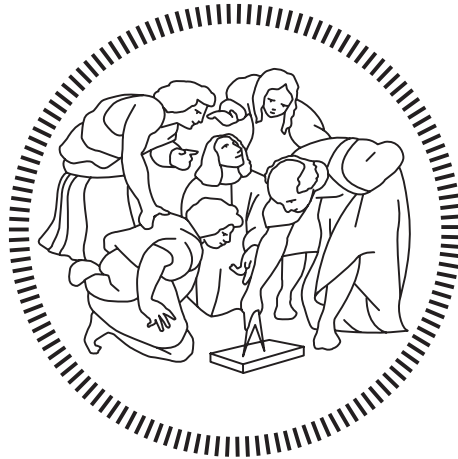


Politecnico di Milano

Scuola di Ingegneria Industriale e dell'Informazione

Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica



Set-up e testing di uno strumento di simulazione dinamica di una rete di teleriscaldamento

Relatore

Professor Federico Viganò

Tesi di Laurea Magistrale di

Mattia Cazzaniga

Matricola 920211

Anno Accademico 2019-2020

Ringraziamenti

Sommario

Il lavoro svolto in questa tesi vuole testare il funzionamento di un software sperimentale, allo scopo di effettuare la simulazione di una rete di teleriscaldamento, che sia in grado di fornire in tempo reale i valori di pressione, portata e temperatura nei componenti della rete, in modo da conoscere istantaneamente le richieste energetiche delle utenze allacciate ad essa al fine di efficientare la regolazione della potenza immessa.

Il primo capitolo dell'elaborato consiste in un'introduzione atta a descrivere la tecnologia del teleriscaldamento e il suo andamento nel panorama italiano. Il secondo capitolo si limita a mostrare lo schema generale del lavoro svolto descrivendo brevemente la logica dietro ogni passaggio intermedio.

Nel terzo capitolo ci si concentra inizialmente sulla presentazione del file AutoCAD in formato DWG rappresentante la rete, per poi mostrare la modalità con cui le informazioni che caratterizzano le entità grafiche in esso contenute sono memorizzate. Viene in seguito schematizzata la logica dietro i codici utilizzati per estrarre le informazioni della rete e vengono presentati i risultati di output in formato .txt. Nella parte centrale di questo capitolo si descrive la modifica ed elaborazione di questi file generati in AutoLISP, allo scopo di ottenere dei risultati intermedi la cui espansione porta al prodotto finale. Gli ultimi paragrafi comprendono la successione di operazioni svolte atte a creare la versione definitiva dei file di input, la modellizzazione utilizzata per schematizzare le condotte di rete e la risoluzione degli errori manifestatisi all'avvio dei primi tentativi di simulazione.

Nel quarto capitolo viene presentata la modellazione matematica per la creazione delle curve di richiesta energetica che si adattino alle diverse tipologie di utenze. Vengono illustrate le ipotesi assunte dietro il processo di creazione dei valori per ognuna di esse.

Nel quinto capitolo, a seguito della spiegazione dell'interfaccia del programma all'avvio della simulazione e una descrizione della successione di operazioni svolte in automatico dall'algoritmo, si presentano i risultati ottenuti con diverse tentativi di simulazione. Viene riprodotta la mappa in funzione dell'andamento delle temperature nei nodi della rete e si analizza la variazione di quest'ultimi a seguito della modifica di alcuni parametri di input. Infine si esamina quanto il risultato ottenuto per le potenze termiche si discosti dai dati forniti in ingresso.

Abstract

The aim of this thesis is to set-up and test an experimental software that can simulate the behaviour of a district heating system. This software must provide in real time the values of pressure, mass flow rate and temperatures of each component of the grid, in order to immediately detect and efficiently meet the energy demands of the users.

The first chapter of this work is a description of the district heating technology, and the growth trend of its in Italy. The second chapter is a general overview of the project, briefly outlining the logic behind each step.

The third chapter focuses on the presentation of the AutoCAD file, in DWG format, showing the structure of the network system and how the information characterizing the graphical entities of the file are stored. There follows an explanation of the logic behind the codes used to extract the information needed, and the output results are presented in .txt format. The central part of this chapter is a description of the editing and processing of such files, previously obtained through AutoLISP, to provide intermediate results which are later to be expanded into the final product. The last section of this chapter includes the description of the procedure that was used to create the final version of the input files, to model the network pipelines and to troubleshoot the errors occurred during the first simulation.

The fourth chapter revolves around the mathematical modelling of the energy demand curves, in order to make sure that they can adapt to every kind of consumers. The different assumptions on which the values for each consumer are calculated are listed in this chapter.

In the fifth chapter, after an explanation of the program interface at the start of a simulation, and a description of the operations automatically performed by the algorithm, there is a presentation of the results obtained during different simulation attempts. The map showing the temperature trend throughout the network is drawn, and the temperature variation at different network hubs following the modification of input parameters is analysed. Lastly, the deviation between the input and output values for thermal powers is examined.

Indice

Sommario	iii
Abstract	iv
Indice	v
Lista delle figure	vii
Capitolo 1 Introduzione	1
1.1 La tecnologia.....	1
1.2 Il teleriscaldamento in Italia.....	4
Capitolo 2	6
2.1 Tecnologie di controllo.....	6
2.2 Scopo, procedimento e obiettivo dell'elaborato.....	6
Capitolo 3 Schema della rete	8
3.1. La rete in AutoCAD	8
3.2. LISP	11
3.3. Macro di istruzioni.....	15
3.3.1 Elementi AutoLISP.....	15
3.3.2 Utenze AutoLISP.....	18
3.3.3 Elementi e utenze Matla.....	20
3.4 File nodi.....	24
3.5 File elementi.....	25
3.5.1 Schematizzazione condotta e scambio termico.....	25
3.5.2 Risoluzione problemi grafici.....	30
3.6 File utenze.....	35
3.6.1 Abbinamento utenze-nodi.....	35
3.6.2 Creazione file.....	37
3.6.2.1 Verifica Utenze estratte.....	38
3.6.2.2 Verica utenze non estratte e file finale.....	38
Capitolo 4 Curve di potenza	40
4.1 Informazioni utenze.....	40
4.2 Definizione curva giornaliera.....	41
Capitolo 5 Software e risultati ottenuti	47

5.1 Interfaccia programma.....	47
5.2 File di supporto.....	48
5.2.1 File “mappa”.....	49
5.3 L’algoritmo.....	50
5.4 AIT.....	52
5.5 Risultati ottenuti.....	55
5.5.1 Risultati simulazioni.....	55
5.5.1.1 Andamento temperature.....	56
5.5.1.2 Andamento pressione.....	62
5.5.1.3 Andamento potenze.....	63
Capitolo 6 Conclusioni e possibili sviluppi futuri.....	66
Bibliografia.....	68

Lista delle figure

Figura 1: schema funzionamento rete di teleriscaldamento.....	1
Figura 2: provenienza fonti energetiche teleriscaldamento.....	2
Figura 3: andamento volumetrico del teleriscaldamento in Italia.....	4
Figura 4: schema generale	7
Figura 5: esempio di file DWG.....	9
Figura 6: particolare di tubazioni.....	10
Figura 7: particolare di sottostazioni.....	10
Figura 8: particolare di centrale.....	11
Figura 9: lista di definizione linea.....	12
Figura 10: lista di definizione tubazione.....	13
Figura 11: lista di definizione sottostazione.....	14
Figura 12: lista di definizione centrale.....	14
Figura 13: schema macro istruzioni AutoLISP elementi.....	15
Figura 14: output macro istruzioni AutoLISP elementi.....	16
Figura 15: plot di rete I.....	17
Figura 16: plot di rete II.....	17
Figura 17: schema macro istruzioni AutoLISP utenze.....	19
Figura 18: output macro istruzioni AutoLISP utenze.....	20
Figura 19: diagramma di flusso macro istruzioni Matlab elementi.....	21
Figura 20: output macro istruzioni Matlab elementi.....	22
Figura 21: output macro istruzioni Matlab utenze.....	22
Figura 22: schema ottenimento nodi di allaccio.....	23
Figura 23: estratto di file nodi.....	24
Figura 24: particolare tubazione per teleriscaldamento.....	25
Figura 25: schematizzazione condotta per teleriscaldamento.....	26
Figura 26: schema tubazioni interrato.....	27
Figura 27: coefficiente globale scambio per diametri.....	28
Figura 28: termine inerziale in funzione di diametro.....	29
Figura 29: struttura finale file elementi.....	29
Figura 30: rete non connessa I.....	30
Figura 31: prima correzione rete non connessa.....	30
Figura 32: rete non connessa II.....	31
Figura 33: rete non connessa III.....	32
Figura 34: rete non connessa IV.....	32
Figura 35: rete non connessa V.....	33
Figura 36: seconda correzione rete non connessa.....	33
Figura 37: rete non connessa VI.....	34
Figura 38: rete non connessa VII.....	34
Figura 39: rete non connessa VIII.....	34
Figura 40: rete non connessa IX.....	35
Figura 41: diagramma di flusso abbinamento utenze-nodi allaccio.....	36
Figura 42: output abbinamento utenze-nodi allaccio.....	36
Figura 43: elenco indirizzo utenze connesse alla rete I.....	37

Figura 44: file utenze sottostazioni.....	39
Figura 45: file utenze centrali.....	39
Figura 46: consuntivo mensile utenze connesse alla rete.....	40
Figura 47: esempio di curva modello.....	41
Figura 48: esempio definizione funzione “SE”.....	44
Figura 49: applicazione funzione “SE” al caso in esame.....	45
Figura 50: andamento giornaliero utenze campione.....	46
Figura 51: andamento settimanale totale.....	46
Figura 52: interfaccia programma.....	47
Figura 53: estratto file “maglie”.....	48
Figura 54: estratto file “mappa”.....	48
Figura 55: temperatura nella rete h 1.....	57
Figura 56: temperatura nella rete h 2.....	57
Figura 57: temperatura nella rete h 3.....	58
Figura 58: temperatura nella rete h 4.....	59
Figura 59: temperatura nella rete h 5.....	60
Figura 60: temperatura nella rete h 6.....	60
Figura 61: temperatura nella rete h 1 B.....	60
Figura 62: temperatura nella rete h 1 C.....	61
Figura 63: andamento pressioni.....	62
Figura 64: potenze utenze.....	63
Figura 65: potenze centrali.....	63
Figura 66: potenza utenza civile I.....	64
Figura 67: potenza utenza civile II.....	64
Figura 68: potenza utenza commerciale I.....	64
Figura 69: potenza utenza commerciale II.....	64
Figura 70: potenza utenza scolastica I.....	65
Figura 71: potenza utenza scolastica II.....	65
Figura 72: potenza utenza sanitaria I.....	65
Figura 73: potenza utenza sanitaria II.....	65

Capitolo 1

Introduzione

1.1. La tecnologia

Il teleriscaldamento (più correttamente riscaldamento urbano a rete, traduzione dell'originale District Heating) è un servizio energetico che consente la distribuzione di acqua calda, acqua surriscaldata o vapore per mezzo di reti interrate, destinata al riscaldamento degli edifici ed alla produzione di acqua calda igienicosanitaria. In un sistema di teleriscaldamento il calore prodotto dagli impianti di generazione circola in una rete attraverso un fluido vettore, il quale distribuisce il calore agli utenti attraverso le tubature "di mandata" e ritorna alle centrali, ormai raffreddato, attraverso le tubature di "ritorno".

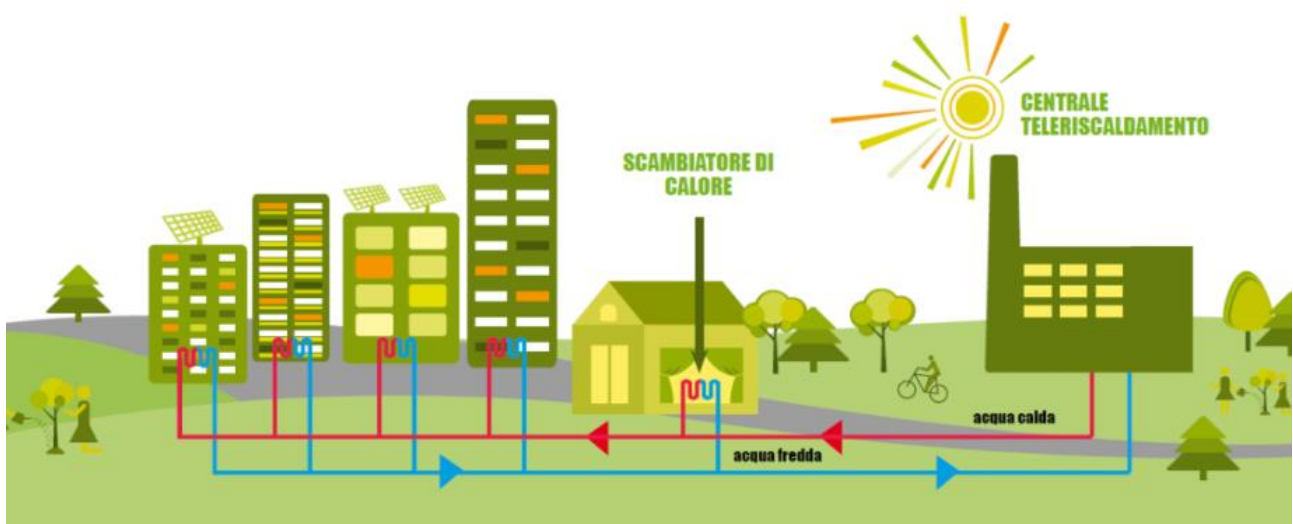


Figura 1: schema funzionamento rete di teleriscaldamento

Uno dei punti di forza di questa tecnologia è la diversità di provenienza dell'energia immessa nelle reti di teleriscaldamento: essa può essere prodotta da una centrale termica convenzionale di grosse dimensioni, tramite la produzione combinata di elettricità e calore, così come può provenire dall'incenerimento di rifiuti solidi urbani, da processi industriali (calore di scarto a bassa temperatura), da fonte geotermica a bassa, media ed alta temperatura, da fonti rinnovabili (biomasse, biogas da discariche, scarti di lavorazione). Un'ulteriore possibilità consiste nell'utilizzo di collettori solari che a fronte di un elevato costo di investimento azzerano i costi marginali dovuti all'utilizzo del combustibile.

Normalmente la rete è alimentata da almeno una centrale di generazione che sostiene il carico di base e può quindi funzionare in maniera efficiente. Ad essa vengono affiancate, come è il nostro caso in esame, una o più caldaie di integrazione e riserva destinate a coprire le punte o eventuali guasti alla centrale principale. Il dimensionamento e il numero delle centrali di generazione dipendono, oltre che dalla domanda complessiva, dall'estensione della rete e dalla densità della domanda. L'utilizzo di una specifica centrale piuttosto che da un'altra è legata alla variabilità del prezzo dell'energia legando questo aspetto alla flessibilità del consumo di combustibile. La molteplicità delle fonti di calore permette di sfruttare un mix di produzione differente a seconda della convenienza del momento.

Nel momento in cui ad esempio il prezzo dell'energia elettrica non giustifica l'accensione di un grosso impianto a ciclo combinato, l'essere accoppiato a una centrale a biomassa permette di erogare il servizio contenendo i costi di produzione. La rete in esame è strutturata nel seguente modo.

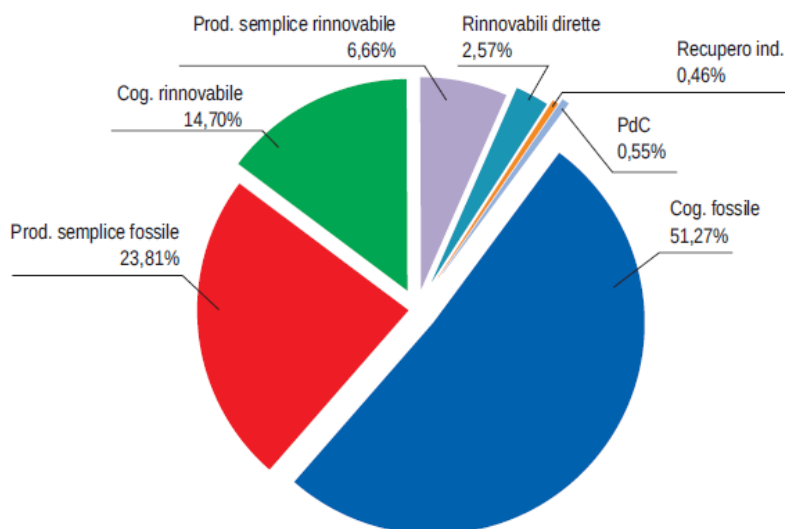


Figura 2: provenienza fonti energetiche teleriscaldamento

Il teleriscaldamento si presenta come alternativa alla tecnologia di riscaldamento domestico comune attualmente sul panorama nazionale: nella prevalenza dei nostri centri urbani, al riscaldamento provvede ogni singolo edificio per proprio conto e il calore viene prodotto tramite caldaie dimensionate per il singolo edificio o tramite caldaie autonome per ogni singola unità immobiliare. Questo sistema utilizza, anche adottando le tecnologie più moderne, non più del 75-80% dell'energia primaria fossile contenuta nel combustibile e, quel che è più importante, utilizza l'energia prodotta dalla combustione a temperatura di circa 1200-1500°C termodinamicamente pregiata per riscaldare un ambiente a soli 20°C. Gli stessi edifici inoltre necessitano di energia elettrica, oltre che di calore, prodotta in larga parte tramite centrali termoelettriche in grado di sfruttare solo il 46% dell'energia primaria nei combustibili usati. Il processo di produzione termoelettrica convenzionale comporta ingenti perdite di energia primaria: con conseguente spreco di risorse economiche e problemi legati all'impatto ambientale. Il teleriscaldamento, presupponendo la produzione centralizzata del calore in una o poche centrali di grosse dimensioni, consente di realizzare centrali di produzione combinata elettricità-calore (centrali di cogenerazione). Grazie al fattore di scala garantito dalle dimensioni di queste strutture è possibile utilizzare una frazione cospicua dell'energia contenuta nel combustibile, ben superiore a quella consentita dalle produzioni separate.

La temperatura di mandata a cui sono servite le utenze è funzione dall'esigenza di quest'ultime e dal livello delle perdite termiche. Grazie ai continui progressi tecnologici relativi all'isolamento delle condotte, allo scambio termico delle sottostazioni delle utenze, le temperature di mandata del fluido si sono ridotti nel tempo, permettendo negli anni il passaggio dalla produzione di vapore o acqua surriscaldata in pressione ($T > 100^{\circ}\text{C}$) fino a acqua in pressione con $T < 100^{\circ}\text{C}$. In generale si possono distinguere gli impianti in

- tradizionali, con temperatura di mandata tra 90°C e 120°C
- a media entalpia con temperatura di mandata tra 70°C e 90°C
- a bassa entalpia con temperatura di mandata tra 40°C e 60°C

Un obiettivo di ricerca è la progettazione di reti consentano l'ottenimento di temperatura di mandata fino di 20°C , permettendone il trasporto in tubi di plastica.

La rete di distribuzione, costituita da un sistema di tubature interrato di diametro decrescente che si ramifica verso le utenze composto di tubazioni coibentate in acciaio preisolato, può essere distinta in due parti: la rete primaria o dorsale, che trasporta il fluido dalla centrale di generazione all'area dove si trovano le utenze, e la rete secondaria, costituita dalle tubazioni che conducono dalla dorsale alle utenze. Il sistema di distribuzione utilizzato nella maggior parte delle reti italiane di teleriscaldamento è il così detto "sistema indiretto", che si contrappone alla soluzione di "scambio diretto", presente in alcuni impianti del nord Europa, in cui il fluido termovettore è anche quello che fornisce direttamente calore alle utenze. Ciò che caratterizza il sistema di distribuzione indiretto è la presenza nelle utenze rifornite, di scambiatori di calore, apparecchiature nelle quali si trasferisce il calore dalla rete esterna all'impianto di distribuzione interna dell'edificio e, costituiscono l'interfaccia tra la rete di TLR e la rete interna all'edificio da riscaldare. Questo sistema, a fronte dei maggiori costi di investimento, consente di utilizzare componenti a bassa pressione per l'impianto dell'utente, semplifica la manutenzione e permette l'individuazione delle perdite, rende più efficiente la regolazione e la contabilizzazione del calore e semplifica l'allacciamento di edifici già esistenti alla rete di teleriscaldamento. Tra i vantaggi propri di questa tecnologia si annoverano:

- produzione di calore con rendimenti medi più elevati a parità di combustibile impiegato
- risparmio di risorse energetiche attraverso l'uso di calore altrimenti disperso e recuperato da vari processi industriali
- significativa riduzione delle emissioni inquinanti e climalteranti e emissione concentrata in zone

Oltre ai sopraelencati vantaggi energetici ed ambientali, questa tecnologia permette dei vantaggi economici e gestionali sia per l'utente che per il gestore:

- costi di gestione sensibilmente inferiori rispetto alla centrale termica sostituita (legati soprattutto all'assenza del prezzo di acquisto del combustibile di alimentazione)
- maggiore sicurezza legata all'assenza di fiamme dirette, eliminando rischi di scoppi e incendi

Per il gestore di rete invece:

- rientro dei costi di investimento in tempi relativamente ridotti grazie alla possibilità di sfruttare materiali di scarto e calore di recupero di processi industriali

- possibilità di scollegare temporalmente la produzione dalla richiesta delle utenze in modo da poter legare la produzione alla variazione del prezzo e regolarla in base a esso.

1.2. Teleriscaldamento in Italia

Lo sviluppo del teleriscaldamento è avvenuto molto in ritardo rispetto al resto d'Europa sia per via delle condizioni climatiche meno rigide, sia a causa del programma di metanizzazione avvenuto sin dagli anni '50 soprattutto nell'Italia Settentrionale. In concomitanza con la crisi energetica degli anni '70 sono sorti i primi impianti di Mantova, Modena, Reggio Emilia e soprattutto Brescia, che si è sviluppata più rapidamente. Negli anni successivi è stato caratterizzato da una crescita costante fino a permettere nel 2015 il raggiungimento dei seguenti risultati:

- 7700 GWh_t di calore distribuito, corrispondente a circa il 5% della domanda totale
- Soddisfa le richieste energetiche di più del 4% della popolazione

In termini energetico-ambientali ha

- 442 ktep
- 1386 ktonn CO_2 evitata

Dall'inizio del nuovo millennio è stato caratterizzato da un trend di crescita di oltre il 7% all'anno, passando dai 117.3 Mm^3 ai quasi 360 del 2018.

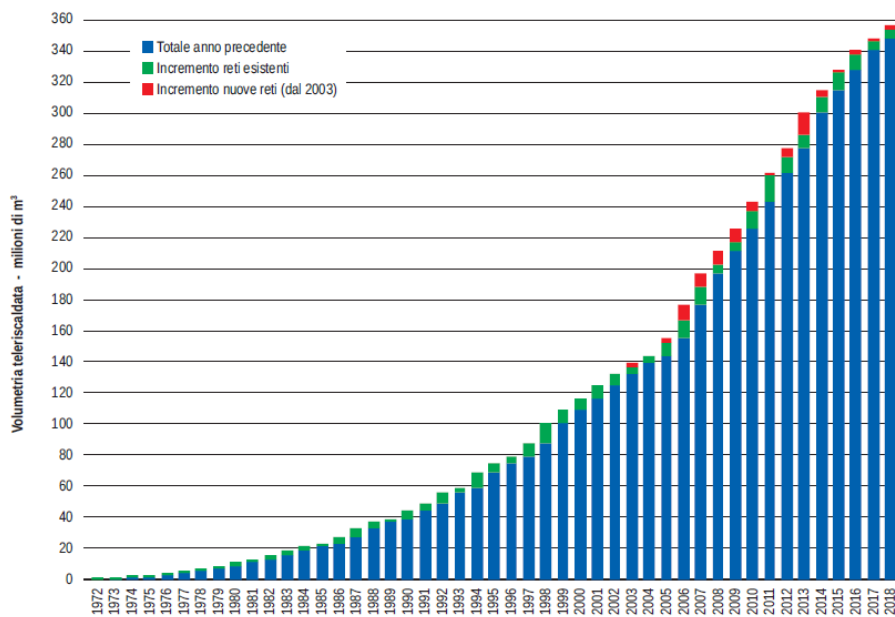


Figura 3: andamento volumetrico del teleriscaldamento in Italia

I vincoli posti dalla totale decarbonizzazione dell'economia necessaria entro il 2050, impongono un percorso a tappe che permetta progressivamente di annullare l'emissione in atmosfera di gas climalteranti. Il sistema energetico dovrà quindi necessariamente attraversare un periodo di trasformazione continua, nei prossimi 30 anni; per questo motivo si dovrà basare su soluzioni tecnologiche flessibili, capaci di trasformarsi seguendo le esigenze di un mondo sempre più efficiente energeticamente e capace di utilizzare in misura crescente energie rinnovabili. Il passaggio dal contesto attuale al sistema energetico del futuro, più sostenibile e capace di integrare grandi quantità di energia proveniente da fonti rinnovabili, richiede un nuovo approccio coerente che integri le diverse componenti del sistema energetico e sfrutti le sinergie dovute alle potenziali integrazioni tra settori energetici termico ed elettrico. Il teleriscaldamento può avere un importante ruolo da svolgere in un simile scenario, le tecnologie devono però essere oggetto di un deciso ricambio generazionale perché possano sfruttare appieno il potenziale di trasformazione. Come riportato dalle ultime ricerche in materia di teleriscaldamento a bassa temperatura, a differenza delle tre generazioni precedenti di teleriscaldamento (a vapore, acqua surriscaldata e acqua calda), lo sviluppo della quarta generazione di tlr a bassa temperatura permette di bilanciare la generazione con il risparmio energetico rispondendo così alla sfida di fornire calore a edifici sempre più efficienti, riducendo nel contempo le perdite nelle reti di teleriscaldamento. Inoltre le reti di quarta generazione prevedono l'integrazione del teleriscaldamento in sistemi energetici intelligenti fortemente basati sull'uso di elaborazioni digitali, i così detti "smart energy system". La realizzazione di queste reti prevede lo sviluppo di un quadro istituzionale e organizzativo di riferimento che presenti adeguate strutture di costo e incentivi. Per essere in grado di svolgere il suo ruolo nel futuro dell'energia sostenibile il teleriscaldamento dovrà avere dunque le seguenti capacità: di alimentare edifici esistenti, ristrutturati e di nuova costruzione, con fluido termovettore a bassa temperatura; di distribuire il calore in reti con basse perdite termiche e di riutilizzare il calore proveniente da fonti a bassa temperatura e integrare fonti di calore rinnovabili come il solare e la geotermia. Di essere parte integrante di sistemi energetici intelligenti contribuendo in tal modo a risolvere il compito di integrare fonti di energia rinnovabile aleatorie e conservazione dell'energia. Al fine di poter garantire lo sviluppo di reti del futuro è però necessaria una pianificazione energetica ed economica adeguata, che contempra investimenti e incentivi coerenti con il percorso di trasformazione verso un sistema energetico futuro sostenibile. L'analisi dei vantaggi ambientali della riduzione dei consumi di energia primaria e delle emissioni mostra come questi benefici propri della tecnologia dipendano fortemente dal sistema separato a cui fa riferimento il confronto e al metodo usato per valutarli. Per poter mantenere gli elevati ed interessanti trend di crescita è quindi necessaria una continua evoluzione della tipologia per mantenerne inalterata l'efficienza.

La competitività della tecnologia è minacciata da numerosi fattori:

- Il continuo progresso tecnologico dei sistemi separati concorrenti comporta un costante aumento della loro sostenibilità, implicando una diminuzione relativa dei benefici ambientali garantiti dalla tecnologia del tlr
- Forte riduzione dei costi della tecnologia relativamente emergente delle PdC, le quali oltre a vedere costantemente aumentato il proprio COP possono risultare economicamente più vantaggiose grazie agli incentivi statali e alle detrazioni fiscali di cui si può usufruire in sede di sostituzione dell'impianto esistente, soprattutto per i sistemi funzionanti a bassa temperatura.

Capitolo 2

Riassunto generale

In questo capitolo si fornisce una visione d'insieme del lavoro svolto, descrivendo in maniera schematica la successione delle operazioni svolte partendo dall'analisi dei dati iniziali fino al raggiungimento del risultato finale.

2.2. tecnologie di controllo

Le reti di più recente costruzione sono progettate per essere telecontrollate: presso ogni sottostazione allacciata alla rete è posizionata una serie di strumenti in grado, oltre a effettuare una rilevazione dinamica e continua dei consumi della generica utenza, di comunicarli istantaneamente alla centrale o al parco di centrali addette alla produzione. Questo canale diretto tra luogo di produzione e luogo di consumo permette di efficientare enormemente la regolazione della potenza termica immessa da parte dei produttori, in modo da sopperire con precisione al quantitativo di richiesta termica rilevato istantaneamente.

La rete di Cremona in esame, non rientrando tra le più moderne in attività, non è provvista del sistema di rilevazione dinamica sopra descritto ma di una tecnologia più tradizionale: in corrispondenza di ogni sottostazione è installato un semplice contatore che registra ininterrottamente il consumo di energia e ne memorizza il consuntivo che viene letto con intervalli programmati dai tecnici al servizio del gestore di rete, il quale rimane in possesso quindi solo di dati discreti sul consumo. La regolazione di questa tipologia di rete è effettuata manualmente a seguito del rilevamento in centrale di un calo di pressione. Questa perdita di pressione è conseguenza di una riduzione della richiesta termica da parte di una o più utenze asservite, ossia di una diminuzione di portata prelevata. Il limite insito in questa tecnologia risiede proprio nel ritardo con cui avviene la rilevazione rispetto al manifestarsi dell'evento che l'ha causata. A supporto dei gestori di rete possono intercorrere i dati circa l'andamento storico pregresso del carico da soddisfare.

2.3. Scopo, procedimento e obiettivo dell'elaborato

Lo scopo di questo elaborato è stato svolgere un'operazione di set-up di un software sperimentale, sviluppato dall'allora laureando magistrale in Ingegneria energetica presso il Politecnico di Milano Alessandro Minoli, al fine di verificare, attraverso un'operazione di testing, basata su un'analisi dinamica della rete, se possa costituire una soluzione in grado di ottimizzare la regolazione energetica delle centrali e la gestione generale della rete.

Vengono ricavati da fornire come input al programma tre file di testo chiamati “nodi”, “elementi” e “utenze”. I primi due contengono le informazioni attraverso cui il programma ricostruisce la topologia della rete, mentre il terzo è composto è dedicato delle utenze connesse alla rete, comprensivo dell'andamento nel corso delle 24 h di un giorno campione delle richieste energetiche ottenute tramite delle curve sperimentali, proprie per ogni utenza.

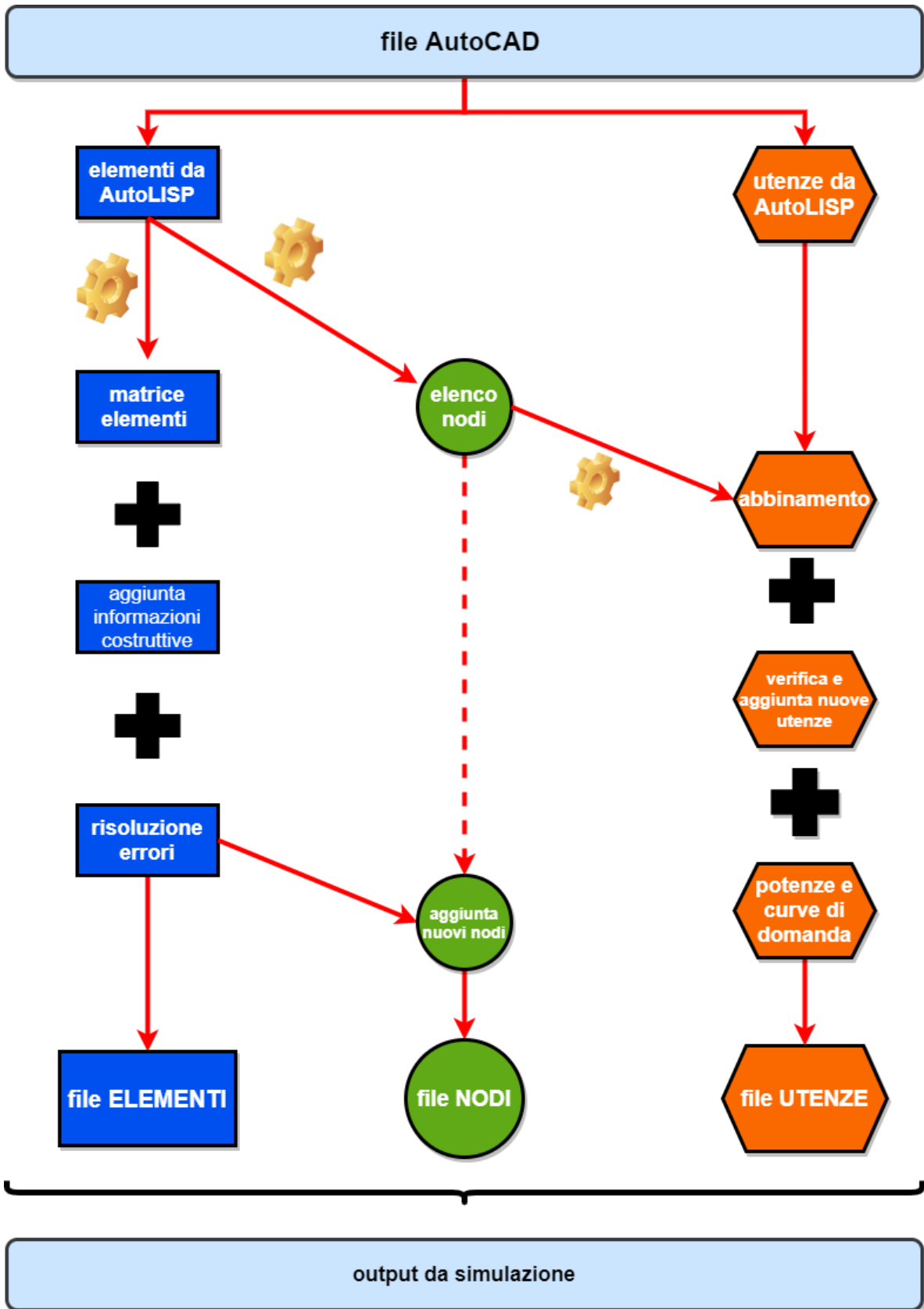


Figura 4: schema generale

L'immagine riassume la sequenza di operazioni svolte, partendo dalla situazione iniziale fino all'ottenimento degli output di programma. La prima di queste è stata l'estrapolazione delle informazioni inerenti la topologia della rete partendo dal file AutoCAD in formato DWG, avvenuta tramite due macro di comandi compilate servendosi di AutoLISP, linguaggio di programmazione di cui si serve AutoCAD. Essendo il lavoro di tesi la prosecuzione di quanto avviato da dei precedenti tesisti si era già in possesso dei codici da loro scritti allo scopo di estrarre le medesime operazioni. Durante questa fase è stato necessario imparare da zero il linguaggio di programmazione fino a conoscerne la totalità di istruzioni possibili compatibili con il programma CAD. Questo perché si intendeva ottenere dei risultati che pur essendo analoghi in termini di contenuto, si presentassero in forma diversa allo scopo di effettuare la loro successiva modifica tramite l'uso del programma Matlab che si presta molto meglio grazie alla sua maggiore immediatezza e velocità di esecuzione nell'elaborazione di grossi file numerici. L'attività di scrittura in questa fase si è limitata a modifiche, operazioni di completamento e solo parziale riscrittura dei codici ereditati.

Questi risultati finora ottenuti vengono rielaborati in Matlab allo scopo di generare una versione base di quelli che saranno i risultati finali di input. Questi risultati intermedi saranno in seguito soggetti a una serie di integrazioni ed ulteriori modifiche frutto anche dell'interazione tra di essi.

Il file "elementi" infatti viene integrato con i valori delle informazioni costruttive delle tubazioni, ottenute modellizzando l'architettura delle stesse per ottenere i dati che esprimessero la dispersione termica, che avviene per conduzione, in un sistema 1-D, e esprimessero la massa del sistema totale

Il file "utenze" è stato completato con l'inserimento delle curve di domanda per ogni centrale, ottenute partendo dai dati di cui si dispone all'inizio, ossia l'erogazione oraria per ogni centrale e i consumi mensili per le centrali. Le ipotesi assunte per definire le basi matematiche a supporto della creazione di queste curve ha rappresentato la parte centrale del lavoro di tesi dagli allora laureandi triennali Gianluca Dadda e Giacomo Gabbiani, durante l'Anno Accademico 2017/2018.

Forniti questi input al programma, quest'ultimo genera degli output che contengono i valori di perdita di pressione in tutti i nodi della rete, permettendo di individuare le zone in cui è più difficoltosa l'erogazione del servizio, perché termodinamicamente sfavorite, e quindi rifornite con fluido a temperatura e pressioni inadeguate, e di conseguenza su cui intervenire. Il programma deve riuscire a fornire i valori di portata di fluido termovettore ottimali per ogni utenza, per evitare che non si verificano in nessuna di esse disservizi, e le ricalcolate curve di potenza emessa delle centrali, adattati a soddisfare la condizione delle utenze. I valori ottenute per mezzo di quest'ultime rappresenteranno le minime quantità di potenza termica che verranno immesse in rete riuscenti a soddisfare la richiesta termica, nonché a vincere le perdite di carico. Un'ulteriore valutazione può essere l'identificazione dei punti della rete in cui può risultare vantaggioso l'inserimento di nuova potenza termica tramite generazione distribuita o nuovi componenti.

Capitolo 3

Schema della rete

In questo capitolo si fornirà inizialmente una panoramica sul file AutoCAD rappresentante la rete, le entità grafiche che lo costituiscono e come si presentano sul disegno. Nei paragrafi successivi, in seguito a una breve descrizione del funzionamento di AutoLISP, viene descritta schematicamente la logica dietro le macro di istruzioni utilizzate per l'estrazione delle informazioni e come si presentano questi risultati ottenuti. La stessa procedura è ripetuta anche per le istruzioni eseguite in Matlab. Per ultimo viene presentata la fase di creazione dei file di input veri e propri al software di simulazione.

3.1. La rete in AutoCAD

La rete di teleriscaldamento di Cremona è stata tra i primi impianti a livello nazionale destinati alla produzione e alla distribuzione del calore. I primi lavori cominciarono negli anni '80 e sono continuati aumentando costantemente l'estensione totale fino a giungere ad oggi a servire ad oggi più di 600 edifici fra pubblici e privati.

Alcuni numeri che descrivono la rete:

- abitanti equivalenti serviti (nr) 57620
- utenze allacciate (nr):641
- lunghezza rete (Km): 59
- volumetria allacciata (mc) m^3 : 5762000
- potenza Termica: massima fornita (MWh): 162592
- energia Elettrica immessa in rete (MWh): 49471
- $tonn/CO_2$ risparmiate: 18718

Nel capitolo precedente si è esposto che uno dei grandi pregi della tecnologia del teleriscaldamento è rappresentato dalla ampia varietà della provenienza dell'energia termica fornita ad essa. La rete di Cremona rappresenta un ottimo esempio di questo beneficio perché il mix produttivo si è sempre evoluto nel corso degli anni nella direzione di utilizzare le sinergie offerte dal territorio: tra gli impianti che servono la rete si annoverano un termovalorizzatore di rifiuti, un impianto a ciclo combinato (turbina a gas e vapore) cogenerativo (produzione combinata di energia elettrica e calore), alimentato a gas metano e, di recente costruzione, nel 2013 un impianto alimentato a biomasse legnose. Oltre a questi impianti sono presenti anche delle centrali integrative alimentate lungo la rete poste lungo la rete che permettono di soddisfare le esigenze dei clienti nei momenti di maggiore richiesta nonché di garantire una riserva. Tutte le centrali produttive sono interconnesse tra di loro dalle condotte della rete. Quest'ultima è sviluppata con uno schema a discreta magliatura con diametro delle tubazioni variabile in funzione delle dimensioni della rete di asservimento: con diametri maggiori per le condotte appartenenti alla dorsale principale e di dimensione minore per le terminazioni di allaccio che servono direttamente le utenze finali. Le doppie tubazioni che compongono la rete sono realizzate in acciaio precoibentato per il ricircolo dell'acqua trattata ed additivata tra centrali ed edifici allacciati, il percorso di andata permette il flusso di acqua con una temperatura il cui valore oscilla tra i 100 e i 108 °C (in funzione della stagione) in pressione a 10-12 bar (ma testata per sopportarne fino a 16), il percorso di ritorno in centrale, dopo la cessione di calore agli utenti finali tramite scambiatori, vede al suo interno acqua a 60-65 °C.

Gli scambiatori di calore si trovano all'interno di sottocentrali di proprietà dell'utilizzatore e costituiscono e con essi termina l'allaccio all'utenza che parte direttamente dalle derivazioni della rete fino ad esso. [Linea Group Holding S.p.A]

L'azienda, presso cui i precedenti tesisti hanno svolto la loro attività di stage, titolare dell'impianto, ha fornito un tracciato DWG già contenente in partenza tutte le informazioni necessarie al progetto.

Tutti gli oggetti presenti sul disegno, siano essi le tubazioni, o le utenze termiche, sono rappresentati esclusivamente tramite l'utilizzo di linee, polilinee, cerchi, rettangoli e testi. La totalità delle entità grafiche del disegno è suddivisa in un gran numero di layer, ognuno rappresentante una diversa tipologia di disegno.

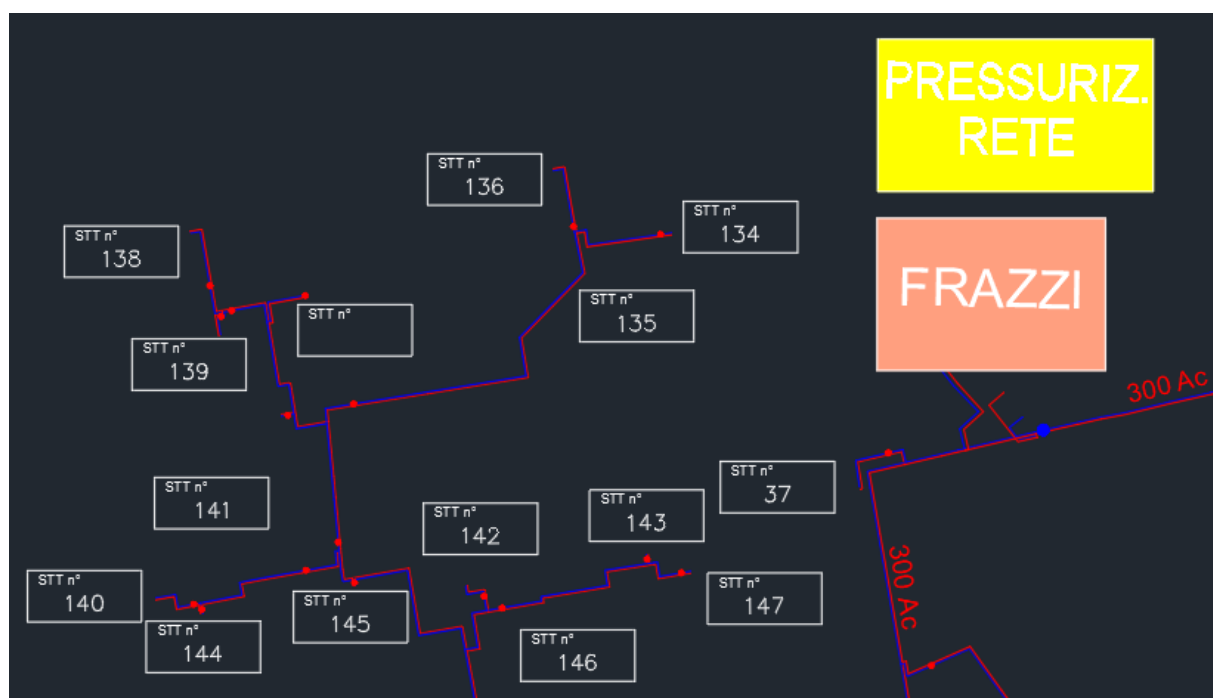


Figura 5: esempio di file DWG

Nella figura sottostante è riportato un piccolo estratto della mappa. In esso si possono distinguere gli elementi che costituiscono, tramite simboli grafici differenti, la rete in esame

- Le tubazioni, sono disegnate con tratti a colorazione rossa per indicare le condotte di mandata e con tratti a colorazione blu per indicare le condotte di ritorno. Si tratta di un misto di linee spezzate e polilinee dove queste ultime sono utilizzate soprattutto per rappresentare i tratti di maggiore lunghezza della rete principale. Le condotte di mandata e ritorno sono ulteriormente suddivise in due macro tipologie di tubazione: la rete principale appena nominata, chiamata "Condotta" che trasporta il fluido termovettore dalle centrali di produzione al cuore della rete, e quella di "Allaccio", che collega la rete principale a ogni singola sottostazione.

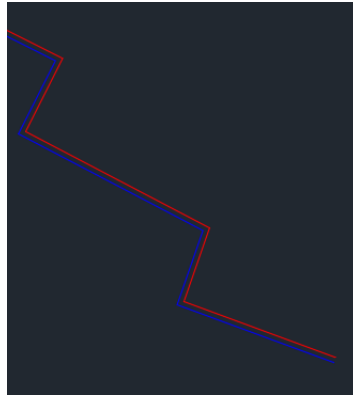


Figura 6: particolare di tubazioni

Questa classificazione trova corrispondenza nelle definizioni dei layer che per quanto riguarda le tubazioni sono organizzati in:

- “Condotta_Mandata-dn”, con $40 \text{ mm} \leq d_n \leq 400 \text{ mm}$, in funzione della portata trasportata
- “Condotta_Ritorno-dn”, con $40 \text{ mm} \leq d_n \leq 400 \text{ mm}$, in funzione della portata trasportata
- “Allaccio_Mandata-dn”, con $20 \text{ mm} \leq d_n \leq 250 \text{ mm}$, in funzione della portata trasportata
- “Allaccio_Ritorno-dn”, con $20 \text{ mm} \leq d_n \leq 250 \text{ mm}$, in funzione della portata trasportata

Dove d_n indica il diametro nominale della tubazione.

● Le sottostazioni, sono rappresentate con dei rettangoli bianchi all’interno dei quali è inserito un codice numerico identificativo per ogni utenza termica. Ad ognuno di questi codici sono associate, in altri file messi a disposizione dell’azienda le informazioni sulla effettiva posizione geografica delle utenze e la loro volumetria grazie alle quali è stato possibile determinare il consumo energetico di ogni sottostazione, dato che costituirà la parte principale del file di input “utenze.txt” per il programma di simulazione. Nel disegno AutoCAD, sia i rettangoli che il testo formano un unico layer chiamato “Sottostazioni”.

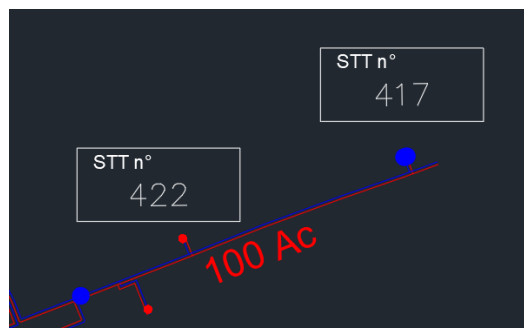


Figura 7: particolare di sottostazioni

● Le centrali termiche e le caldaie ausiliarie di alimentazione della rete similmente alle sottostazioni di prelievo di energia sono rappresentate con quadrati ai quali è assegnata una colorazione e un nome proprio anziché un codice numerico. In fase di elaborazione tramite Matlab delle informazioni ottenute, questi nomi saranno sostituiti da generici codici numerici per permettere la loro elaborazione da un programma che non accetta caratteri non numerici. Il layer di competenza per queste entità è nominato “Centrali”.

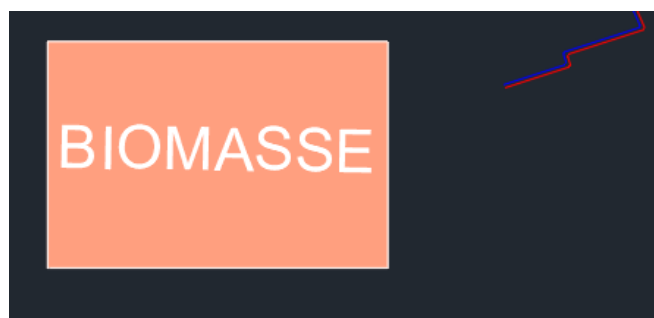


Figura 8: particolare di centrale

Il file descritto in questo modo si presta molto bene ad una estrapolazione di dati realizzata mediante semplici macro in AutoLisp poiché è rappresentata secondo un ordine molto sistematico.

3.2. LISP

LISP, acronimo di “list processor”, è un linguaggio di programmazione creato nel 1958 da John McCarthy. Si tratta di un linguaggio interpretato che non necessita quindi di processi intermedi quali la compilazione, operazione che trasforma ogni istruzione nel corrispondente linguaggio macchina, processo tipico dei linguaggi di programmazione come C/C++. Grazie alla sua potenza si è sviluppato sin dagli anni successivi alla sua creazione in numerosi campi di applicazione, tra cui l’interfaccia con i primi tentativi di intelligenza artificiale negli anni ’60. Tra i suoi maggiori pregi si annoverano la semplicità e l’immediatezza di utilizzo. La familiarizzazione con la sintassi ed i comandi tipici non risulta particolarmente difficile, rendendo possibile iniziare a scrivere alcune semplici programmi con un tempo di apprendimento relativamente breve. Presenta inoltre una buona velocità di esecuzione a patto di una corretta scrittura, anche se per caratteristica intrinseca del tipo di programma, non può raggiungere i livelli dei più sofisticati programmi di programmazione quali C/C++ o Python.

Grazie alla sua versatilità, sono nati negli anni numerosi dialetti di LISP, tra cui AutoLISP, utilizzato in questo progetto, che è integrato nelle versioni di AutoCAD e da cui si accede direttamente all’editor fin dalla prima versione del programma.

L’adozione in ambiente CAD di AutoLISP è stata permessa grazie alla sua capacità di trattare le liste dinamiche di dati.

Il termine LISP, come si è visto non è altro che l'acronimo di "List Processing", da cui si può dedurre che LISP è un linguaggio di programmazione che nasce e si sviluppa, facendone il principale elemento per la programmazione, attorno il concetto di lista. Una lista in AutoLISP è un insieme non ordinato di simboli, ossia qualsiasi elemento all'interno del programma, che può essere paragonata ad un array (o vettore) dinamico i cui elementi non abbiano un tipo specifico ma variabile a seconda del tipo di rappresentazione (esigenze). All'interno del software l'organizzazione dei dati passa attraverso l'utilizzo di queste sequenze di dati generici chiamate liste. Esse diventano quindi il principale elemento per la programmazione perché Lisp consente di creare liste di qualsiasi tipo, permette la ricerca di elementi al loro interno, consente la loro manipolazione, l'ordinamento ed eventualmente la loro cancellazione. Ma soprattutto le liste sono lo strumento per poter accedere al "database del disegno" ossia l'insieme di tutte le entità grafiche e non presenti nel disegno, siano esse visibili o invisibili, all'interno del quale sono contenute tutte le informazioni necessarie al programma per la loro corretta rappresentazione grafica.

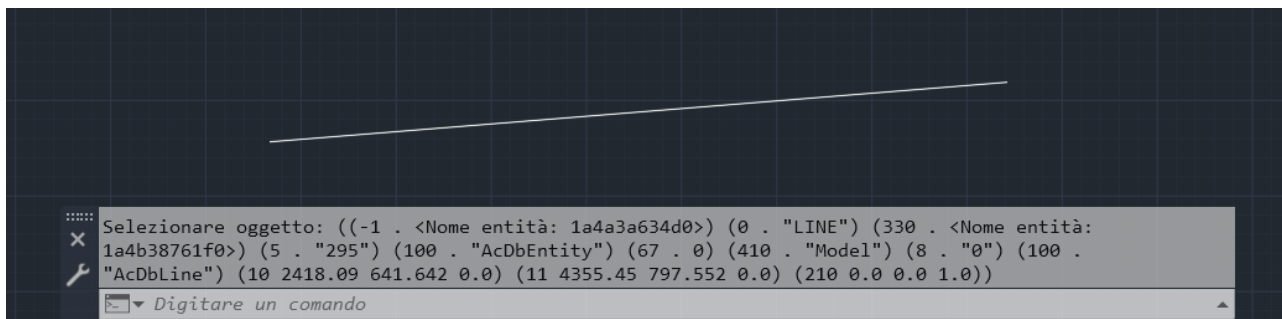


Figura 9: lista di definizione linea

L'immagine precedente mostra quella che viene definita la "lista di definizione" del più semplice oggetto grafico rappresentabile in AutoCAD, ossia una linea. La lista di definizione è per appunto una lista contenente tutte le caratteristiche attribuite alla determinata entità grafica, siano esse geometriche, di colore etc. La sua analisi permette di comprendere una fondamentale proprietà con cui vengono memorizzate le liste di informazioni all'interno del programma, ossia il fatto che siano a loro volta costituite da altre liste, definite "sottoliste".

Ogni sottolista, chiamata anche "gruppo", identifica una specifica proprietà o caratteristica dell'oggetto in esame ed è, nella maggior parte dei casi composta da una "coppia puntata", cioè da due valori, separati da un punto, dei quali il primo rappresenta il codice di gruppo mentre il secondo il valore vero e proprio della proprietà identificata dal primo valore, il codice di gruppo.

Esempi di quanto detto li si trova nell'immagine in figura precedente: la seconda parentesi ad esempio riporta come primo valore il codice di gruppo "0" indicando che il valore ad esso annesso è di che tipo di oggetto si tratta, ossia "LINE". La sottolista avente come codice di gruppo "8" indica a quale layer del disegno appartiene l'entità grafica. Sottoliste i cui valori non possono essere espresse in un unico carattere contengono più di due valori. È il caso per esempio delle sottoliste contenenti le informazioni geometriche dell'oggetto. In terza posizione infatti trova posto la parentesi contenente le coordinate X e Y del punto iniziale della linea rappresentata mentre nella parentesi successiva le coordinate X e Y del punto finale. I codici di gruppo in apertura di esse sono rispettivamente "10" e "11".

AutoCAD fa utilizzo di centinaia di codici di gruppo diversi ed ogni tipo di entità (linea, cerchio, testo, ecc..) ha i propri codici di gruppo.

Alcuni codici di gruppo, tuttavia, vengono utilizzati per ogni tipologia di elemento, uno di questi è quello specifico per indicare il nome entità. Contrassegnato dal codice di gruppo -1, il nome entità è infatti la chiave per poter accedere alla lista di definizione di uno specifico oggetto grafico.

Le operazioni svolte sul disegno AutoCAD consistono quindi nell'identificazione delle liste di definizione ed estrazione delle informazioni in esse contenute per ogni entità grafica tramite dei codici utilizzanti una serie di funzioni, le quali sono:

- **SSGET**: permette di selezionare qualsiasi entità contenuta nel file, prendendo tutti gli elementi esistenti o, tramite la ricerca di un filtro di appartenenza comune, uno specifico gruppo avente le stesse caratteristiche.

- **SSNAME**, estrae uno alla volta i nomi entità di tutti gli oggetti selezionati.

- **ENTGET**, riceve il nome entità in esame e restituisce la lista di definizione associata a quella specifica entità.

Una volta ottenuta la lista di definizione è possibile modificare o estrarre i dati. La modifica attraverso le liste di definizione non sarà trattata in questo elaborato perché inutile ai fini del progetto. L'estrazione delle informazioni richieste avviene invece attraverso l'uso delle seguenti funzioni:

- **SETQ**: permette di definire una variabile, creandola oppure modificandone il valore.

- **ASSOC**: cerca in una lista la sottolista che ha come primo elemento quello indicato e restituisce gli elementi seguenti in quella sottolista.

- **NTH**: permette invece di estrarre l'ennesimo elemento di una lista.

Queste funzioni sono alla base delle macro di istruzioni per l'estrazione delle informazioni dalle varie entità grafiche.

Nelle immagini seguenti si mostra come si presentano le liste di definizione per una generica tubazione, una sottostazione di prelievo e una centrale di immissione di energia termica:

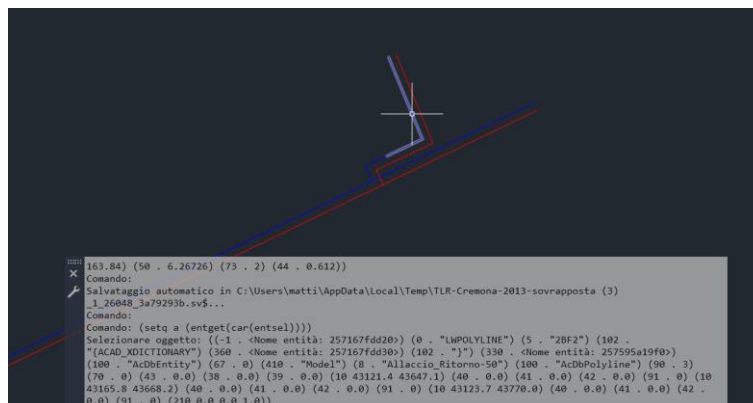


Figura 10: lista di definizione tubazione

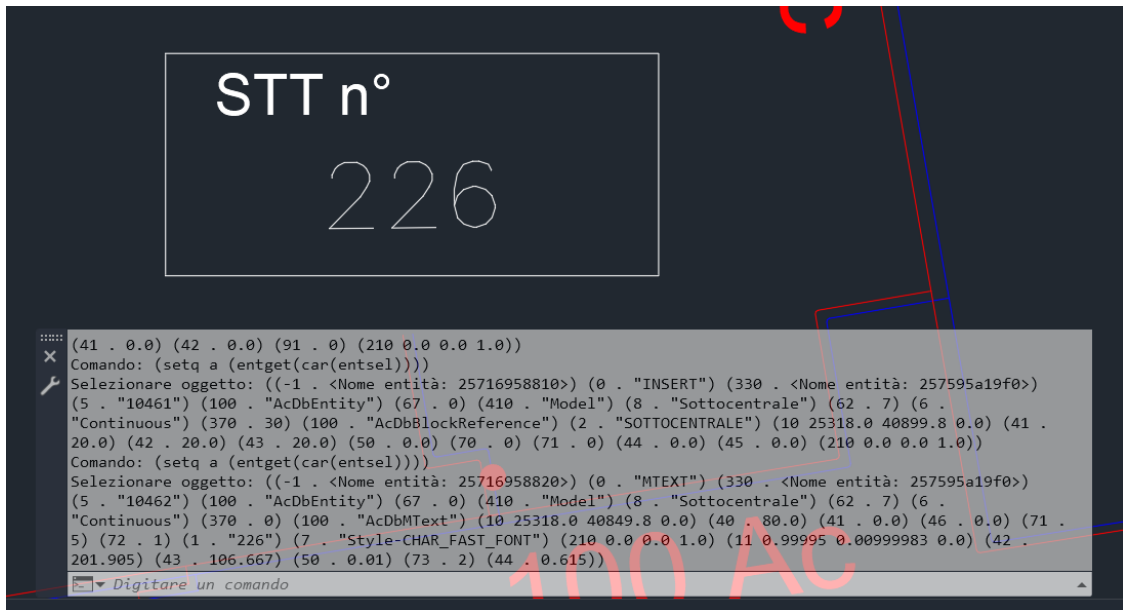


Figura 11: lista di definizione sottostazione

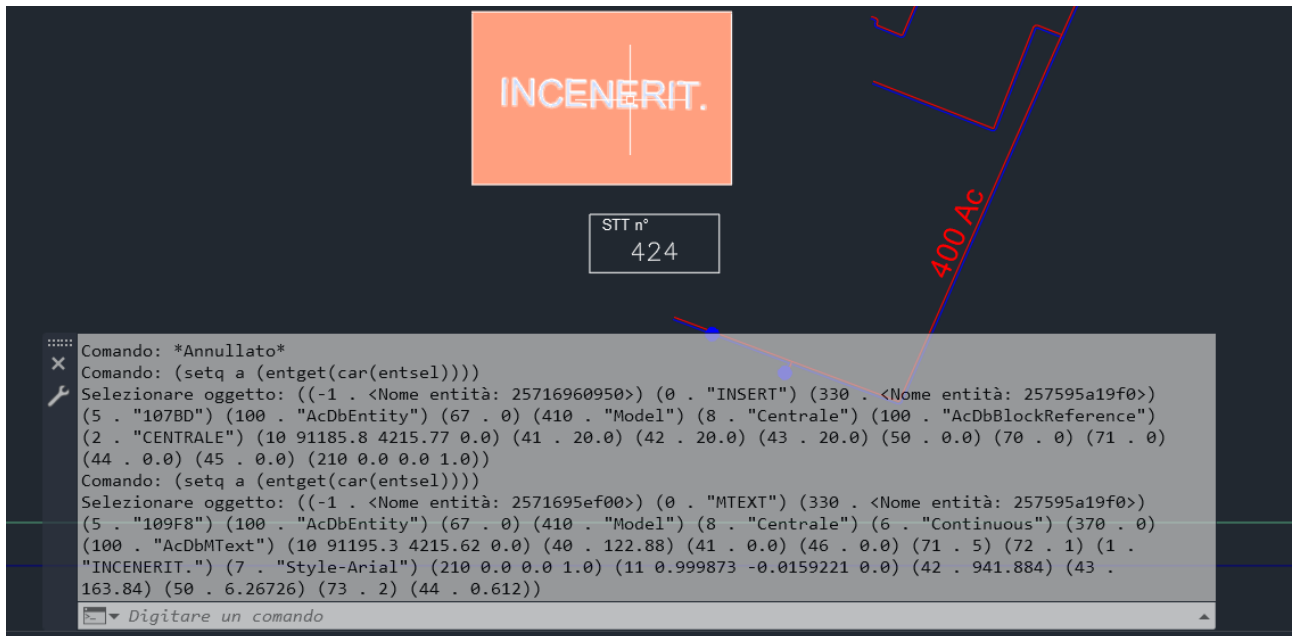


Figura 12: lista di definizione centrale

3.3. Macro di istruzioni

In questo paragrafo verranno mostrati gli schemi di flusso che descrivono la successione di operazioni svolte per l'estrazione delle informazioni contenute nel database del disegno tramite le funzioni presentate a inizio capitolo.

3.3.1 Elementi AutoLISP

Come primo passo ci si è limitati a ricavare un file che contenesse le coordinate X e Y dei punti che per ogni elemento tubo rappresentato costituissero i nodi di inizio e di fine della generica tubazione. In questa fase, alla ricerca di una forma che rendesse più immediata la comprensione della topografia della rete che verrà attuata servendosi di programmi che ne rendessero più veloce la composizione, si è anteposta la necessità di assicurarsi la presenza di tutti i nodi presenti sul disegno. Un nodo non è altro che un punto con coordinate X e Y a estremo di un segmento della rete di teleriscaldamento. Poiché ciascuna tubazione della rete è collegata ad essi, diventa fondamentale conoscerne le coordinate, in modo da identificare la posizione di un elemento indicando i nodi a cui esso è correlato.

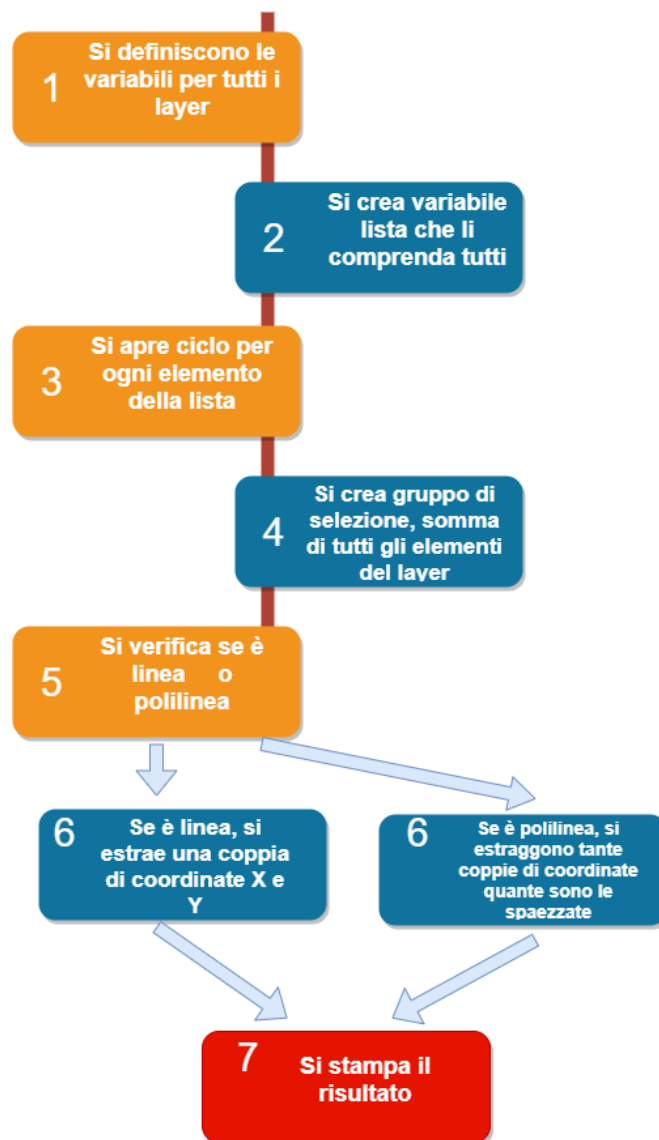


Figura 13: schema macro istruzioni AutoLisp elementi


```
40
59108.7876
52343.6192
59123.0647
52339.0188
40
59123.0647
52339.0188
59095.6571
52253.9609
40
59095.6571
52253.9609
59177.1128
52235.2927
40
59177.1128
52235.2927
59303.6153
52206.3005
40
59303.6153
52206.3005
60046.3336
52010.2152
40
60046.3336
52010.2152
60156.0910
51980.7428
```

Figura 14: output macro istruzioni Autolisp elementi

Nella figura soprastante è riportato un estratto del file di output di questa prima macro di istruzioni: alla descrizione di ogni generico elemento tubo sono destinate cinque righe, la prima delle quali è occupata dal valore del diametro della tubazione, seguita dalle coordinate X e Y del punto di inizio e per chiudere le coordinate del nodo di termine. Il file così ottenuto conta un totale di 47525 righe, indicando la presenza per il momento di un totale di 9505 elementi tubo.

Ora che siamo in possesso di queste prime informazioni intermedie, che nella forma attuale risultano inservibili per il software di simulazione, tramite esse è comunque possibile utilizzarli per eseguire una rappresentazione grafica della rete di teleriscaldamento della città di Cremona nella sua interezza tramite Matlab, dal momento che risulta l'unico modo per accertarsi della correttezza delle operazioni sin qui sostenute, data dimensione del file di origine unito alla sua complessità di architettura:

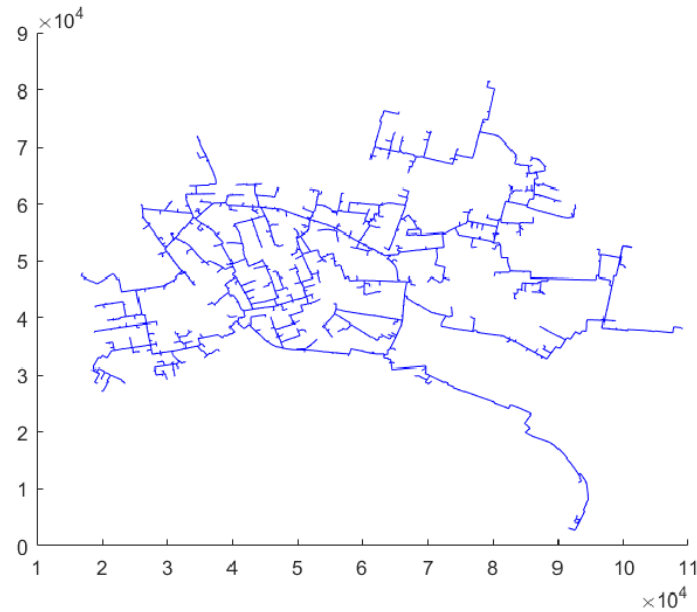


Figura 15: plot di rete

Possiamo anche rappresentare la rete in modo tale che risulti possibile identificare la dorsale principale della rete, e la parte ramificata che da essa parte. Andando a rappresentare le diverse tubazioni in funzione del diametro nominale, attribuendo una colorazione più chiara a quelle dotate di minor diametro e via via più scura (fa schifo, cambiare) con il crescere del diametro, si ottiene:

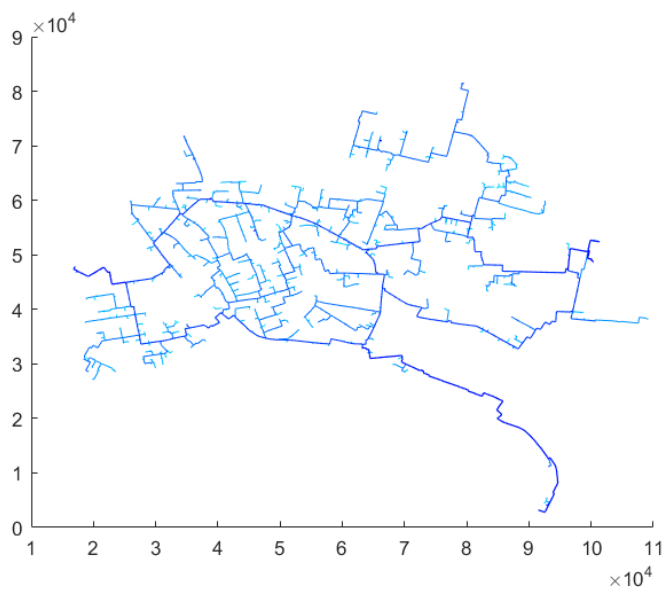


Figura 16: plot di rete 2

L'immagine mostra come da una dorsale principale a forma vagamente ellittica si dirama il resto della rete posata strategicamente nelle vie fra il centro e la periferia della città .

3.3.2 Utenze AutoLISP

Una volta ottenute le informazioni inerenti agli elementi tubazione si è passati alla ricerca di quelle riguardanti le centrali termiche e le sottostazioni di prelievo, la cui somma costituisce la totalità delle utenze presenti sulla rete. Sia per le utenze termiche, o sottostazioni, che per le centrali, la loro rappresentazione, come già detto consiste in caselle rettangolari. Entrambe le tipologie al loro interno contengono un codice numerico riferito alla generica sottostazione, mentre per le centrali è riportato il nome. Mentre la casella è memorizzata nel programma come "blocco", il nome è invece un'entità di tipo MTEXT. Ai fini del risultato finale è indifferente estrarre le coordinate del punto centrale dell'una quanto dell'altra, in quanto questa informazione è condivisa dalle due strutture. Si è optato per estrarre le coordinate del centro della casella di testo, verificando che sia verificata anche la richiesta filtro MTEXT.



Figura 17: schema macro istruzioni AutoLisp utenze

000	434	21482.3840	37715.0591
001	203	18252.1810	37613.3948
002	160	22040.9948	39011.9892
003	161	21398.7103	39213.6254
004	165	22319.7876	39301.2864
005	131	21659.9598	42141.9152
006	171	20842.7438	42718.3005
007	114	20769.7621	41867.7880
008	115	19322.4412	41782.9948
009	17	18541.0672	30448.4761
0010	379	21210.6528	34480.1453
0011	122	20922.8612	35875.7303
0012	23	20251.1425	35838.5817
0013	97	21177.8886	35173.6862
0014	241	78647.5841	81079.9104

Figura 18: output macro istruzioni AutoLISP utenze

In figura XX è esposto un estratto del codice di output di questo programma. Per ogni riga, contenente le informazioni di una generica utenze, sono presenti:

- in prima colonna l'indice numerico assegnatogli da AutoLISP
- in seconda colonna il codice con cui è presente sul disegno
- in terza colonna la coordinata X del centro del rettangolo
- in quarta colonna la coordinata Y del centro del rettangolo.

Sono presenti un totale di 581 sottostazioni e 8 centrali termiche, correttamente al risultato aspettato.

3.3.3 Elementi e utenze Matlab

A questo punto sono state estratte tutte le informazioni necessarie dalla mappa DWG e siamo quindi in possesso dei due file preliminari che costituiranno il punto di partenza per la creazione dei file di testo "nodi.txt" ed "elementi.txt" da fornire come input al programma TLR

Per prima cosa è necessario modificare il file "" per attribuirgli la forma richiesta dal programma di simulazione. L'obiettivo è quello di far sì che ogni riga rappresentasse un elemento nodo, avendo posizionate lungo le colonne quelle informazioni che erano deducibili esclusivamente dal file di input. La scrittura di questa macro di istruzioni ha richiesto un discreto tempo in quanto la logica con cui gli elementi sono stati riportati nel lungo elenco iniziale è stata casuale e non rispecchiava un ordine prestabilito comprensibile quale potesse essere la posizione di quel determinato elemento con la mappa. Era molto frequente che segmenti di una lunga tubazione non fossero rappresentati in sequenza ma fossero stati posizionati in maniera molto distante sul file. E' stata inoltre necessaria una continua modifica del codice in quanto eventuali errori presenti nell'output ero segnalati solamente all'avvio di un tentativo di simulazione perché non identificabili a prima vista. Alcuni di questi errori corrispondevano a degli errori di rappresentazione presenti nel disegno che erano nascosti alla vista. Un esempio di questi errori era la segnalata presenza di elementi paralleli all'interno della ricostruzione della topografia da parte del programma, che pur essendo presente visivamente sul disegno veniva correttamente riportato sotto l'aspetto di dati numerici.

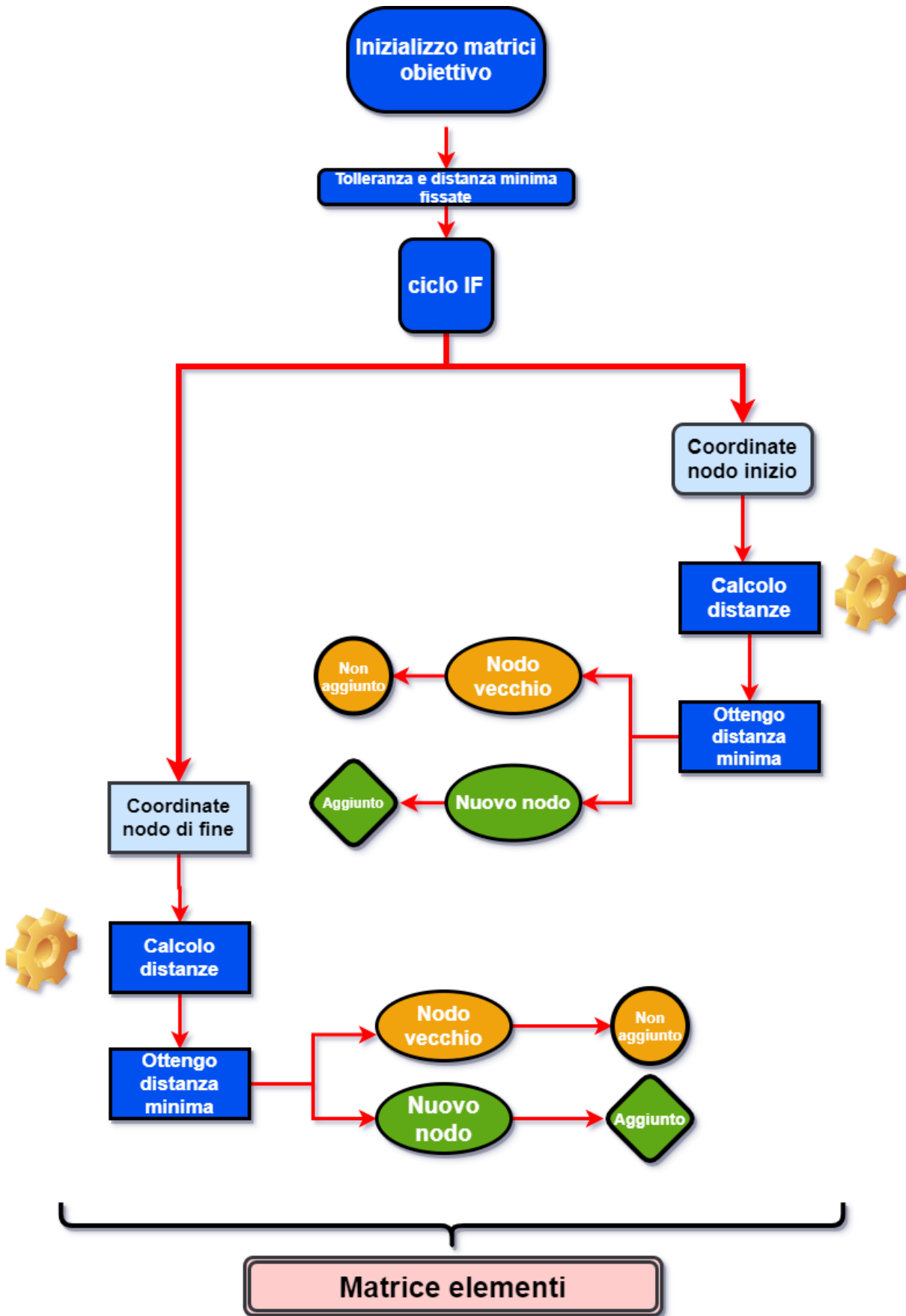


Figura 19: diagramma di flusso macro istruzioni Matlab elementi

Nell'immagine precedente è mostrato lo schema di flusso che riassume la macro di istruzioni mentre nelle immagini seguenti sono riportati due estratti dei file di output generati da questo codice:

139	140	65	62.4719
140	141	65	119.704
141	130	65	0.534376
142	143	65	54.8915
143	144	65	3.29096
145	146	65	15.3896
146	147	65	339.94
147	148	65	427.986
148	142	65	37.0278
149	145	65	58.4783
150	151	80	38.0326
151	152	80	13.3771
152	153	80	153.965
154	150	80	19.9999

Figura 20: output macro istruzioni Matlab elementi

Proprio come richiesto ogni riga contiene le informazioni sulle caratteristiche geometriche della tubazione e le connessioni che essa ha con i lati ad essa congiungente. Nelle prime due colonne trovano posto infatti i nodi di inizio e di fine, espressi come loro posizione di appartenenza nella tabella dei nodi, riportata nell'immagine successiva, il diametro della tubazione espressa in mm e la lunghezza espressa in m. Essa contiene 9487 righe per un numero analogo di lati.

Il secondo risultato ottenuto è un elenco di tutti i nodi presenti sul disegno, espressi tramite le coordinate X e Y avendo accuratamente evitato che venissero ripetuti. La certezza dell'unicità del singolo nodo acquista fondamentale importanza per i processi successivi. Questo file conta un totale di 9489 nodi e si presenta in questo modo:

59108.7876	52343.6192
59123.0647	52339.0188
59095.6571	52253.9609
59177.1128	52235.2927
59303.6153	52206.3005
60046.3336	52010.2152
60156.0910	51980.7428
60606.7545	51842.6357
60851.9539	51767.9025
60886.6781	51757.3191
18551.7029	31114.3857
18480.5229	31149.6253
18439.2985	31170.0346
41485.5246	44985.8631
41473.2735	44979.9611
41580.7190	45031.7229
38425.4074	52751.1808
38515.3804	52788.7087
38517.5219	52790.8360

Figura 21: output macro istruzioni Matlab utenze

Dopo aver ottenuto questi risultati si può procedere con la loro rielaborazione sempre tramite l'uso del software Matlab, al fine di arrivare alla creazione dei file di input finali richiesti.

Un primo passaggio intermedio da compiere prima di effettuare la creazione finale vera e propria consiste nel ricercare i nodi della rete appartenenti alla categoria di "Allaccio". Essi costituiscono le terminazioni della rete di teleriscaldamento, ovviamente non appartenenti alla dorsale principale ma alle estremità della parte ramificata e periferica della rete e che sono per questo caratterizzati da un valore di diametro minore. Sono da identificare tramite la caratteristica unica di non essere condivisi con altri elementi perché non connessi ad alcuno di essi. Essi costituiranno quindi gli estremi degli elementi tubo ossia i punti della rete presso cui si allacciano le varie utenze, sia di prelievo di energia che di immissione. Questo passaggio intermedio è di fondamentale importanza per la successiva operazione di abbinamento utenze termiche con il rispettivo nodo di allaccio ad esse più vicine. Per determinare quali nodi appartengono a questa categoria si è proceduto nel seguente modo:

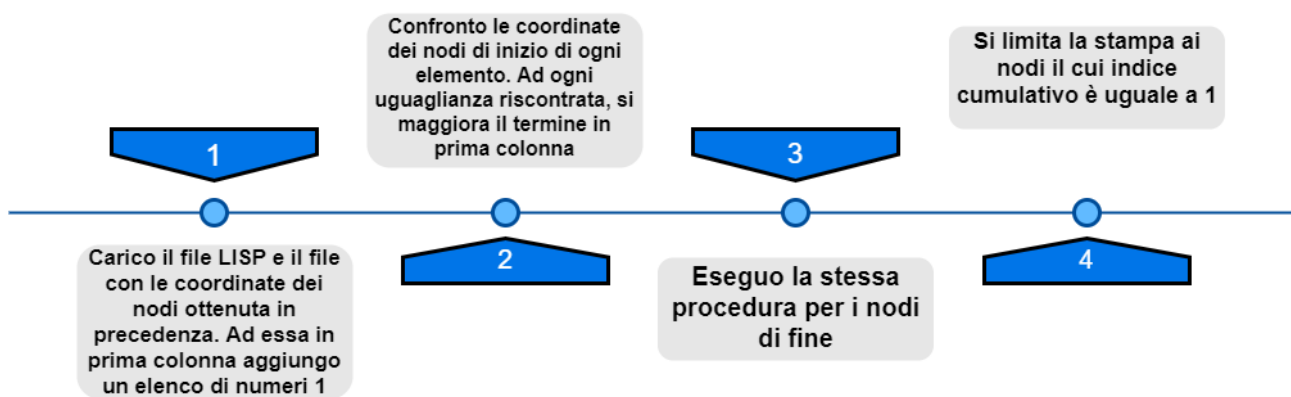


Figura 22: schema ottenimento nodi di allaccio

Si procede a stampare quindi sono quelli che hanno una sola ripetizione. Tramite questo procedimento si trovano 884 nodi di allaccio finali.

3.4. File Nodi

In questo capitolo verranno presentati i tre file di input al software sperimentale per il tentativo di simulazione dinamica della rete. La presentazione della successione di operazioni svolte per ottenere la loro versione finale è seguita da una breve spiegazione degli elementi che li compongono.

La creazione del file “nodi” è stata semplice e immediata perché ha richiesto la creazione di un file che contenesse le informazioni circa le proprietà del fluido termovettore differenziandole per le condotte di mandata e di ritorno:

Cnd	Tmand	Trit		Pmand	Prit
0	108	60	0	10	2
1	108	60	0	10	2
2	108	60	0	10	2
3	108	60	0	10	2
4	108	60	0	10	2
5	108	60	0	10	2
6	108	60	0	10	2
7	108	60	0	10	2
8	108	60	0	10	2
9	108	60	0	10	2
10	108	60	0	10	2
11	108	60	0	10	2
12	108	60	0	10	2
13	108	60	0	10	2
14	108	60	0	10	2
15	108	60	0	10	2

Figura 23: estratto di file nodi

In prima colonna trovano posto i codici numerici identificativi dei singoli nodi, mentre nelle colonne successive sono ripetuti per ognuno di essi i valori della temperatura nelle tubazioni di mandata e di ritorno, fissate rispettivamente a 108° C e 60 °C i valori delle pressioni che nelle medesime condotte raggiungono i valori di 10 e 2 bar. La colonna centrale occupata da soli elementi negativi rappresenta la quota rispetto al livello del mare espressa in metri a cui si trovano i nodi. A causa dell'assenza della terza coordinata, riferita alla componente Z, sul file AutoCAD d'origine, trattandosi questo di un disegno 2D, non si dispone di questo dato.

Uno sviluppo futuro del programma potrebbe l'aggiunta di questa opzione allo scopo di poter fornire un risultato sulle perdite di carico della rete che possa tenere conto anche delle componenti dovute a una differenza di altitudine tra due nodi tra loro connessi.

3.5. File elementi

Il punto di partenza per la creazione del file “elementi” è costituito dal file di output ottenuto nel paragrafo 3.3 e di cui si è riportato un estratto nell’immagine 19. La struttura del file è la medesima, ogni riga rappresenta un elemento tubo, per il quale è nota la lunghezza grazie alla conoscenza dei nodi terminali di inizio e di fine.

Per completare il file è necessario, oltre a modificare l’ordine attuale delle colonne, assegnare ad ogni condotta i valori di tre coefficienti US, MC e scabrezza necessari per la risoluzione del bilancio di energia e il calcolo delle perdite di pressione.

3.5.1. schematizzazione condotta e scambio termico



Figura 24: particolare tubazione per teleriscaldamento

L’immagine mostra la composizione standard delle tubazioni utilizzate in una rete di teleriscaldamento. Si tratta di condotte preisolate costituite da tubi a sezione circolare concentrici ognuno costituito di materiale diverso. I coefficienti US e MC è stato necessario calcolarli partendo dalle informazioni estrapolate da file contenenti le caratteristiche costruttive reperite dalla letteratura tecnica, di cui si riporta una tabella in appendice.

La determinazione del coefficiente US passa attraverso una schematizzazione della tubazione di questo tipo:

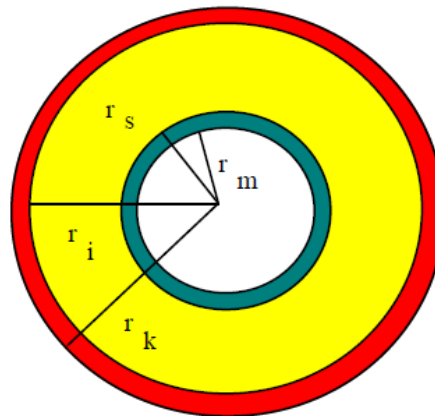


Figura 25: schematizzazione condotta per teleriscaldamento

I tre strati di differente materiale di cui è costituita la condotta sono:

- tubo di servizio in acciaio di spessore compreso tra r_m e r_s
- coibentazione in schiuma di poliuretano espanso di spessore compreso tra r_s e r_i
- rivestimento esterno protettivo con guaina di polietilene di spessore compreso tra r_i e r_k

Ogni strato ha una propria resistenza termica, capacità del materiale di opporsi a un flusso di calore attraverso un mezzo. Dall'appendice fornita da un costruttore è possibile conoscere lo spessore di ogni strato componente la tubazione. E' stato quindi possibile determinare le resistenze termiche per unità di lunghezza dei tre strati costituenti la tubatura, ottenute modellano lo scambio di calore come conduzione in geometria cilindrica, per ogni valore di diametro

- $R_{acc} \left[\frac{m \cdot K}{W} \right]$, resistenza termica per unità di lunghezza della parete di acciaio del tubo di servizio

$$R_{acc} = \frac{1}{2 * \pi * K_s} * \ln \left(\frac{r_s}{r_m} \right)$$

- $R_{poliur} \left[\frac{m \cdot K}{W} \right]$, resistenza termica per unità di lunghezza della schiuma isolante in poliuretano:

$$R_{poliur} = \frac{1}{2 * \pi * K_{poliur}} * \ln \left(\frac{r_i}{r_s} \right)$$

- $R_{guaina,PE} \left[\frac{m \cdot K}{W} \right]$, resistenza termica per unità di lunghezza della guaina in polietilene di rivestimento

$$R_{guaina,PE} = \frac{1}{2 * \pi * K_{guaina,PE}} * \ln \left(\frac{r_k}{r_i} \right)$$

Per i valori di riferimento dei valori di conduttività termica dei vari strati si è preso come riferimento quanto riportato sul catalogo del produttore, quindi:

$$\bullet K_{acc} = 56.7 \frac{W}{m \cdot K}$$

$$\bullet K_{poliur} = 0.03 \frac{W}{m \cdot K}$$

$$\bullet K_{guaina,PE} = 0.35 \frac{W}{m \cdot K}$$

Si calcola in seguito la resistenza termica totale per unità di lunghezza ottenuta come la somma delle resistenze termiche di ogni singolo strato.

$$R_{TOT} = R_{acc} + R_{poli} + R_{guaina,PE}$$

E il coefficiente di dispersione termica per unità di lunghezza $U \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$

$$U = \frac{1}{R_{TOT}}$$

Il coefficiente U calcolato sopra descrive tuttavia unicamente il trasporto di calore all'interno della tubazione e non tiene in considerazione il fatto che le condotte sono interrate nel suolo, con il quale avviene uno scambio termico, e che avviene un ulteriore scambio di calore anche fra tubazione di mandata (calda) con tubazione di ritorno (fredda).

Il flusso in questione non è più monodimensionale ma, per evitare di dover ricorrere alla definizione di complesse equazioni per descrivere il fenomeno in più dimensioni, si fa riferimento nuovamente ad un approccio nuovamente monodimensionale, ricorrendo ad un fattore di forma s tipico per la geometria in esame.

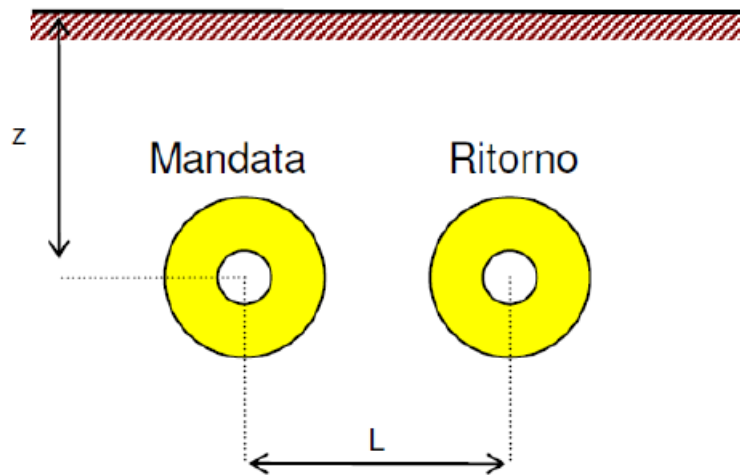


Figura 26: schema tubazioni interrate

Dopo aver supposto un valore di conducibilità termica del terreno $K_{ground} = 0.864 \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$, si calcola la resistenza complessiva per unità di lunghezza dovuta all'interramento delle tubazioni come

$$R_{ground} = \frac{1}{s * K_{ground}} = \frac{1}{2 * \pi * K_{ground}} * \ln\left(\frac{4 * z}{d_k}\right)$$

dove $h = z + R_0 * K_s$ con $R_0 = 0.0685 \left[\frac{m^2}{K * W}\right]$ e z è la profondità complessiva dell'asse della tubazione espressa in metri (si suppone un valore di 60 cm), mentre d_k è il diametro totale della condotta.

Si considera ora lo scambio termico tra tubazione di mandata e tubazione di ritorno, la resistenza associata a questo fenomeno è

$$R_{mr} = \frac{1}{2 * \pi * K_{ground}} * \ln\left(1 + \frac{4 * (z + 0.685 * K_{ground})^2}{L^2}\right)$$

Non disponendo del valore dell'interasse tra le due tubature, lo si è calcolato ottenendolo dal file DWG: prendendo le coordinate dei punti finali di una condotta di ritorno e di mandata parallele, se ne è calcolata la distanza. Si è ottenuto un valore di L pari a 1.2 m. Una volta ottenuti i valori delle resistenze è possibile calcolare la resistenza totale

$$R_{TOT} \left[\frac{m * K}{W}\right] = R_{acc} + R_{poliur} + R_{guaina,PE} + R_{ground} + R_{mr}$$

e il coefficiente di dispersione termica

$$U_{TOT} \left[\frac{W}{m * K}\right] = \frac{1}{R_{TOT}}$$

Tramite foglio di calcolo excel si sono ottenuti i seguenti valori

D _N [mm]	R _{TOT} [m*K/W]	U [W/mK]
19	7,190779493	0,139067
20	6,989764608	0,143066
25	6,027334256	0,165911
40	4,974534259	0,201024
50	4,485405349	0,222945
65	4,057213847	0,246475
80	3,743181203	0,267152
100	3,570310463	0,280088
125	3,118850148	0,320631
150	2,674323518	0,373926
200	2,471515129	0,40461
250	2,540847156	0,39357
300	2,242520247	0,445927
350	2,296923769	0,435365
400	2,175671588	0,459628

Figura 27: coefficiente globale scambio per diametri

La prima condotta presenta un valore di diametro nominale di 19 mm, questo è un valore ipotizzato e corrisponde a quella tipologia di tubazioni presenti sul file AutoCAD senza specificazione del diametro. Appartengono infatti a un layer chiamato "ND". Quindi gli si è attribuito questo valore.

Analizzando invece MC, come detto prima esso rappresenta un termine inerziale composto dalla somma della massa del tubo e della massa d'acqua in esso contenuta per unità di lunghezza misurato in $[\frac{kg}{m}]$. Il dato sul peso al metro delle barre delle tubazioni è stato ottenuto da valori di letteratura mentre per l'acqua si è considerata densità costante pari a $1000 [\frac{kg}{m^3}]$. Sempre tramite foglio di calcolo excel si è arrivati al seguente risultato:

D_N [mm]	m_{TOT}/m [kg/m]	D_N [mm]	m_{TOT}/m [kg/m]
19	3,314028737	19	3,314028737
20	3,504159265	20	3,504159265
25	4,090873852	25	4,090873852
40	6,696637061	40	6,696637061
50	8,653495408	50	8,653495408
65	11,67830724	65	11,67830724
80	14,86654825	80	14,86654825
100	22,29398163	100	22,29398163
125	29,8318463	125	29,8318463
150	40,52145868	150	40,52145868
200	65,75592654	200	65,75592654
250	99,10738521	250	99,10738521
300	134,7658347	300	134,7658347
350	170,221275	350	170,221275
400	219,8137061	400	219,8137061

Figura 28: termine inerziale in funzione di diametro

Il valore di scabrezza relativa è stata posta universalmente uguale a 0.00007

Disponiamo ora di tutti i dati necessari per compilare il file e "elementi.txt". Sono state sufficienti pochi semplici programmi ognuno con un piccolo determinato compito per ottenere il seguente risultato:

7	0.04	471.35	7e-05	0.201	6.6967	7	8
8	0.04	256.335	7e-05	0.201	6.6967	8	9
9	0.04	36.3012	7e-05	0.201	6.6967	9	10
10	0.05	79.4256	7e-05	0.2229	8.6534	11	12
11	0.05	45.9999	7e-05	0.2229	8.6534	12	13
12	0.05	13.5986	7e-05	0.2229	8.6534	14	15
13	0.05	105.665	7e-05	0.2229	8.6534	16	14
14	0.05	97.4858	7e-05	0.2229	8.6534	17	18
15	0.05	3.0185	7e-05	0.2229	8.6534	18	19

Figura 29: struttura finale file elementi

In quarta colonna viene inserito il valore della scabrezza relativa delle tubazioni, universalmente fissata a 0.00007

3.5.2 Risoluzione problemi grafici

Nel momento in cui si è fornito il file “elementi.txt” così definito in input al programma, quest’ultimo non era in grado di avviare la simulazione dinamica della rete in quanto segnalava la presenza di porzioni della rete non connesse, segno che l’elaborazione per la ricostruzione della topografia della rete con le informazioni fornitegli non gli consentiva di ricostruire un’unica struttura che risultasse continua ma interrotta in uno più punti.

L’individuazione di questo errore è stato un processo dispendioso in termini di tempo e la sua soluzione è stata possibile, nonostante le frequenti modifiche al file elementi, da ognuna delle quali era atteso il definitivo risolvimento, solo tramite una profonda riscrittura del programma a opera del relatore Professore Federico Viganò, che riuscisse a rappresentare correttamente la rete.

Il primo approccio utilizzato alla ricerca dell’errore è stato quello di individuare se fossero effettivamente presenti delle condotte non connesse alla macro struttura principale, visionando la mappa sul file AutoCAD di origine. Durante la fase di compilazione del file “utenze.txt”, che verrà spiegata nel successivo paragrafo, è stato possibile riscontrare le prime evidenze di questo problema segnalato in due punti piccole sezioni della rete che si presentavano in effetti separate dal resto della rete. Si riporta doppia immagine di questa situazione:

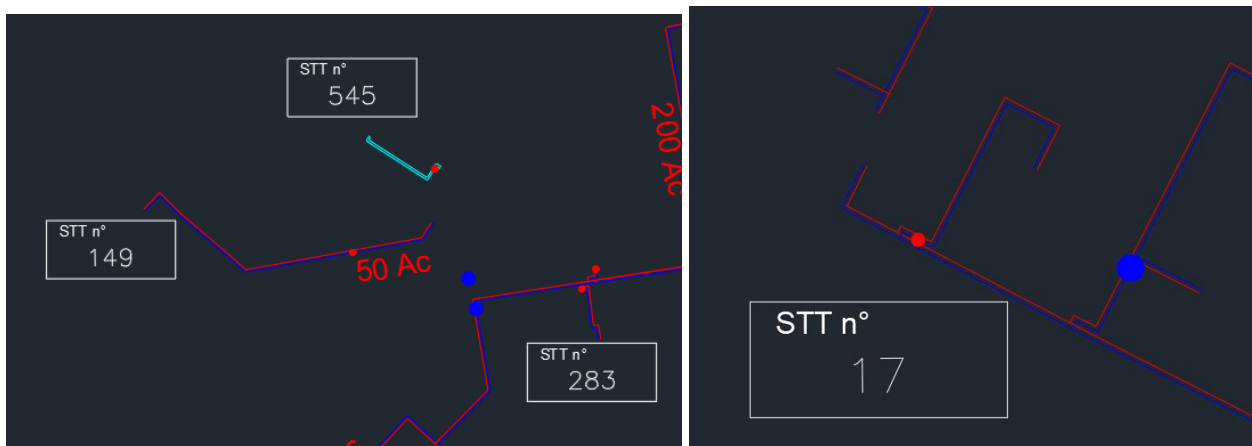


Figura 30: rete non connessa I

Nel tentativo di ristabilire la continuità della rete si è intervenuti manualmente aggiungendo al file “elementi” le righe che descrivessero le nuove tubazioni che connettessero i nodi erroneamente non collegati, dopo averne calcolato la distanza che li separava grazie alla conoscenza delle coordinate. Sono stati aggiunte anche altre due righe che rappresentassero degli elementi tubo fittizi, di lunghezza arbitrariamente fissata a 1 m, allo scopo di abbinarne gli estremi di fine alle utenze che erano precedentemente associate ai nodi degli elementi erroneamente separati.

9488	0.05	777.382	0.00007	0.2229	8.6534	7107	9219	
9489	0.08	1	7.00E-05	0.2672	14.8666	9217	9480	
9490	0.08	1	7.00E-05	0.2672	14.8666	7109	9481	
9491	0.15	127.0406529	0.00007	0.3739	40.5215	2262	2321	

Figura 31:

Figura 31: prima correzione rete non connessa

La permanenza dell'errore di non connessione della rete ha richiesto un'analisi più approfondita del file "elementi" alla ricerca di quelle condotte che risultassero non connesse alla rete. Esaurite le possibilità di individuare situazioni analoghe da un semplice esame visivo, si è ragionato a partire dal file elementi alla ricerca di incongruenze tra quanto era presente e la realtà che avrebbe invece dovuto rappresentare. Si è allora calcolato, aggiungendo due colonne al file originario, quante volte comparissero nelle ultime due colonne del file "elementi" gli indici numerativi dei nodi alla ricerca di quelle tubazioni le cui terminazioni di inizio e di fine risultassero entrambe nodi di allaccio, andandole così a identificare come delle condotte topograficamente separate dall'insieme principale della rete.

Il fatto che questa indagine ha avuto successo ha permesso di prendere atto della presenza sul file AutoCAD di origine di una serie di errori di natura grafica, la cui individuazione manuale sarebbe risultata impossibile data la vastità e la complessità della rete in esame.

Una tipologia di errore riscontrata è la seguente:

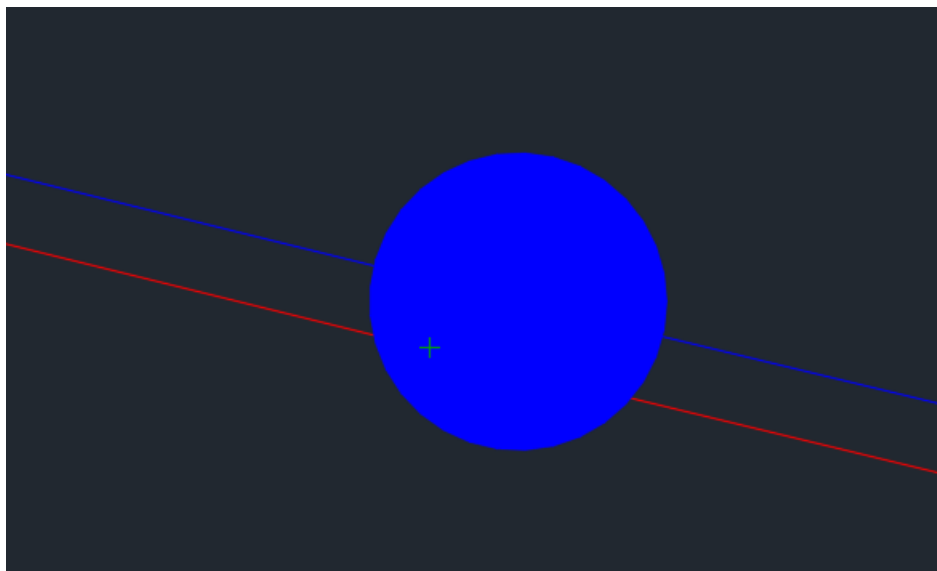


Figura 32: rete non connessa II

Presenza di un segmento rappresentante condotta di ritorno la cui posizione, in corrispondenza di una valvola, era erroneamente invertita con una condotta di mandata, creando quindi un'interruzione di continuità.

La seconda tipologia di errore consisteva in un'inversione di posizione tra i segmenti finali delle condotte di mandata e di ritorno di tubazioni appartenenti alle porzioni di rete ramificata:

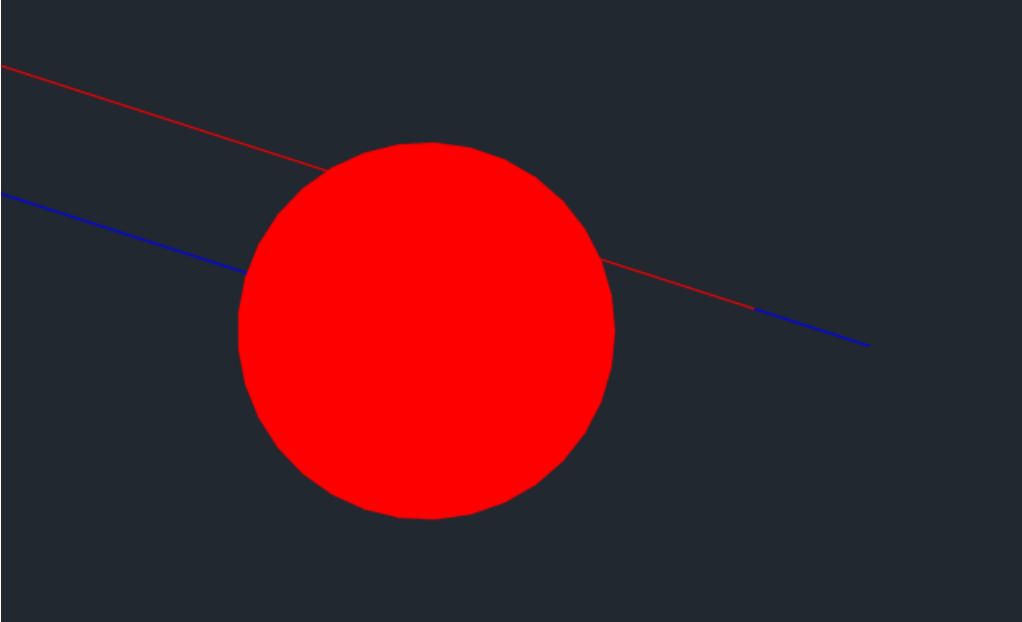


Figura 33: rete non connessa III

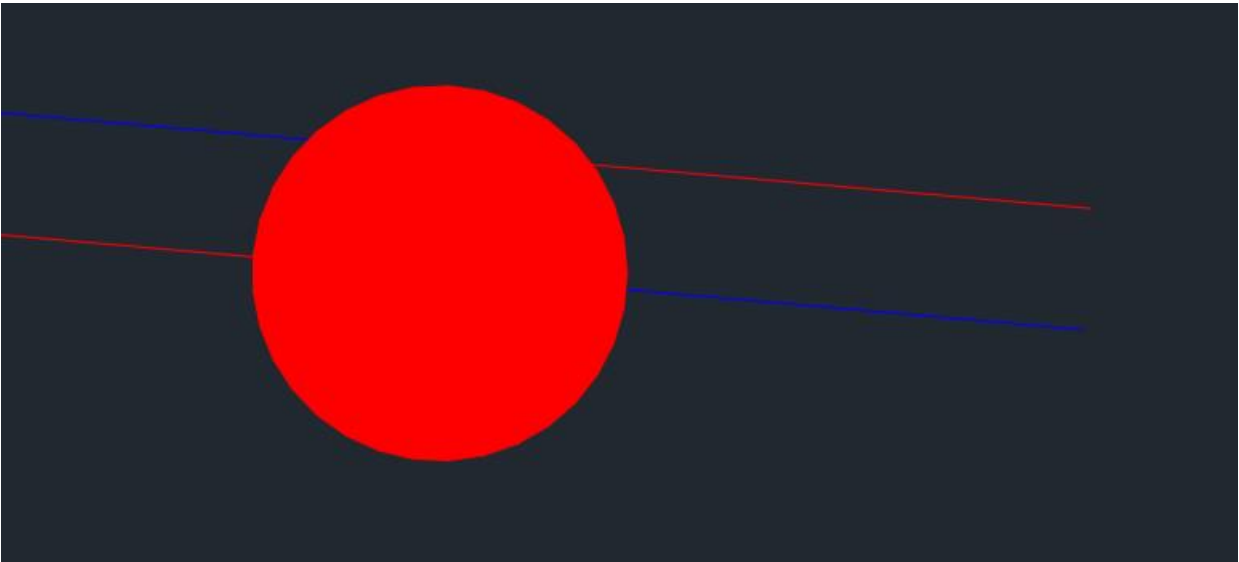


Figura 34: rete non connessa IV

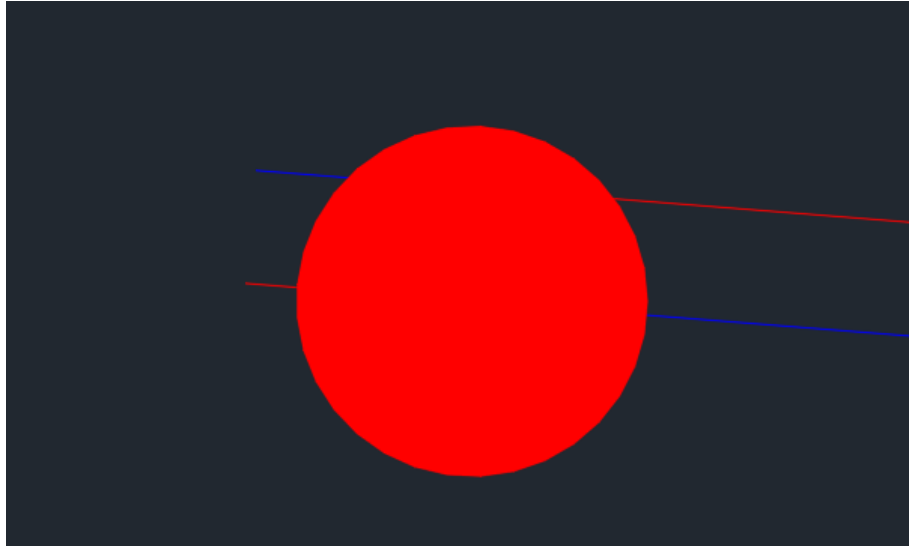


Figura 35: rete non connessa V

Sono stati quindi eliminati dal file “elementi” le righe riferite a questi tratti di condotta mal posizionati. Questa operazione ha comportato quindi anche l’eliminazione dei rispettivi nodi di terminazione, comportando una loro riduzione in numero rispetto al numero riportato sul file “nodi”. Dal momento che era necessario mantenere la continuità di numerazione all’interno del file “elementi”, per evitare di riassegnare un indice numerativo a tutti gli elementi rimasti, si è aggirato il problema creando una nuova sequenza di elementi fittizi, anch’essi di lunghezza pari a 1 m come i precedenti, ognuno dei quali presenta come punto di termina uno dei nodi originariamente appartenuto alle condotte eliminate. Per non modificare la geometria della rete, si è deciso di connetterli a delle sezioni della rete non abbinate ad alcuna utenza.

9492	0.15	1	0.00007	0.3739	40.5215	9092	3113
9493	0.15	1	0.00007	0.3739	40.5215	34	3114
9494	0.15	1	0.00007	0.3739	40.5215	8491	6912
9495	0.15	1	0.00007	0.3739	40.5215	8780	6913
9496	0.15	1	0.00007	0.3739	40.5215	9132	6914
9497	0.15	1	0.00007	0.3739	40.5215	2283	6915
9498	0.15	1	0.00007	0.3739	40.5215	8517	8217
9499	0.15	1	0.00007	0.3739	40.5215	3377	8218
9500	0.15	1	0.00007	0.3739	40.5215	975	8229
9501	0.15	1	0.00007	0.3739	40.5215	1026	8230
9502	0.15	1	0.00007	0.3739	40.5215	1083	8231
9503	0.15	1	0.00007	0.3739	40.5215	30	8232

Figura 36: seconda correzione rete non connessa

Purtroppo il problema persisteva nuovamente anche in seguito a questa ulteriore modifica. Essendo esaurite le problematiche legate agli errori connessi al disegno, l’individuazione del problema è stata possibile tramite una profonda modifica del codice sorgente ad opera del relatore Professor F. Viganò. Il passaggio chiave è stata la creazione di un file intermedio di ausilio chiamato “mappa.txt” di cui si presenterà un estratto nel paragrafo 5.1.

L'analisi di questo nuovo file ha fatto emergere l'esistenza di alcune porzioni della rete, di diverse dimensioni e quindi comprendente un diverso numero di tubazioni, che risultavano effettivamente non connesse alla restante parte. Questa nuova tipologia di errore era dovuta al fatto che alcuni punti che costituiscono dei nodi raccordo tra diverse tubazioni non erano stati interpretati come tali in fase di creazione del file "nodi" oppure erano stati omessi nella scrittura del file "elementi", le condotte che le connettersero al resto della rete.

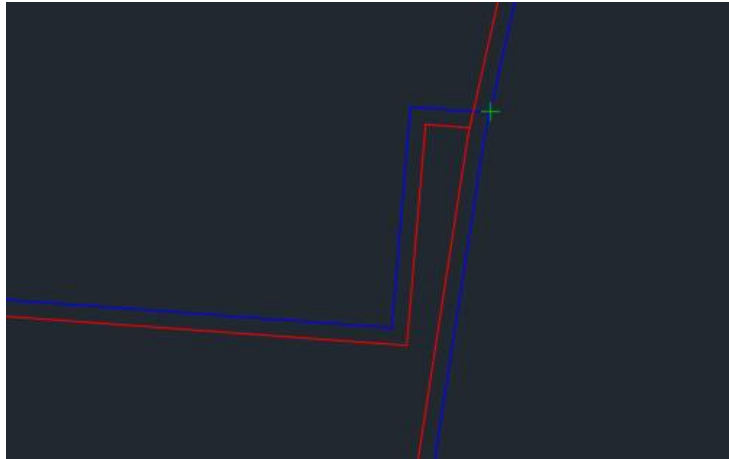


Figura 37: rete non connessa VI

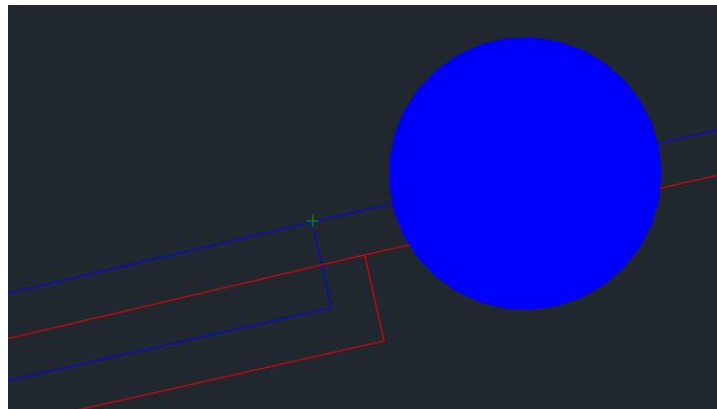


Figura 38: rete non connessa VII

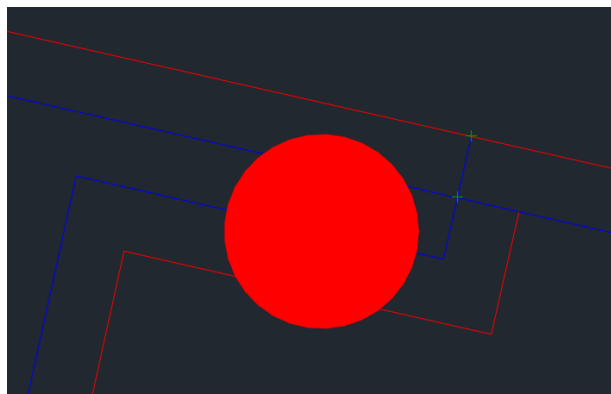


Figura 39: rete non connessa VIII

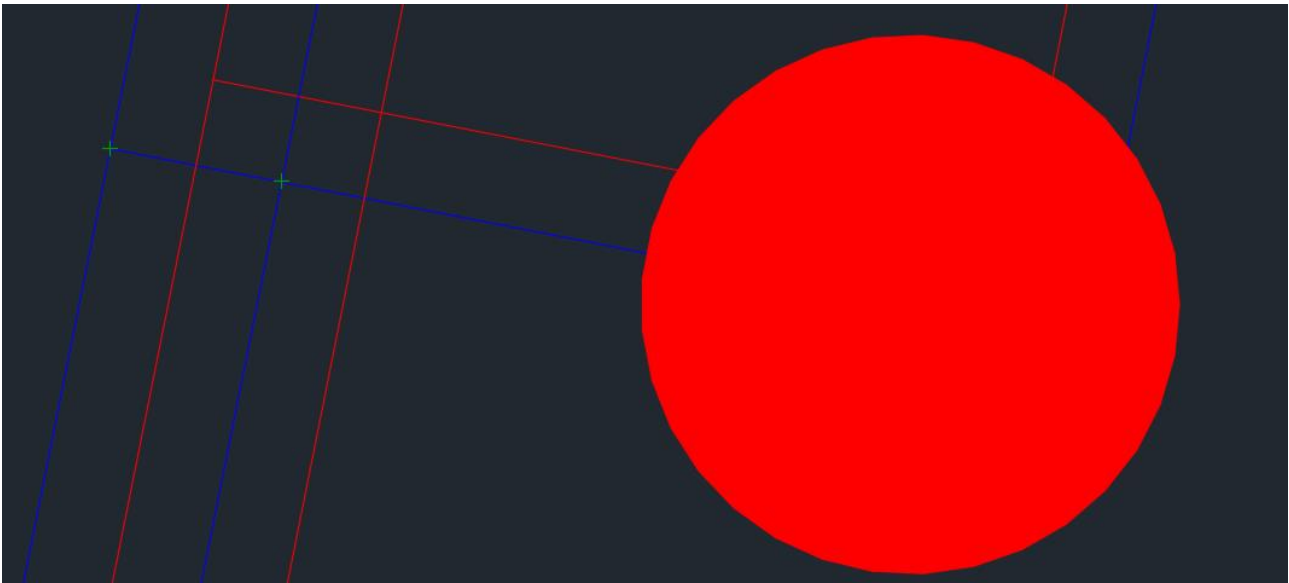


Figura 40: rete non connessa IX

E' stato quindi necessario eliminare le righe di elementi che avessero uno dei nodi segnalati come estremi e sostituirle con i nuovi elementi che rispecchiassero correttamente la realtà topografica della rete.

A seguito di queste modifiche, il file "elementi" contiene ora 9504 righe.

3.6 Utenze

La creazione di questo file, nonostante non sia stata la più difficoltosa dal punto di vista delle attività svolte, si è rivelata essere molto dispendiosa in termini di tempo investito. L'obiettivo è quello di creare un file che mostri quante sono le utenze allacciate alla rete, quale sia il numero del nodo attraverso cui avviene questo allacciamento, e che riporti il valore delle richieste energetiche orarie espresse in termini di potenza termica lungo il periodo temporale di prova assunto per la simulazione.

3.6.1 Abbinamento utenze-nodi

Per cominciare è stato necessario creare tramite programma Matlab, un file intermedio che abbinasse ad ogni singola utenza estratta dalla rete AutoCAD il nodo di allaccio della rete ad essa più vicina. Con questa operazione si suppone che tale nodo rappresenti la terminazione della rete di teleriscaldamento presso cui le sottostazioni prelevano l'energia richiesta e le centrali la immettano.

Il file intermedio ottenuto tramite macro AutoLisp illustrato in 3.3.2, figura 18 e la matrice costituita dai soli nodi di allaccio ottenuta in 3.3.3 costituiscono gli elementi di partenza da fornire in input a un nuovo codice che svolga questa nuova sequenza di operazioni, i cui passaggi sono:

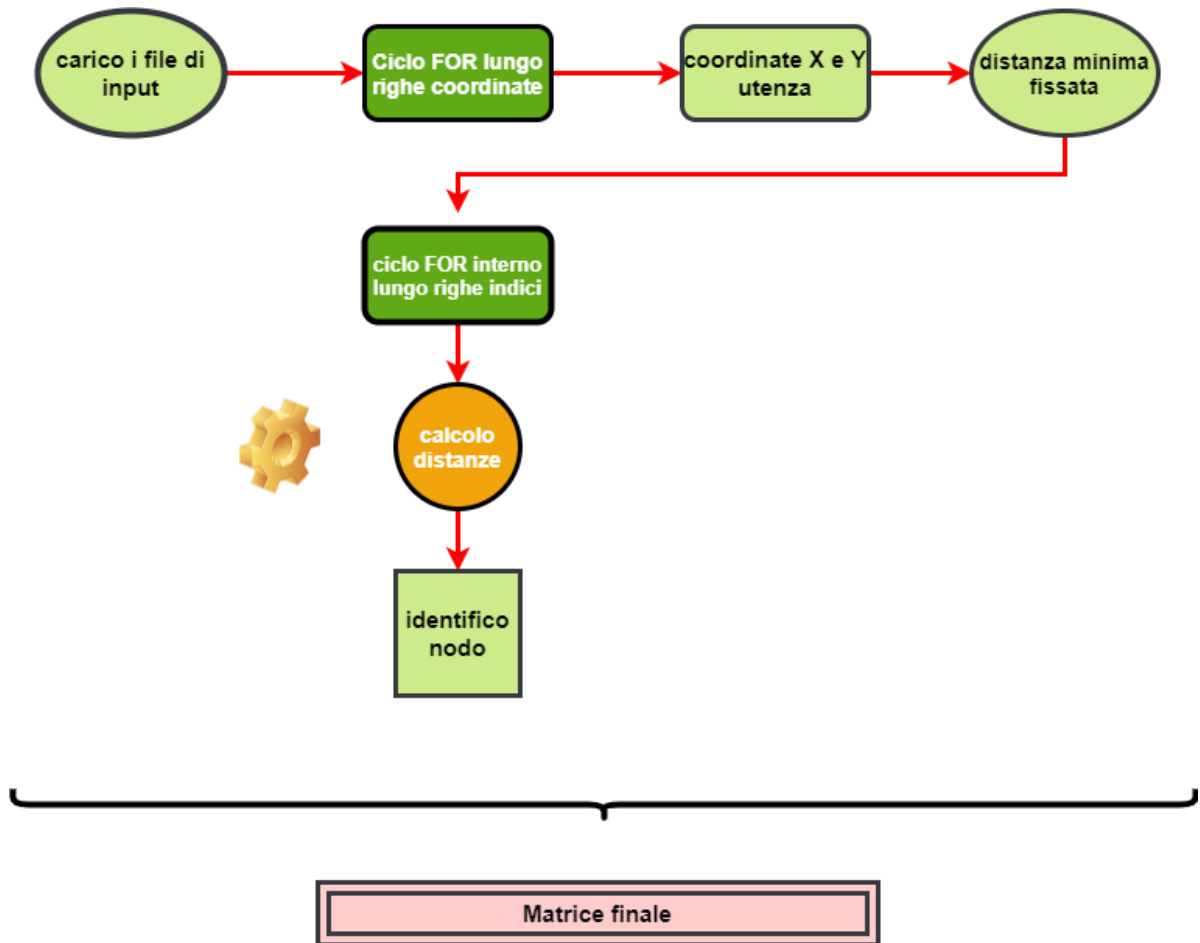


Figura 41: diagramma di flusso abbinamento utenze-nodi allaccio

Il file di output si figura come l'estratto riportato nella figura sottostante:

434	6744
203	7947
160	6701
161	6770
165	6701
131	6001
171	6005
114	6015
115	6982
17	2322
379	7003
122	9366
23	9366
97	6073

Figura 42: output abbinamento utenze-nodi allaccio

3.6.2 Creazione file

La fase successiva è stata la creazione del file “utenze” vero e proprio tramite programma Excel per poi effettuare la conversione in formato .txt a risultato ottenuto per renderlo leggibile dal software sperimentale di simulazione.

Il primo passo è consistito nell’importare il risultato della precedente elaborazione Matlab in un nuovo foglio di calcolo Excel. Le due colonne ottenute sono state ordinate in modo da avere i codici numerici identificativi delle sottostazioni posizionati in ordine crescente. Questo passaggio intermedio è risultato necessario per rendere più efficienti le operazioni successive.

Siccome il mio lavoro si è svolto in assenza di possibilità di comunicazione con l’azienda Linea Holding S.P.A, la società che possiede e gestisce l’impianto della rete di teleriscaldamento di Cremona, titolare quindi dei documenti con le informazioni inerenti alle utenze allacciate alla rete. Per poter procedere correttamente alla creazione del file senza incorrere in errori, è’ stato quindi necessario visionare gli elaborati excel realizzati dagli allora laureandi Giacomo Gabbiani e Gianluca Dadda, che hanno svolto durante l’anno accademico 2017/2018 il proprio stage presso l’azienda e dal laureando Alessandro Platoni, che svolse il proprio stage presso la società consortile LEAP-Laboratorio Energia e Ambiente Piacenza. Essi sono riusciti nel compilare un elenco di tutte le utenze allacciate alla rete con annesso l’indirizzo per ogni utenza comprensivo del numero civico.

La prima versione di questo file, avvenuta per mano dei primi tesisti, riportava le informazioni in totale di 537 utenze, numero che è stato esteso fino a più 600 dal secondo tesista grazie alla corrispondenza avvenuta tra lui, l’azienda e i primi tesisti. Si è utilizzato come punto di riferimento quindi il suo lavoro. Esso si presentava in questo modo:

UTENZA				
STT	PDP	INDIRIZZO DA FILE REPORT	INDIRIZZO DA FILE STT	
1	CR00001000	VIA BIXIO NINO, 28	Via Bixio Nino n° 28 / Via Fatebenefratelli n° 5	-
94	CR00094000	P.ZZA VENTQUATTRO MAGGIO, 2	Piazza XXIV Maggio	2
24	CR00024000	VIA FATEBENEFRATELLI, 2	Via Fatebenefratelli	2/a
268	CR00268000	VIA S. MARIA IN BETLEM, 5	Via S. Maria in Betlem	3
2	CR00002000	VIA FATEBENEFRATELLI, 3	Via Fatebenefratelli n° 3 / Via Abba n° 2	-
3	CR00003000	VIA FATEBENEFRATELLI, 12	Via Fatebenefratelli	10 - 12
4	CR00004000	VIA PLEBISCITO, 9	Via Plebiscito	3 ÷ 9
5	CR00005000	VIA FATEBENEFRATELLI, 11	Via Fatebenefratelli	7 ÷ 13
6	CR00006000	VIA BIXIO NINO, 5	Via Bixio Nino	5
7	CR00007000	VIA BIXIO NINO, 7	Via Bixio Nino	7 - 9
8	CR00008000	VIA SOLOMOS DIONISIO, 7	Via Solomos	3 ÷ 11
9	CR00009000	VIA CAPRERA, 53	Via Caprera	53
10	CR00010000	VIA FATEBENEFRATELLI, 2	Via Fatebenefratelli	2 ÷ 6
11	CR00011000	VIA CAPPUCCINI, 3	Via Cappuccini	3 ÷ 9
12	CR00012000	VIA DELL'AQUILA, 14	Via dell'Aquila	14 ÷ 18
13	CR00013000	VIA SOLOMOS DIONISIO, 13	Via Solomos Dionisio	13 ÷ 17
22	CR00022000	VIA PIPPIA, 1	Via Pippia	1
23	CR00023000	VIA DEI PESCATORI, 1	Via dei Pescatori	1/d
25	CR00025000	VIA VOLTURNO, 62	Via Garibotti Giuseppe	24
29	CR00029000	V.LE TRENTO E TRIESTE, 48	Viale Trento e Trieste	48
31	CR00031000	VIA VITTORI CARLO, 4	Via Vittori Carlo	4
32	CR00032000	VIA DEL GIORDANO, 5	Via del Giordano	5

Figura 43: elenco indirizzo utenze connesse alla rete I

L'importanza di questa consultazione è dovuta al fatto che i valori riguardanti l'andamento oraria di richiesta energetica, la cui spiegazione verrà trattata nel prossimo capitolo, sono ottenuti come funzione dell'appartenenza a una determinata macrotipologia di edificio con cui vengono classificate le utenze, nonché della volumetria della sottostazione. Questa coppia di informazioni costituisce la seconda parte dell'immagine precedente. Risulta di fondamentale importanza che vi sia completa corrispondenza tra il codice con cui un'utenza è identificata in AutoCAD e quello riportato sul file compilato da terzi servendosi dei dati di azienda, in modo da accertarsi che un singolo indice non rappresenti in realtà due sottostazioni diverse. Il dubbio dietro questa necessità è da attribuire al fatto che durante la visione dell'elenco sono state identificate una serie di utenze i cui codici superavano in valore il massimo tra quelle estratte con le operazioni sopra elencate.

Se dalla mappa risultano allacciate alla mappa un totale di 581 utenze, questo nuovo elenco affermava che la totalità di esse ammontasse invece a 612.

3.6.2.1 Verifica Utenze estratte

Il processo di verifica di corrispondenza tra il codice di centrale e il codice del disegno ha riguardato prima le utenze estratte. Grazie alla conoscenza dell'indirizzo civico per ognuna di esse si è potuto confrontare il suo posizionamento all'interno del tracciato cittadino con la posizione all'interno del disegno della sottostazione caratterizzata dal medesimo indice numerico di identificazione. La precisione di questa serie di confronti è stata resa possibile grazie al livello di dettaglio dell'indirizzo: con la conoscenza anche del numero civico è stato possibile evidenziare se due utenze situate nella medesima fossero esattamente loro, o basare il confronto sull'ipotetica distanza che le separava. Parallela a questa operazione era la verifica che il nodo di allaccio della rete abbinatogli tramite codice Matlab fosse effettivamente quello corretto. Questa fase è stata molto dispendiosa in termini di tempo e ha occupato la quasi totalità di operazioni svolte per la composizione del file utenze.

Questa lunga, macchinosa operazione si è rivelata tuttavia necessaria dal momento che ha permesso di identificare alcune non corrispondenze tra gli indici numerici, legate soprattutto alla condivisione del medesimo nodo da parte di alcune utenze oppure a una variazione di assegnazione, che comportava un posizionamento non corretto. La verifica dei nodi di allaccio ha comportato la correzione di alcuni nodi di allaccio, dovuti non a un errore di assegnazione avvenuta in fase di matlab ma a una serie di errori di natura grafica presenti nel disegno costituiti dalla presenza di prolungamenti in altre direzioni di alcuni segmenti.

3.6.2.2 Verifica utenze non estratte e file finale

Terminata la fase di verifica per le utenze estratte dalla mappa si è proseguito con l'operazione di assegnazione di un nodo di allaccio a tutte quelle sottostazioni non presenti sul disegno di origine ma risultanti ugualmente connesse alla rete di teleriscaldamento. Per fare questo si è guardato l'indirizzo e si è ricercato altre utenze con cui lo condividessero o giacenti in vie confinanti. Una volta certi della sua posizione dopo averla verificata con una serie di utenze vicine, si cercava sulla mappa un nodo che poteva ricoprire il ruolo di terminazione di allaccio per quella rete. Identificando le sue coordinate sul disegno si cercava all'interno del file contenente la matrice totale dei nodi con tanto di indice numerativo, si concludeva questa operazione assegnandogli quel rispettivo nodo.

Il file è stato completato con le informazioni mancanti, che sono riportate nell'immagine seguente:

codice ut	tipo	nodo	P max	P min	T out	k	t0				
0	1	4499	9099198	0	60	0.1	2390285	2390285	2390285	2390285	2390285
1	1	6542	63122.49	0	60	0.1	19021.22	19021.22	19021.22	19021.22	19021.22
2	1	6538	29441.4	0	60	0.1	8871.82	8871.82	8871.82	8871.82	8871.82
3	1	7602	48693.19	0	60	0.1	14673.12	14673.12	14673.12	14673.12	14673.12
4	1	8959	78390.17	0	60	0.1	23621.96	23621.96	23621.96	23621.96	23621.96
5	1	8963	91352.88	0	60	0.1	27528.12	27528.12	27528.12	27528.12	27528.12
6	1	6533	22559.95	0	60	0.1	6798.178	6798.178	6798.178	6798.178	6798.178
7	1	6529	22567.12	0	60	0.1	6800.337	6800.337	6800.337	6800.337	6800.337
8	1	8938	143430.7	0	60	0.1	43221.15	43221.15	43221.15	43221.15	43221.15
9	1	8540	69662.37	0	60	0.1	20991.94	20991.94	20991.94	20991.94	20991.94
10	1	7580	84409.34	0	60	0.1	25435.77	25435.77	25435.77	25435.77	25435.77
11	1	8028	95800.38	0	60	0.1	28868.32	28868.32	28868.32	28868.32	28868.32
12	1	6507	84523.99	0	60	0.1	25470.31	25470.31	25470.31	25470.31	25470.31
13	1	6501	84129.88	0	60	0.1	25351.55	25351.55	25351.55	25351.55	25351.55
14	1	6550	47111.52	0	60	0.1	12375.81	12375.81	12375.81	12375.81	12375.81
15	1	6179	336886	0	60	0.1	88497.18	88497.18	88497.18	88497.18	88497.18
16	1	103	73485.96	0	60	0.1	19304.16	19304.16	19304.16	19304.16	19304.16
17	1	6053	472795.1	0	60	0.1	124199.4	124199.4	124199.4	124199.4	124199.4
18	1	8008	56751.76	0	60	0.1	14908.22	14908.22	14908.22	14908.22	14908.22
19	1	8016	98369.71	0	60	0.1	25840.92	25840.92	25840.92	25840.92	25840.92
20	1	9079	116341.1	0	60	0.1	30561.85	30561.85	30561.85	30561.85	30561.85

Figura 44: file utenze sottostazioni

In figura è riportato un estratto della tabella per le sottostazioni di prelievo di energia termica: esse sono contraddistinte da un codice “tipo” fissato a “+1”. Nella parte finale trovano posto i valori di richiesta energetica oraria, mentre tra la colonna riportante il nodo di allaccio e quella con il valore di richiesta energetica relativa alla prima ora della giornata, si inserisce il valore di P_{max} ossia il massimo valore di potenza richiesta nell’arco delle 24h maggiorata di un fattore 1.2, il valore di P_{min} posta a valore nullo, il valore di T_{out} , temperatura di uscita da quel nodo a seguito dell’avvenuto scambio termico e infine un coefficiente “k” legato al calcolo delle perdite di carico.

1001	-1	3218	0	-4900800	108	1	0	0	0	0	0	-2442000	-3730000
1002	-1	4647	0	-6260400	108	1	-4781000	-4925000	-4835000	-4996000	-5027000	-4923000	-4965000
1002	-1	5665	0	-3E+07	108	1	-7060000	-6575000	-6104000	-7204000	-1.3E+07	-1.7E+07	-2.5E+07
1003	-1	4258	0	-6250800	108	1	0	0	0	0	0	0	0
1004	-1	5300	0	-74400	108	1	0	-1000	-2000	-5000	-8000	-27000	-1000
1005	-1	6458	0	-7773600	108	1	-4710500	-4712000	-4699000	-4726500	-5126500	-5919000	-6197000
1006	-1	9421	0	-7773600	108	1	-4710500	-4712000	-4699000	-4726500	-5126500	-5919000	-6197000
1007	-1	5659	0	-1.7E+07	108	1	0	0	0	0	0	-6187000	-1.4E+07

Figura 45: file utenze centrali

Nella figura precedente sono riportate le righe con le informazioni di input riferite alla centrali di produzione. Come detto prima, il codice di tipologia utenza è “-1”, e contrariamente alle sottostazioni di prelievo, la P_{max} ha un valore nullo mentre per rispettare la convenzione di segni utilizzata, alla P_{min} è assegnato un valore negativo. Segue infine il valore per la T_{out} che assume in questo caso il valore di 108°C. Conclude l’inserimento del coeff K.

Capitolo 4

Curve di potenza

In questo capitolo verrà descritto il procedimento matematico utilizzato per la creazione delle curve di potenza, quest'ultime sono state calcolate tramite una funzione realizzata nel lavoro di Tesi svolto dagli allora laureandi Gianluca Dadda e Giacomo Gabbiani, durante l'anno 2017/2018 che ne ha costituito la parte principale del loro elaborato. L'obiettivo da essi ricercato consisteva nel generale una curva che fosse in grado di rappresentare l'andamento energetico orario delle utenze connesse alla rete.

4.1 Informazioni utenze

Il quantitativo di potenza termica richiesto da una generica struttura nel corso di una giornata dipende da molteplici fattori tra di loro non per forza correlati. Il più importante è ovviamente la tipologia di utenza: una residenza domestica presenta infatti esigenze in termini di calore diverse rispetto a un esercizio commerciale, una struttura scolastica o sanitaria a loro volta sono caratterizzate da necessità di fornitura di calore unici sia dal punto di vista del quantitativo richiesto sia di come esso debba essere erogato nel corso di una giornata standard. A parità di tipologia di appartenenza bisogna inoltre considerare il livello di isolamento termico, la presenza o meno di elettrodomestici o apparecchiature industriali di grosse dimensioni o in gran numero così come ovviamente il numero di persone che usufruiscono del servizio di riscaldamento.

Siccome le differenze più significative sono da attribuire alla differente tipologia di appartenenza, l'azienda titolare della rete ha suddiviso la totalità delle utenze asservite alla rete in quattro classi di appartenenza: civile, scolastica, commerciale e sanitaria. Accanto a questo dato i file di azienda erano comprensivi anche delle informazioni riguardanti la volumetria di ogni utenza e il consuntivo mensile dei consumi termici espressi in [kWh/mese]. Questi dati discreti sul consumo provengono dalla lettura, a intervalli programmati, dei contatori posti presso ogni sottostazione.

TIPOLOGIA DI APPARTENZA E VOLUMETRIA				CONSUNTIVO MENSILE
civile	scolastico	commerciale	sanità	dati Report Febbraio (kWh/mese)
7,800				26,427
	10,820			35,582
		7,000		29,000
			8,571	30,536
3,600				12,326
5,400				20,386
10,800				32,819
13,200				38,246
3,300				9,445
3,600				9,448
15,000				60,049

Figura 46: consuntivo mensile utenze connesse alla rete

In possesso di queste informazioni è stato possibile definire una “curva modello” che approssimi al meglio il quantitativo di calore richiesto per ogni utenza in un arco di tempo definito. Considerando la rete di teleriscaldamento un sistema chiuso applicando un bilancio di energia è possibile uguagliare

la quantità di energia termica immessa in rete alla somma della corrispettiva quantità assorbita dalla somma delle utenze connesse alla rete e al valore di perdite di calore generate.

Come evidenziato nelle immagini che forniscono un esempio sulla natura del file di input al software di simulazione per le utenze, in esso sono presenti i dati relativi alle 24 h del giorno che è stato scelto come campione di prova. Questi fanno riferimento però a una funzione che definisce il consumo espresso per tutto l’arco del mese di cui il giorno di prova fa parte. La scelta di limitare la scelta a un solo giorno è legata a un problema di gestione del programma. La funzione che è stata definita riesce quindi nel doppio obiettivo di mostrare la variazione di richiesta che avviene per la generica sottostazione sia nell’arco di una giornata sia nel corso di un mese, questo è stato possibile ottenendo prima una funzione che esprimesse la richiesta giornaliera moltiplicata poi per una funzione di periodo settimanale allo scopo di simulare l’andamento di richiesta al variare delle settimane del mese.

4.2 Definizione curva giornaliera

Partendo da un’analisi dei dati ricavati in letteratura riferiti a utenze scelta a campione, mostranti le curve di richiesta energetica giornaliera delle diverse tipologie in cui sono racchiuse quelle in esame, la media di queste ultime produce una curva che presenta le seguenti caratteristiche: un primo picco raggiunto nelle prime ore del mattino seguito da una diminuzione di richiesta energetica fino al raggiungimento del minimo tra le ore del mezzogiorno e del primo pomeriggio. La curva prosegue con un aumento di valore fino al raggiungimento di un secondo picco di richiesta temporalmente ubicato nelle ore serali della giornata.

Sulla base di queste ipotesi, le richieste energetiche sono state modellizzate calcolandole tramite una “curva ad M”, che viene inizialmente caratterizzata da due massimi relativi all’interno dei quali vi è un minimo relativo e valori nulli agli estremi. Presentando in questo modo quattro punti di flesso, si è rappresentata tramite una funzione definita a tratti suddivisa in quattro cubiche, con i massimi e i minimi della curva in corrispondenza degli estremi dell’intervalli.

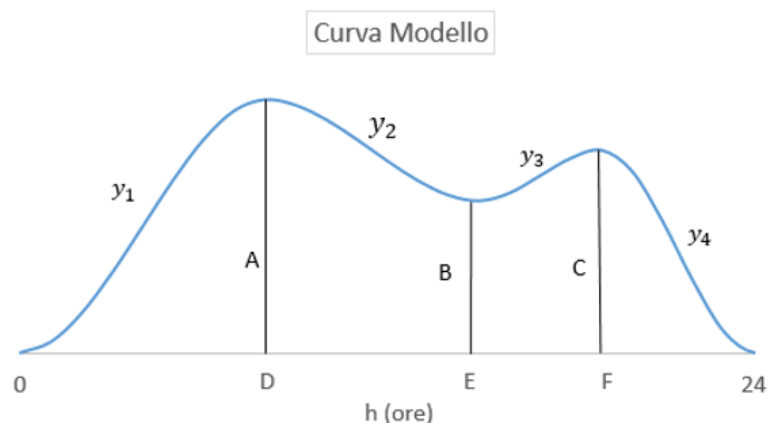


Figura 47: esempio di curva modello

D è l'orario a cui corrisponde il picco di richiesta oraria mattutina A, E indica invece l'orario in cui avviene il minimo relativo B mentre F è invece l'orario a cui corrisponde il secondo picco di richiesta energetica, quello serale, identificato con C. La funzione che ha origine in $h=0$ e termina in $h=24$ è quindi:

$$f(h) = y_i = a_i + b_i * h + c_i * h^2 + d_i * h^3$$

Equazione 1

con $i=1,2,3,4$ in base all'intervallo di appartenenza: $i=1$ per $0 < h < D$, $i=2$ per $D < h < E$, $i=3$ per $E < h < F$ e $i=4$ per $F < h < 24$.

La determinazione dei quattro coefficienti a_i, b_i, c_i e d_i passa attraverso la scrittura di un sistema di 4 equazioni in 4 incognite. Queste rappresentano le condizioni al contorno valide per ogni singola cubica. Queste impongono i valori che la curva deve avere in corrispondenza degli estremi e la posizione dei punti massimi e minimi, punti in cui le derivate assumono valori nulli.

Esse sono quindi:

Valori

$$y_1(D) = y_2(D) = A$$

$$y_2(E) = y_3(E) = B$$

$$y_3(F) = y_4(F) = C$$

$$y_1(0) = y_1(24) = 0$$

Derivate

$$y'_1(D) = y'_2(D) = 0$$

$$y'_2(E) = y'_3(E) = 0$$

$$y'_3(F) = y'_4(F) = 0$$

$$y'_1(0) = y'_4(24) = 0$$

Equazione 2

La definizione di queste cubiche implica che il metodo risolutivo di ognuna di esse è il medesimo e i valori finali di ogni coefficiente sono funzione esclusivamente dei parametri A, B, C, D, E, F che assumeranno sempre valori reali positivi. Se si definisce P l'estremo sinistro di ogni cubica, Q l'estremo destro e S e T i rispettivi valori assunti dalla funzione per questi valori, le espressioni che definiscono i coefficienti della funzione obiettivo sono:

$$a_i = S + \frac{1}{2}(P^3 - 3QP^2)d_i$$

$$b_i = 3QPd_i$$

$$c_i = -\frac{3}{2}(P + Q)d_i$$

$$d_i = \frac{2(T-S)}{(P-Q)^3}$$

L'equazione calcolata precedentemente viene poi moltiplicata per un fattore chiamato "Gradi Giorno". Essi rappresentano la differenza tra un valore definito "temperatura di comfort", che si cerca di mantenere all'interno dei locali, e la temperatura esterna. Questo termine fornisce l'indicazione di quanta energia termica bisogna fornire nel riscaldamento. La temperatura di comfort termico scelta è 20°C rendendo l'equazione

$$f(h) = (a_i + b_i * h + c_i * h^2 + d_i * h^3) * (20 - T)$$

Equazione 3

Per evitare che la funzione così scritta assuma il valore nullo negli estremi, all'ora 0 e all'ora 24, condizione che non trova riscontro nella realtà, per cui vi è sempre richiesta termica nell'arco di una giornata, alla funzione si somma un valore K, elevato al quadrato per far sì che risulti sempre positivo, al solo scopo di non rendere mai nulla la curva, facendo diventare la funzione:

$$f(h) = (a_i * h + b_i * h^2 + c_i * h^3 + d_i * h^4) * (20 - T) + K^2$$

Equazione 4

Quella ottenuta finora è la curva che definisce la richiesta energetica media giornaliera, che ha periodo di 24 h. Bisogna però, dopo aver ripetuto la curva trovata per tutti i mesi di febbraio, moltiplicarla per un fattore che la renda periodica settimanalmente. La scelta di far ricadere l'analisi sul mese di febbraio, in quanto mese invernale privo di festività, permette di avere un andamento delle richieste abbastanza ripetuto, con la sola variazione di richiesta durante il finesettimana rispetto ai giorni lavorativi. L'equazione f(h) viene resa periodica di un periodo settimanale venendo moltiplicata per una funzione sinusoidale così definita:

$$y = [\sin^2(\frac{h * \pi}{168})]^n + t$$

Equazione 5

Derivata dalla generica funzione sinusoidale

$$y = \sin(2 * \pi * h + \varphi)$$

Equazione 6

Il cui argomento viene diviso per 168, numero di ore settimanali, per renderlo periodico ogni 7 giorni. Siccome la curva finale dovrà descrivere la richiesta di energia termica di ogni utenza è una curva oraria il periodo settimanale viene espresso in ore. L'elevamento al quadrato serve per escludere i valori negativi della funzione, mentre l'argomento viene ulteriormente diviso per due per rendere la funzione con un unico massimo nel periodo considerato. Infine l'elevamento a potenza per il fattore n serve a costituire un altro grado di libertà della curva. Si somma infine la costante positiva alla funzione per far sì che per i valori nulli della sinusoide, il valore della funzione corrisponda a quello della costante t.

La funzione finale si presenta quindi come

$$f(h) = [(a_i * h + b_i * h^2 + c_i * h^3 + d_i * h^4) * (20 - T) + K^2] * \{[\sin^2(\frac{h * \pi}{168} + \varphi)]^n + t\}$$

Equazione 7

Questa è dunque la curva con doppia periodicità, giornaliera e settimanale, che modella l'andamento delle richieste termiche orarie nel corso del mese di esame. Il passo finale consiste nel personalizzare questa curva per ogni utenza. Come detto in precedenza, risulterebbe troppo complicato trovare le soluzioni del problema per la totalità del numero di utenze presenti sulla mappa, si è quindi limitato il lavoro a determinare 4 curve modello, una per ogni tipologia di edificio in cui si classificano le utenze,

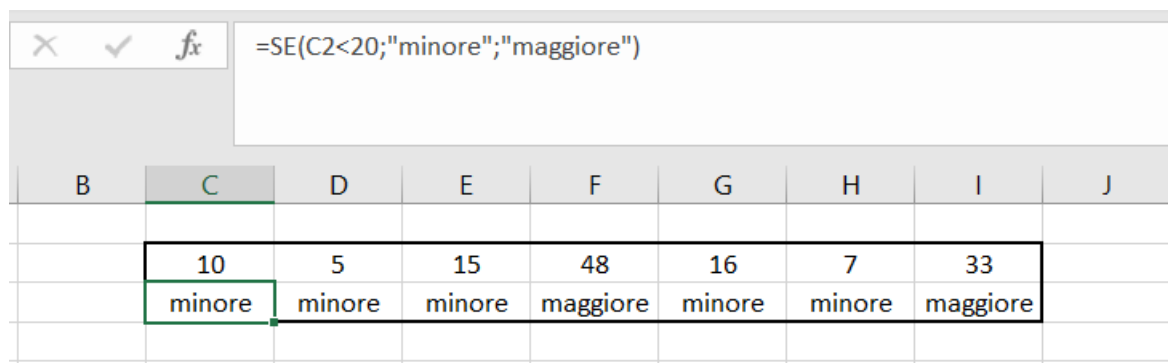
$$f(h) = [(a_i * h + b_i * h^2 + c_i * h^3 + d_i * h^4) * (20 - T) + K^2] * \{[\sin^2(\frac{h * \pi}{168} + \varphi)]^n + t\} * m^3$$

Equazione 8

Per ottenere le richieste energetiche di ogni utenza non appartenente al campione, si moltiplica il valore orario appartenente all'utenza campione di quella tipologia per un coefficiente θ , che esprime il rapporto tra i consumi di quella determinata utenza e quelli dell'utenza presa come campione per la curva della medesima tipologia.

La composizione del file utenze è avvenuta tramite programma "Excel", che per la scrittura di una funzione definita a tratti, mette a disposizione la funzione "SE". Essa permette di eseguire confronti logici tra un valore e un risultato atteso. La forma più semplice di questa funzione prevede che abbia due possibili risultati, il primo ottenuto se il confronto che si sta operando risulta Vero, il secondo se invece è Falso.

La sintassi della funzione è la seguente: SE(cond_test;valore_vero;valore_falso). Nello specifico "cond_test" è la condizione che va testata, "valore_vero" il valore assunto dalla funzione la condizione testata è vera, al contrario "valore_falso" è il valore assunto dalla funzione in caso la condizione testata risultasse falsa.



The screenshot shows an Excel spreadsheet with a formula bar at the top containing the formula `=SE(C2<20;"minore";"maggiore")`. Below the formula bar, a range of cells from C2 to I2 is highlighted. The values in this range are 10, 5, 15, 48, 16, 7, and 33. The corresponding cells in the row below (C3 to I3) contain the results of the SE function: "minore", "minore", "minore", "maggiore", "minore", "minore", and "maggiore".

B	C	D	E	F	G	H	I	J
	10	5	15	48	16	7	33	
	minore	minore	minore	maggiore	minore	minore	maggiore	

Figura 48: esempio definizione funzione "SE"

Nell'esempio riportato in immagine si verifica che i numeri appartenenti alla prima riga sono maggiori o minori a 20. Se dovessero soddisfare la richiesta, allora la funzione assume il valore "minore", se invece il numero in una cella della seconda riga dovesse non soddisfare la richiesta, allora la condizione test sarebbe falsa e quindi la funzione assumerebbe il valore associato a questo caso, ossia "maggiore".

Per poter scrivere la funzione nel nostro caso si è fatto ricorso alla funzione “SE” annidata che può generare più di due soli risultati. E’ infatti possibile sostituire ad ogni valore falso una condizione “SE” posta internamente alla precedente, riuscendo in questo modo a generare un alto numero di risultati. Dal momento che la funzione rappresentante le curve di richiesta energetiche di una generica utenza è definita in quattro tratti, ognuno dei quali espresso dalle funzioni y_1, y_2, y_3, y_4 si può eseguire una delle quattro funzioni in base all’intervallo orario in cui ci si trova, come espresso nell’equazione 7:

01/02/2016																							
con sfasamento 2 h	6	6	5	5	5	5	5	5	5	4	5	6	8	7	7	7	7	8	8	7	7		
Ore cumulate	7	7	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
Ora del giorno	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
CIV	SF10	19021.222	19021.22	19021.22	19021.22	25220.56	45346.06	43894.55	47280.49	51103.53	50940.95	50175.6	46261.01	48669.26	49081.31	49689.02	50404.94	51141.65	49289.35	49765.62	52602.07	48292.52	
SCOL	0	0	0	564.8755	32747.28	88511.71	128678.9	121119.9	86979.59	66563.68	63860.31	63756.31	59376.95	69882.35	74985.03	78689.94	79367.12	71915.66	53394.02	37177.32	22510.62	8011.561	
COMM		28822.56	28822.559	28822.56	28822.56	46637.19	91433.38	81169.01	64380.98	50275.51	42667.62	41966.55	40555.18	42238.1	43044.18	43852.02	44562.5	45076.52	44027.84	38802.93	30097.44	28822.56	
SANIT		31621.05	32720.759	34394.01	36353.24	38590.53	41017.74	43543.45	46073.47	48511.32	51913.41	52714.93	52910.87	51059.69	54623.21	53875.53	52235.12	49529.45	46186.67	42029.03	38984.92	36711.7	35223.9

Figura 49: applicazione funzione “SE” al caso in esame

Una volta ottenuti i valori di richieste energetiche per le quattro utenze campione per tutto il mese di febbraio 2016, si è estesa la ricerca dei valori anche per tutte le restanti sottostazioni. Per farlo è bastato moltiplicare il valore di domanda termica dell’utenza campione della tipologia di riferimento per un coefficiente θ che è dato dal rapporto tra il quantitativo mensile di quell’utenza rispetto all’utenza campione di riferimento.

Una volta ottenuti i valori orari per tutti i giorni del mese bisogna ricavare il valore dei coefficienti che definiscono la funzione in modo da rendere minima la differenza tra la somma di tutte le richieste e quella dell’erogazione, a meno delle perdite di rete.

La funzione così scritta presenta 8 gradi di libertà, ossia i quattro coefficienti della funzione e i termini K, φ, n e t . A causa della dipendenza dei quattro coefficienti dai valori dei picchi e dai loro orari, la curva ad M presenta in realtà 8 gradi di libertà, perché alle 6 incognite lettere si aggiungono i valori che la funzione può assumere agli estremi, facendo aumentare il numero dei gdl totali a 12.

Il raggiungimento dell’obiettivo è raggiunto per mezzo del componente aggiuntivo di Excel chiamato “Risolutore, strumento usato per eseguire analisi di simulazione. Facendo variare i gradi di libertà, in questo caso i 12 coefficienti per le cubiche, della funzione di riferimento, ponendo dei vincoli opportuni, l’obiettivo è quello di modellare le curve affinché il loro andamento rispecchi il più possibile il comportamento reale, ossia la minimizzazione delle differenze tra la somma delle richieste e l’erogazione netta delle centrali. Quest’ultimo valore è dato dalla totalità delle emissioni orarie a cui è stata sottratta la componente delle perdite di rete, fissate, secondo questionario AIRU, a 19.6%

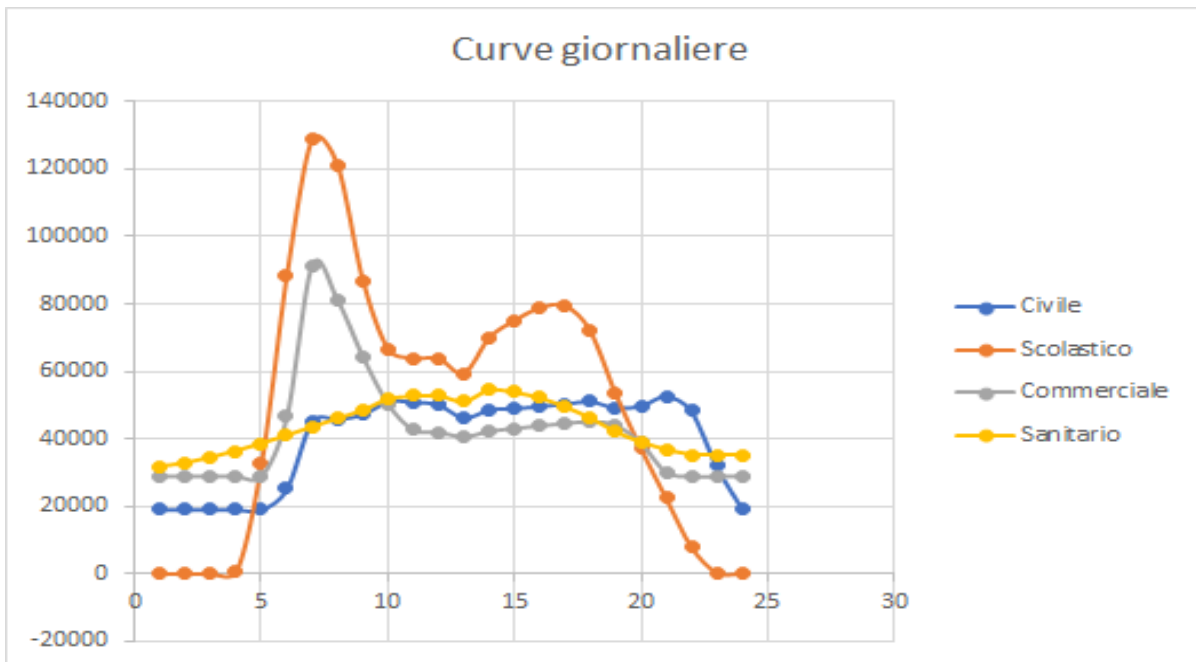


Figura 50: andamento giornaliero utenze campione

In figura si riporta l'andamento delle curve per le quattro utenze campione espresse lungo l'arco della prima giornata. In questo modo è possibile ottenere dei grafici che mostrino l'andamento delle richieste riportate su un intervallo di tempo di una settimana e di un mese:

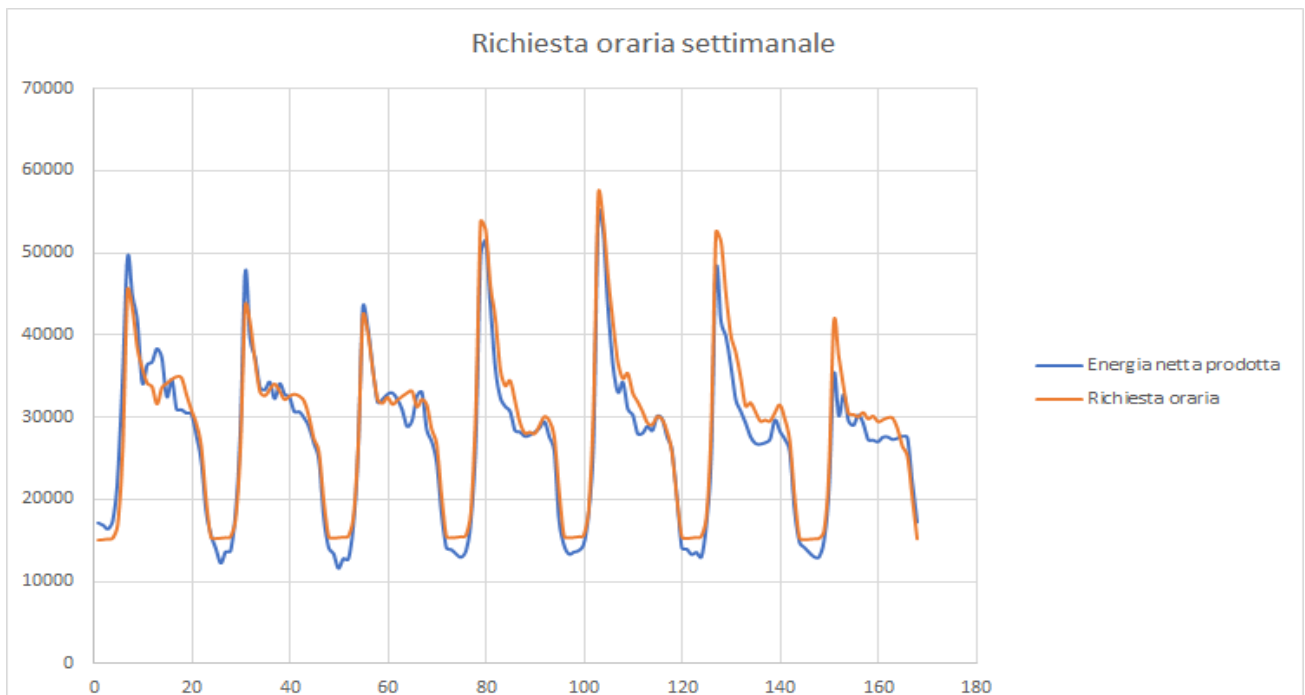


Figura 51: andamento settimanale totale

Capitolo 5

Software e Risultati ottenuti

In questo capitolo verrà mostrata l'interfaccia del programma, i risultati intermedi generati automaticamente in fase di riordinamento della rete e in seguito verranno presentati i grafici rappresentativi dei risultati ottenuti dal tentativo di simulazione della rete. L'obiettivo dell'elaborazione della rete è mostrare il valore delle proprietà pressione e temperatura in ogni nodo della rete al fine di individuare i suoi punti critici.

5.1 Interfaccia programma

L'interfaccia del programma, all'avviamento della simulazione si presenta in questo modo:

```
La lettura del file elementi p avvenuta con successo
Numero nodi corretto
Sono presenti 21 maglie - definizione in corso (attendere ...)
Ricerca maglia n. 0
Ricerca maglia n. 1
Ricerca maglia n. 2
Ricerca maglia n. 3
Ricerca maglia n. 4
Ricerca maglia n. 5
Ricerca maglia n. 6
Ricerca maglia n. 7
Ricerca maglia n. 8
Ricerca maglia n. 9
Ricerca maglia n. 10
Ricerca maglia n. 11
Ricerca maglia n. 12
Ricerca maglia n. 13
Ricerca maglia n. 14
Ricerca maglia n. 15
Ricerca maglia n. 16
Ricerca maglia n. 17
Ricerca maglia n. 18
Ricerca maglia n. 19
Ricerca maglia n. 20
File maglie.txt generato

Premere invio per proseguire . . .

File mappa.txt generato

Premere invio per proseguire . . .
```

Figura 52: interfaccia programma

La prima fase dell'esecuzione consiste nell'individuazione e nella definizione delle maglie presenti nella rete

5.2 File di supporto

0(3931)	1449(3932)	1448(3925)	1447(3917)	1431(3918)	1430(3919)
1429(3920)	1428(3921)	1427(3922)	1426(3923)	1425(3924)	1423(3611)
1422(3612)	1421(3827)	1420(3280)	1419(3281)	1418(3282)	1417(3283)
1416(3284)	1415(3285)	1414(3286)	1413(3863)	1412(3857)	1411(3856)
1410(3855)	1409(3854)	1408(3853)	1407(3871)	1406(3870)	1405(3869)
1404(3868)	1403(3867)	1402(3866)	1401(3865)	1400(3864)	1399(3887)
1398(3886)	1397(3885)	1396(3884)	1395(3883)	1394(3882)	1393(3845)
1392(3846)	1391(3847)	1390(3848)	1389(3849)	1388(3839)	1387(3840)
1386(3838)	1385(3958)	1384(3957)	1383(3956)	1382(3955)	1381(3954)
1380(3953)	1379(3962)	1378(3961)	1377(3963)	1376(3969)	1375(3968)
1374(3967)	1373(3966)	1372(3965)	1082(3964)	1081(4006)	1080(4007)
1079(4008)	1078(4009)	1077(4010)	1076(4011)	1075(4001)	1074(4002)
1073(4003)	1072(4004)	1071(4005)	1070(3989)	1069(3993)	1068(3994)
1067(3984)	1066(2864)	1065(2863)	1064(2843)	1063(2842)	1062(2841)
1056(4969)	1059(4242)	1060(4243)	1061(4244)	1083(4245)	1084(4246)
1085(4247)	1086(4248)	1087(4394)	1088(4389)	1098(4390)	1099(4391)
1100(4392)	1101(4393)	1102(4669)	1103(4670)	1104(4671)	1105(4672)
1106(4673)	1107(4674)	1108(4659)	1109(4660)	1110(4661)	1111(4662)
1112(4663)	1113(4664)	1114(4665)	1115(4666)	1116(4667)	1117(4668)
1118(4657)	1119(4658)	1120(4652)	1121(4653)	1122(4654)	1123(4655)
1124(4635)	1125(4636)	1126(4637)	1127(4638)	1128(4639)	1162(3195)
1163(3196)	1451(3197)	1452(3198)	1453(3231)	1454(3232)	1455(3233)

Figura 53: estratto file “maglie”

Nell’immagine precedente viene presentato un estratto del file “maglie.txt” automaticamente generato dal programma, contenente i codici numerici assegnati ai generici elementi che concorrono alla composizione della generica maglia. Per ogni elemento indicativo di una tubazione è presente una doppia numerazione: accanto al codice numerico assegnatogli in fase di definizione del file “elementi.txt”, tra le parentesi figura un secondo indice attribuitogli dal programma che si ritrova anche nel file “mappa.txt” anch’esso generato durante la fase preliminare di simulazione:

-21	1429	2208	3931	4038	4037
-20	373	1009	4893	4957	4925
-19	1178	1436	3175	3298	3297
-18	105	849	5480	5491	5488
-17	2265	2510	2531	2651	2650
-16	492	535	3321	3444	3443
-15	1778	2442	3662	3774	3775
-14	621	623	4177	4273	4274
-13	1670	2518	5489	5500	5499
-12	1426	2217	3900	4005	4004
-11	1770	1772	3691	3802	3456
-10	70	71	391	403	448
-9	1767	1777	3329	3452	3453
-8	1234	1430	3626	3739	3740
-7	2499	2511	2514	2635	2634
-6	60	72	402	406	459
-5	574	1757	4402	4491	4492
-4	145	314	5362	1695	5392
-3	1879	2490	3483	3585	3600
-2	2008	2405	4794	4860	4859
-1	1500	1532	3804	3912	3911
0	0	1	5763	5277	5219
1	0	2	5238	5277	5278
2	1	3	5173	5219	5218
3	3	4	5172	5218	5217

Figura 54: estratto file “mappa”

5.2.1 File “mappa”

Nell’immagine precedente è mostrato un estratto del file “mappa.txt”. Dal momento che la risoluzione del problema idraulico necessita di ordinare opportunamente gli elementi e i nodi della rete, in modo da originare una matrice triangolare, che ponga gli elementi sulla righe e i nodi sulle colonne, esso nella sua interezza è così costituito:

- Nelle colonne 5 e 6 sono riportati i codici dei due nodi terminali dell’elemento rappresentato lungo la riga della matrice. Sono gli stessi presenti sul file “elementi.txt”, ad eccezione che sono invertiti di posizione.
- Nelle colonne 2 e 3 trovano posto i nuovi indici riferiti ai medesimi nodi delle colonne 5 e 6 , attribuitigli dal programma sperimentale per più corretta rappresentazione della rete.

Durante lo svolgimento della simulazione, il programma, con la corrispondente matrice triangolare risolve il problema di ottenimento delle portate per sostituzione e da questi valori ricava a posteriori il valore delle pressioni.

In presenza di maglie lungo la rete, come in questo caso, si ottiene una matrice $(N+K) \times (N+1)$ con

- $(N+K)$ numero degli elementi della rete. Il fattore K rappresenta il numero di maglie presenti
- $(N+1)$ il numero dei nodi

Le maglie rappresentano K gradi di libertà per il problema delle portate, che necessitano di essere fissati mediante il bilanciamento delle pressioni sulle maglie.

- In colonna 4 del file “mappa.txt” trovano posto gli indici numerici riferiti all’elemento tubo. Come valori sulle ultime due colonne, analogamente al file originale “elementi” sono riportati i nodi di inizio e di fine per ogni condotta.

- In colonna 1 invece sono presenti i codici degli elementi a loro riassegnati dal programma. La particolarità di questa colonna è la presenza di indici con valore negativo, in numero uguale al quantitativo delle maglie presenti lungo la rete che nello specifico è $K = [n^\circ \text{ elementi} - n^\circ \text{ nodi} + 1] = 9503 - 9483 + 1 = 21$. La numerazione degli elementi parte quindi da -21 per giungere a -1: queste sono le righe relative agli elementi “pivot di maglia”, ossia quegli elementi della matrice che vengono processati prima di tutti dal programma allo scopo di aumentare l’efficienza dell’esecuzione. Sono determinati in modo residuale, ossia sono quelli che non stanno in geometria triangolare della matrice.

In presenza di maglie, la matrice triangolare è composta da due sezioni, che nel file “mappa.txt” si suddividono nel seguente modo:

- Dalla riga 0 a una riga intermedia a una riga intermedia sono presenti gli elementi che costituiscono porzioni di maglie o che sono elementi di collegamento tra le diverse maglie.
- Da questa riga intermedia fino all’ultima riga del file sono invece presenti gli elementi che compongono le porzioni ramificate della rete ossia l’insieme di elementi che non si richiudono fino a formare un percorso chiuso.

5.3 L'algoritmo

L'algoritmo è stato implementato allo scopo di risolvere i modelli idraulico e termico caratterizzanti la rete calcolando le distribuzioni di portate, pressioni e temperatura, in modo da valutare nel corso del tempo, attraverso discretizzazioni temporali, l'andamento del valore di queste variabili nei lati della rete e in ogni suo punto. Tramite la valutazione dell'andamento spaziale e temporale di queste grandezze è possibile individuare la posizione dei punti critici della rete, le conseguenziali dissipazioni di calore e il quantitativo di energia termica che le centrali energetiche devono fornire per garantire il bilancio di sistema.

L'algoritmo utilizzato prende ispirazione dal metodo elaborato e presentato come suo progetto di Tesi dall'allora laureando Federico Minoli durante l'A.A 2013-2014. L'attività di prosecuzione di sviluppo del programma è stata portata avanti dal Relatore Professor F. Viganò come conseguenza delle continue modifiche apportate ai file di input. Il mio operato si è concentrato sull'attività di testing delle continue nuove versioni del programma.

La successione delle operazioni svolte dal programma con il principio di funzionamento ereditato si articola nel modo seguente:

- Il file di input "nodi.txt" comprensivo dei valori di temperatura di mandata dei nodi permette la conoscenza completa della distribuzione di questa proprietà nella rete mentre nel file "utenze.txt" c'è il consuntivo delle richieste termiche orarie del giorno campione. Per prima cosa verranno calcolate le temperature di ritorno per ogni utenza insieme al vero valore di temperatura di mandata. Per ultimo viene calcolata la portata massica di fluido necessaria per soddisfare la richiesta termica.
- Ottenuto il valore delle portate transitanti nelle utenze, si passa a risolvere il problema idraulico della rete allo scopo di ottenere la portata massica e le cadute di pressione in ogni tratto di essa. La risoluzione del problema della distribuzione delle portate si avvale solamente del bilancio di massa in ogni nodo della rete:

$$\sum m_i = 0$$

Le equazioni di bilancio delle portate in ingresso e in uscita ad ogni nodo vengono prima eseguite per le porzioni ramificate della rete, partendo dai nodi più periferici. Il proseguo delle iterazioni conduce a determinare la portata che circola nelle porzioni di rete magliate, risolvendo prima le equazioni indipendenti e in seguito quelle dipendenti. La risoluzione delle maglie della rete parte dall'assunzione di una portata ipotizzata circolante in essa e l'ottenimento del valore corretto dopo essere andata a convergenza.

Una volta ottenuto il valore delle portate in ogni punto, vengono ottenuti i valori di variazione di pressione in ogni punto da

$$\Delta P = k * m^2$$

● Viene svolta la risoluzione del modello termico grazie alla conoscenza della temperatura di mandata in centrale, anch'esso fissato ad un valore costante nei file di input, e considerando costanti le portate e le pressioni, calcolate nel punto precedente dalla risoluzione del modello idraulico, si calcolano le perdite termiche e le temperature al dato istante temporale. Questo viene fatto risolvendo il bilancio di energia in ogni tratto di tubazione dx:

$$\rho A c_V \frac{\delta T}{\delta t} + \rho A w c_V \frac{\delta T}{\delta x} + A w \frac{\delta P}{\delta x} = \dot{q}$$

Equazione 8

Dove al primo membro trovano posto i termini riferiti all'energia interna specifica e all'entalpia interna specifica e \dot{q} rappresenta il calore scambiato con l'esterno per unità di lunghezza nel tratto infinitesimo dx, considerato positivo se entrante. Questa è un'equazione alle derivate parziali con una dipendenza sia spaziale che temporale per la temperatura. La semplificazione di quest'equazione verte intorno all'approssimazione della derivata parziale con un metodo alle differenze finite upwind. Si sostituisce ossia la derivata parziale della temperatura nel punto in analisi con la differenza tra la temperatura nel medesimo punto, chiamato punto 2, e la temperatura posseduta nel punto precedente, chiamato punto 1, divisa per la lunghezza del tratto che separa i due punti così considerati:

$$\frac{\delta T_2}{\delta x} = \frac{(T_2 - T_1)}{L}$$

Equazione 9

T_2 è l'incognita che rappresenta la temperatura del punto di cui si cerca il valore, T_1 è il valore di temperatura che il fluido ha nel punto precedente, mentre L è la distanza che intercorre tra i due punti. Apportata questa semplificazione, l'espressione si riduce a un'equazione differenziale ordinaria avente il valore della temperatura che varia solo nel tempo.

Per la risoluzione del modello termico si utilizza un approccio a parametri concentrati, in questo modo la T_2 , riportata come solo T, indica il valore di temperatura proprio dell'intero tratto di tubazione considerato mentre T_1 , che verrà indicata come T_{in} , rappresenta la temperatura posseduta dal fluido nel punto di ingresso al generico componente ed assume il significato di temperatura di miscelazione adiabatica di tutte le portate massiche che scorrono nelle tubazioni immediatamente precedenti a quella in esame. Introducendo queste semplificazioni, moltiplicando per il termine L che permette di ottenere al secondo membro il calore scambiato con l'ambiente per il tratto di tubo considerato, ci si riconduce a un'equazione del tipo:

$$MCL \frac{dT}{dt} + m c_V (T - T_{in}) + w A (p_2 - p_1) = -U A L (T - T_{ext})$$

Equazione 10

Da questa equazione sono riconoscibili i termini MC, capacità termica per unità di lunghezza del tratto di tubo, e UA, il coefficiente globale di scambio termico per unità di lunghezza.

● Svolta l'analisi al timestep temporale fissato, si procede con l'analisi della rete all'istante temporale successivo.

5.4 AIT

Come esposto precedentemente tra le ipotesi assunte per la risoluzione del modello termico vi è il considerare per il singolo tratto la capacità termica concentrata in un unico punto. Così facendo si è eliminata la dipendenza dalla coordinata spaziale per la temperatura, riducendo il problema a un sistema di equazioni differenziali ordinarie del tipo:

$$\frac{dT}{dt} = a(t)T(t) + b(t)$$

Equazione 11

Questa espressione evidenzia come la dipendenza della temperatura in un punto è funzione della temperatura stessa e dei coefficienti $a(t)$ e $b(t)$. Questi ultimi, che saranno approfonditi in seguito, includono grandezze quali la portata, il calore in ingresso, la T_{in} e la T_{ext} possono anche essi essere dipendenti dal tempo in base alle approssimazioni utilizzate per descrivere il modello.

Grazie alla conoscenza del valore di temperatura nell'istante iniziale di tempo e delle condizioni del flusso in ingresso in una generica tubazione, quest'ultime derivate dalla temperatura nei tratti di tubazione precedente, si riesce a ottenere il valore della temperatura in generico istante temporale. Il fatto che la temperatura in un punto sia influenzata da quella degli altri tratti della rete rende il modello costituito da un sistema di equazioni differenziali non indipendenti. Le soluzioni numeriche di questo sistema sono ottenute utilizzando metodi di risoluzione che determinino la temperatura al susseguirsi degli intervalli discreti di tempo con cui si suddivide la simulazione.

All'inizio di ogni intervallo di integrazione si conosce il valore della temperatura all'istante iniziale (T_0), derivante dal calcolo all'istante precedente. Il problema è quindi un problema ai valori iniziali che può essere schematizzato come:

$$\frac{dT}{dt} = a(t)T(t) + b(t) \text{ e } T(t = t_0) = T_0$$

Equazione 12

Il metodo utilizzato per la risoluzione del modello termico prende il nome di AIT, average inlet temperature. Esso comporta la risoluzione di ogni equazione differenziale al generico istante t dove tra gli input figura la temperatura ai nodi della rete simulando di conoscerne il valore reale, in realtà non ancora calcolato. Questo modo comporta al suo primo utilizzo legare la temperatura al valore degli altri edges nell'istante precedente, comportando un'approssimazione crescente all'aumentare del timestep.

Riprendendo l'espressione matematica del nostro sistema, isolando il termine $\frac{dT}{dt}$ essa è:

$$MCL \frac{dT}{dt} = mc_v(T_{in} - T) + Q_{gen} - UAL(T - T_{ext})$$

Equazione 13

T_{in} è la temperatura presente nel nodo di ingresso nel generico tratto di rete in esame. Il suo valore dipende dagli elementi posti precedentemente nel senso di scorrimento del flusso.

Nel momento in cui però, si scegliesse di slegare la dipendenza dagli edges precedenti ma considerando come valore valido la T all'istante precedente o addirittura un valore fornito in input, si fa perdere la dipendenza della temperatura dagli altri edges, rendendo questo termine una costante facendo sì che l'equazione diventi:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{-UAL - |m|c_V}{MCL} T + \frac{Q_{gen} + |m|c_V T_{in} + UAL T_{ext}}{MCL}$$

Equazione 14

I termini che precedono la variabile T costituiscono il termine a(t) dell'espressione sopra, mentre il termine che segue il segno di addizione rappresenta il termine noto b(t). Volendo analizzare il problema in forma matriciale, se si indica con A la matrice contenente i termini a(t), per come è stato formulato il problema essa risulta essere una matrice diagonale, ossia costituita dai soli termini a_{jj} ossia quelli che manifestano la dipendenza della derivata dalla temperatura dell'edge stesso. I termini a_{jk} , non appartenenti alla diagonale principale, indicano invece la dipendenza della derivata della temperatura dell'edge j dalla temperatura dell'edge k. Essi hanno valore diverso dal nullo se il generico edge k rappresenta un tratto contiguo della rete, che fornisce portata all'edge j. In questo modo esso rappresenta il contributo pesato del componente k alla portata in ingresso al componente j. Nel nostro caso specifico questi termini sono tutti uguali a 0 dal momento che il contributo della T_{in} compare tra i termini della sommatoria del vettore termini noti, che quindi ora sarà costituito esclusivamente da:

$$b_j = \frac{Q_{gen,j} + |m_j|c_V T_{in,j} + UA_j L_j T_{ext}}{MC_j L_j}$$

Equazione 15

$$\frac{dT}{dt} = a_{jj} T + b_j$$

Equazione 16

Il cui integrale è dato da

$$T(t) = e^{A(t)} \left[cost + \int (b(t) e^{-A(t)}) dt \right]$$

Equazione 17

Avendo

$$A(t) = \int a(t) dt$$

Equazione 18

Si effettua un'integrazione dall'istante t_0 , in cui si conosce la soluzione $T(t_0) = T_0$ all'istante t in cui si vuole calcolare la soluzione. L'integrazione risulta semplice da eseguire poiché i termini $a(t)$ e $b(t)$ sono considerati costanti nel timestep della simulazione. Per il calcolo della temperatura si ricorre quindi all'espressione:

$$T_{i+dt} = e^{adt} \left[\frac{b}{a} + T_i \right] - \frac{b}{a}$$

Equazione 19

Grazie ad essa è possibile determinare il valore della temperatura in ogni edge della rete dopo aver fornito il valore della temperatura all'istante iniziale della simulazione. Le prime iterazioni sono quelle che risentono maggiormente del valore iniziale stimato, fornito in input. L'allungarsi del dt comporta un aumento di approssimazione avendo ricevuto le informazioni dall'istante precedente.

Applicando questo metodo come descritto fino ad ora che consiste attribuire alle temperature ai nodi di ingresso, quindi le T del fluido entrante negli edges, quelle riferite all'istante precedente comporta un errore nei risultati che si otterrebbero. Per ridurre l'entità degli errori nel bilancio di energia, al termine della prima chiamata, svolta con il metodo sopra descritto, se ne avvia una seconda dove si calcola nuovamente il valore delle T ai nodi di ingresso per sostituire a quella dell'istante precedente, il valor medio della T degli edge nell'intervallo di tempo considerato, per poi risolvere l'equazione sopra con i valori aggiornati più corretti. La temperatura media è definita come:

$$T_{media} = \frac{1}{dt} \int_0^{dt} T(t) dt$$

Equazione 20

Dove $T(t)$ è la temperatura come espressa nell'equazione xxx e dt rappresenta il passo temporale dell'iterazione. Integrando sopra si giunge all'espressione analitica, valida per ogni edge, tramite la quale si determina la T media da un'istante iniziale i a quello in esame $i+dt$:

$$T_{media} = \frac{(T_i + \frac{b}{a})(e^{adt} - 1)}{a dt} - \frac{b}{a}$$

Equazione 21

Tra gli elementi che compongono T_{media} , figura l'elemento b e quindi il valore di temperatura al nodo di ingresso e saranno necessarie un certo numero di iterazioni per far convergere al valore corretto sia le T finali degli edges che le T medie. Il processo di iterazione termina quando lo scarto quadratico medio tra le T già calcolate e il loro valore all'istante precedente scende al di sotto di un valore di tolleranza prescelto.

All'interno della formula, nell'elemento b , vi è la temperatura al nodo di ingresso quindi sia le temperature medie sia le temperature finali degli edges convergeranno al valore esatto dopo un certo numero di iterazioni.

Il ciclo viene terminato quando lo scarto quadratico medio tra le temperature calcolate e le temperature all'iterazione precedente scende sotto una tolleranza scelta in base al grado di accuratezza richiesto.

5.5 Risultati ottenuti

Il modello termico della rete si basa su equazioni differenziali, la stabilità del metodo utilizzato per ottenerne la risoluzione è funzione quindi delle discretizzazioni spaziali e temporali assunte, che influenzano pesantemente l'accuratezza dei risultati dell'andamento di temperatura e di pressione. Le discretizzazioni spaziali e temporali insieme al valore della velocità del fluido nel condotto sono legati nel numero adimensionale di Courant:

$$\text{Cou} = \frac{\Delta t v}{\Delta x}$$

Δt è l'intervallo di tempo che intercorre tra due valutazioni, Δx è la lunghezza del tratto di cui si sta valutando la temperatura e v è la velocità del fluido che scorre in esso.

$\text{Cou} > 1$ comporta che i metodi numerici espliciti risultano instabili, amplificando l'errore introdotto in un calcolo di temperatura nella valutazione spaziale successiva. Rendere eccessivamente fitta la discretizzazione spaziale, riducendo Δx , comporta diminuire il salto temporale per far sì che Cou resti inferiore a 1. Aumentare il livello di dettaglio della rete impone di elevare il numero delle valutazioni svolte nell'intervallo temporale fissato, comportando un aumento dei tempi di simulazione.

Un numero di Cou troppo rasente lo 0, dettato da passi temporali eccessivamente piccoli, in rapporto a una discretizzazione spaziale troppo larga, comporta d'altro canto approssimazioni troppo elevate. Al verificarsi di queste condizioni, considerare la temperatura in ingresso a un tratto di condotta uguale a quella della tubazione precedente, nello stesso istante o media nel timestep comporta un aumento continuo dell'approssimazione, crescente con il tempo di percorrenza del fluido. Se il fluido risultasse troppo lento, le sue condizioni medie potrebbero divergere enormemente da quelle del suo punto conclusivo.

5.5.1 Risultati simulazioni

Il primo tentativo di simulazione dinamica della rete, avvenuto con timestep temporale fissato a 12 min, ritenuto sufficiente per simulare il comportamento della rete lungo le 24 del giorno preso in esame, si è rivelato infruttuoso: il file di output delle potenze termiche mostrava una ciclica alternanza di segno dei valori per una generica utenza in una lettura verticale. Sospettando un'instabilità del metodo il passo temporale è stato ridotto provando a ritentare la simulazione con timestep continuamente ridotti a 9,6,3 minuti. Il manifestarsi nuovamente di questa condizione ha reso necessario riesaminare il metodo utilizzato per il calcolo delle stesse da parte del Professor F. Viganò. Questo ha permesso al l'individuazione di un errore nel calcolo delle potenze. Nonostante questo l'assenza di significato fisico dietro al valore dei risultati di output era connessa a un problema di instabilità nel metodo causato dall'eccessiva lunghezza dei passi temporali. La modifica del fattore k , fornito come dato di input nel file "elementi", avvenuta per riduzione dell'ordine di grandezza, tentata, non ha prodotto alcuna modifica nei risultati.

Per rendere stabile l'algoritmo è stato necessario ridurre l'ampiezza di quest'ultimi a valori di pochi secondi. Si sono condotte simulazioni dinamiche sulla rete con Δt di 1,3,5 secondi. Queste operazioni hanno evidenziato quanto la velocità di elaborazione del programma per far giungere a convergenza le generiche iterazioni risultasse assolutamente insufficiente per poter eseguire una simulazione che durasse almeno una giornata: a fronte di tempi di elaborazione lunghi svariate ore, il programma non è stato in grado di ottenere i risultati sull'andamento delle quantità fisiche che superassero i 30 minuti.

L'analisi dei valori di temperatura nei nodi della rete ha evidenziato una eccessiva variazione dell'andamento di questa proprietà. La causa di questo atteggiamento, a fronte della mancanza di errori nei codici di sorgente del programma è stata attribuita al termine UA che nonostante risultasse conforme ai dati ottenuti dalla letteratura tecnica è stato giudicato eccessivamente elevato per permettere al software di convergere con facilità. Questo era dovuto al fatto che nelle attuali condizioni il programma si trovava in grandi difficoltà nello svolgere le iterazioni a causa della troppo marcata differenza di temperatura tra l'inizio e la fine della stessa iterazione.

Addossando la colpa di questo andamento alla resistenza termica, si è proceduto quindi ad avviare numerosi tentativi di simulazioni modificando per ognuno di essi il timestep temporale e il fattore con cui veniva ridotto il termine UA, alla ricerca di una combinazione che risultasse vincente ai fini della ricerca del risultato.

La velocità di elaborazione per ognuno di questi tentativi si riduceva drasticamente nel momento in cui l'interfaccia del programma segnalava l'esaurimento del numero di iterazioni messe a disposizione per la risoluzione del problema termico senza arrivare a convergenza. Al presentarsi di questo problema seguiva un'esponenziale crescita del tempo necessario per il raggiungimento della convergenza al di sotto della soglia di tolleranza imposto. L'analisi di questi inservibili dati di output, nella maggioranza dei casi inservibili ha permesso comunque di verificare che, a parità di fattore con cui veniva diviso il termine UA, il programma riusciva a modellare la rete per un tempo minore all'aumentare del timestep temporale a causa dell'aumento dell'instabilità intrinseca dettata da Courant.

5.5.1.1 Andamento temperatura

Le immagini che seguono mostrano in successione l'andamento della temperatura nei vari punti della rete per le prime 6 h del giorno di prova ottenute con una simulazione che avesse in input passo temporale di 10 s e fattore UA diviso per 10, unico caso che è riuscito a fornire valori di output per più di 6 h.

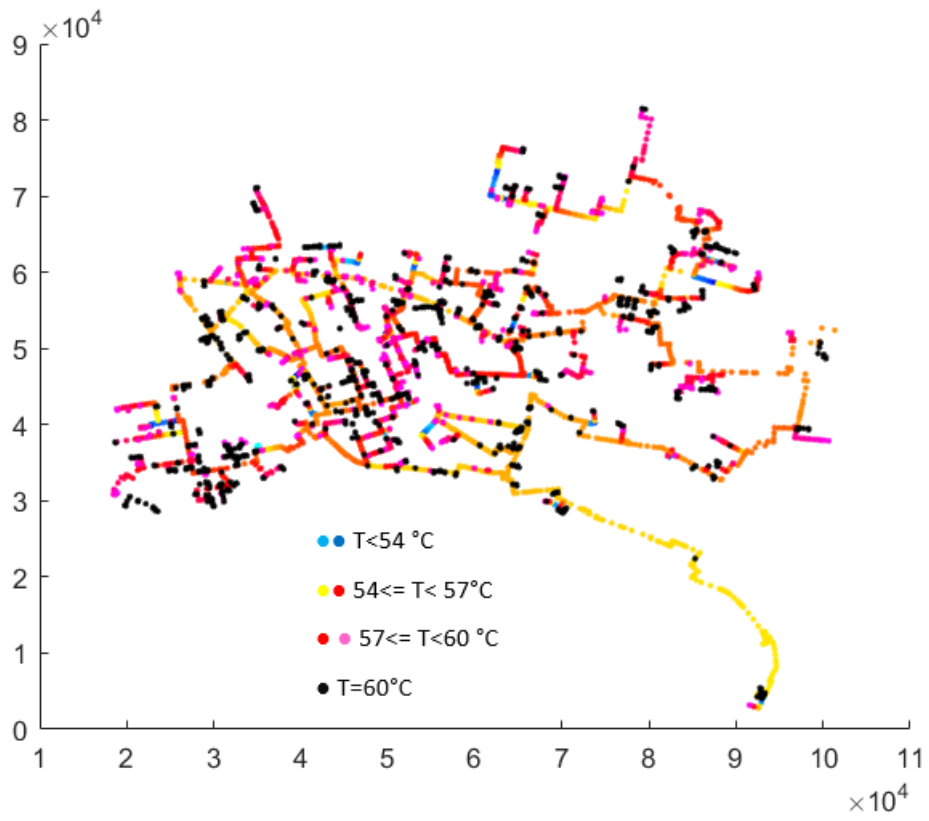


Figura 55: temperatura nella rete h 1

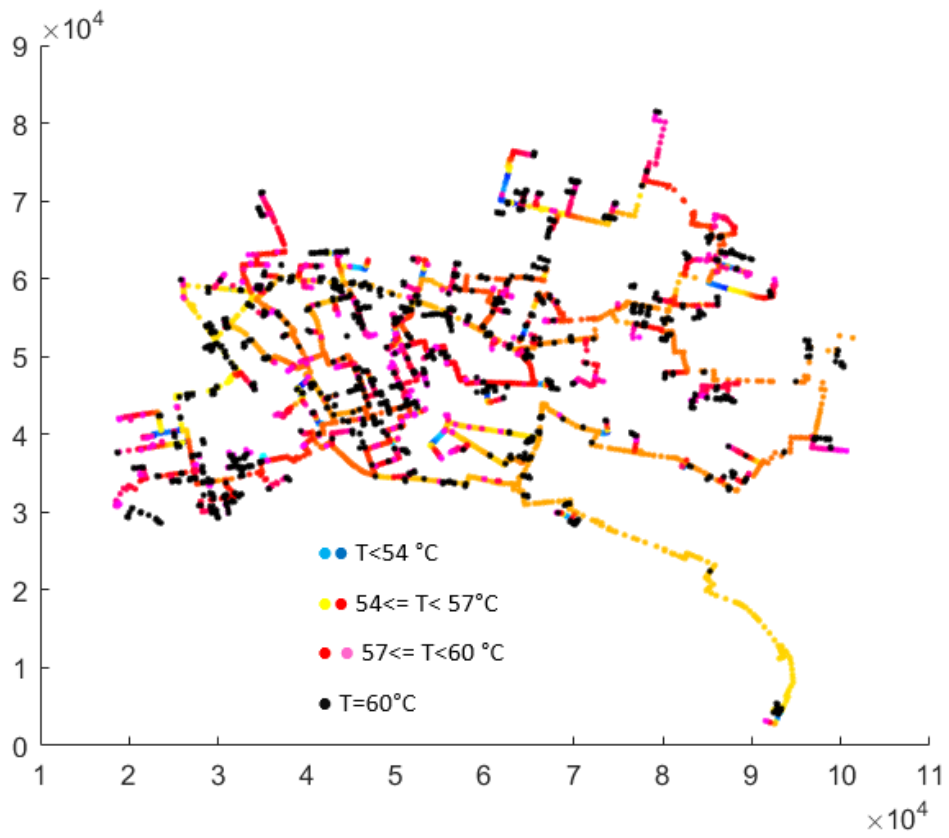


Figura 56: temperatura nella rete h 2

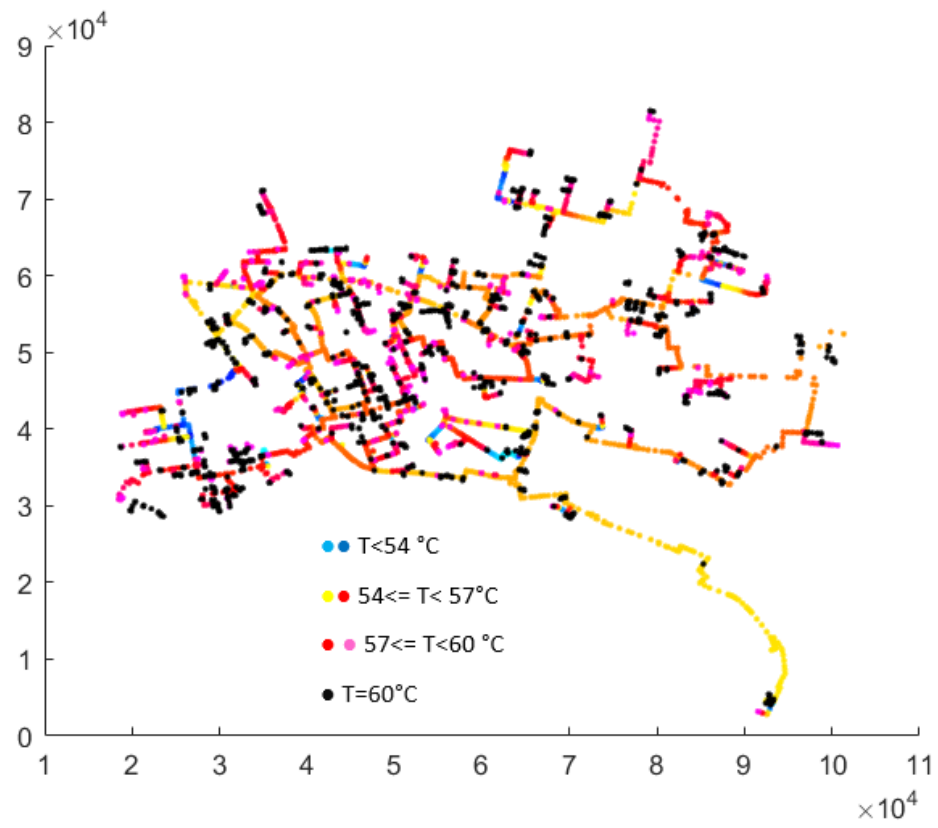


Figura 57: temperatura nella rete h 3

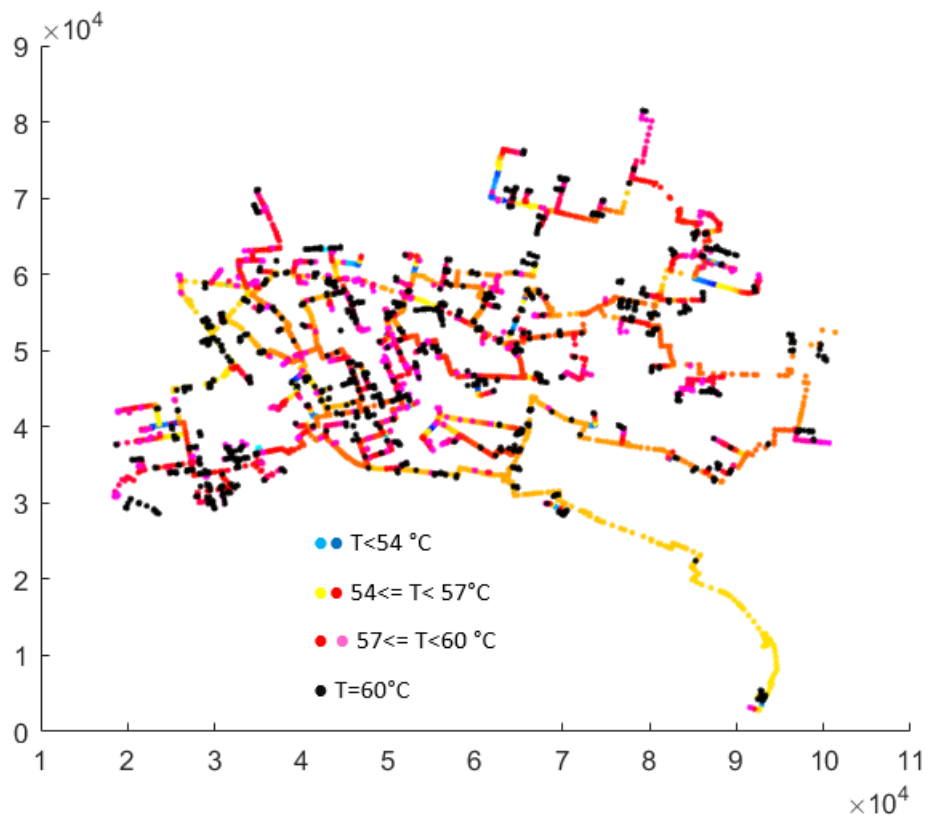


Figura 58: temperatura nella rete h 4

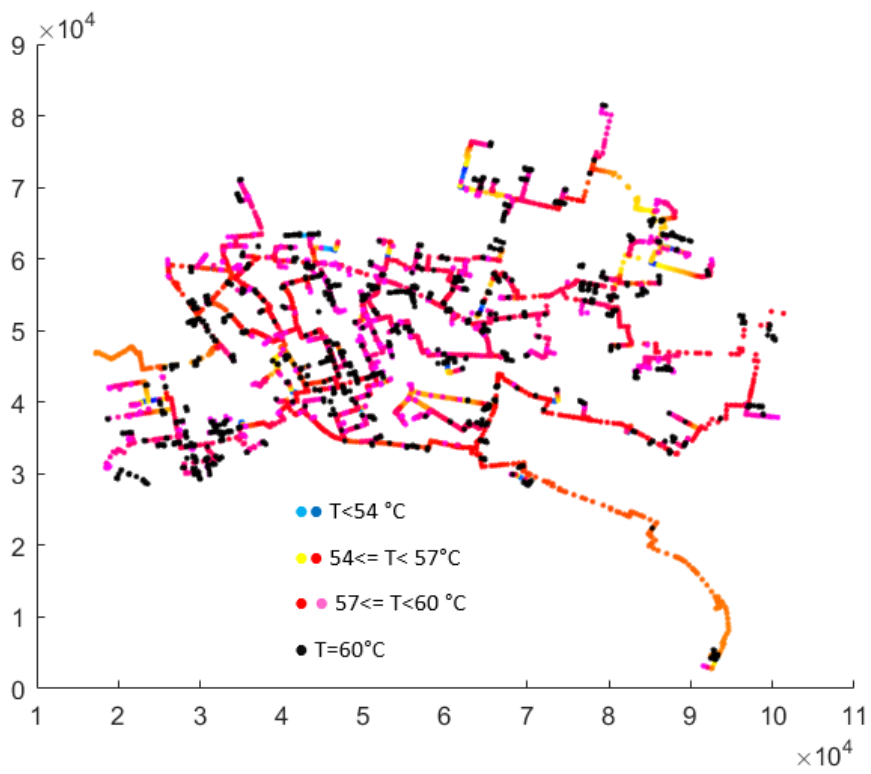


Figura 59: temperatura nella rete h 5

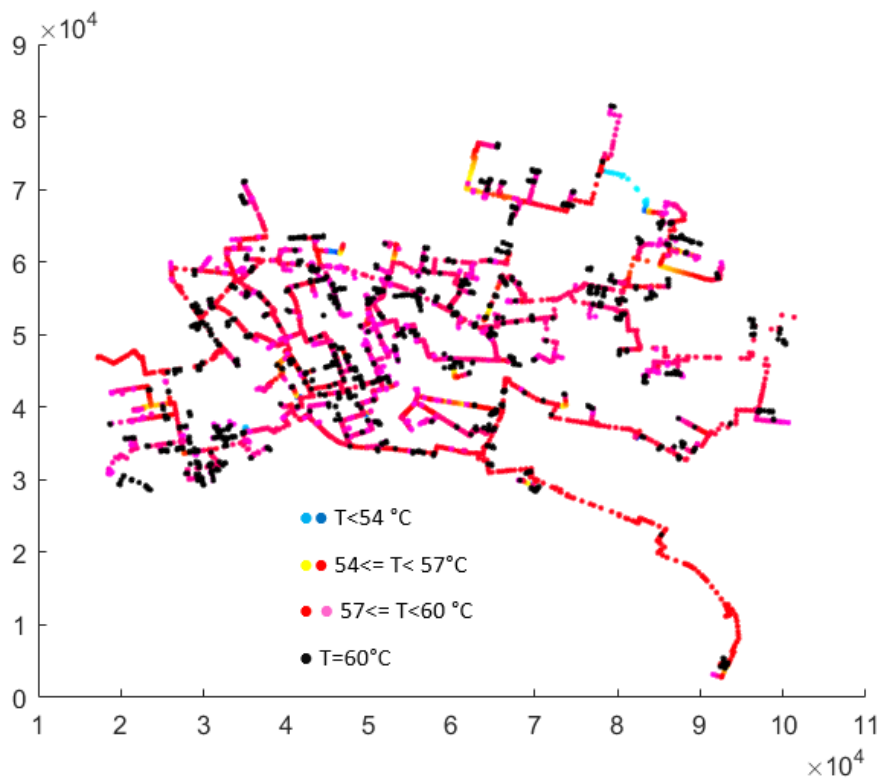


Figura 60: temperatura nella rete h 6

Dalle immagini sopra riportate si evince che la modifica nei file di input apportata consente un assestamento dei valori di temperatura nelle condotte di ritorno della rete lungo valori consoni alla tecnologia. I punti di colorazione nera corrispondono in parte alle utenze allacciate alla rete ma “spente”, mancanti di richiesta di potenza lungo il periodo di simulazione, in parte alla categoria di utenze scolastiche, le quali presentano correttamente un’assenza di prelievo nelle prime ore della giornata.

Il software è riuscito correttamente a non coinvolgere queste tipologie nei bilanci di energia, non essendo coinvolte nel prelievo di fluido termovettore, , facendo sì che la temperatura a questi nodi non subisse variazioni rispetto ai file di input. Lungo le sei h di simulazione si assiste inoltre correttamente a un graduale aumento della temperatura media lungo le condotte: i punti che nelle prime ore sono identificati dalla colorazione assegnata a un range di temperatura tra i 54 e i 57 °C sono gradualmente sostituiti da punti con colorazione assegnata al range di temperatura successivo, tra i 57 e i 60 °C, a testimonianza che al susseguirsi delle iterazioni il sistema abbandona lentamente le condizioni di transitorio termico assestandosi su una condizione di regime che garantisce una diminuzione di perdite termiche lungo la rete.

Nonostante le altre simulazioni avviate con differenti combinazioni di dati di input non siano state in grado di ottenere gli andamenti dei valori richiesti per un altrettanto lungo periodo, sono riuscite ugualmente a simulare il comportamento della rete lungo la prima ora della giornata:

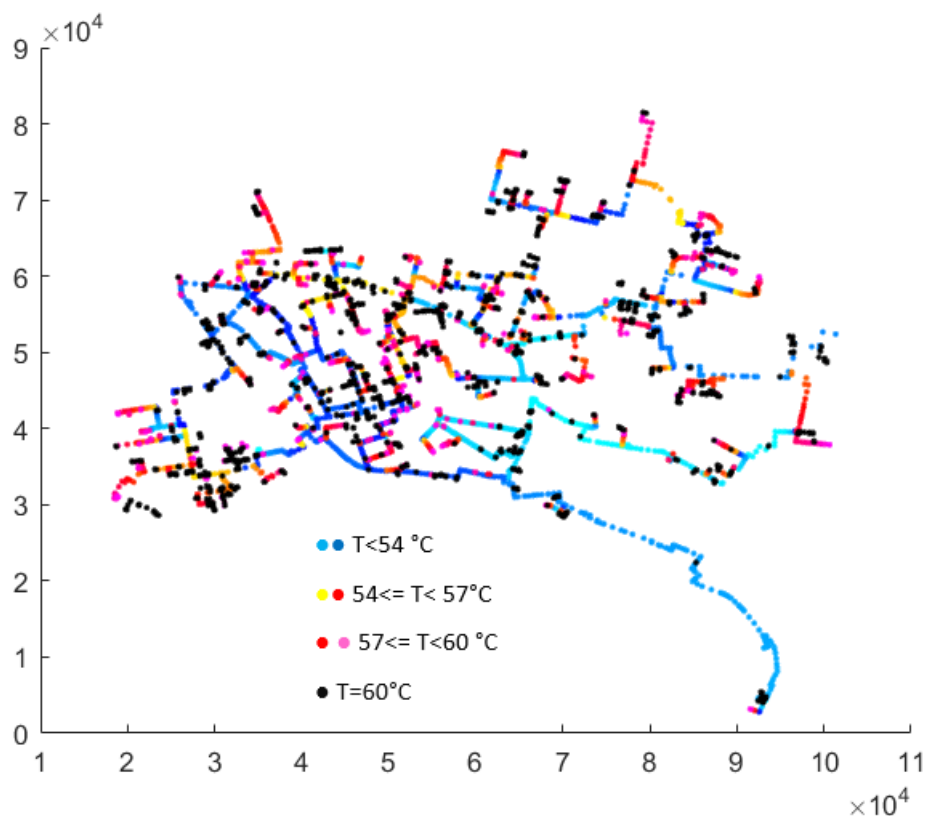


Figura 61: temperatura nella rete h 1 B

Questi valori sono stati ottenuti con passo temporale di 5 s e termine UA diviso 5 rispetto alla condizione originaria. Concordemente a quanto aspettato, la riduzione del termine UA per un fattore minore rispetto alla simulazione precedente, implica delle resistenze termiche più piccole, quindi una maggior variazione del valore della temperatura: si nota infatti come una grande parte della rete sia interessata da valori di temperatura leggermente inferiori rispetto al caso precedente.

Un ritorno all'aumento della diminuzione del coefficiente UA, fissato questa volta a 8, comporta il ritorno a una condizione più simile al caso iniziale.

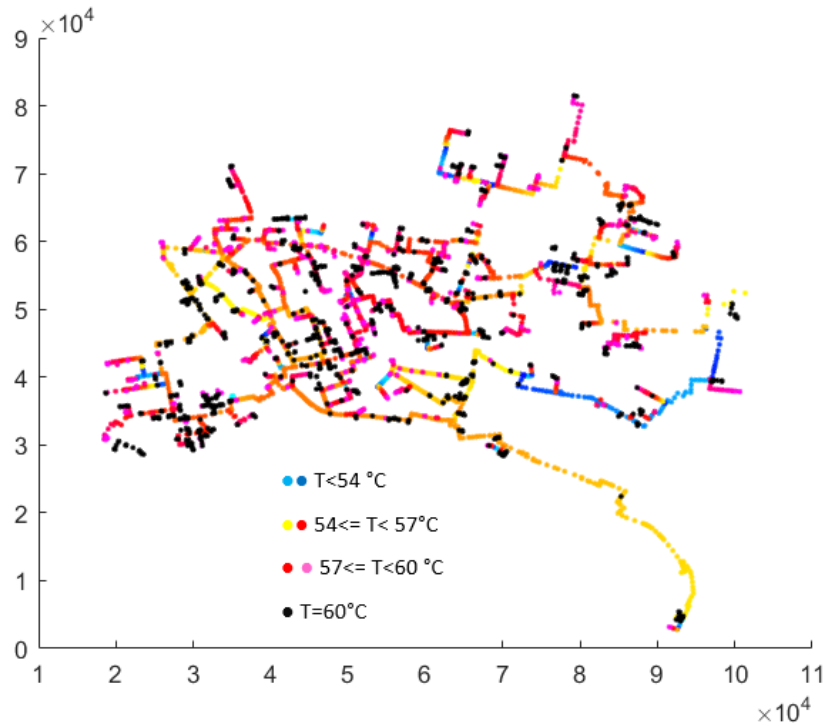


Figura 62: temperatura nella rete h 1 C

5.5.1.2 Andamento pressioni

Allo stato attuale di sviluppo del programma, quest'ultimo non è purtroppo in grado di simulare l'andamento della pressioni in tempo reale: la variazione di questo termine infatti si attesta sull'ordine di grandezza di -5 o -6, rendendo di fatto irrilevanti questi valori al fine di determinare le zone critiche della rete al fine di intervenire per garantire sempre un miglioramento dell'erogazione.

1	Time, s	CR	LF				
2		El. 0	El. 1	El. 2	El. 3		
3	Code:	3931	4893	3175	5480		
4	Nod. IN:	2208	373	1436	105		
5	Nod. OUT:	1429	1009	1178	849		
6	Nod. IN code:	4037	4957	3297	5491		
7	Nod. OUT cd :	4038	4925	3298	5488		
8		0	-8.58e-007	6.946e-005	8.736e-008	-0.000192	
9		10	-8.848e-007	8.276e-005	1.268e-007	-0.000212	
10		20	-9.073e-007	8.965e-005	1.467e-007	-0.0002241	
11		30	-9.276e-007	8.955e-005	1.449e-007	-0.0002264	
12		40	-9.495e-007	9.484e-005	1.589e-007	-0.0002353	
13		50	-9.682e-007	9.82e-005	1.674e-007	-0.0002416	
14		60	-9.87e-007	9.753e-005	1.639e-007	-0.0002429	
15		70	-9.996e-007	9.603e-005	1.613e-007	-0.0002429	
16		80	-1.017e-006	9.933e-005	1.662e-007	-0.0002486	
17		90	-1.026e-006	0.0001234	2.606e-007	-0.0002771	
18		100	-1.038e-006	0.0001259	2.665e-007	-0.0002818	
19		110	-1.056e-006	0.0001287	2.725e-007	-0.0002869	
20		120	-1.074e-006	0.0001322	2.793e-007	-0.0002925	

Figura 63: andamento pressioni

5.5.1.3 Andamento potenze

Rimane da valutare, analizzando l'andamento delle potenze assorbite dalle utenze, se il programma sia stato in grado di uguagliare il più possibile i valori delle potenze fornite in input.

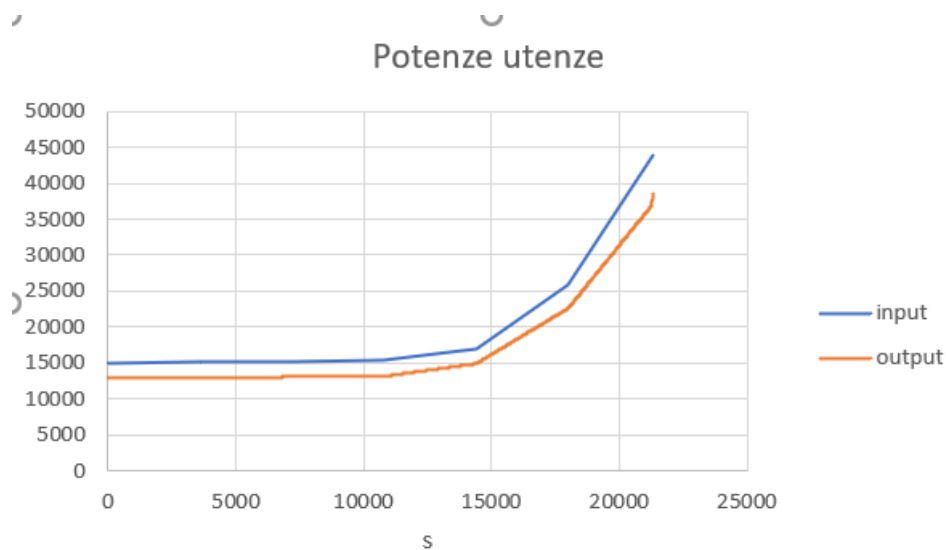


Figura 64: potenze utenze

La simulazione sul primo giorno del mese mostra che il programma è stato in grado di seguire l'andamento globale della potenza termica assorbita dalla totalità delle utenze, al netto di una leggera sottostima che può essere considerata accettabile a fronte dell'elevato numero di utenze allacciate, dalla diversa tipologia di appartenenza e dai differenti singoli andamenti che questo comporta.

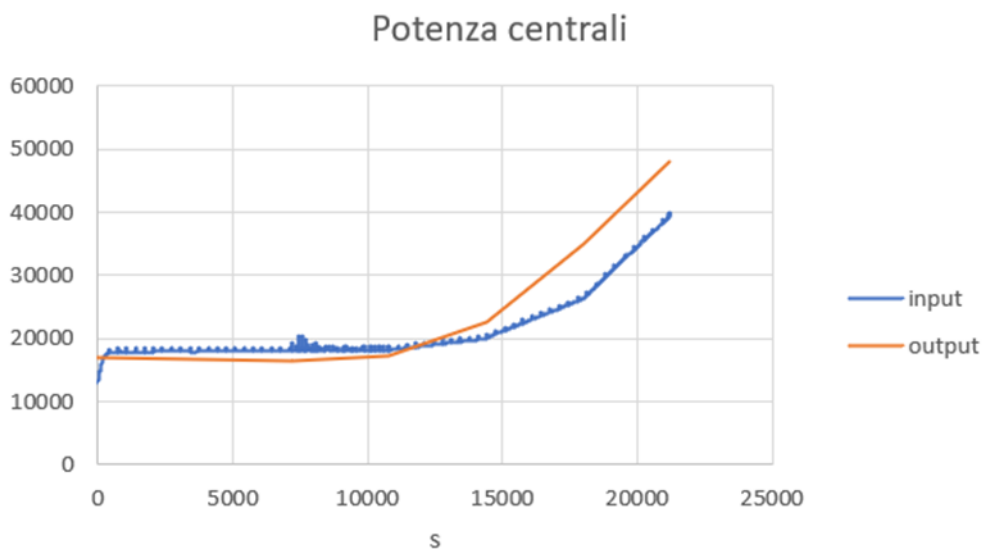


Figura 65: potenze centrali

In figura 65 è riportato l'andamento della potenza totale immessa in rete per rispondere alla richiesta di potenza termica delle centrali.

Per verificare quanto l'output segua fedelmente l'andamento delle potenze in input è necessario confrontare singolarmente le utenze. Per farlo si è riprodotta una nuova simulazione, che partisse ad esaminare il comportamento della rete non più dalle h 00:00 del primo giorno ma dalle ore successive al picco di massimo mattutino, in modo da estendere l'analisi a tutte le quattro categorie e non solo alle utenze appartenenti alla categoria sanitaria che nelle ore notturne sono le uniche con una richiesta energetica che varia nel tempo.

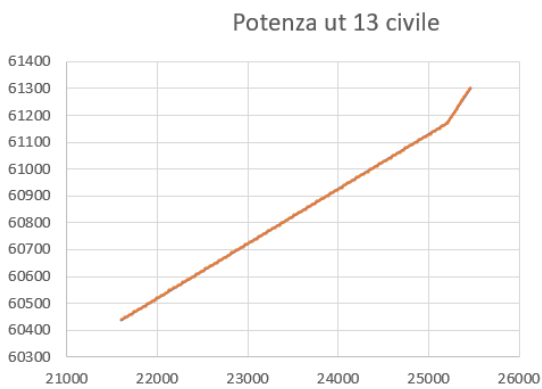


Figura 66: potenza utenza civile I

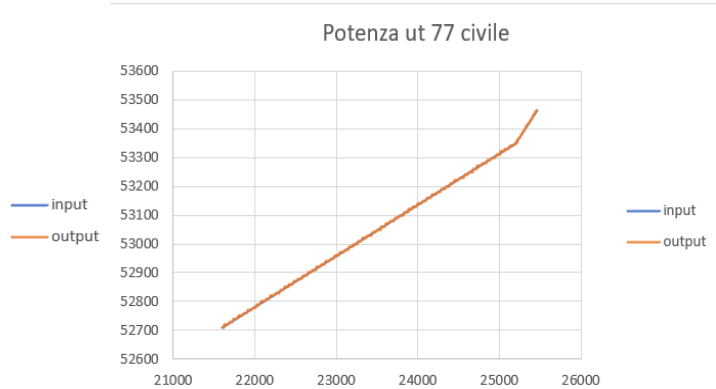


Figura 67: potenza utenza civile II

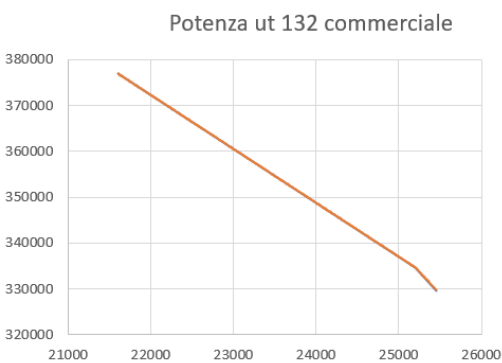


Figura 68: potenza utenza commerciale I

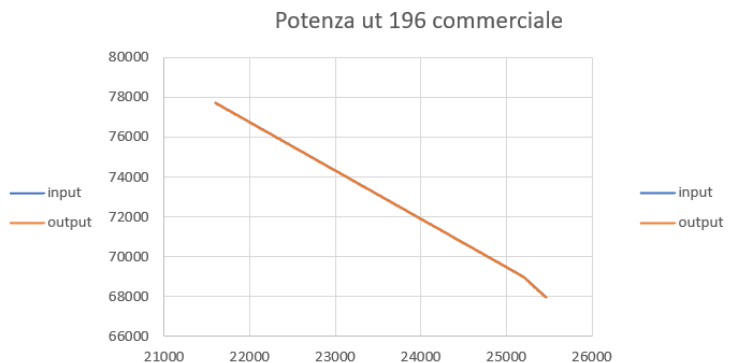


Figura 69: potenza utenza commerciale II

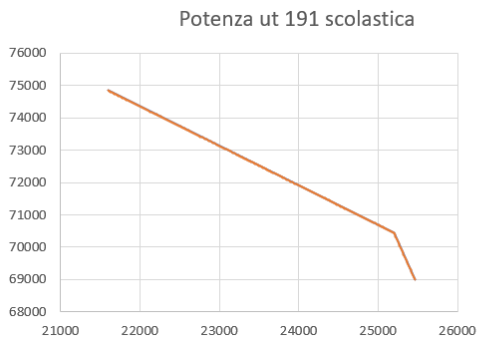


Figura 70: potenza utenza scolastica I

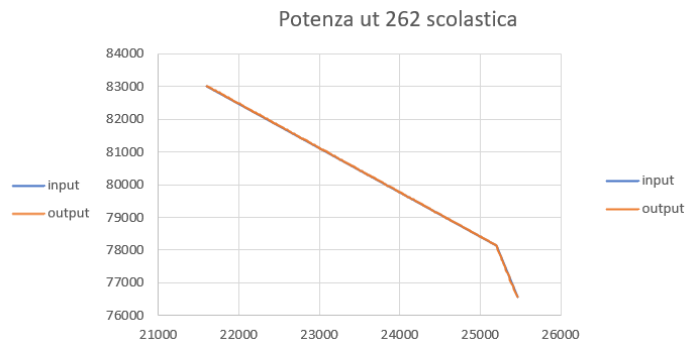


Figura 71: potenza utenza scolastica II

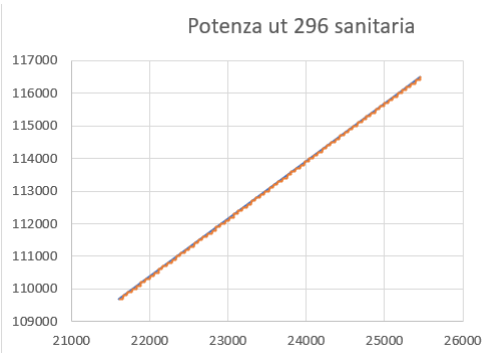


Figura 72: potenza utenza sanitaria I



Figura 73: potenza utenza sanitaria II

Capitolo 6

Conclusioni e possibili sviluppi futuri

In questo elaborato si è tentato di avviare una simulazione dinamica della rete di teleriscaldamento della città di Cremona, effettuato il set up e il testing di un software sperimentale. Tramite questo strumento si desidera conoscere in tempo reale i valori della pressione, portata e temperatura nelle condotte della rete in modo da identificare e localizzare le perdite termiche e di carico lungo la rete, con l'obiettivo di intervenire per aumentare l'efficienza del servizio di teleriscaldamento.

Accanto ai valori di queste grandezze fisiche, si determina se il programma sia in grado o meno di fornire i valori di potenza termica immessa dalle centrali che servono la rete e dalla moltitudine di sottostazioni di prelievo allacciate alla rete, in modo da efficientare l'erogazione della potenza per renderla uguale alla somma totale delle richieste termiche e minimizzare le perdite.

La prima parte dell'elaborato si concentra sull'estrazione dei dati strutturali della rete, salvata in un file DWG, tramite l'utilizzo di macro di istruzioni scritte in linguaggio di programmazione AutoLISP, che affianca AutoCAD sin dalle prime versioni. Nonostante si fosse preso come punto di partenza il lavoro svolto da altri tesisti, che avevano lavorato sia sulla stessa rete che su un'altra rete, è stato familiarizzare con un linguaggio di programmazione ed un software mai utilizzati durante i corsi di studi. Grazie alla sua semplicità che contraddistingue AutoLISP è stato possibile apportare delle modifiche o parziali riscritture ai codici ereditati. I due risultati così ottenuti forniscono rispettivamente, le coordinate geometriche del posizionamento delle sottostazioni e delle centrali della rete, e le una coordinate dei nodi della rete in una ordinati come punti di inizio e di fine di una generica condotta. Si è proceduto in seguito alla loro elaborazione in Matlab allo scopo di ottenere tre file di testo, chiamati "nodi", "elementi" e "utenze" che costituiscono gli input del programma sperimentale.

Il file nodi si limita a contenere le informazioni di temperatura e pressione nelle condotte di mandata e di ritorno della rete. E' stato necessario molto tempo per giungere alla versione definitiva a causa di problemi di natura grafica presenti sul file di disegno che si traducevano in un file di input che non permetteva al programma di ricostruirne la topografia garantendo la totale connessione degli elementi contenuti. La risoluzione di questi errori ha richiesto una serie di correzioni basandosi sugli errori contenuti nel disegno e una profonda riscrittura del codice del programma ad opera del relatore Professor F. Viganò. Il file utenze contiene i valori di richiesta energetica per ogni utenza della rete ottenute da delle curve sperimentali che permettesse di modellare l'andamento della richiesta oraria partendo dai dati consuntivi forniti a disposizione dell'azienda.

Una volta risolti i problemi di esecuzione da parte del programma è stato possibile avviare i primi tentativi di simulazione dinamica della rete. I risultati ottenuti sul file di output delle utenze mostrava che con la discretizzazione temporale inizialmente assegnata il programma non era in grado di simulare l'erogazione della potenza prelavata dalla rete. La diminuzione del passo temporale avvenuto nei tentativi successivi ha permesso di riuscire a risolvere i problemi di stabilità prima sorti ma al contempo non ha permesso di ottenere simulazioni della rete che durassero più di 30 minuti rendendo infruttuosa la ricerca di ottimizzazione di erogazione elettrica.

Si è attribuita la lentezza di computazione all'eccessiva variazione del valore di temperatura tra un'iterazione e la successiva causata da un valore di resistenza termica dei materiali costituenti le tubature troppo basso, anche se conformi ai valori tabulati presenti in letteratura tecnica.

Sono state avviate quindi nuove simulazioni variando, oltre al passo temporale, il fattore con cui veniva diviso il termine UA inserito all'interno del file elementi. Una particolare combinazione di questi due fattori, composta da Δt di 10 s e fattore UA ridotto di un ordine di grandezza, ha permesso di analizzare almeno l'andamento della temperatura nelle prime sei h della giornata, rendendo tuttavia inservibili i file di output mostranti la variazione di pressione in quanto la variazione si attestava su valori talmente minimi da rendere irrilevante lo studio del suo andamento.

Confrontando i valori delle potenze di output ottenuti con quelli riferiti alle potenze in input si nota che il programma è riuscito con buona precisione a ricostruire l'andamento delle richieste energetiche attese.

In conclusione, nonostante i numerosi sviluppi che lo hanno interessato nel procedere delle operazioni di testing, il programma sperimentale al suo attuale stato non si è rivelato in grado di eseguire la simulazione dinamica di una rete di teleriscaldamento dalle dimensioni e dal grado di complessità come quella attualmente installata nella città di Cremona. L'instabilità del metodo utilizzato per la risoluzione delle equazioni differenziale che governano il problema termico, impedisce di utilizzare discretizzazioni temporali abbastanza lunghe da simulare il comportamento della rete per un tempo sufficientemente lungo. Gli sviluppi futuri dovranno sicuramente concentrarsi sul miglioramento dell'algoritmo alla base del programma allo scopo di velocizzare di molto la procedura di calcolo.

Bibliografia

[GSE] Gestore Servizi Energetici – Teleriscaldamento e teleraffreddamento 2018- Diffusione delle reti ed energia fornita in Italia

AIRU- Il riscaldamento urbano, annuario 2020

AIRU-Legambiente -Il Teleriscaldamento in Italia- Stato attuale e potenzialità di sviluppo – Scenario dei benefici energetici ed ambientali

Osservatorio permanente della regolazione energetica, idrica e del teleriscaldamento-
Inquadramento generale del settore del Teleriscaldamento italiano

Linea Group Holding S.p.A www.linea-green.it/cremona

Roberto Rossi “IL MIO LISP”, edizione 01/08/2016 www.redchar.net

Autodesk Knowledge Network, *AutoLisp Developer’s Guide*, January 2012

Arnold Higuít,Sr, *Practical AutoLISP Programming- Beginner to Advanced*, Udemy.com

Punto di partenza per il seguente elaborato:

F. Minoli, *Costruzione di un modello numerico per reti di teleriscaldamento efficienti*, Piacenza 2014

G. Dadda, G. Gabbani, *Raccolta dati di una rete di teleriscaldamento per successiva analisi dinamica*, Piacenza 2018

A. Platoni, *Analisi e simulazione dinamica di reti di teleriscaldamento*, Piacenza 2019

