esame nell’assetto modificato. ....   | 98 |

## 19 Appendice A

**Tabella 16** – Elenco dettagliato delle caratteristiche relative ai rami che compongono la rete in esame nella configurazione di design (86 MW – rete base invernale).

| ID ramo | nodo a monte | nodo a valle | Diametro interno condotta [mm] | Spessore condotta M [mm] | Spessore isolante M [mm] | Coeff. conduzione condotta M [W/m °C] | Coeff. conduzione isolante M [W/m °C] | Scabrezza M [mm] |
|---------|--------------|--------------|--------------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------|
| 1       | 83           | 2            | 77.92                          | 5.49                     | 34.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 2       | 2            | 3            | 77.92                          | 5.49                     | 34.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 3       | 1            | 4            | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 4       | 4            | 5            | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 5       | 5            | 6            | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 6       | 6            | 7            | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 7       | 195          | 8            | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 8       | 7            | 9            | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 9       | 9            | 10           | 62.68                          | 5.16                     | 32.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 10      | 10           | 11           | 62.68                          | 5.16                     | 32.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 11      | 11           | 12           | 62.68                          | 5.16                     | 32.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 12      | 150          | 13           | 62.68                          | 5.16                     | 32.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 13      | 151          | 14           | 62.68                          | 5.16                     | 32.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 14      | 9            | 15           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 15      | 15           | 16           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 16      | 155          | 17           | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 17      | 16           | 18           | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 18      | 18           | 19           | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 19      | 19           | 20           | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 20      | 20           | 21           | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 21      | 18           | 22           | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 22      | 22           | 23           | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 23      | 16           | 24           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 24      | 24           | 25           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 25      | 25           | 26           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 26      | 26           | 27           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 27      | 27           | 28           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 28      | 157          | 80           | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 29      | 28           | 29           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 30      | 29           | 30           | 254.46                         | 9.27                     | 70.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 31      | 30           | 32           | 254.46                         | 9.27                     | 70.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 32      | 32           | 33           | 254.46                         | 9.27                     | 70.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 33      | 33           | 34           | 254.46                         | 9.27                     | 70.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 34      | 34           | 35           | 128.20                         | 6.55                     | 38.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 35      | 35           | 36           | 128.20                         | 6.55                     | 38.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 36      | 29           | 37           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 37      | 37           | 38           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |

| ID ramo | nodo a monte | nodo a valle | Diametro interno condotta [mm] | Spessore condotta M [mm] | Spessore isolante M [mm] | Coeff. conduzione condotta M [W/m °C] | Coeff. conduzione isolante M [W/m °C] | Scabrezza M [mm] |
|---------|--------------|--------------|--------------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------|
| 38      | 38           | 39           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 39      | 39           | 40           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 40      | 40           | 41           | 154.08                         | 7.11                     | 40.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 41      | 41           | 42           | 154.08                         | 7.11                     | 40.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 42      | 43           | 40           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 43      | 43           | 44           | 254.46                         | 9.27                     | 70.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 44      | 44           | 45           | 254.46                         | 9.27                     | 70.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 45      | 45           | 46           | 254.46                         | 9.27                     | 70.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 46      | 165          | 47           | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 47      | 46           | 48           | 128.20                         | 6.55                     | 38.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 48      | 48           | 49           | 128.20                         | 6.55                     | 38.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 49      | 49           | 50           | 128.20                         | 6.55                     | 38.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 50      | 50           | 51           | 128.20                         | 6.55                     | 38.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 51      | 52           | 43           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 52      | 53           | 52           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 53      | 54           | 53           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 54      | 55           | 54           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 55      | 56           | 55           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 56      | 173          | 57           | 62.68                          | 5.16                     | 32.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 57      | 58           | 56           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 58      | 59           | 58           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 59      | 59           | 60           | 304.86                         | 9.52                     | 95.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 60      | 60           | 61           | 304.86                         | 9.52                     | 95.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 61      | 62           | 59           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 62      | 63           | 62           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 63      | 64           | 63           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 64      | 65           | 64           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 65      | 65           | 66           | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 66      | 66           | 67           | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 67      | 67           | 68           | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 68      | 68           | 69           | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 69      | 69           | 70           | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 70      | 185          | 71           | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 71      | 74           | 196          | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 72      | 92           | 74           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 73      | 89           | 72           | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 74      | 72           | 73           | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 75      | 61           | 75           | 304.86                         | 9.52                     | 95.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 76      | 75           | 76           | 304.86                         | 9.52                     | 95.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 77      | 180          | 77           | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 78      | 182          | 78           | 128.20                         | 6.55                     | 38.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 79      | 170          | 79           | 254.46                         | 9.27                     | 70.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |

| ID ramo | nodo a monte | nodo a valle | Diametro interno condotta [mm] | Spessore condotta M [mm] | Spessore isolante M [mm] | Coeff. conduzione condotta M [W/m °C] | Coeff. conduzione isolante M [W/m °C] | Scabrezza M [mm] |
|---------|--------------|--------------|--------------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------|
| 80      | 37           | 109          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 81      | 160          | 81           | 254.46                         | 9.27                     | 70.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 82      | 175          | 141          | 154.08                         | 7.11                     | 40.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 83      | 1            | 84           | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 84      | 1            | 144          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 85      | 1            | 83           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 86      | 83           | 86           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 87      | 84           | 87           | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 88      | 85           | 88           | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 89      | 86           | 89           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 90      | 87           | 90           | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 91      | 88           | 91           | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 92      | 89           | 92           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 93      | 90           | 93           | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 94      | 93           | 94           | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 95      | 94           | 95           | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 96      | 95           | 96           | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 97      | 96           | 97           | 77.92                          | 5.49                     | 34.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 98      | 97           | 98           | 77.92                          | 5.49                     | 34.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 99      | 98           | 99           | 77.92                          | 5.49                     | 34.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 100     | 99           | 143          | 77.92                          | 5.49                     | 34.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 101     | 97           | 100          | 77.92                          | 5.49                     | 34.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 102     | 100          | 142          | 77.92                          | 5.49                     | 34.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 103     | 96           | 101          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 104     | 101          | 102          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 105     | 102          | 103          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 106     | 103          | 104          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 107     | 104          | 105          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 108     | 105          | 106          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 109     | 106          | 107          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 110     | 107          | 108          | 154.08                         | 7.11                     | 40.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 111     | 108          | 140          | 154.08                         | 7.11                     | 40.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 112     | 109          | 31           | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 113     | 30           | 110          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 114     | 110          | 111          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 115     | 111          | 112          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 116     | 112          | 113          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 117     | 161          | 139          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 118     | 113          | 114          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 119     | 114          | 162          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 120     | 107          | 115          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 121     | 115          | 116          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |

| ID ramo | nodo a monte | nodo a valle | Diametro interno condotta [mm] | Spessore condotta M [mm] | Spessore isolante M [mm] | Coeff. conduzione condotta M [W/m °C] | Coeff. conduzione isolante M [W/m °C] | Scabrezza M [mm] |
|---------|--------------|--------------|--------------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------|
| 122     | 116          | 117          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 123     | 117          | 118          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 124     | 118          | 119          | 154.08                         | 7.11                     | 40.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 125     | 119          | 120          | 154.08                         | 7.11                     | 40.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 126     | 120          | 121          | 154.08                         | 7.11                     | 40.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 127     | 91           | 197          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 128     | 121          | 122          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 129     | 122          | 123          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 130     | 123          | 124          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 131     | 124          | 138          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 132     | 125          | 118          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 133     | 126          | 125          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 134     | 127          | 126          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 135     | 128          | 127          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 136     | 129          | 128          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 137     | 130          | 129          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 138     | 131          | 130          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 139     | 131          | 132          | 154.08                         | 7.11                     | 40.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 140     | 132          | 133          | 154.08                         | 7.11                     | 40.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 141     | 174          | 82           | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 142     | 134          | 131          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 143     | 135          | 134          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 144     | 136          | 135          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 145     | 137          | 136          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 146     | 144          | 145          | 77.92                          | 5.49                     | 34.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 147     | 145          | 2            | 77.92                          | 5.49                     | 34.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 148     | 88           | 147          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 149     | 147          | 148          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 150     | 147          | 72           | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 151     | 194          | 149          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 152     | 194          | 195          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 153     | 94           | 152          | 62.68                          | 5.16                     | 32.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 154     | 152          | 191          | 62.68                          | 5.16                     | 32.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 155     | 193          | 151          | 62.68                          | 5.16                     | 32.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 156     | 193          | 153          | 62.68                          | 5.16                     | 32.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 157     | 12           | 150          | 62.68                          | 5.16                     | 32.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 158     | 12           | 151          | 62.68                          | 5.16                     | 32.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 159     | 100          | 22           | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 160     | 99           | 20           | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 161     | 16           | 155          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 162     | 96           | 156          | 77.92                          | 5.49                     | 34.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 163     | 156          | 155          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |

| ID ramo | nodo a monte | nodo a valle | Diametro interno condotta [mm] | Spessore condotta M [mm] | Spessore isolante M [mm] | Coeff. conduzione condotta M [W/m °C] | Coeff. conduzione isolante M [W/m °C] | Scabrezza M [mm] |
|---------|--------------|--------------|--------------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------|
| 164     | 156          | 154          | 77.92                          | 5.49                     | 34.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 165     | 28           | 157          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 166     | 105          | 158          | 154.08                         | 7.11                     | 40.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 167     | 158          | 159          | 154.08                         | 7.11                     | 40.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 168     | 158          | 157          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 169     | 108          | 109          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 170     | 106          | 110          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 171     | 34           | 160          | 254.46                         | 9.27                     | 70.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 172     | 113          | 161          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 173     | 161          | 160          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 174     | 114          | 35           | 154.08                         | 7.11                     | 40.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 175     | 117          | 163          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 176     | 163          | 164          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 177     | 163          | 41           | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 178     | 124          | 50           | 128.20                         | 6.55                     | 38.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 179     | 121          | 165          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 180     | 165          | 166          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 181     | 46           | 166          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 182     | 166          | 167          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 183     | 43           | 170          | 254.46                         | 9.27                     | 70.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 184     | 118          | 169          | 154.08                         | 7.11                     | 40.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 185     | 169          | 168          | 154.08                         | 7.11                     | 40.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 186     | 169          | 170          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 187     | 56           | 173          | 62.68                          | 5.16                     | 32.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 188     | 129          | 171          | 62.68                          | 5.16                     | 32.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 189     | 171          | 172          | 62.68                          | 5.16                     | 32.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 190     | 171          | 173          | 62.68                          | 5.16                     | 32.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 191     | 61           | 175          | 154.08                         | 7.11                     | 40.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 192     | 133          | 174          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 193     | 174          | 175          | 154.08                         | 7.11                     | 40.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 194     | 133          | 176          | 154.08                         | 7.11                     | 40.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 195     | 176          | 177          | 154.08                         | 7.11                     | 40.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 196     | 177          | 178          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 197     | 178          | 179          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 198     | 178          | 180          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 199     | 76           | 180          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 200     | 177          | 183          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 201     | 76           | 182          | 128.20                         | 6.55                     | 38.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 202     | 183          | 182          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 203     | 183          | 181          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 204     | 137          | 185          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 205     | 65           | 184          | 154.08                         | 7.11                     | 40.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |

| ID ramo | nodo a monte | nodo a valle | Diametro interno condotta [mm] | Spessore condotta M [mm] | Spessore isolante M [mm] | Coeff. conduzione condotta M [W/m °C] | Coeff. conduzione isolante M [W/m °C] | Scabrezza M [mm] |
|---------|--------------|--------------|--------------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------|
| 206     | 185          | 184          | 154.08                         | 7.11                     | 40.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 207     | 184          | 186          | 154.08                         | 7.11                     | 40.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 208     | 137          | 187          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 209     | 187          | 188          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 210     | 188          | 189          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 211     | 189          | 190          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 212     | 189          | 69           | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 213     | 191          | 192          | 62.68                          | 5.16                     | 32.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 214     | 191          | 150          | 62.68                          | 5.16                     | 32.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 215     | 152          | 193          | 62.68                          | 5.16                     | 32.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 216     | 7            | 195          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 217     | 93           | 194          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 218     | 145          | 146          | 77.92                          | 5.49                     | 34.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 219     | 144          | 85           | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 220     | 196          | 197          | 62.68                          | 5.16                     | 32.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 221     | 196          | 65           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 222     | 197          | 137          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |

## 20 Appendice B

**Tabella 17** – Elenco dettagliato delle caratteristiche relative ai rami che compongono la rete in esame nell’assetto modificato.

| ID ramo | nodo a monte | nodo a valle | Diametro interno condotta [mm] | Spessore condotta M [mm] | Spessore isolante M [mm] | Coeff. conduzione condotta M [W/m °C] | Coeff. conduzione isolante M [W/m °C] | Scabrezza M [mm] |
|---------|--------------|--------------|--------------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------|
| 1       | 83           | 2            | 77.92                          | 5.49                     | 34.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 2       | 2            | 3            | 77.92                          | 5.49                     | 34.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 3       | 1            | 4            | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 4       | 4            | 5            | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 5       | 5            | 6            | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 6       | 6            | 7            | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 7       | 195          | 8            | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 8       | 7            | 9            | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 9       | 9            | 10           | 62.68                          | 5.16                     | 32.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 10      | 10           | 11           | 62.68                          | 5.16                     | 32.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 11      | 11           | 12           | 62.68                          | 5.16                     | 32.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 12      | 150          | 13           | 62.68                          | 5.16                     | 32.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 13      | 151          | 14           | 62.68                          | 5.16                     | 32.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 14      | 9            | 15           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 15      | 15           | 16           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 16      | 155          | 17           | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 17      | 16           | 18           | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 18      | 18           | 19           | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 19      | 19           | 20           | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 20      | 20           | 21           | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 21      | 18           | 22           | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 22      | 22           | 23           | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 23      | 16           | 24           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 24      | 24           | 25           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 25      | 25           | 26           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 26      | 26           | 27           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 27      | 27           | 28           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 28      | 157          | 80           | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 29      | 28           | 29           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 30      | 29           | 30           | 254.46                         | 9.27                     | 70.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 31      | 30           | 32           | 254.46                         | 9.27                     | 70.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 32      | 32           | 33           | 254.46                         | 9.27                     | 70.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 33      | 33           | 34           | 254.46                         | 9.27                     | 70.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 34      | 34           | 35           | 128.20                         | 6.55                     | 38.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 35      | 35           | 36           | 128.20                         | 6.55                     | 38.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 36      | 29           | 37           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 37      | 37           | 38           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 38      | 38           | 39           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |

| ID ramo | nodo a monte | nodo a valle | Diametro interno condotta [mm] | Spessore condotta M [mm] | Spessore isolante M [mm] | Coeff. conduzione condotta M [W/m °C] | Coeff. conduzione isolante M [W/m °C] | Scabrezza M [mm] |
|---------|--------------|--------------|--------------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------|
| 39      | 39           | 40           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 40      | 40           | 41           | 154.08                         | 7.11                     | 40.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 41      | 41           | 42           | 154.08                         | 7.11                     | 40.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 42      | 43           | 40           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 43      | 43           | 44           | 254.46                         | 9.27                     | 70.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 44      | 44           | 45           | 254.46                         | 9.27                     | 70.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 45      | 45           | 46           | 254.46                         | 9.27                     | 70.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 46      | 165          | 47           | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 47      | 46           | 48           | 128.20                         | 6.55                     | 38.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 48      | 48           | 49           | 128.20                         | 6.55                     | 38.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 49      | 49           | 50           | 128.20                         | 6.55                     | 38.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 50      | 50           | 51           | 128.20                         | 6.55                     | 38.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 51      | 52           | 43           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 52      | 53           | 52           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 53      | 54           | 53           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 54      | 55           | 54           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 55      | 56           | 55           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 56      | 173          | 57           | 62.68                          | 5.16                     | 32.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 57      | 58           | 56           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 58      | 59           | 58           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 59      | 59           | 60           | 304.86                         | 9.52                     | 95.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 60      | 60           | 61           | 304.86                         | 9.52                     | 95.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 61      | 62           | 59           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 62      | 63           | 62           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 63      | 64           | 63           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 64      | 65           | 64           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 65      | 65           | 66           | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 66      | 66           | 67           | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 67      | 67           | 68           | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 68      | 68           | 69           | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 69      | 69           | 70           | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 70      | 185          | 71           | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 71      | 74           | 196          | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 72      | 92           | 74           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 73      | 89           | 72           | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 74      | 72           | 73           | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 75      | 61           | 75           | 304.86                         | 9.52                     | 95.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 76      | 75           | 76           | 304.86                         | 9.52                     | 95.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 77      | 180          | 77           | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 78      | 182          | 78           | 128.20                         | 6.55                     | 38.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 79      | 170          | 79           | 254.46                         | 9.27                     | 70.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 80      | 37           | 109          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |

| ID ramo | nodo a monte | nodo a valle | Diametro interno condotta [mm] | Spessore condotta M [mm] | Spessore isolante M [mm] | Coeff. conduzione condotta M [W/m °C] | Coeff. conduzione isolante M [W/m °C] | Scabrezza M [mm] |
|---------|--------------|--------------|--------------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------|
| 81      | 160          | 81           | 254.46                         | 9.27                     | 70.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 82      | 175          | 141          | 154.08                         | 7.11                     | 40.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 83      | 1            | 84           | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 84      | 1            | 144          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 85      | 1            | 83           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 86      | 83           | 86           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 87      | 84           | 87           | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 88      | 85           | 88           | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 89      | 86           | 89           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 90      | 87           | 90           | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 91      | 88           | 91           | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 92      | 89           | 92           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 93      | 90           | 93           | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 94      | 93           | 94           | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 95      | 94           | 95           | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 96      | 95           | 96           | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 97      | 96           | 97           | 77.92                          | 5.49                     | 34.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 98      | 97           | 98           | 77.92                          | 5.49                     | 34.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 99      | 98           | 99           | 77.92                          | 5.49                     | 34.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 100     | 99           | 143          | 77.92                          | 5.49                     | 34.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 101     | 97           | 100          | 77.92                          | 5.49                     | 34.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 102     | 100          | 142          | 77.92                          | 5.49                     | 34.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 103     | 96           | 101          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 104     | 101          | 102          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 105     | 102          | 103          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 106     | 103          | 104          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 107     | 104          | 105          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 108     | 105          | 106          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 109     | 106          | 107          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 110     | 107          | 108          | 154.08                         | 7.11                     | 40.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 111     | 108          | 140          | 154.08                         | 7.11                     | 40.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 112     | 109          | 31           | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 113     | 30           | 110          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 114     | 110          | 111          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 115     | 111          | 112          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 116     | 112          | 113          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 117     | 161          | 139          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 118     | 113          | 114          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 119     | 114          | 162          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 120     | 107          | 115          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 121     | 115          | 116          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 122     | 116          | 117          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |

| ID ramo | nodo a monte | nodo a valle | Diametro interno condotta [mm] | Spessore condotta M [mm] | Spessore isolante M [mm] | Coeff. conduzione condotta M [W/m °C] | Coeff. conduzione isolante M [W/m °C] | Scabrezza M [mm] |
|---------|--------------|--------------|--------------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------|
| 123     | 117          | 118          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 124     | 118          | 119          | 154.08                         | 7.11                     | 40.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 125     | 119          | 120          | 154.08                         | 7.11                     | 40.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 126     | 120          | 121          | 154.08                         | 7.11                     | 40.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 127     | 91           | 197          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 128     | 121          | 122          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 129     | 122          | 123          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 130     | 123          | 124          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 131     | 124          | 138          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 132     | 125          | 118          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 133     | 126          | 125          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 134     | 127          | 126          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 135     | 128          | 127          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 136     | 129          | 128          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 137     | 130          | 129          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 138     | 131          | 130          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 139     | 131          | 132          | 154.08                         | 7.11                     | 40.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 140     | 132          | 133          | 154.08                         | 7.11                     | 40.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 141     | 174          | 82           | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 142     | 134          | 131          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 143     | 135          | 134          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 144     | 136          | 135          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 145     | 137          | 136          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 146     | 144          | 145          | 77.92                          | 5.49                     | 34.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 147     | 145          | 2            | 77.92                          | 5.49                     | 34.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 148     | 88           | 147          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 149     | 147          | 148          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 150     | 147          | 72           | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 151     | 194          | 149          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 152     | 194          | 195          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 153     | 94           | 152          | 62.68                          | 5.16                     | 32.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 154     | 152          | 191          | 62.68                          | 5.16                     | 32.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 155     | 193          | 151          | 62.68                          | 5.16                     | 32.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 156     | 193          | 153          | 62.68                          | 5.16                     | 32.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 157     | 12           | 150          | 62.68                          | 5.16                     | 32.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 158     | 12           | 151          | 62.68                          | 5.16                     | 32.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 159     | 100          | 22           | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 160     | 99           | 20           | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 161     | 16           | 155          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 162     | 96           | 156          | 77.92                          | 5.49                     | 34.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 163     | 156          | 155          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 164     | 156          | 154          | 77.92                          | 5.49                     | 34.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |

| ID ramo | nodo a monte | nodo a valle | Diametro interno condotta [mm] | Spessore condotta M [mm] | Spessore isolante M [mm] | Coeff. conduzione condotta M [W/m °C] | Coeff. conduzione isolante M [W/m °C] | Scabrezza M [mm] |
|---------|--------------|--------------|--------------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------|
| 165     | 28           | 157          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 166     | 105          | 158          | 154.08                         | 7.11                     | 40.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 167     | 158          | 159          | 154.08                         | 7.11                     | 40.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 168     | 158          | 157          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 169     | 108          | 109          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 170     | 106          | 110          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 171     | 34           | 160          | 254.46                         | 9.27                     | 70.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 172     | 113          | 161          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 173     | 161          | 160          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 174     | 114          | 35           | 154.08                         | 7.11                     | 40.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 175     | 117          | 163          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 176     | 163          | 164          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 177     | 163          | 41           | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 178     | 124          | 50           | 128.20                         | 6.55                     | 38.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 179     | 121          | 165          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 180     | 165          | 166          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 181     | 46           | 166          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 182     | 166          | 167          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 183     | 43           | 170          | 254.46                         | 9.27                     | 70.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 184     | 118          | 169          | 154.08                         | 7.11                     | 40.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 185     | 169          | 168          | 154.08                         | 7.11                     | 40.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 186     | 169          | 170          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 187     | 56           | 173          | 62.68                          | 5.16                     | 32.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 188     | 129          | 171          | 62.68                          | 5.16                     | 32.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 189     | 171          | 172          | 62.68                          | 5.16                     | 32.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 190     | 171          | 173          | 62.68                          | 5.16                     | 32.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 191     | 61           | 175          | 154.08                         | 7.11                     | 40.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 192     | 133          | 174          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 193     | 174          | 175          | 154.08                         | 7.11                     | 40.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 194     | 133          | 176          | 154.08                         | 7.11                     | 40.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 195     | 176          | 177          | 154.08                         | 7.11                     | 40.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 196     | 177          | 178          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 197     | 178          | 179          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 198     | 178          | 180          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 199     | 76           | 180          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 200     | 177          | 183          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 201     | 76           | 182          | 128.20                         | 6.55                     | 38.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 202     | 183          | 182          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 203     | 183          | 181          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 204     | 137          | 185          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 205     | 65           | 184          | 154.08                         | 7.11                     | 40.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 206     | 185          | 184          | 154.08                         | 7.11                     | 40.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |

| ID ramo | nodo a monte | nodo a valle | Diametro interno condotta [mm] | Spessore condotta M [mm] | Spessore isolante M [mm] | Coeff. conduzione condotta M [W/m °C] | Coeff. conduzione isolante M [W/m °C] | Scabrezza M [mm] |
|---------|--------------|--------------|--------------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------|
| 207     | 184          | 186          | 154.08                         | 7.11                     | 40.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 208     | 137          | 187          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 209     | 187          | 188          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 210     | 188          | 189          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 211     | 189          | 190          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 212     | 189          | 69           | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 213     | 191          | 192          | 62.68                          | 5.16                     | 32.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 214     | 191          | 150          | 62.68                          | 5.16                     | 32.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 215     | 152          | 193          | 62.68                          | 5.16                     | 32.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 216     | 7            | 195          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 217     | 93           | 194          | 102.26                         | 6.02                     | 36.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 218     | 145          | 146          | 77.92                          | 5.49                     | 34.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 219     | 144          | 85           | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 220     | 196          | 197          | 62.68                          | 5.16                     | 32.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 221     | 196          | 65           | 336.56                         | 9.52                     | 116.00                   | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 222     | 197          | 137          | 202.74                         | 8.18                     | 44.00                    | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 223     | 30           | 198          | 154.08                         | 7.1                      | 40.0                     | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |
| 224     | 110          | 199          | 154.08                         | 7.1                      | 40.0                     | 55.000                                | 0.050                                 | 0.03             |