



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO



Ricerca di Sistema elettrico

Stato dell'arte degli algoritmi e delle metodologie di ottimizzazione relative al dimensionamento e alla localizzazione ottimale dei componenti di una rete termica

Antonino Pontecorvo, Luigi Mongibello

Report RdS/PTR2019/059

STATO DELL'ARTE DEGLI ALGORITMI E DELLE METODOLOGIE DI OTTIMIZZAZIONE RELATIVE AL
DIMENSIONAMENTO E ALLA LOCALIZZAZIONE OTTIMALE DEI COMPONENTI DI UNA RETE TERMICA

Antonino Pontecorvo, Luigi Mongibello

Con il contributo di: A. Borriello, M. Caliano, C. Cancro, G. Ciniglio, M. Di Somma, G. Fiorenza, V. Giglio, A. Guglielmo, D. Mele

Dicembre 2019

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - I annualità

Obiettivo: *N. 1 - Tecnologie*

Progetto: *1.5 - Tecnologie, tecniche e materiali per l'efficienza energetica ed il risparmio di energia negli usi finali elettrici degli edifici nuovi ed esistenti*

Work package: *4 - Reti energetiche integrate*

Linea di attività: *LA4.19 - Sviluppo di un tool di ottimizzazione per il dimensionamento, la localizzazione e la gestione dei componenti di una rete termica (1 di 3)*

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi

Responsabile del Work package (LA4.16-LA4-33): Luigi Mongibello

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE	5
2 STATO DELL'ARTE SULLE RETI TERMICHE.....	5
3 METODOLOGIE MONO-OBIETTIVO E MULTI-OBIETTIVO PER IL DIMENSIONAMENTO OTTIMIZZATO DI RETI TERMICHE.....	9
3.1 APPROCCI MATEMATICI ALLA OTTIMIZZAZIONE DELLE RETI TERMICHE	9
3.2 VARIABILI DECISIONALI O DI INPUT	11
3.3 I VINCOLI	12
3.4 SOFTWARE UTILIZZATI PER L'OTTIMIZZAZIONE DELLE RETI TERMICHE	13
3.5 FUNZIONI OBIETTIVO.....	13
4 CLASSIFICAZIONE DELLE RETI TERMICHE NELLA LETTERATURA SCIENTIFICA	14
4.1 <i>Distributed integration</i>	15
4.2 <i>Superstructures</i>	16
4.3 <i>Operation and planning</i>	16
4.4 <i>Subsystem building blocks</i>	17
5 INDAGINE BIBLIOGRAFICA SULLE SOLUZIONI OTTIMIZZATE PER LA COLLOCAZIONE DEI COMPONENTI DI RETI TERMICHE.....	19
6 CONCLUSIONI	20
7 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	21

Sommario

Nel presente lavoro è stata effettuata una ampia ricerca bibliografia al fine di determinare lo stato dell'arte degli algoritmi e delle metodologie di ottimizzazione relative al dimensionamento e alla localizzazione ottimale dei componenti di una rete termica. Infatti, le reti termiche sono universalmente riconosciute come la tecnologia futura per il riscaldamento dei centri abitati, in quanto garantiscono sostenibilità ambientale e basse emissioni di inquinanti. Le reti termiche si sono evolute attraverso cinque generazioni passando da un funzionamento iniziale ad alta temperatura (superiore ai 100°C) fino ad arrivare ai giorni nostri a temperature intorno ai 15-25 °C. In particolare, come si vedrà in dettaglio nello studio effettuato, l'adozione di temperature di funzionamento più basse porta notevoli vantaggi sia perché consente di integrare tali sistemi energetici con fonti rinnovabili, sia perché riduce i costi di impianto e di funzionamento. In questo documento vengono presentati quindi le tecniche di ottimizzazione che si possono ritrovare nella più recente letteratura scientifica per l'ottimizzazione e la simulazione delle reti termiche. In particolare, si porteranno all'attenzione le variabili di input o decisionali che devono essere considerate in un processo di ottimizzazione che coinvolge le reti termiche, così come i vincoli ambientali, progettuali e topologici, a cui deve sottostare l'implementazione di un processo di ottimizzazione di una rete termica. Infine vengono anche esaminate le funzioni obiettivo che maggiormente sono state utilizzate dai ricercatori per l'ottimizzazione di tali sistemi energetici. Particolare attenzione viene posta anche ai software utilizzati in letteratura per la simulazione e l'ottimizzazione, in modo da avere un quadro quanto mai esaustivo sul processo di ottimizzazione che coinvolge le reti termiche.

1 Introduzione

Nel primo anno di attività per quanto concerne il WP4 - LA4.19 vale a dire lo “Sviluppo di un tool di ottimizzazione per il dimensionamento, la localizzazione e la gestione dei componenti di una rete termica”, gli autori hanno effettuato una approfondita ricerca bibliografica in modo da determinare secondo la più recente letteratura scientifica quale fosse lo stato dell’arte nel suddetto ambito di ricerca.

L’obiettivo infatti è quello di approfondire ed implementare le conoscenze sulle metodologie per l’ottimizzazione delle reti termiche, per poter così gettare le basi per il successivo sviluppo di appropriati modelli di calcolo ed in ultima analisi della loro validazione.

Pertanto nella prima parte dell’attività è stata analizzata la cronistoria delle reti termiche, osservando come tali sistemi di trasporto di energia abbiano avuto origine con applicazioni ad alta temperatura, mentre oggi, per motivi legati al risparmio energetico, alla necessità di realizzare sistemi energetici a basso impatto ambientale, ai costi di impianto, sono utilizzate in applicazioni a bassa temperatura. D’altronde il grande interesse del mondo scientifico verso questo tipo di tecnologia ha fatto sì che oggi siamo giunti nel pieno della quarta generazione delle reti termiche e già avviati verso la quinta generazione.

Successivamente si è proceduto nello studiare le problematiche connesse alla progettazione ed al dimensionamento delle reti termiche, in particolar modo tenendo conto degli approcci matematici che vengono utilizzati in letteratura per l’ottimizzazione di tali sistemi energetici. Più in dettaglio si sono analizzati, anche i principali obiettivi, vincoli e variabili che entrano in gioco nel dimensionamento e nella progettazione di una rete termica. A tal proposito verranno presentati anche i codici di calcolo maggiormente impiegati nella letteratura scientifica per lo studio di queste problematiche.

Nell’ultima fase dell’attività si è effettuato una approfondita indagine bibliografica sulle soluzioni ottimizzate per la collocazione dei componenti delle reti termiche.

Infatti, essendo il dimensionamento e la progettazione di una rete termica molto complessa per la molteplicità di vincoli e variabili, al fine di ottenere una configurazione ottimale è necessario stabilire anche in maniera dettagliata il numero, la posizione e la taglia dei componenti. Inoltre, è importante per ottenere una corretta soluzione del problema tenere conto di tutte le interdipendenze così come le relazioni spaziali.

2 Stato dell’arte sulle reti termiche

I ricercatori di tutto il mondo stanno intensificando i loro sforzi al fine di ridurre il consumo di energia termica all’interno degli edifici, infatti in Europa nel 2008 circa il 50% del consumo di energia veniva utilizzato per il riscaldamento che corrispondeva a circa 565 Mtep del consumo finale [1]. Più in dettaglio, in Europa circa il 12% dell’energia termica viene fornito da energia rinnovabile e solo il 10% da reti termiche.

Negli ultimi quattro decenni le reti termiche sono una tecnologia che si è evoluta considerevolmente. Infatti tradizionalmente le reti termiche sono nate per essere impiegate in applicazioni ad alta temperatura, in particolar modo per servire edifici tramite un sistema combinato sia di calore che di energia. In particolare, possiamo distinguere cinque generazioni di reti termiche [2], [3]. In Figura 1 è riportato una interessante rappresentazione dell’evoluzione delle reti termiche.

Nella prima generazione di rete termiche troviamo che il vettore di calore era il vapore. Questo tipo di rete termica fu introdotta intorno al 1880 negli Stati Uniti ma ben presto divenne popolare anche in alcuni paesi europei. Le reti termiche di prima generazione furono utilizzate fino al 1930 ed il vapore ad alta temperatura veniva trasportato in condotte di cemento. Si può quindi ben comprendere come tali sistemi non erano alquanto efficienti. Infatti a causa delle alte temperature e pressioni si ebbero anche problemi di affidabilità e sicurezza. Tuttavia, alcuni di questi sistemi sono ancora in uso, ad esempio a New York o Parigi. Altri sistemi originariamente appartenenti alla prima generazione sono stati successivamente convertiti in generazioni successive [4].

La seconda generazione di reti termiche va dal 1930 al 1970 ed era caratterizzata dal fatto che il fluido termovettore fosse acqua calda in pressione, prodotta mediante la combustione di carbone o petrolio. L’acqua calda viaggiava ancora in tubazioni di cemento ad una temperatura di 100°C ed in grandi scambiatori di calore a tubo e mantello. Queste applicazioni di reti termiche le ritroviamo soprattutto nella vecchia

Unione Sovietica e dopo la seconda guerra mondiale anche in alcuni paesi dell'Europa dell'Est. Il principale scopo dell'utilizzo di queste reti termiche fu quello di realizzare un risparmio di energia primaria migliorando contemporaneamente il benessere termico grazie all'adozione della cogenerazione.

Dal 1970 parte la terza generazione di reti termiche che fu utilizzata in molti paesi del mondo. Questa generazione è chiamata anche "Scandinavian District Heating Technology", perché la maggior parte dei produttori dei componenti delle reti termiche erano scandinavi. In particolare le tubazioni erano costituite da tubi prefabbricati ed isolati, e gli scambiatori di calore erano del tipo a piastre con componenti meno pesanti [5].

Il fluido termovettore è ancora acqua calda in pressione, ma le temperature sono al di sotto dei 100°C. Lo sviluppo di questa tecnologia fu dovuto soprattutto alla crisi petrolifera ed alla necessità di migliorare l'efficienza energetica degli impianti. Infatti per alimentare le reti termiche venivano utilizzati combustibili derivanti dal carbone, dalle biomasse e dai rifiuti; in alcuni casi vi era anche un apporto di energia solare o geotermica. A tal riguardo a Parigi intorno agli anni 70, per il riscaldamento delle abitazioni veniva utilizzato una fonte geotermica situata all'incirca 2 km sotto la superficie terrestre, in cui il fluido termovettore veniva inviato ad una temperatura tra i 50°C e 70°C [6], [7].

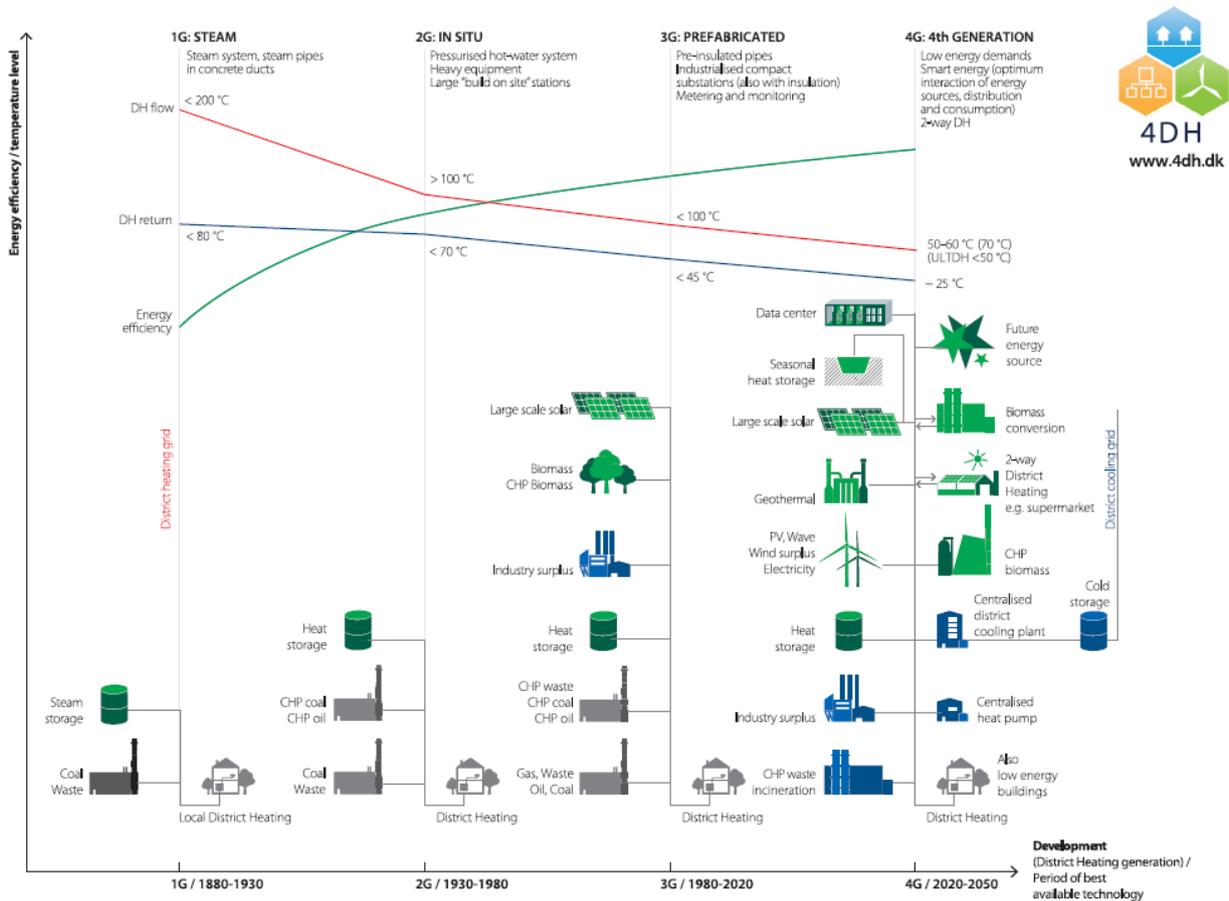


Figura 1: Sviluppo storico delle reti termiche (fonte [8])

Oggi siamo nel pieno della quarta generazione di reti termiche e già avviati verso la quinta generazione [2], [3] come rappresentato in Figura 1, in cui i principali obiettivi sono ancora una volta il risparmio energetico e la minimizzazione dei costi, ma in particolar modo quello di realizzare sistemi energetici con basse emissioni di inquinanti [8], [9]. L'andamento dello sviluppo della tecnologia delle reti termiche, ha mostrato nel corso delle prime tre generazioni una tendenza verso una distribuzione delle temperature più basse, componenti costituiti da materiali meno pesanti e prefabbricati. Pertanto sulla base delle suddette tendenze, la prossima tecnologia di reti termiche dovrà essere orientata a funzionare con temperature più basse e componenti

orientati alla facilità e flessibilità nell'assemblaggio. Infatti si delinea che un livello di temperatura, con temperatura di mandata intorno ai 25°C diventerà la caratteristica più importante per le reti termiche di quinta generazione. Di seguito vengono riportati alcuni dei vantaggi che si riescono a conseguire con una bassa temperatura di mandata del fluido termovettore [10]:

- Il principale motivo che spinge verso livelli di temperatura più bassi rispetto alle precedenti tre generazioni è quello di riuscire a raggiungere un'efficienza complessiva più alta del sistema di distribuzione dell'energia termica.
- Si diminuiscono le perdite termiche, con conseguente diminuzione delle perdite exergetiche.
- Migliori prestazioni e funzionamento delle pompe che lavorano a temperature più basse.
- Riduzione del rischio di perdite dai tubi a causa di stress termico e pertanto riduzione dei corrispondenti costi di manutenzione.
- Minor rischio di ebollizione dell'acqua nella rete termica, il che significa minor rischio di flusso bifase nelle pompe e problemi di cavitazione.
- Un miglior accoppiamento dei carichi termici richiesti dall'utente con quelli forniti dalla rete.
- Elimina il potenziale rischio di scottature della pelle a causa di perdite d'acqua ad elevate temperature.
- Di accoppiarsi in maniera ancora più flessibile con le fonti di energia rinnovabile ed accumuli termici.

Per mostrare lo stato dell'arte raggiunto dalle reti termiche per quanto riguarda le temperature di funzionamento, si riportano in particolare in Figura 2 i livelli medi di temperatura di mandata e di ritorno per diverse reti termiche esistenti ed in Figura 3 per alcuni impianti pilota. Queste figure mostrano che i livelli di temperatura di Riga, Varsavia e Poznan, così come gli impianti presenti in Svezia e Danimarca per il loro livello termico possono essere considerati di terza generazione, mentre essendo i livelli termici degli esistenti impianti di Ginevra e Brescia più alti, vicino se non superiori ai 100°C, si possono considerare di seconda generazione [11].

In definitiva per essere in grado di realizzare le aspettative attese le reti termiche di quinta generazione dovranno:

- Erogare calore a bassa temperatura sia per il riscaldamento domestico degli ambienti, sia per la fornitura di acqua calda sanitaria.
- Essere capaci di distribuire calore con basse perdite.
- Essere in grado di recuperare calore da fonti a bassa temperature ed integrare fonti rinnovabili come l'energia solare e geotermica.
- Essere in grado di integrarsi con gli altri sistemi energetici in maniera intelligente, come impianti elettrici, termici e di raffreddamento.
- Essere in grado di garantire una adeguata pianificazione e progettazione in modo da rendere conveniente l'integrazione in sistemi energetici sostenibili.

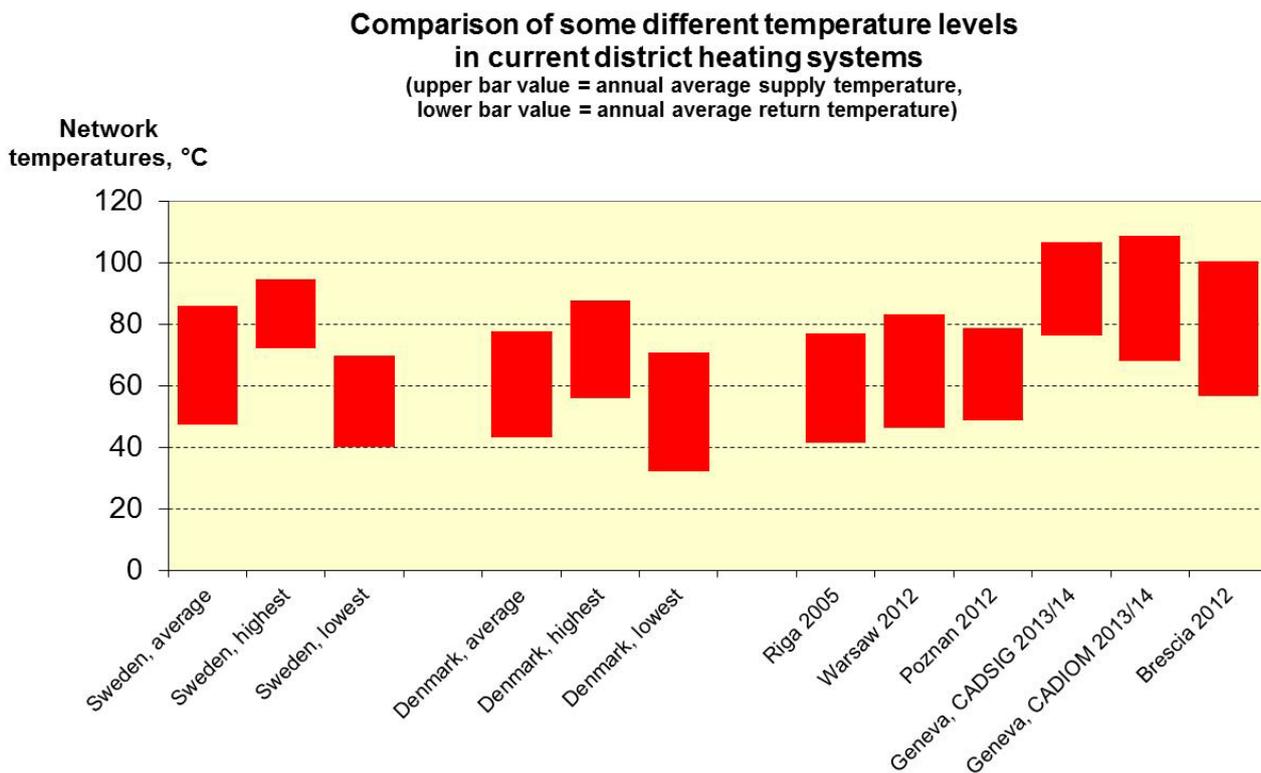


Figura 2: Confronto delle temperature di mandata e di ritorno nelle più attuali reti termiche. (fonte [12])

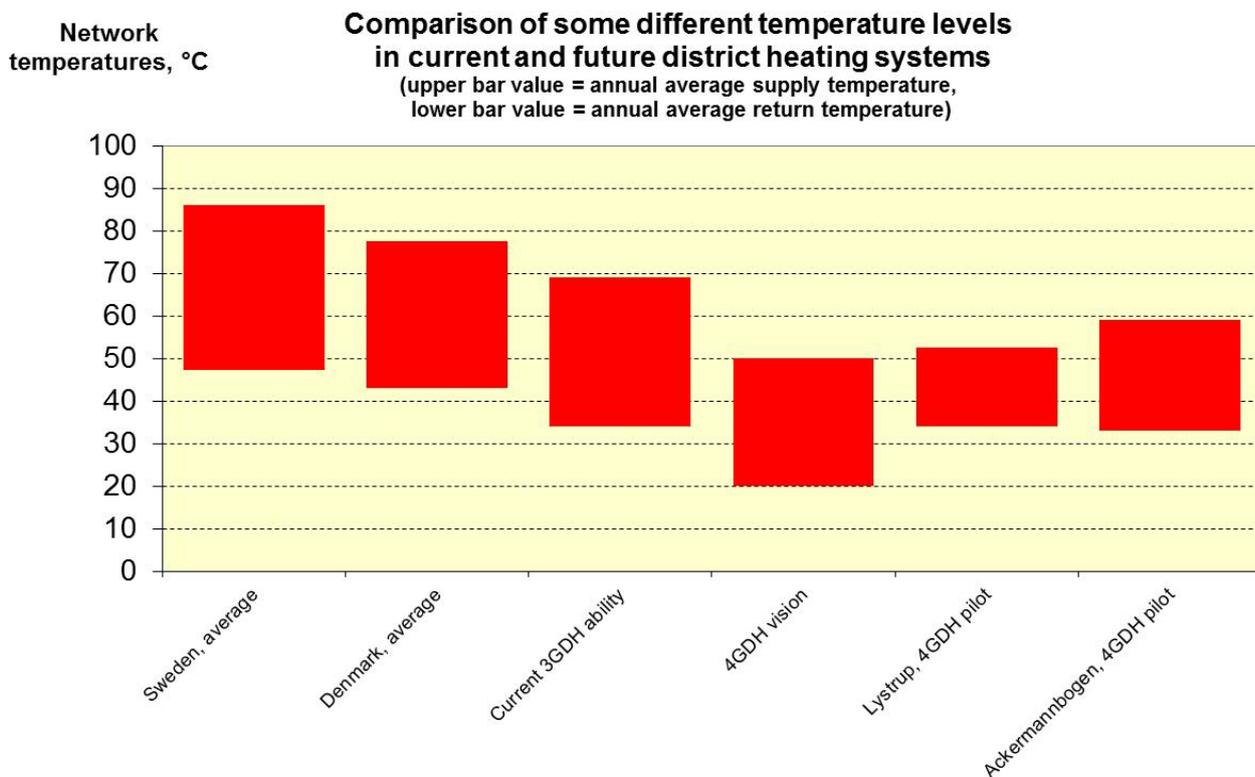


Figura 3: Confronto delle temperature di mandata e di ritorno nelle più attuali reti termiche e negli impianti pilota. (fonte [12])

3 Metodologie mono-obiettivo e multi-obiettivo per il dimensionamento ottimizzato di reti termiche

3.1 Approcci matematici alla ottimizzazione delle reti termiche

Una razionale pianificazione e progettazione delle reti termiche assume un ruolo fondamentale per raggiungere da un lato gli obiettivi di massimizzare il risparmio energetico e gli aspetti economici dall'altro minimizzare le emissioni di inquinanti. In generale una rete termica è costituita da una fonte di calore, da una rete di distribuzione e da un certo numero di utenze Figura 4.

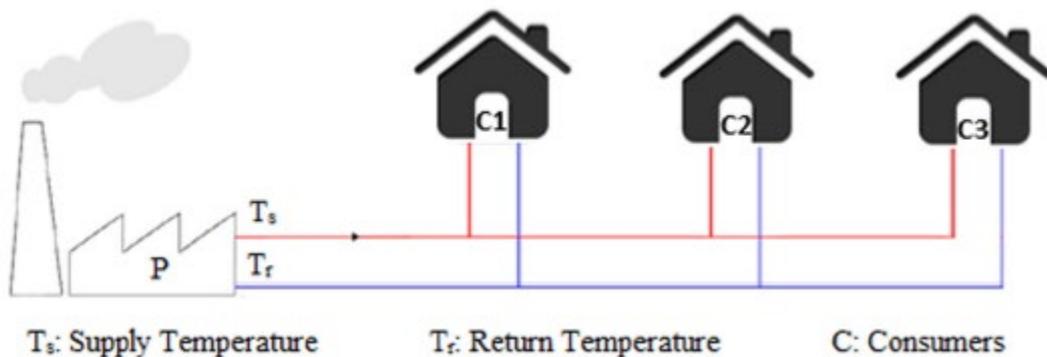


Figura 4: Layout di una rete termica (fonte [13])

Una rete termica varia la sua complessità in base a vari fattori, di seguito vengono riportati quelli più significativi [13]:

- Numero di tecnologie utilizzate: una delle complessità nella progettazione e dimensionamento delle reti termiche è l'integrazione di altre fonti di energia oltre alla fonte termica. Ad esempio in una rete termica alimentata da fonte geotermica, il sistema potrebbe operare con un fluido organico invece dell'acqua. Ad ogni modo in una rete termica possono essere integrate diverse fonti di energia rinnovabile [14], [15], [16] e [17].
- Il numero di utenze finali: una delle principali problematiche nella progettazione di una rete termica è il numero e la varietà degli utenti collegati al sistema. Infatti una rete termica situata in un'area municipale servirà una varietà di edifici residenziali, commerciali e industriali con diversi livelli di domanda [18].
- Profili temporali: è molto realistico pensare che ciascun utente connesso alla rete abbia un proprio profilo di carico termico [15]. Ad esempio una utenza industriale avrà meno oscillazione del carico termico rispetto ad una utenza domestica [19].
- Vincoli spaziali: oltre alla posizione di tutte le utenze all'interno della rete termica, gioca un ruolo fondamentale anche la configurazione della città. Ad esempio, cercare di evitare l'interferenza della rete termica con le infrastrutture. Così come altri fattori che potrebbero influenzare la progettazione di una rete termica sono la qualità e la topologia del suolo [15], [20], [21] e [22].

Queste problematiche possono essere affrontate e risolte solo se si ha una ottimale [23] [24]:

- Integrazione delle tecnologie.
- Configurazione della rete.
- Funzionamento.

In letteratura si possono trovare diversi metodi di ottimizzazione aventi lo scopo di ridurre le perdite termiche, nonché i costi associati al funzionamento e alla migliore configurazione delle reti termiche nonché alla riduzione di emissioni. Tra i metodi più considerati nella letteratura scientifica ci sono metodi matematici basati su variabili continue o discrete, algoritmi genetici, reti neurale e sistemi di logica Fuzzy.

In particolare, l'ottimizzazione di una rete termica può essere mono-obiettivo se la funzione da ottimizzare è singola o multi-obiettivo se ci sono più funzioni che devono essere ottimizzate [25].

A tal riguardo si fa osservare che mentre per le funzioni mono-obiettivo verranno utilizzati approcci basati su metodi deterministici, per le funzioni multi-obiettivo viene utilizzata la metodologia basata sui fattori ponderati o meglio dei pesi, oppure una ulteriore soluzione verrà trovata facendo ricorso alla frontiera di Pareto.

In particolar modo nel caso dei fattori ponderati, giocano un ruolo fondamentale il peso dato alle singole funzioni obiettivo, necessari per convertire la funzione multi-obiettivo in un problema a singolo obiettivo.

Nella seguente Figura 5 vengono riportati diversi metodi deterministici per la risoluzione di problemi di ottimizzazione.

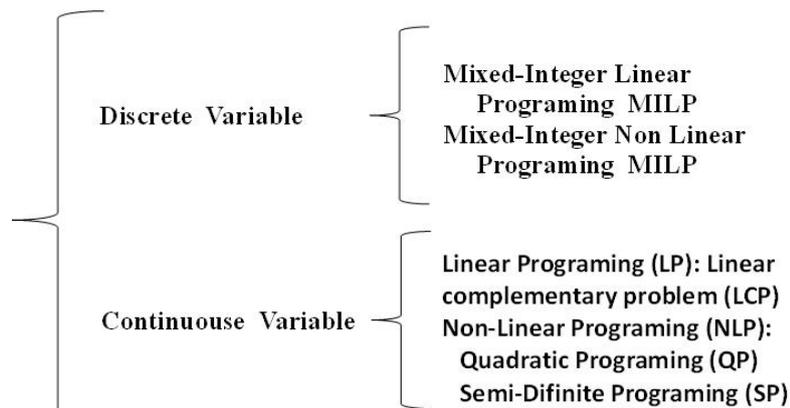


Figura 5: Differenti approcci per la risoluzione di problemi di ottimizzazione (fonte [13])

Dove il problema di ottimizzazione può essere definito come (Figura 6):

$$\min Z=f(x,y) \text{ s.t. } \begin{cases} h(x,y) = 0 \\ g(x,y) \leq 0 \\ x \in X, y \in \{0, 1\}^m \end{cases}$$

Figura 6: Formulazione matematica di un problema di ottimizzazione (fonte [13])

In cui $f(x,y)$ è la funzione obiettivo che deve essere minimizzata, mentre $h(x, y)$ e $g(x, y)$ sono i vincoli rispettivamente di uguaglianza e disuguaglianza.

Come si diceva in precedenza, la progettazione, la pianificazione ed il funzionamento ottimale delle reti termiche viene effettuata mediante differenti metodi di programmazione matematica. I modelli matematici per l'ottimizzazione delle reti termiche sono basati sulla programmazione strutturata come la programmazione lineare (LP), la programmazione lineare intera mista (MILP), la programmazione non lineare (NLP), ed infine la programmazione non lineare mista intera (MINLP) [24], [26].

Se la funzione obiettivo ed i vincoli sono lineari il problema è detto essere lineare, altrimenti il problema è non lineare [27]. La programmazione lineare e non lineare, intera mista, coinvolge due tipologie distinte di variabili:

- Variabili continue come ad esempio portate, temperature, pressioni.
- Variabili discontinue come ad esempio la presenza di nodi, presenza di apparecchiature.

Le variabili continue sono in genere limitate tra due estremi (quello inferiore la maggior parte delle volte corrisponde con lo zero e le variabili discrete che in genere sono binarie ad indicare la presenza (1) o l'assenza (0) della apparecchiatura o del nodo. La funzione obiettivo da ottimizzare è funzione di entrambe le tipologie di variabili [28].

Per l'ottimizzazione dei sistemi energetici come le reti termiche si fa ricorso a diversi algoritmi di ottimizzazione. Tra gli algoritmi di ottimizzazione che tradizionalmente vengono utilizzati citiamo:

- il metodo di ottimizzazione basato sul calcolo infinitesimale
- il metodo enumerativo
- il metodo di ricerca casuale.

Per quanto riguarda il metodo di ottimizzazione basato sul calcolo infinitesimale questo è possibile suddividerlo nel metodo a ricerca diretta ed indiretta. Il metodo di ricerca diretta si fonda sulla implementazione di equazioni lineari o non lineari e sul calcolo analitico di ognuna di esse ponendo il gradiente uguale a zero.

Il metodo di ricerca indiretta cerca la migliore soluzione partendo da un generico punto dello spazio delle possibili soluzioni tendendo poi verso il gradiente della funzione da ottimizzare o verso altre direzioni opportunamente determinate.

Purtroppo tali algoritmi di soluzione conducono a soluzioni non ottimali quando la funzione da ottimizzare ha numerosi minimi o massimi locali. Infatti per come sono intrinsecamente programmati, quando l'algoritmo trova un punto di minimo o di massimo, difficilmente poi, si riesce a spostare per esplorare nuovi spazi ed andare quindi a determinare il reale valore di minimo o massimo della funzione.

Ci sono poi i metodi di ricerca enumerativi, in cui il campo di ricerca delle possibili soluzioni viene discretizzato, in maniera tale, da andare a valutare il valore della funzione obiettivo in ogni punto fino a determinarne il massimo o il minimo. Tale metodo risulta essere molto efficace, ma da quanto detto si comprende bene che nel caso in cui il campo di ricerca delle possibili soluzioni sia particolarmente vasto i tempi di calcolo sarebbero elevatissimi.

Infine ci sono le tecniche di ricerca casuale in cui l'algoritmo di ottimizzazione si muove in maniera casuale nello spazio delle possibili soluzioni determinando i valori assunti dalla funzione obiettivo. Tale algoritmo, molto simile a quello enumerativo, fa ricorso alla strategia "simulated annealing" (ricottura simulata) che mira a trovare un minimo globale quando si è in presenza di più minimi locali.

Le tecniche menzionate sono come detto in genere efficienti, tuttavia può trovare soluzioni locali anziché globali. In alcuni casi, ad esempio quando la funzione obiettivo (funzione di costo ad esempio) non è convessa e non è regolare in termini di variabili decisionali [29], i metodi di ottimizzazione basati sugli algoritmi tradizionali non riescono a risolvere il problema. Per risolvere tali tipi di problemi si fa invece ricorso ad algoritmi evolutivi basati sul principio darwiniano della sopravvivenza, in maniera da simulare il processo dell'evoluzione naturale.

Anche questi algoritmi fanno uso di una ricerca casuale nel campo delle possibili soluzioni, ma come fondamento di ogni codice di ottimizzazione genetico c'è la selezione di nuovi possibili individui che contengono in sé geni o informazioni ottenute dalle migliori soluzioni già computate. Si evidenzia che uno dei migliori algoritmi evolutivi noti in letteratura è l'algoritmo NSGA-II, un algoritmo genetico multi-obiettivo [30].

Vengono di seguito riportate le variabili decisionali, i vincoli e le funzioni obiettivo più utilizzate nella letteratura scientifica per quanto riguarda le reti termiche.

3.2 Variabili decisionali o di input

Le variabili decisionali o di input che devono essere determinate in un processo di ottimizzazione che coinvolge le reti termiche sono connesse sia ad aspetti economici che energetici. Prima di passare al vero e proprio processo di ottimizzazione, si è chiamati quindi, ad identificare e determinare quali siano le variabili di input da prendere in considerazione nel processo di ottimizzazione.

A tal proposito è possibile sia eseguire una analisi di sensibilità per vedere quali siano le variabili di input che hanno un maggiore impatto sugli obiettivi o in alternativa fare riferimento a studi precedenti che hanno determinato una forte dipendenza della variabile da ottimizzare, dalla funzione obiettivo.

Viene di seguito riportato un elenco delle variabili di input o decisionali più utilizzate:

- I carichi termici ed elettrici
- I prezzi dell'energia

- Il profilo di generazione
- vincoli legislativi
- I costi dei componenti
- dati meteo
- risorse energetiche
- tecnologie energetiche e prestazioni
- energia fornita con rinnovabili

3.3 I vincoli

Nell’ottimizzazione delle reti termiche è possibile distinguere tre gruppi di vincoli distinguendo tra vincoli di uguaglianza e disuguaglianza, come illustrato in Tabella 1:

- 1) Vincoli legati ai componenti
 - Vincoli di uguaglianza come quelli ad esempio legati alle relazioni tra combustibile, prodotti e sotto prodotti
 - Vincoli di disuguaglianza come quelli ad esempio legati alle relazioni tra i carichi ed il range di grandezza
- 2) Vincoli legati ai bilanci di energia
 - Vincoli di uguaglianza relativi al riscaldamento, raffreddamento all’energia elettrica ed all’accumulo
- 3) Vincoli relativi alla rete termica
 - Sia vincoli di uguaglianza che di disuguaglianza come flusso termiche nelle tubazioni, perdite, circolazione, ecc.

Nella seguente tabella vengono riassunti i vincoli più utilizzati nei recenti studi per l’ottimizzazione delle reti termiche.

Tabella 1: Vincoli implementati nella più recente ottimizzazione delle reti termiche

Riferimenti	Numero componenti	Capacità CHP/Boiler/Chiller	Capacità dell'accumulo	Superficie impianto fotovoltaico	Capacità nominale PV	Flusso in una direzione	Massima capacità della linea di distribuzione	Circolazione in raffreddamento e riscaldamento	Bilancio di elettricità	Bilancio sull'accumulo	Relazioni tra boiler e CHP	Interconnessione con la rete	Intercambiabilità delle tubazioni	Limiti dell'energia in ingresso	Tempo di inizio e fine attività
Li ed al. [31]	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*				
Uris ed al. [32]		*		*		*		*		*		*	*	*	
Ameri ed al. [33]	*	*		*		*			*			*	*		
Mehler ed al. [34]		*		*		*		*				*			
Wang ed al. [35]		*			*				*	*					
Carpaneto ed al. [36]		*	*									*			*
Mehler ed al. [37]	*	*		*				*	*			*			
Zhou ed al. [38]	*	*	*						*	*					
Wang ed al. [39]		*	*						*	*					
Ren ed al. [40]			*						*	*		*			
Wang ed al. [41]		*	*		*				*	*					

3.4 Software utilizzati per l'ottimizzazione delle reti termiche

L'ottimizzazione di una rete termica è una problematica al quanto complessa essendo coinvolte numerose variabili discrete non lineari e soggette a vincoli, abbiamo descritto nel precedente paragrafo quali siano gli algoritmi di ottimizzazione più utilizzati mentre in questo paragrafo riportiamo alcuni tool di ottimizzazione che vengono impiegati in maniera frequente per le reti termiche.

Molti degli algoritmi utilizzati per l'ottimizzazione delle reti termiche consistono in una algebraic modeling language (AML), ossia sono linguaggi ad alto livello utilizzati per risolvere problemi di ottimizzazione molto complessi su larga scala. Un vantaggio che hanno algoritmi di ottimizzazione di questo tipo (AIMMS, AMPL, GAMS, MathProg, Mosel, e OPL) è di avere una sintassi molto simile alla notazione matematica dei problemi di ottimizzazione.

Oltre ai suddetti algoritmi di ottimizzazione, esistono software di analisi energetica che sono in grado sia di modellare che ottimizzare una rete termica. Ad esempio TRNSYS [42], che consente di simulare diverse tipologie di impianto come impianti solari e termici, fotovoltaici fino ad arrivare alle celle a combustibile.

Un altro software impiegato è EnergyPRO che fornisce l'ottimizzazione tecno-economica di un sistema energetico poli generativo sia in termini termici che elettrici ed ha come funzione obiettivo il flusso di cassa [43]. HOMER consente la modellizzazione, l'ottimizzazione ed all'analisi di sensibilità connesse alla rete ed alle tecnologie di energia rinnovabile incentrate sulla conversione dell'energia elettrica. Il software ha un numero però limitato di unità termiche che sono in genere semplificate. Si può però osservare che, possono essere utilizzati come input diversi tipi di profili di carico elettrico e termico, in maniera da mostrare le variazioni giornaliere o stagionali [44].

Un altro software utilizzato è SynCity che adotta lo stesso approccio che possiamo trovare in GAMS per quanto riguarda la programmazione matematica, ed ha come obiettivi l'ottimizzazione delle emissioni di carbonio, l'energia richiesta e il costo totale di una rete termica [45].

Non bisogna inoltre dimenticare Neplan, un software di analisi di sistema di produzione di energia, utilizzato nella progettazione, modellizzazione, ottimizzazione della rete di distribuzione di acqua, elettricità, gas e tubazioni termiche. Questo software è in grado di eseguire analisi riguardanti il flusso di energia, la perdita di energia ed analizzare le problematiche connesse con l'impianto idraulico in maniera da dimensionare le unità di riscaldamento, la pompa di circolazione e gli scambiatori di calore.

3.5 Funzioni obiettivo

In Tabella 2 vengono riportate le più consuete variabili che vengono impiegate in un processo di ottimizzazione di una rete termica ed ancora più interessante se esse sono in conflitto tra di loro [25]. Infatti molto spesso in un processo di ottimizzazione multi-obiettivo gli obiettivi che si intendono perseguire sono in una condizione di "trade-off", vale a dire la massimizzazione di un obiettivo ne comporta la minimizzazione di un altro, al punto che chi è chiamato a decidere, dovrà prendere una opportuna soluzione di compromesso. Ad esempio, come si può osservare dalla Tabella 2, spesso sono in condizioni "trade-off" gli obiettivi ambientali con quelli economici.

Tabella 2: Funzioni obiettivo più utilizzate per l’ottimizzazione delle reti termiche ed eventuale conflitti

Funzioni obiettivo	Massimo fatturato	Minime emissioni	Massima produzione	Minimi costi di funzionamento	Minimo Investimento	Minimo costo del combustibile	Massime rinnovabili
Massimo fatturato	*	C	D	C	D	C	D
Minime emissioni	C	*	D	C	C	C	S
Massima produzione	D	D	*	C	C	C	D
Minimi costi di funzionamento	C	C	C	*	C	S	C
Minimo Investimento	D	C	C	C	*	S	C
Minimo costo del combustibile	C	C	C	S	S	*	C
Massime rinnovabili	D	S	D	D	C	C	*

4 Classificazione delle reti termiche nella letteratura scientifica

Come viene illustrato in Figura 7, la letteratura scientifica classifica gli approcci [25] utilizzati per l’ottimizzazione delle reti termiche in quattro principali gruppi:

1. Distributed integration
2. Superstructures
3. Operation and planning
4. Subsystem building blocks

Inoltre in Tabella 3 vengono riportati gli approcci utilizzati nei più recenti studi per l’ottimizzazione delle reti termiche. Di seguito si vanno ad esaminare le 4 classificazioni.

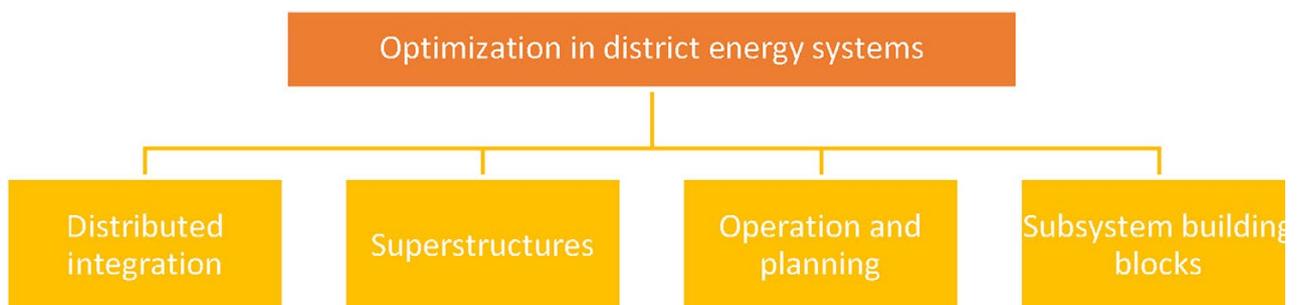


Figura 7: Classificazione delle reti termiche nella letteratura scientifica [25]

4.1 Distributed integration

L'integrazione distribuita si occupa della connessione delle risorse energetiche al sistema energetico distrettuale per fornire una produzione di energia affidabile, economicamente soddisfacente e rispettosa dell'ambiente [46].

La complessità di un sistema integrato associato con sistemi combinati di produzione di energia elettrica e calore e con la pianificazione energetica di una rete termica richiede una analisi di ottimizzazione.

Recentemente, la ricerca scientifica, riguardante le suddette problematiche, è stata attirata da due aspetti principali: sviluppo di modelli accurati e fornitura di solutori matematici efficaci.

In particolare nel lavoro di Sartor ed al. [47], gli autori hanno sviluppato un modello di ottimizzazione non lineare per stimare le prestazioni di un impianto di cogenerazione a biomassa integrato con un sistema di teleriscaldamento. Gli autori hanno utilizzato il processo di ottimizzazione per validare e calibrare il loro modello di calcolo basandosi su di un impianto esistente.

Wang ed al. [48] hanno invece utilizzato una tecnica di programmazione lineare (LP) ed hanno studiato una rete termica basata su produzione combinata di energia elettrica da integrare con energie rinnovabili, sviluppando un metodo di modellizzazione e ottimizzazione per la pianificazione e il funzionamento di tali sistemi energetici. In particolare l'obiettivo dell'ottimizzazione era di ridurre al minimo i costi complessivi per l'acquisizione di calore ed energia dal mercato liberalizzato dell'energia. Il modello di ottimizzazione tiene conto di un orizzonte temporale mensile anziché considerare un giorno tipico.

Ondeck ed al. [49], hanno adottato una programmazione lineare intera mista (MILP) ed hanno studiato l'integrazione ottimale di un impianto di cogenerazione in un complesso residenziale. È stata determinata la configurazione ottimale del sistema di cogenerazione con l'impianto fotovoltaico considerando anche le fluttuazioni dei tassi di energia, delle condizioni ambientali e dei carichi termici richiesti dalle singole utenze.

Falke ed al. [27] hanno proposto un modello di ottimizzazione multi obiettivo per la pianificazione degli investimenti e la gestione di sistemi distribuiti di energia e calore. Per ridurre la complessità computazionale il problema di ottimizzazione è stato diviso in tre parti:

- Progettazione della rete termica
- Impianti di generazioni e sistemi di accumulo
- Funzionamento degli impianti di generazioni e dei sistemi di accumulo

Per la risoluzione matematica è stato utilizzato un algoritmo genetico.

Weber e Shah [50] hanno adottato un algoritmo basato su di una programmazione mista intera (MILP) e hanno proposto uno strumento, chiamato DESDOP, per determinare la combinazione ottimale di tecnologie in grado di soddisfare le esigenze energetiche di una città con basse emissioni di inquinanti, considerando diversi scenari.

Con una metodologia diversa, J. Pirkandi ed al. [51] hanno presentato un modello tecno-economico basato su di un'ottimizzazione multi-obiettivo, facente ricorso alla frontiera di Pareto per la determinazione della migliore configurazione, per analizzare un sistema di cogenerazione integrato con turbina a gas da utilizzare in una comunità a basso consumo energetico.

Uris ed al. [32] hanno studiato il dimensionamento ottimale di un'unità di cogenerazione con ORC (ciclo organico di Rankine) alimentato da biomassa utilizzando per le simulazioni un algoritmo basato su di una programmazione non lineare (NLP). Gli autori considerando un sistema distrettuale esistente hanno avuto come obiettivo quello di cercare di ottenere il massimo profitto. Sia il funzionamento dei sistemi di cogenerazione che di tri-generazione sono stati considerati a pieno carico e carico parziale.

Un lavoro simile, che tiene conto anche dell'integrazione dell'accumulo termico, è stato presentato nel rif. [52]. Gli autori hanno studiato una rete termica esistente nel paese di Leini in provincia di Torino, sia sotto il punto di vista energetico che economico. I risultati ottenuti mostrano che le configurazioni ottimali differiscono a seconda che si considerino criteri economici o energetici.

Maatallah ed al. [53] hanno invece utilizzato il software di ottimizzazione ibrida per energie rinnovabili HOMER, per l'ottimizzazione tecnico economica di un impianto integrato con fotovoltaico, eolico, motore diesel con e senza accumulo elettrico nella città di Bizerte in Tunisia.

Uno studio simile, per elettrificare una zona rurale, è stato condotto sempre con il software HOMER, senza però considerare l'accumulo ma includendo nell'analisi anche l'energia idroelettrica [54].

4.2 Superstructures

In questa categoria sono racchiuse le reti termiche in cui il principale obiettivo è l'ottimizzazione, in base a stabilite e determinate configurazioni, delle dimensioni di ciascun componente. Pertanto il problema sarà determinare quali cogeneratori, refrigeratori, o più in generale macchine termiche possono essere installate per la realizzazione di un funzionamento ottimale. Di seguito viene riportato un'analisi dei lavori più recenti per questa problematica.

In uno studio di Mehleri ed al. [34] viene presentato un modello di programmazione lineare mista intera (MILP) in cui viene utilizzato un algoritmo genetico in cui l'obiettivo è quello di selezionare tra diversi componenti come micro cogeneratori, array fotovoltaici e caldaie quelli che determinassero un minimo costo di investimento e funzionamento, incluso l'ottimizzazione della rete termica che prevedeva lo scambio termico tra i diversi nodi.

Un lavoro simile è stato svolto da Wu ed al. [55] che ha proposto un modello di ottimizzazione basato su di una programmazione lineare mista intera che consente tra diversi candidati di determinare la configurazione ottimale per la rete termica.

Li ed al. [31] invece proposero un modello di programmazione lineare in cui gli obiettivi consistevano nel ridurre al minimo il costo totale annuo e le emissioni di CO₂ in maniera da realizzare una progettazione ed un funzionamento ottimale al fine di soddisfare il fabbisogno energetico annuale in termini di riscaldamento, raffreddamento e potenza.

Bordin ed al. [56] invece analizzarono la soluzione ottimizzata dell'introduzione di nuovi utenti da inserire in una esistente rete termica che minimizzasse i costi operativi e di funzionamento per orizzonti temporali di cinque e dieci anni.

Nel lavoro di Ameri e Besharati [33] si è analizzato il confronto tra quattro diversi scenari (convenzionale, CCHP senza rete, CCHP con rete e CCHP / PV con rete) aventi diversi componenti in grado di ottenere l'emissione minima di CO₂ ed un risparmio sui costi operativi.

Rivarolo ed al. [57] hanno invece pubblicato un lavoro su di un micro rete disponibile nel campus di Savona, che permette di determinare le dimensioni ottimali dei diversi componenti in maniera da soddisfare la domanda di energia di un utente generico.

4.3 Operation and planning

Anche con una rete termica caratterizzata da un numero limitato di unità, la definizione di una strategia di pianificazione che controlli gli impianti per funzionare al minimo costo e sfruttare la massima quota possibile di energie rinnovabili non è un compito semplice.

Vesterlund e Dahl [58] hanno introdotto una nuova tecnica per la modellazione delle reti termiche contenenti circuiti chiusi o colli bottiglia senza utilizzare semplificazioni in tal senso. In particolare è presa in considerazione parte della rete termica della città di Kiruna in Svezia che è caratterizzata da una configurazione complessa avendo in essa diverse circuiti chiusi e colli di bottiglia.

Carpaneto ed al. [36] hanno invece sviluppato una procedura di ottimizzazione in MATLAB e hanno analizzato diversi scenari per l'utilizzo di energie rinnovabili nelle reti di teleriscaldamento. Il focus dello studio era rivolto ad impianti ad energia solare, tuttavia, sono stati considerati anche CHP, caldaia ed accumulo.

Wang ed al. [39] hanno utilizzato il metodo di Newton per un problema di programmazione non lineare al fine di ridurre al minimo, il costo di un sistema di teleriscaldamento (per un edificio di N piani) ottimizzando le portate massiche (costo di pompaggio) e le conduttanze termiche (costo degli scambiatori di calore). Lo svantaggio che si può osservare nella loro modellazione è che richiede tempi di calcolo molto lunghi quando vengono prese in considerazione reti di grandi dimensioni. Inoltre, la caduta di temperatura lungo la linea di alimentazione per gli utenti di ciascun piano di abitazione, provoca una distribuzione non uniforme dell'energia termica.

Khair e Haouari [59] hanno presentato una analisi computazionale per una modellazione MINLP, al fine di ottimizzare una rete di raffreddamento in base alle dimensioni delle unità refrigeranti, al sistema di accumulo e alla configurazione della rete. Oltre ai soliti vincoli tecnici e operativi, gli autori hanno considerato nel loro modello la caduta di temperatura e pressione.

Zhou ed al. [38] hanno proposto e confrontato due modelli matematici per ridurre al minimo il costo totale annuo di un sistema combinato di raffreddamento, riscaldamento ed energia elettrica (CCHP) basato su due presupposti: efficienza costante ed esaminando il comportamento fuori progetto di diversi componenti.

Powell ed al. [60] hanno invece presentato un'ottimizzazione dinamica per trovare il tempo ottimale di carica /scarica di un sistema di accumulo. Sono stati considerati tre scenari: solo carburante, carburante con entrate derivanti dalla vendita di energia elettrica in eccesso e carburante sia con l'acquisto che con la vendita di energia elettrica.

Jie ed al. [61] hanno invece introdotto un modello di ottimizzazione per ridurre al minimo la somma dei costi di pompaggio e di dispersione del calore per un esistente sistema di teleriscaldamento. Sono state prese in considerazione e confrontate quattro diverse strategie considerando portate costanti o variabili sia per il circuito primario che per quello secondario. La soluzione migliore si ha quando sia la portata primaria che quella secondaria possono essere controllate.

Jiang ed al. [62] hanno proposto un modello matematico che considera il generatore eolico come una delle fonti di energia per alimentare lo scaldabagno elettrico, oltre ad utilizzare uno scaldacqua solare ed una caldaia a gas. Gli autori hanno minimizzato il consumo di carburanti (chilogrammo di carbone equivalente) in base alla temperatura nominale della caldaia e alla portata massica di pompe a velocità variabile.

Kim ed al. [63] hanno preso in considerazione contemporaneamente diverse reti termiche. In particolare hanno affrontato il problema della combinazione e dell'ottimizzazione di undici sistemi di teleriscaldamento esistenti in maniera da minimizzare il costo totale e massimizzare i profitti, il limite del loro modello era, che per semplicità, non includeva alcun costo di pompaggio e perdite di rete.

4.4 Subsystem building blocks

Altri studi di ottimizzazione sono stati condotti concentrandosi su aspetti tecnici specifici dei componenti o elementi costitutivi del sistema distrettuale.

Jie ed al. [64] hanno proposto un modello analitico per individuare l'ottimale caduta di pressione ed il relativo minimo costo annuo per la rete termica basato su variabili operative e strategie diverse.

Wang ed al. [41] hanno utilizzato l'ottimizzazione attraverso un algoritmo genetico per calibrare il proprio modello per la distribuzione di energia termica in regime stazionario attraverso una rete esistente. Il loro modello matematico era semplice, tuttavia, sfruttando le misurazioni della temperatura e del flusso per tre casi, si sono ottenuti parametri (coefficiente di conduzione del calore) che hanno permesso di realizzare un modello più accurato.

Barbis ed al. [65] hanno proposto un approccio termo-economico per studiare l'integrazione di diversi sistemi di accumulo di energia termica (sia calda che fredda) ed elettrica per una ottimale strategia di gestione di un distretto energetico.

Diangelakis ed al. [66] ha proposto un modello analitico di ottimizzazione dinamica per un cogeneratore in un ipotetico distretto costituito da 10 edifici. La variabile decisionale era il volume di cilindrata del motore a combustione interna da determinare per minimizzare i costi operativi.

L. Li [31] si è concentrato sulla ottimale progettazione economica della rete di distribuzione di una pompa di calore con sorgente di acqua di mare per una baia di un distretto commerciale. Tuttavia, il loro studio non ha preso in considerazione la variazione della domanda nel corso dell'anno.

Tabella 3: Approcci utilizzati in recenti studi per l’ottimizzazione delle reti termiche

Riferimento	Tipo di Ottimizzazione	Metodo/ Algoritmo	Obiettivi	Tipo di rete termica	Solutore
Magnier ed al. [42]	Multi-obiettivo	Algoritmo genetico	Layout rete	Centralizzato	TRNSYS
Gopalakrishnan [67]	Mono-obiettivo	Algoritmo genetico	Costo orario	Decentralizzato	-
Dobersek [68]	Mono-obiettivo	NLP	Costo capitalizzato	Centralizzato	-
Verda [69]	Multi-obiettivo	Algoritmo genetico	Costo medio del calore fornito alle utenze	Centralizzato	-
Mehleri ed al. [37]	Mono-obiettivo	MILP	Costo annuale della micro-grid	Centralizzato	GAMS CPLEX
Wu ed al. [40]	Multi-obiettivo	MILP	Aspetti economici ed ambientali	Decentralizzato	Non menzionato
Zhou. [38]	Mono/Multi-obiettivo	MILP	Costo annuale co2	Decentralizzato	MATLAB/ Gurobi
Bordin ed al. [56]	Mono-obiettivo	MILP	Scelta di nuovi utenti	Centralizzato	Opti-TLR CPLEX
Ameri ed al. [33]	Mono-obiettivo	MILP	Risparmio energetico e riduzioni di emissioni di CO2	Decentralizzato	CPLEX
Rivarolo ed al. [57]	Mono-obiettivo	NLP	Sommatoria dei costi variabili annuali	Centralizzato	AIMMS W-ECOMP
Buoro ed al. [19]	Mono-obiettivo	MILP	Investimento annual, costi di manutenzione e d operativi	Combinato	Xpress
Karschin and Geldermann [70]	Mono-obiettivo	MILP	Costi ed efficienza della rete termica	Centralizzato	Xpress
Vesterlund ed al. [58]	Mono-obiettivo	MILP	Costi operativi per la produzione dell’energia termica	Centralizzato	CPLEX
Wang ed al. [48]	Mono-obiettivo	LP	Costi per l’acquisto dell’energia termica ed elettrica	Centralizzato	LP2
Carpaneto ed al [36]	Mono-obiettivo	MILP	Strategia di dispacciamento per le diverse fonti di potenza	Centralizzato	MATLAB
Wang ed al. [39]	Mono-obiettivo	Metodo di Newton	Portata massica e conduttanza globale	Centralizzato	Non menzionato
Khair and Haouari [59]	Mono-obiettivo	MINLP/MILP	Costi capitali e di funzionamento	Centralizzato	CPLEX
Zhou ed al. [38]	Mono-obiettivo	MILP/MINP	Costi capitali e di funzionamento di una CCHP	Centralizzato	GAMS CPLEX
Powell ed al. [60]	Mono-obiettivo	MILP/MINLP	Costi operativi	Centralizzato	MATLAB BONMIN
Jie ed al. [61]	Mono-obiettivo	NLP	Costi di pompaggio e delle perdite termiche	Centralizzato	MATLAB
Jiang ed al. [62]	Mono-obiettivo	GSO	Consumo di energia	Centralizzato	MATLAB
Ren ed al. [71]	Mono-obiettivo	MILP	Costi di funzionamento ed emission CO2	Centralizzato	Non menzionato
Fang ed al. [29]	Mono-obiettivo	Algoritmo genetico	Sommatoria dei costi del combustibile e di pompaggio	Centralizzato	MATLAB C++
Kim ed al. [63]	Mono-obiettivo	MILP	Costi operativi	Integrazione di sistemi centralizzati	CPLEX
Sartor ed al. [47]	Mono-obiettivo	NLP		Centralizzato	Non menzionato
Wang ed al. [48]	Mono-obiettivo	LP	Prestazioni della rete e costi per l’acquisto di energia	Centralizzato	LP2 EnergyPro
Ondeck ed al. [49]	Mono-obiettivo	MILP	Profitto della rete CHP dala vendita dell’energia	Centralizzato	GAMS CPLEX
Falke ed al. [27]	Multi-obiettivo	Algoritmo genetico	Costi per energia elettrica e termica ed emission di CO2	Decentralizzato	Non menzionato
Weber and Shah [50]	Mono-obiettivo	MILP	Costi annuali operativi e di investimento	Centralizzato	GAMS CPLEX
Sameti ed al. [51]	Multi-obiettivo	NLP	efficienza exergetica e potenza prodotta	Decentralizzato	MATLAB
Maatallah ed al. [53]	Mono-obiettivo	Ottimizzazione ibrida	Costi totali netti	Centralizzato	HOMER
Amutha ed al. [54]	Mono-obiettivo	Ottimizzazione ibrida	Costi totali netti	Centralizzato	HOMER
Jie ed al. [64]	Mono-obiettivo	-	Costi di investimento d’impianto	Centralizzato e decentralizzato	-
Wang ed al. [35]	Mono-obiettivo	Algoritmo genetico	Calibrazione	Centralizzato	MATLAB
Barberis ed al. [65]	Mono-obiettivo	Algoritmo genetico	Costo annuale variabile	Centralizzato	W-ECOMP
Zeng ed al. [72]	Mono-obiettivo	Algoritmo genetico	Investimenti,manutenzione e costi di funzionamento delle pompe di circolazione	Centralizzato	Non menzionato
Diangelakis ed al. [66]	Mono-obiettivo	-	Costi di funzionamento	Decentralizzato	gPROMS gOPT

5 Indagine bibliografica sulle soluzioni ottimizzate per la collocazione dei componenti di reti termiche

Nell'ottimizzazione delle reti termiche gioca un ruolo molto importante sia la scelta ottimale dei componenti che la loro collocazione all'interno della rete [73].

Ad esempio, Mertz ed al. [74] hanno ottimizzato la configurazione di una rete caratterizzata da quattro utenti e due siti di produzione del calore. La rete è stata progettata e modellata in ambiente GAMS ed è stata utilizzata una tecnica basata su di una programmazione non lineare per minimizzare i costi operativi e d'investimento.

Nel riferimento [71] vengono confrontati 3 differenti scenari per l'alimentazione di 5 edifici sia mediante energia elettrica che termica. È stata condotta per ogni caso una ottimizzazione lineare ed i risultati ottenuti mostrano che la migliore configurazione della rete si otteneva nel secondo scenario, anche se tuttavia il modello di calcolo non tiene in opportuna considerazione le perdite di carico e termiche.

Bordin ed al. [56] hanno sviluppato un approccio chiamato District Heating Network Design Problem, ed utilizzano un approccio basato sulla programmazione mista non lineare ed impiegano CPLEX per l'ottimizzazione della rete. Come caso studio considerarono una città del nord Italia con una rete termica costituita da circa 32 utenze. Due scenari furono analizzati, il primo considerava un periodo di dieci anni per il calcolo del valore attuale netto, mentre nel secondo caso è stato considerato un intervallo di cinque anni.

Nel lavoro [75] viene proposto un modello matematico per l'ottimizzazione di una configurazione ibrida di una rete termica al fine di ridurre i costi per la generazione dell'energia termica.

In un interessante lavoro di Ren e Gao [40] gli autori presentano un modello matematico che minimizza il costo dell'energia globale per un intero anno scegliendo le unità da installare e determinando i loro parametri di funzionamento. I dati di input sono basati sui dati climatici del sito, sulla struttura tariffaria e sulle informazioni tecniche e finanziarie delle tecnologie scelte. In particolare viene presentato uno studio numerico su di un eco-campus in Kitakyushu (Japan).

In Sanaei e Nakata [76] viene presentato un modello di ottimizzazione non lineare in cui viene determinata la scelta dei componenti ed il modo in cui essi interagiscono.

La configurazione ottimale viene identificata mediante un algoritmo che ha come funzione obiettivo quella di ridurre al minimo il costo complessivo dell'energia assorbita dalla rete termica

Un algoritmo genetico viene invece utilizzato nel lavoro di Molyneaux ed al. [77], al fine di ottimizzare la progettazione e la pianificazione di una rete di teleriscaldamento basata su una combinazione di pompe di calore centralizzate e decentralizzate combinate con la cogenerazione in loco. L'algoritmo genetico ha come funzioni obiettivo la minimizzazione degli inquinanti, dei costi e degli investimenti.

L'ottimizzazione della giusta configurazione di scambiatori di calore e pompe è invece analizzata nel lavoro di Xu e Chen [78]. In particolare vengono analizzate due ottimizzazioni complementari, la prima relativa alla minimizzazione della conduttanza termica degli scambiatori di calore avendo assegnato il consumo di energia totale delle pompe; il secondo invece la minimizzazione del consumo totale di energia delle pompe avendo assegnato la conduttanza termica globale. L'obiettivo finale è ottenere una configurazione ottimizzata dei parametri strutturali ed operativi.

Sempre sulle problematiche relative a scambiatori di calore, Aringhieri and Malucelli [79] presentano un lavoro sull'ottimizzazione della giusta temperatura di ritorno all'impianto, al fine di ottenere una buona efficienza del sistema ad un ragionevole costo.

Nel lavoro di H.I. Tol, S. Svendsen [80] viene presentata la progettazione di una rete di teleriscaldamento a bassa temperatura con diverse metodologie di dimensionamento delle tubazioni, delle sottostazioni e della configurazione della rete. Le dimensioni ottimali dei tubi sono state determinate considerando il software Termis con diversi profili di carico termico. Furono analizzate gli effetti della configurazione della rete dovuti dall'introduzione di scambiatori di calore, pompe ed accumulo sulla dimensione dei tubi.

Infine il lavoro svolto da Elisa Guelpa, Vittorio Verda [81] presentano l'implementazione dell'accumulo termico sia in una rete di riscaldamento che di raffreddamento. In particolare vengono analizzati:

- I vantaggi e svantaggi di connettere un serbatoio di accumulo con una rete termica, soffermandosi in particolar modo sulle varie fonti che possono essere utilizzate per alimentare la rete.
- Serbatoi di accumulo a calore latente, sensibile e chimici, per descrivere le loro potenzialità in combinazione con le reti termiche.
- Le analisi energetiche ed exergetiche dell'accumulo connesso con le reti termiche

La considerazione finale che viene riportata è che in relazione ad una rete termica non è possibile identificare apriori un'unica soluzione per i sistemi di accumulo.

Questo perché tali sistemi possono essere caratterizzati da una varietà di configurazioni, a seconda della topologia di rete, della distribuzione della domanda di densità di energia, tipo di impianti collegati, controllo della strategia, condizioni ambientali ecc.

6 Conclusioni

In questo report è stato esaminato lo stato dell'arte delle reti termiche con particolare attenzione alle metodologie di ottimizzazione relative al dimensionamento e alla localizzazione ottimale dei componenti di una rete termica. In particolare si è potuto appurare che:

- Per giungere all'obiettivo di un funzionamento delle reti termiche che possano interfacciarsi ed integrarsi in maniera ottimale con altri sistemi energetici come ad esempio le fonti rinnovabili, è necessario adottare una opportuna e mirata ottimizzazione della rete termica.
- In particolare si è visto che in un processo che coinvolge l'ottimizzazione delle reti termiche le funzioni obiettivo che vengono utilizzate più frequentemente sono le emissioni di inquinanti (in particolar modo la CO₂), i costi di investimento e funzionamento, il costo del combustibile, ed infine lo sfruttamento delle energie rinnovabili.
- Nella maggior parte dei casi si utilizza un'ottimizzazione multi-obiettivo, in cui viene però utilizzata la tecnica dei pesi per trasformare la funzione multi-obiettivo in una funzione mono-obiettivo. La determinazione dei pesi richiede una approfondita conoscenza del problema.
- L'approccio più utilizzato dai ricercatori per applicazioni nelle reti termiche è una programmazione lineare intera mista (MILP).
- Gli algoritmi genetici sono quelli più utilizzati per determinare la migliore configurazione della rete termica.
- La maggior parte dei lavori scientifici esaminati mostra che gli edifici presi in considerazione sono di un numero limitato rispetto alla realtà, questo per cercare di contenere i tempi di calcolo. Pertanto in futuro sarà necessario investigare e studiare algoritmi di calcolo più veloci e potenti.

7 Riferimenti bibliografici

- [1] A.Mazhar,S. Liu,A. Shukla,"A state of art review on district heating systems". Renewable and Sustainable Energy Reviews. vol.96, (2018), pp. 420–439.
- [2] «J. von Rhein, G.P. Henze, N. Long, Y. Fu “Development of a topology analysis tool for fifth-generation district».
- [3] «S. Buffa, M. Cozzini, M. D’Antoni, M. Baratieri, R.Fedrizzi, “5th generation district heating and».
- [4] H. Lund, B. Möller, B.V. Mathiesen, A. Dyrelund, The role of district heating in future renewable energy systems, Energy, vol.35, (2010), pp. 1381-1390.
- [5] A.D . Rosa, H. Li, S. Svendsen, S. Werner, U. Persson, K. Ruehling, C. Felsmann, M. Crane, R. Burzynski, C. Bevilacqua, Annex X Final report: Towards 4th Generation DH Experiences with and Potential of Low Temperature DH, in, IEA DHC/CHP, (2014).
- [6] D. Schmidt, A. Kallert, M. Blesl, S. Svendsen, H.W. Li, N. Nord, K. Sipila, “Low Temperature District Heating for Future Energy Systems”, Energy Procedia, vol. 116, (2017), pp. 26-38.
- [7] H. Li, N. Nord, “Transition to the 4th generation district heating - possibilities, bottlenecks, and challenges,” Energy Procedia, vol. 149, (2018), pp. 483-498.
- [8] H. Lund, S. Werner, R. Wiltshire, S. Svendsen, J. E. Thorsen, F. Hvelplund, and B. V. Mathiesen, “4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems,” Energy, vol.68, (2014), pp. 1-11.
- [9] S. Werner, “International review of district heating and cooling”, Energy, vol. 137, (2017), pp. 617-631.
- [10] H. Averfalk, S. Werner, “Essential improvements in future district heating systems,” Energy Procedia, vol. 116, (2017), pp. 217-225.
- [11] S. Werner, “District heating and cooling in Sweden”, Energy, vol. 126, (2017), pp. 419-429.
- [12] H. Averfalk, S. Werner, C. Felsmann, K. Rühling, R. Wiltshire, S. Svendsen, “Transformation roadmap from high to low temperature district heating systems”, Annex XI final report. International Energy Agency, (2017).
- [13] B. Talebi, A. Mirzaei, A. Bastani, F. Haghghat, “A Review of district heating systems: modeling and optimization”, Frontiers in building Environment, vol.2, (2016), Article 22.
- [14] M. Sakawa, K. Kato, S. Ushiro, “Operational planning of district heating and cooling plants through genetic algorithms for mixed 0-1 linear programming”, European Journal of Operational Research, vol. 137, (2002), pp.677–687.
- [15] C.Weber, F. Maréchal, D. Favrat, “ Design and optimization of district energy systems”, Computer aided chemical engineering, vol. 24, (2007), pp. 1127-1132.
- [16] B. Sibbitt, D. McClenahan, R. Djebbar, J. Thornton, B. Wong, J. Carriere, J. Kokko, “The performance of a high solar fraction seasonal storage district heating system – five years of operation”, Energy Procedia vol. 30, (2012), pp. 856–865.
- [17] D. Olsthoorn, F. Haghghat, P.A. Mirzaei, “Integration of storage and renewable energy into district heating systems: a review of modelling and optimization”, Sol. Energy vol. 136 (2016), pp. 49–64.
- [18] M. Pirouti, A. Bagdanavicius, J. Ekanayake, J. Wu, N. Jenkins, “Energy Consumption and Economic analyses of a district heating network”, the International Journal of Energy, vol. 57, (2013), pp. 149-159..
- [19] D. Buoro, P. Pinamonti, M. Reini, “Optimization of a distributed cogeneration system with solar district heating”, Applied Energy, vol. 124, (2014), pp. 298-308.
- [20] I. BenHassine, U. Eicker, “Impact of load structure variation and solar thermal energy integration an existing district heating network”, Applied Thermal Energy, vol. 50, (2013), pp. 1437-1446.

- [21] C. Flynn, K. Sirén, “Influence of location and design on the performance of a solar district heating system equipped with borehole seasonal storage”, *Renewable Energy*, vol. 81, pp. 377–388.
- [22] D. Trier, “Towards solar district heating with more than 70% solar fraction”, *Energy Procedia* vol.70, (2015), pp. 580–586.
- [23] H. Zhao, J. Holst., “Study on a network aggregation model in dh systems”. *Euroheat and Power*, vol. 27, (1998), pp. 38-44.
- [24] R. Roy, S. Hinduja, R. Teti, “Recent advances in engineering design optimisation: challenges and future trends”, *CIRP Annals—ManufacturingTechnology*, vol. 57, (2008), pp. 697-715.
- [25] M. Sameti, F. Haghghat, “Optimization approaches in district heating and cooling thermal network”, *Energy and Buildings*, vol.140, (2017), pp. 121-130.
- [26] T.G. Kolda, R.M. Lewis, V. Torczon, “Optimization by direct search: new perspectives on some classical and modern methods”, *SIAM Rev.* 45, (2003), pp. 385–482.
- [27] T. Falke, S. Krengel, A.-K. Meinerzhagen, A. Schnettler, “Multi-objective optimization and simulation model for the design of distributed energysystems”, *Applied Energy*, vol.184, (2016), pp.1508-1516.
- [28] V. Machairas, A. Tsangrassoulis, K. Axarli, “Algorithms for optimization of building design: a review”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 31, (2014), pp. 101–112.
- [29] T. Fang, R. Lahdelma, “Genetic optimization of multi-plant heat production in district heating networks”, *Applied Energy*, vol. 159, (2015), pp. 610–619.
- [30] R. Evins, “A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design”, *Renew. Sustain. Energy Rev.* Vol.22, (2013), pp. 230–245.
- [31] L. Li, H. Mu, N. Li, M. Li, “Economic and environmental optimization for distributed energy resource systems coupled with district energy networks”, *Energy*, vol. 109, (2016), pp. 947–960.
- [32] M. Uris, J.I. Linares, E. Arenas, “Size optimization of a biomass-fired cogeneration plant CHP/CCHP (Combined heat and power/Combined heat, cooling and power) based on Organic Rankine Cycle for a district network in Spain”, *Energy*, vol.88, (2015), pp. 935–.
- [33] M. Ameri, Z. Besharati, “Optimal design and operation of district heating and cooling networks with CCHP systems in a residential complex”, *Energy Build.*, vol.110, (2016), pp. 135–148.
- [34] E.D. Mehleri, H. Sarimvais, N.C. Markatos, L.G. Papageorgiou, “A mathematical programming approach for optimal design of distributed energy systems at the neighbourhood level”, *Energy*, vol. 44, (2012), pp. 96–104.
- [35] H. Wang, E. Abdollahi, R. Lahdelma, W. Jiao, Z. Zhou, “Modelling and optimization of the smart hybrid renewable energy for communities (SHREC)”, *Renew. Energy*, vol. 84, (2015), pp.114–123.
- [36] E. Carpaneto, P. Lazzeroni, M. Repetto, “Optimal integration of solar energy in a district heating network”, *Renew. Energ.*, Vol.75, (2015), pp. 714–721.
- [37] E.D. Mehleri, H. Sarimveis, N.C. Markatos, L.G. Papageorgiou, “Optimal design and operation of distributed energy systems: application to Greek residential sector”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 51, 2013, pp. 333–342.
- [38] Z. Zhou, P. Liu, Z. Li, E.N. Pistikopoulos, M.C. Georgiadis, “Impacts of equipment off-design characteristics on the optimal design and operation of combined cooling, heating and power systems”, *Comput. Chem. Eng.* Vol. 48, (2013), pp. 40–47.
- [39] W. Wang, X. Cheng, X. Liang, “Optimization modeling of district heating networks and calculation by the Newton method”, *Appl. Therm. Eng.* 61, (2013), pp. 163–170.
- [40] H. Ren, Q. Wu, W. Gao, W. Zhou, “Optimal operation of a grid-connected hybrid PV/fuel cell/battery energy system for residential applications”, *Energy* vol. 113, (2016), pp. 702–712.
- [41] J. Wang, Z. Zhou, J. Zhao, “A method for the steady-state thermal simulation of district heating systems and model parameters calibration”, *Energy Convers. Manage.*, vol. 120, (2016), pp. 294–305.

- [42] L. Magnier, F. Haghghat, “Multiobjective optimization of building design using TRNSYS simulations, genetic algorithm, and Artificial Neural Network”, *Build. Environ*, vol.45, (2010), pp.739–746.
- [43] A. Fragaki, A.N. Andersen, D. Toke, “Exploration of economical sizing of gas engine and thermal store for combined heat and power plants in the UK”, *Energy Elsevier*, vol. 33, (2008), 1659–1670.
- [44] R. Sena, S.C. Bhattacharyya, “Off-grid electricity generation with renewable energy technologies in India: an application of HOMER”, *Renew. Energ. Vol. 62*, (2014), 388–398.
- [45] N. Ouhajjou, W.L.S. Fenz, A.M. Tjoa, “Stakeholder-oriented energy planning support in cities”, *Energy Procedia*, vol.78, (2015), pp. 1841–1846.
- [46] K. Vijeta, D.S.S. Sarma, “Protection of distributed generation connected distribution system”, In *Advances in Power Conversion and Energy Technologies (APCET)*, International Conference on IEEE, (2012).
- [47] K. Sartor, S. Quoilin, P. Dewallef, “Simulation and optimization of a CHP biomass plant and district heating network”, *Applied Energy*, vol. 130, (2014), pp.474-483.
- [48] H. Wang, W. Yin, E. Abdollahi, R. Lahdelma, W. Jiao, “Modelling and optimization of CHP based district heating system with renewable energy production and energy storage”, *Applied Energy*, vol. 159, (2015), pp. 401–421.
- [49] A. D. Ondeck, T.F. Edgar, M. Baldea, “Optimal operation of a residential district-level combined photovoltaic/natural gas power and cooling system”, *Applied Energy*, vol. 156, (2015), pp. 593–606.
- [50] C. Weber, N. Shah, “Optimisation based design of a district energy system for an eco-town in the United Kingdom”, *Energy*, vol. 36, 2011, pp. 1292–1308.
- [51] J. Pirkandi, M.A. Jokar, M. Sameti, A. Kasaeian, “Simulation and multi-objective optimization of a combined heat and power (CHP) system integrated with low-energy buildings”, *J. Build. Eng.*, vol.5, 2016, pp. 13–23.
- [52] M. Noussan, G.C. Abdin, A. Poggio, R. Roberto, “Biomass-fired CHP and heat storage system simulations in existing district heating systems”, *Applied Thermal Energy*, vol. 71, (2014), pp. 729–735.
- [53] T. Maatallah, N. Ghodhbane, S.B. Nasrallah, “Assessment viability for hybridenergy system (PV/wind/diesel) with storage in the northern most city in Africa, Bizerte, Tunisia, *Renew. Sustain*”, *Energy Rev. vol. 59*, (2016), pp. 1639–1652.
- [54] W.M. Amutha, V. Rajini, “Cost benefit and technical analysis of rural electrification alternatives in southern India using HOMER”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 62, (2016), pp. 236–246.
- [55] Wu Q, Ren H, Gao W, Ren J., “Multi-objective optimization of a distributed energy network integrated with heating interchange”, *Energy*, (2016), pp.353-364.
- [56] C. Bordin, A. Gordini, D. Vigo, “An optimization approach for district heating strategic network design”, *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 252, (2016), 296–307.
- [57] M. Rivarolo, A. Cuneo, A. Traverso, A.F. Massardo, “Design optimization of smart poly-generation energy districts through a model based approach”, *Appl. Therm. Eng. Vol.99*, (2016), pp.291–301.
- [58] M. Vesterlund, J. Dahl, “A method for the simulation and optimization of district heating systems with meshed networks”, *Energy Convers. Manage.*, vol. 89, (2015), pp. 555–567.
- [59] R. Khir, M. Haouari, “Optimization models for a single-plant district cooling system”, *Eur. J. Oper. Res. Vol. 247*, (2015), pp. 648–658.
- [60] K. M. Powell, J.S. Kim, W. J. Cole, K. Kapoor, J. L. Mojica, J.D. Hedengren, T.F. Edgar, “Thermal energy storage to minimize cost and improve efficiency of a polygeneration district energy system in a real-time electricity market”, *Energy*, vol. 113 , (2016).
- [61] P. Jie, N. Zhu, D. Li, “Operation optimization of existing district heating systems”, *Appl. Therm. Eng.*, vol. 78, (2015), pp. 278–288.
- [62] X. Jiang, Z. Jing, Y. Li, Q. Wu, W. Tang, “Modelling and operation optimization of an integrated energy based direct district water-heating system”, *Energy*, vol. 64, (2014), pp. 375–388.

- [63] U.S. Kim, T.C. Park, L.-H. Kim, Y.K. Yeo, "Optimal operation of the integrated district heating system with multiple regional branches", *Korean J. Chem. Eng.*, vol. 27, (2010), pp. 6–18.
- [64] P. Jie, X. Kong, X. Rong, S. Xie, "Selecting the optimum pressure drop per unit length of district heating piping network based on operating strategies", *Appl. Energ.*, vol. 177, (2016), pp. 341–353.
- [65] S. Barberis, M. Rivarolo, A. Traverso, A. Massardo, "Thermo-economic analysis of the energy storage role in a real polygenerative district", *J. Energy Storage*, vol. 5 (2016) 187–202.
- [66] N.A. Diangelakis, C. Panos, E.N. Pistikopoulos, "Design optimization of an internal combustion engine powered CHP system for residential scale application", *Comput. Manage. Sci.*, vol. 11, (2014), pp. 237–266.
- [67] «H. Gopalakrishnan, D. Kosanovic, D., ".Economic optimization of combined cycle district heating systems.", *Sustainable Energy Technologies and Assessments Vol.7*, (2014), pp.91-100».
- [68] «D. Dobersek, D. Goricanec. "Optimisation of tree path pipe network with non linear optimisation method". *Applied Thermal Engineering*, Elsevier, vol. 29, (2009), 29, pp. 1584–1591».
- [69] «V. Verda, G. Baccino, A. Sciacovellia, A., S.L. Russo,"Impact of district heating and ground water heat pump systems on the primary energy needs in urban areas. *Appl. Therm. Eng.*", vol. 40, (2012), pp. 18–26».
- [70] I. Karschin, J. Geldermann, "Efficient cogeneration and district heating systems in bioenergy villages: an optimization approach", *J. Clean. Prod.* vol.104 (2015), pp. 305–314.
- [71] Q. Wu, R. Hongbo, J. Ren, W. Gao, "Multi-objective optimization of a distributed energy network integrated with heating interchange", *Energy* vol.109, (2016), pp. 353–364.
- [72] J. Zeng, J. Han, G. Zhang, "Diameter optimization of district heating and cooling piping network based on hourly load", *Appl. Therm. Eng.* , vol. 107, (2016), 750–757.
- [73] I.Y. Kim, O.L. De Weck, "Adaptive weighted sum method for multi objective optimization: a new method for Pareto front generation, *Struct. Multidiscip. Optim.* vol.31, (2006), pp. 105–116.
- [74] T. Mertz, Sylvain Serra, A. Henon, Jean-Michel Reneaume., "A MINLP Optimization of the Configuration and the Design of a District Heating Network: Academic Study Cases", *Energy*, (2016), vol.117, pp.450-464.
- [75] R. Mikulandri, G. Kraja, N. Dui, G. Khavin, H. Lund, BV. Mathiesen, P. Østergaard, "Performance analysis of a hybrid district heating system: a case study of a small town in Croatia", *J Sustain Dev Energy, Water Environ Syst*, (2015), vol.3, pp. 282-302.
- [76] S. M. Sanaei, T. Nakata, "Optimum design of district heating: Application of a novel methodology for improved design of community scale integrated energy systems", *Energy*, Vol. 38, (2012), pp.190-204.
- [77] A. Molyneaux, G. Leyland, D. Favrat, "Environomic multi-objective optimisation of a district heating network considering centralized and decentralized heat pumps. *Energy*, vol., (2010), pp.751-758.
- [78] Y.C. Xu, Q. Chen. "An entransy dissipation-based method for global optimization of district heating networks", *Energy and Buildings*, vol.48, (2011), pp. 50-60.
- [79] R. Aringhieri, F. Malucelli., "Optimal operations management and network planning of a district heating system with a combined heat and power plant. *Annals of Operation Research*, volo. 120, (2003), pp. 173-199.
- [80] H.I. Tol, S. Svenden, "Improving the dimensioning of piping networks and network layouts in low-energy buildings: A case study in Roskilde, Denmark", *Energy*, vol.38, (2012), pp. 276-290.
- [81] E. Guelpa, V. Verda, "Thermal energy storage in district heating and cooling systems: A review," *Applied Energy*, Elsevier, vol. 252, (2019), pages 1-1.