



Ricerca di Sistema elettrico

Analisi critica dello stato dell'arte delle metodologie e strategie multi-obiettivo adottabili per la minimizzazione dei costi dei vettori energetici e dell'impatto ambientale di reti energetiche distribuite a servizio di distretti

M. Di Somma, G. Graditi, L. Mongibello, M. Caliano

ANALISI CRITICA DELLO STATO DELL'ARTE DELLE METODOLOGIE E STRATEGIE MULTI-OBIETTIVO
ADOTTABILI PER LA MINIMIZZAZIONE DEI COSTI DEI VETTORI ENERGETICI E DELL'IMPATTO AMBIENTALE
DI RETI ENERGETICHE DISTRIBUITE A SERVIZIO DI DISTRETTI

M. Di Somma, G. Graditi, L. Mongibello, M. Caliano (ENEA)

Settembre 2016

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

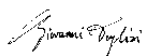
Piano Annuale di Realizzazione 2015

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

Progetto: Tecnologie per costruire gli edifici del futuro

Obiettivo: B. Reti termiche distribuite

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA



Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 SCENARIO DI RIFERIMENTO	7
3 RETI ENERGETICHE DISTRIBUITE A SERVIZIO DI DISTRETTI.....	10
3.1 CARATTERISTICHE PRINCIPALI DELLE RETI ENERGETICHE DISTRIBUITE.....	10
3.2 TECNOLOGIE NELL'AMBITO DELLE RETI ENERGETICHE DISTRIBUITE: SISTEMI DI CONVERSIONE PRIMARIA E ACCUMULO	11
3.2.1. MOTORI A COMBUSTIONE INTERNA.....	11
3.2.2. TURBINE A GAS.....	13
3.2.3. MICROTURBINE A GAS	13
3.2.4. CELLE A COMBUSTIBILE	14
3.2.5. TECNOLOGIE ALIMENTATE DA FONTI RINNOVABILI	15
3.2.6. SISTEMI DI ACCUMULO.....	15
4 PIANIFICAZIONE DI RETI ENERGETICHE DISTRIBUITE A SERVIZIO DI DISTRETTI MEDIANTE APPROCCIO MULTI-OBIETTIVO.....	17
4.1 PROCESSO DECISIONALE PER LA PIANIFICAZIONE DI RETI ENERGETICHE DISTRIBUITE	17
4.2 PROBLEMI DI OTTIMIZZAZIONE PER LA PIANIFICAZIONE DI RETI ENERGETICHE DISTRIBUITE.....	21
4.2.1. CARATTERISTICHE DEI PROBLEMI DI OTTIMIZZAZIONE E RELATIVI METODI DI SOLUZIONE.....	21
4.2.2. DILEMMA MODELLAZIONE ESATTA/OTTIMIZZAZIONE ESATTA	23
4.3 OTTIMIZZAZIONE MULTI-OBIETTIVO PER LA PIANIFICAZIONE DI RETI ENERGETICHE DISTRIBUITE	24
4.3.1. NECESSITÀ DI UN APPROCCIO MULTI-OBIETTIVO	24
4.3.2. CARATTERISTICHE DEI PROBLEMI DI OTTIMIZZAZIONE MULTI-OBIETTIVO	25
4.3.3. METODI DI OTTIMIZZAZIONE MULTI-OBIETTIVO.....	27
5 STATO DELL'ARTE SULLA PIANIFICAZIONE DI RETI ENERGETICHE DISTRIBUITE A SERVIZIO DI DISTRETTI	31
5.1 OTTIMIZZAZIONE OPERAZIONALE E DI DESIGN.....	31
5.2 CRITERI DI OTTIMIZZAZIONE.....	32
5.3 OTTIMIZZAZIONE MULTI-OBIETTIVO PER RIDURRE IL COSTO DEI VETTORI ENERGETICI E L'IMPATTO AMBIENTALE	32
6 CONCLUSIONI.....	35
7 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	36

Sommario

Il tema dell'efficienza energetica degli edifici, strettamente connesso a quello della sostenibilità ambientale, rappresenta uno degli aspetti fondamentali delle attuali politiche mondiali ed europee. L'Energy Management, inteso come l'insieme delle attività volte alla conservazione e all'uso razionale dell'energia, nell'ambito dell'intera catena di fornitura, dalla fonte all'utente, rappresenta uno degli obiettivi da perseguire in un'ottica di risparmio energetico sempre più spinto.

In tale contesto, le reti energetiche distribuite rappresentano una valida alternativa ai sistemi di approvvigionamento energetico convenzionali. Il loro maggiore beneficio risiede, infatti, sia nella possibilità di integrare tra loro diverse fonti energetiche, rinnovabili e non, sia in quella di recuperare l'energia termica dei processi di conversione, mediante l'utilizzo di sistemi co-trigenerativi, consentendo così un uso più razionale delle fonti energetiche. Affinché la loro penetrazione possa diventare effettivamente realizzabile, è necessario, però, dover affrontare ovvie criticità legate alla pianificazione energetica di tali sistemi, inteso come quel processo decisionale volto a determinare la configurazione ottimale o le strategie operazionali ottimali della rete, e che vede il coinvolgimento di diversi stakeholder. Se da una parte ci sono gli addetti alla realizzazione e/o gestione della rete, il cui maggiore interesse è sicuramente rappresentato dal fattore economico, dall'altra ci sono le legislazioni energetiche, tra cui quelle europee, che sono invece particolarmente interessate a ridurre gli impatti ambientali legati all'approvvigionamento energetico. Tali tipologie di obiettivi sono in conflitto, e pertanto nasce l'esigenza di passare ad un approccio multi-obiettivo che consente di trovare delle soluzioni di compromesso a beneficio dei diversi stakeholder.

Il presente studio esamina le metodologie e le strategie multi-obiettivo adottabili nell'ambito delle reti energetiche distribuite nell'ottica del raggiungimento di obiettivi economico/ambientali, quali la riduzione dei costi dei vettori energetici in input al sistema, e la riduzione dell'impatto ambientale.

Lo studio si sofferma innanzitutto sulla descrizione dello scenario di riferimento, caratterizzato da problematiche quali l'incremento della domanda d'energia su scala mondiale, l'esaurimento delle fonti fossili e l'incremento delle emissioni di CO₂ in atmosfera, che comportano la necessità di innestare politiche energetiche volte all'utilizzo razionale delle fonti fossili nei sistemi di approvvigionamento energetico. Sono pertanto descritte le caratteristiche principali delle reti energetiche distribuite a servizio di distretti, esaminando le tecnologie maggiormente utilizzate in tale contesto.

Successivamente, un capitolo specifico è dedicato alla pianificazione energetica di una rete energetica distribuita mediante approccio multi-obiettivo. In tale contesto, sono descritte le caratteristiche principali dei problemi di ottimizzazione multi-obiettivo con relative metodologie di soluzione.

Infine, l'ultimo capitolo è dedicato allo stato dell'arte della pianificazione di reti energetiche distribuite a servizio di distretti. I lavori analizzati in letteratura sono stati innanzitutto classificati in base allo scopo dell'ottimizzazione, ovvero determinazione della configurazione ottimale della rete o delle strategie operazionali ottimali della rete. Sono stati poi esaminati i criteri maggiormente utilizzati nell'ambito di tale pianificazione, e infine, sono stati descritti in dettaglio i lavori dedicati all'ottimizzazione di reti energetiche distribuite con lo scopo di ridurre il costo dei vettori energetici e l'impatto ambientale.

1 Introduzione

Il presente studio nasce dall'esigenza di analizzare metodologie e strategie multi-obiettivo adottabili per la riduzione dei costi dei vettori energetici e dell'impatto ambientale nell'ambito di reti energetiche distribuite a servizio di distretti, per individuare delle soluzioni di compromesso tra i diversi stakeholders interessati alla pianificazione delle reti energetiche distribuite.

Una rete energetica distribuita è un sistema energetico in cui l'energia elettrica e termica è resa disponibile in prossimità dell'utente finale, tipicamente caratterizzato da un cluster di edifici. Le reti energetiche distribuite a servizio di distretti possono comprendere diverse tipologie di sistemi di conversione sia termica che elettrica, nonché sistemi di accumulo. Uno dei maggiori benefici offerti da tali sistemi è dato dalla possibilità di integrare differenti risorse energetiche, anche rinnovabili, e di recuperare energia termica da sistemi di co/trigenerazione per usi termici negli edifici. Questo vantaggio consente di ottenere un sistema di approvvigionamento energetico più sostenibile rispetto a quello convenzionale, attraverso un uso più efficiente delle risorse energetiche e un ridotto impatto ambientale.

La pianificazione di una rete energetica distribuita è quel processo decisionale alla base della scelta della sua configurazione ottimale o delle sue strategie operazionali ottimali, al fine di conseguire uno o più obiettivi, che, nel caso in esame, sono quello economico, volto alla riduzione dei costi dei vettori energetici, e quello ambientale, volto alla riduzione dell'impatto ambientale.

L'obiettivo generale di tale studio è stato declinato in alcune linee operative i cui obiettivi sono sintetizzati a seguire:

- Descrivere le caratteristiche principali delle reti energetiche distribuite, soffermandosi sui vantaggi rispetto ai sistemi di approvvigionamento convenzionali, nonché sulle tecnologie, alimentate da fonti rinnovabili e non, maggiormente utilizzate nel contesto di riferimento.
- Descrivere il processo decisionale che è alla base della pianificazione di una rete energetica distribuita, come uno strumento efficace per ottenere i potenziali attesi di tale sistema energetico.
- Descrivere l'approccio multi-obiettivo adottabile nell'ambito della pianificazione di una rete energetica distribuita, con lo scopo di individuare delle soluzioni di compromesso economico/ambientale per i diversi stakeholder che partecipano al processo decisionale, analizzando le caratteristiche principali dei problemi di ottimizzazione multi-obiettivo, con i relativi metodi di ottimizzazione.
- Analizzare lo stato dell'arte sulla pianificazione di reti energetiche distribuite a servizio di distretti, soffermandosi sulla tipologia di ottimizzazione, che può essere di design o operativa, sull'approccio utilizzato del tipo mono- o multi-obiettivo, sui criteri di ottimizzazione maggiormente utilizzati in letteratura e relativi metodi di ottimizzazione adottati, focalizzando poi l'attenzione sui lavori dedicati all'ottimizzazione di reti energetiche distribuite con lo scopo di ridurre il costo dei vettori energetici e l'impatto ambientale.

Il presente report descrive le attività svolte all'interno di questo quadro. Seguendo le linee sopra indicate, il lavoro svolto è partito dalla descrizione dello scenario di riferimento, soffermandosi sulle problematiche legate all'aumento della domanda di energia su scala mondiale, all'esaurimento delle fonti fossili, e all'incremento delle emissioni di CO₂ in atmosfera. Sulla base di tale scenario, si è focalizzata l'attenzione sull'importanza di ottenere risparmio energetico nell'ambito dei sistemi di approvvigionamento, innestando una politica energetica basata sull'uso razionale delle fonti primarie. Sono state pertanto descritte le caratteristiche principali delle reti energetiche distribuite a servizio di distretti, riconosciute come un'alternativa sostenibile ai sistemi di approvvigionamento energetico convenzionali, soffermandosi sui loro vantaggi, nonché sulle caratteristiche delle tecnologie maggiormente utilizzate nel contesto di riferimento.

In una seconda fase, è stata esaminata il complesso processo decisionale che è alla base della pianificazione di tali sistemi energetici per il raggiungimento dei potenziali attesi. Sono state pertanto

descritte le caratteristiche principali dei problemi di ottimizzazione formulati per pianificare una rete energetica distribuita con le relative metodologie di soluzione, ed è stato descritto il dilemma, tipico in tale contesto, esistente tra modellazione esatta e ottimizzazione esatta. È stato poi descritto l'approccio multi-obiettivo adottabile nell'ambito della pianificazione delle reti energetiche distribuite, necessario per individuare soluzioni di compromesso economico/ambientale per i diversi stakeholders che partecipano al processo decisionale. In tale contesto, sono state analizzate in dettaglio le caratteristiche principali dei problemi di ottimizzazione multi-obiettivo, con i relativi metodi di ottimizzazione.

Infine, in un'ultima fase, sulla base dello scenario di riferimento descritto, e delle caratteristiche tipiche del processo decisionale per la pianificazione di una rete energetica distribuita, è stato analizzato lo stato dell'arte sull'ottimizzazione di design e operativa di tali sistemi energetici, soffermandosi sui criteri di ottimizzazione maggiormente utilizzati in letteratura e sui metodi di ottimizzazione adottati. Sono stati poi descritti in maniera dettagliata, i modelli formulati, e i risultati ottenuti nei lavori in letteratura dedicati alla pianificazione di reti energetiche distribuite con lo scopo di ridurre sia il costo dei vettori energetici che l'impatto ambientale.

2 Scenario di riferimento

I sistemi energetici ricoprono un ruolo essenziale nello sviluppo economico e sociale di un paese e nella qualità della vita dei singoli individui [1, 2]. Con l'aumento della domanda di energia su scala mondiale, le problematiche legate all'esaurimento delle fonti fossili, e la crescente consapevolezza della necessità di tutelare l'ambiente derivata dall'ultima conferenza COP21 sul clima, il tema dell'efficienza energetica dei sistemi di approvvigionamento energetico è diventato basilare nell'ambito dei tavoli istituzionali europei e internazionali. L'International Energy Agency nel "World Energy Outlook 2013" [3], ha previsto che la domanda globale di energia primaria è destinata a crescere in modo significativo nel corso dei prossimi decenni, soprattutto con riferimento alle economie emergenti. In Figura 1a è rappresentata la domanda di energia primaria globale prevista nel 2035, mentre in Figura 1b è mostrata la quota di crescita del consumo energetico globale entro lo stesso anno. Tale scenario prevede una crescita significativa della domanda energetica globale, soprattutto nel contesto delle economie emergenti, che saranno responsabili, in base a tali previsioni, di più del 90% della crescita globale netta della domanda energetica entro il 2035 [3].



Figura 1. Rappresentazione di a) Domanda di energia primaria globale prevista nel 2035 (Mtoe); b) Percentuale di crescita del consumo globale di energia nel periodo 2012-2035. Elaborata da ENEA da dati provenienti da [3].

In Figura 2, è mostrato il consumo di energia primaria globale diviso per fonti energetiche nei periodi 1987-2011 e 2011-2035 [3]. Si evince che nonostante l'uso delle fonti rinnovabili è destinato ad aumentare nei prossimi decenni, i combustibili fossili, come gas naturale e carbone, continueranno ad essere le fonti energetiche più utilizzate nei sistemi di approvvigionamento energetico su scala mondiale.

L'uso dei combustibili fossili è irrimediabilmente legato alle emissioni climalteranti. In tale contesto si è osservato che la concentrazione di CO₂ in atmosfera è aumentata in maniera esponenziale nel corso dell'ultimo secolo (circa 280 ppm), rispetto a quella relativa all'era pre-industriale [4]. La concentrazione di CO₂ in atmosfera nel 2014 è risultata essere pari a 397 ppm, ovvero superiore di circa il 40% rispetto a quella relativa alla metà del 1800, con una crescita media di 2 ppm/anno negli ultimi dieci anni. La crescente domanda mondiale di energia da combustibili fossili svolge un ruolo chiave nell'andamento crescente delle emissioni di CO₂, fenomeno, quest'ultimo, strettamente legato ai problemi di riscaldamento globale.

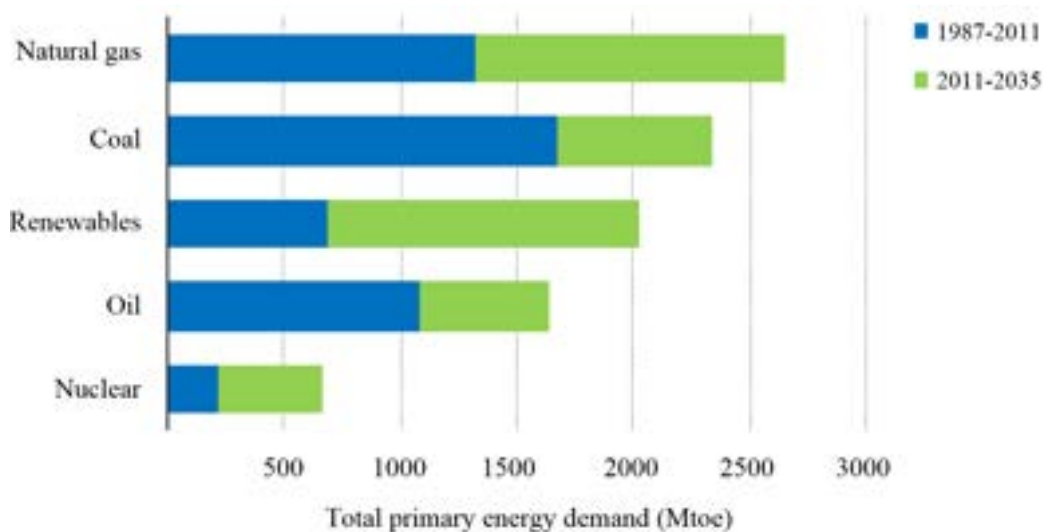


Figura 2. Consumo di energia primaria globale per fonti energetiche (Mtoe) nei periodi 1987-2011 e 2011-2035 [3].

In Figura 3, si mostra l'andamento delle emissioni globali di CO₂ da combustibili fossili nel periodo 1870-2013. Si evince che a partire dalla rivoluzione industriale, le emissioni globali annue di CO₂ sono passate da valori quasi nulli a 32 GtCO₂ nel 2013.

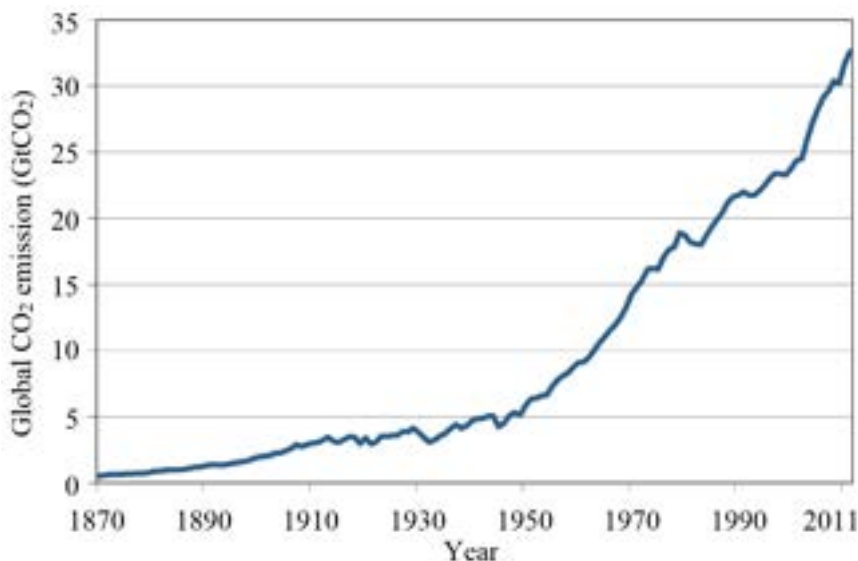


Figura 3. Andamento delle emissioni globali di CO₂ provenienti da combustione di fonti fossili [4]

Il settore edilizio è responsabile di oltre un terzo della domanda energetica globale [5]. Inoltre, risulta responsabile del 15% delle emissioni totali di CO₂ legate al consumo diretto di energia da parte degli utenti finali, e se si tiene anche conto delle emissioni indirette imputabili alla domanda elettrica e termica, allora tale percentuale arriva al 26% [6]. La domanda energetica globale annua pro-capite per usi finali nel settore edilizio nel 1990 e nel 2013 per varie regioni nel mondo è rappresentata in Figura 4, in cui si evince il notevole tasso di crescita registrato negli ultimi due decenni.

La domanda energetica per usi finali negli edifici è destinata a raddoppiare, o addirittura triplicare, entro la metà del secolo, a causa di una serie di fattori chiave, quali la migrazione verso le città, i crescenti livelli di

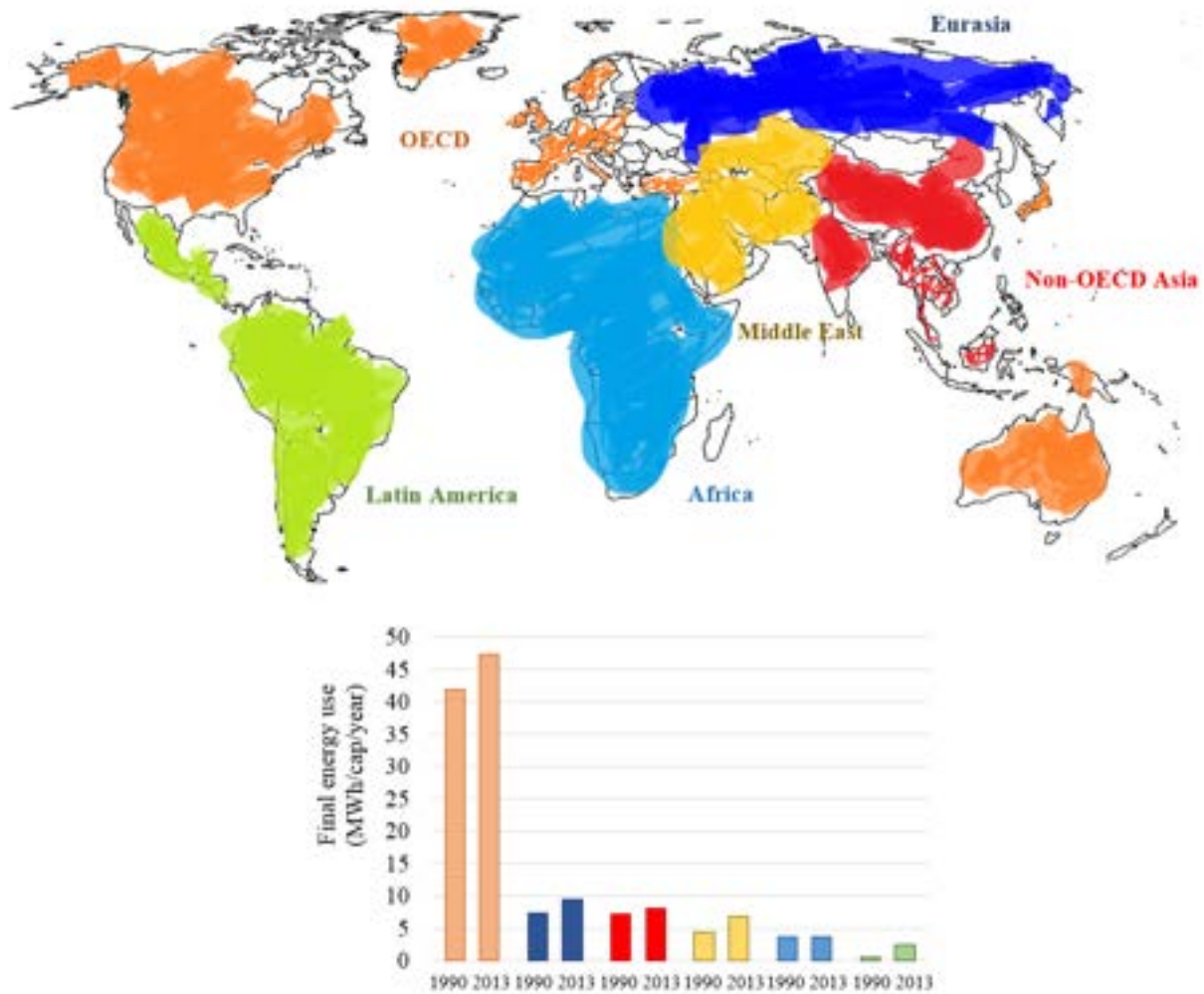


Figura 4. Domanda energetica globale annua pro-capite per usi finali nel settore edilizio nel 1990 e nel 2013 per varie regioni nel mondo. Elaborata da ENEA da dati provenienti da [6].

ricchezza, e lo sviluppo delle economie emergenti [6]. Ciò significa che gli edifici, collettivamente, daranno un contributo sempre più significativo ai problemi energetici mondiali sopra descritti. In tale scenario, il tema del risparmio energetico nel settore edilizio ha attirato molto interesse negli ultimi decenni, e tale interesse si è generalmente focalizzato sul risparmio energetico inteso come miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici.

Tuttavia, oltre all'importanza di ridurre i consumi energetici dal lato "domanda", è altresì importante ottenere risparmio energetico nei sistemi di approvvigionamento energetico, innestando una politica energetica basata sull'uso razionale delle fonti energetiche [7]. Negli ultimi anni è cresciuta la sensibilità verso questo nuovo approccio, e diverse politiche di governo sono state adottate per favorire l'efficienza energetica nell'ambito dei sistemi di approvvigionamento energetico degli edifici, ad esempio attraverso l'integrazione di fonti energetiche rinnovabili con l'obiettivo ultimo di aumentare la loro sostenibilità [8 - 10]. In tale contesto, si è intensificato l'interesse verso le reti energetiche distribuite a servizio di distretti, che sono state riconosciute come un'alternativa sostenibile ai sistemi di approvvigionamento convenzionali [11 - 14], e come una buona opzione per lo sviluppo sostenibile dell'approvvigionamento energetico futuro [11, 12, 16].

3 Reti energetiche distribuite a servizio di distretti

3.1 Caratteristiche principali delle reti energetiche distribuite

Una rete energetica distribuita è un sistema energetico in cui l'energia elettrica e termica è resa disponibile in prossimità dell'utente finale, tipicamente caratterizzato da un cluster di edifici [11]. Le reti energetiche distribuite a servizio di distretti possono comprendere diverse tipologie di sistemi di conversione sia termica che elettrica, così come elencato di seguito:

- Cogeneratori/trigeneratori con diversi tipologie di prime movers quali motori a combustione interna, turbine a gas, microturbine a gas, celle a combustibile;
- Caldaie tradizionali;
- Caldaie a biomassa;
- Pompe di calore/chiller elettrici;
- Assorbitori;
- Collettori solari;
- Pannelli fotovoltaici;
- Turbine eoliche;
- Sistemi di accumulo termico/elettrico.

In Figura 5, sono messi a confronto un tipico sistema di approvvigionamento convenzionale e una rete energetica distribuita a servizio di un distretto reale [16]. Tale rete energetica è stata installata a Savona nel campus dell'Università di Genova.



Figura 5. Rappresentazione di un tipico sistema di approvvigionamento convenzionale vs. una rete energetica distribuita a servizio di un distretto.

Uno dei maggiori benefici offerti dalle reti energetiche distribuite è dato dalla possibilità di integrare differenti risorse energetiche, anche rinnovabili, e di recuperare energia termica da sistemi di co/trigenerazione per usi termici negli edifici [12 - 14]. Questo vantaggio consente di ottenere un sistema di approvvigionamento energetico più sostenibile rispetto a quello convenzionale, attraverso un uso più efficiente delle risorse energetiche e un ridotto impatto ambientale. Per poter ottenere i potenziali attesi di tali sistemi, è però necessario pianificarli in maniera opportuna, selezionando, tra le numerose alternative

offerte dal mercato, sia le tecnologie appropriate in termini di tipologie, numeri e taglie, sia le loro strategie di funzionamento, per soddisfare il fabbisogno energetico di un'utenza o un gruppo di utenze. Attraverso un'opportuna pianificazione, tali sistemi energetici possono mostrare delle performance, sia economiche che di impatto ambientale, di gran lunga migliori rispetto a singoli sistemi poligenerativi, quali cogeneratori o trigeneratori [12, 13].

3.2 Tecnologie nell'ambito delle reti energetiche distribuite: sistemi di conversione primaria e accumulo

In Figura 6 si riporta una schematizzazione delle tecnologie, ovvero sistemi di conversione primaria e sistemi di accumulo, maggiormente utilizzate nell'ambito delle reti energetiche distribuite a servizio di distretti. In Tabella 1, sono invece riportate le loro caratteristiche principali.

Ciascuna di queste tecnologie è descritta nel seguito.

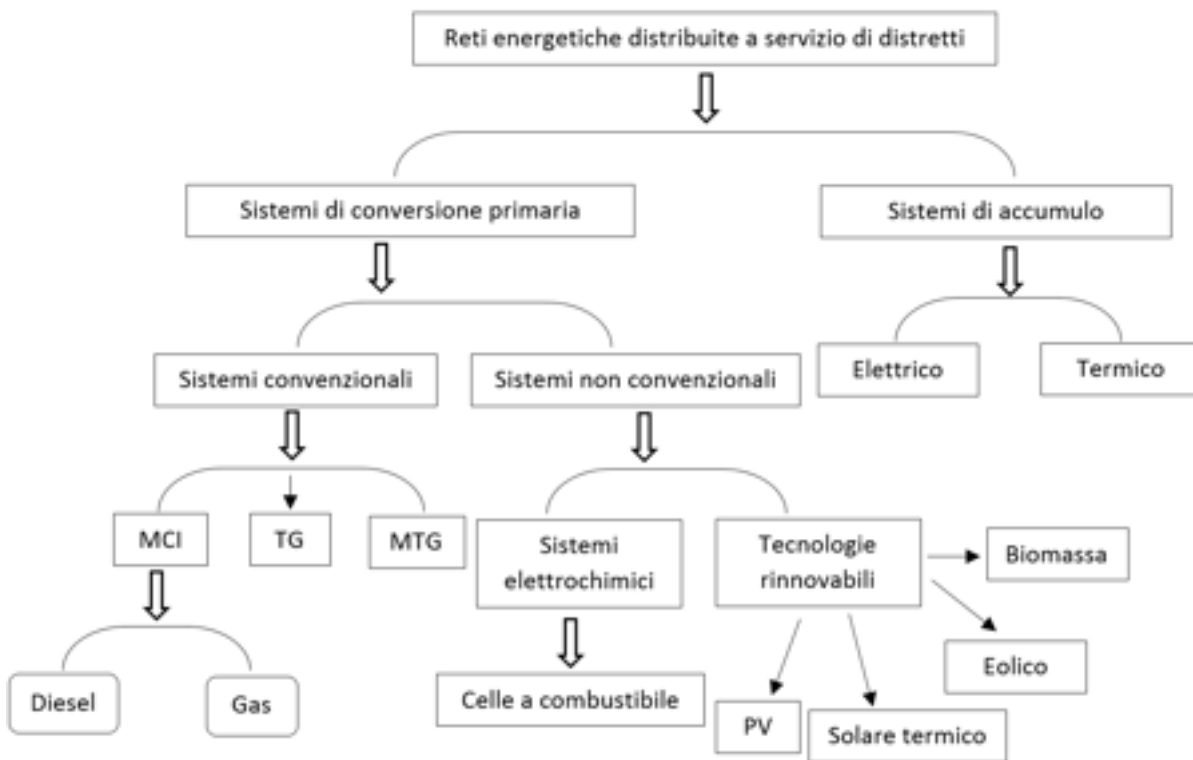


Figura 6. Tecnologie nelle reti energetiche distribuite

3.2.1. Motori a combustione interna

I motori a combustione interna (MCI) alimentati da combustibili fossili, quali Diesel e gas naturale sono tra le tecnologie maggiormente utilizzate nell'ambito delle reti energetiche distribuite, soprattutto in applicazioni di co-trigenerazione per produzione combinata di energia elettrica e termica. Il range di taglie disponibili sul mercato va da pochi kW ai MW. Questa tecnologia ha il vantaggio del basso costo di installazione, ma lo svantaggio di avere elevate emissioni e costi di manutenzione. Una miscela impropria di aria/combustibile, nonché l'eccessivo raffreddamento dei cilindri provoca emissioni di monossido di carbonio, e di idrocarburi, mentre il processo di combustione genera NO_x . Tali effetti negativi sono ridotti nel caso di motori alimentati a gas naturale che si stanno diffondendo negli ultimi anni. Questi motori,

infatti, offrono la combinazione di efficienza ed affidabilità di un motore diesel, con emissioni di NO_x minime rispetto al suo equivalente Diesel. Le caratteristiche principali di questa tecnologia sono sintetizzate in Tabella 2.

Tabella 1. Caratteristiche principali delle tecnologie nelle reti energetiche distribuite [13]

Tecnologie	Range di applicazione	Efficienza elettrica	Applicazione nell'ambito delle reti	Efficienza termica	Combustibile
Motori a combustione interna (MCI)	Diesel: 20 kW _e – 10 MW _e Gas: 5 kW _e – 5MW _e	Diesel: 36–43% Gas: 28–42%	Prevalentemente applicazioni in ambito residenziale e commerciale per: - Solo fornitura energia elettrica - Co/trigenerazione	Diesel: 32-55% Gas: 40-68%	Diesel e biodiesel Gas, soprattutto gas naturale, ma anche biogas sono utilizzati
Turbine a gas (TG)	500 kW _e – 20 MW _e	21–40%	Applicazioni in ambito industriale per: - Solo fornitura energia elettrica - Co/trigenerazione	33-42%	Gas, cherosene
Microturbine a gas (MGT)	30 – 200 kW _e 35 kW _e – 1 MW _e	25–30%	Applicazioni in ambito residenziale e commerciale per: - Solo fornitura energia elettrica - Co/trigenerazione	42–52%	Generalmente gas naturale, ma anche biogas o combustibili liquidi possono essere utilizzati
Celle a combustibile	PAFC: 200 kW _e –2 MW _e MCFC: 50kW _e –1+MW _e SOFC: 1 kW _e –5MW _e	PAFC: ± 35% MCFC: 50-55% SOFC: 50-55%	Applicazioni per: - Solo fornitura energia elettrica - Cogenerazione	PAFC: ± 46% MCFC: 27-32% SOFC: 19-24%	Idrogeno/ metanolo, gas naturale
Fotovoltaico	1 +kW _e	~12-14%	Prevalentemente applicazioni in ambito residenziale e commerciale	-	Energia solare
Eolico	200 W _e –3 MW _e	~20-25%		-	Energia cinetica del vento
Solare termico	1+kW _t	-	Prevalentemente applicazioni in ambito residenziale e commerciale	~60%	Energia solare
Boiler a biomassa	10 kW _t – 2 MW _t		Prevalentemente applicazioni in ambito residenziale e commerciale	~85%	Biomasse
Turbogeneratori ORC	200 kW _e – 2 MW _e	~18%	Cogenerazione	~80%	Biomasse

Tabella 2. Caratteristiche principali dei MCI [17]

Output termico in applicazioni di co/trigenerazione	Possono produrre acqua calda, vapore a bassa pressione, e acqua fredda attraverso l'uso di un assorbitore
Velocità della fase di avviamento	Sono caratterizzati da un veloce avviamento che consente una veloce ripresa del sistema seguendo la procedura di manutenzione. Tali sistemi sono in grado di offrire una risposta tempestiva in caso di picco di richiesta di energia elettrica
Funzionamento a carico parziale	Sono caratterizzati da un'elevata efficienza a carico parziale
Affidabilità	Sono considerati una tecnologia affidabile sulla base di una corretta manutenzione
Emissioni	I MCI alimentati a Diesel sono caratterizzati da elevate emissioni di NO _x e particolato. Quelli invece alimentati a gas sono caratterizzati da livelli di

3.2.2. Turbine a gas

Le turbine a gas (TG) sono impianti motori termici che convertono l'energia chimica del combustibile in energia meccanica mediante un ciclo termodinamico Brayton. Queste tecnologie sono spesso utilizzate in grandi applicazioni industriali, e il range di taglie disponibili sul mercato va dai 500 kW ai 20 MW [11]. Esse possono essere utilizzate in diverse applicazioni che vanno dalla sola generazione elettrica alla produzione combinata di energia elettrica e termica in ambito industriale. Le caratteristiche principali di questa tecnologia sono sintetizzate in Tabella 3.

Tabella 3. Caratteristiche principali delle TG [17]

Output termico in applicazioni di co/trigenerazione	Rendono disponibile calore ad elevata temperatura. Il vapore ad elevata pressione può essere sia utilizzato per processi di riscaldamento o essiccazione in ambito industriale, che per produrre acqua fredda attraverso l'uso di un assorbitore
Diversità dei combustibili di alimentazione	Possono essere alimentate da diversi combustibili, come gas naturale, syngas, e oli combustibili
Funzionamento a carico parziale	Sono caratterizzate da una riduzione notevole dell'efficienza a carico parziale
Affidabilità	Le TG moderne sono da considerare una tecnologia affidabile sulla base di una corretta manutenzione.
Emissioni	Le TG (soprattutto quelle alimentate da gas naturale) sono caratterizzate da basse emissioni di NO _x e monossido di carbonio.

3.2.3. Microturbine a gas

Le microturbine a gas (MGT) sono impianti motori termici simili alle TG che convertono l'energia chimica del combustibile in energia meccanica mediante un ciclo termodinamico Brayton. Tali tecnologie, insieme ai motori a combustione interna, sono tra le tecnologie maggiormente utilizzate nell'ambito delle reti energetiche distribuite, e anche tra le più promettenti. Uno dei vantaggi maggiori di questa tecnologia è legata alla velocità della fase di avviamento. Il range di disponibilità sul mercato va dai 30 kW_e ai 200 kW_e e sono maggiormente utilizzate in applicazioni residenziali e commerciali. Le MGT offrono diversi vantaggi rispetto ai MCI, tra cui maggiore densità di potenza con riferimento a fattori quali ingombro e peso, e minori emissioni inquinanti. Un altro vantaggio è sicuramente legato alla presenza di poche parti poste in rotazione, con conseguente riduzione dei costi di manutenzione. In applicazioni quali co/trigenerazione, un altro vantaggio è legato al fatto che gran parte del calore di scarto da recuperare è contenuto nei gas esausti ad elevata temperatura, mentre nei motori il calore di scarto è diviso tra gas esausti e circuito di raffreddamento. Tuttavia, rispetto alle MTG, i MCI hanno il vantaggio di fornire una risposta più veloce alle variazioni del carico elettrico, sono più efficienti, e sono caratterizzati da una maggiore efficienza a carico parziale. Le caratteristiche principali delle MTG sono sintetizzate in Tabella 4.

Tabella 4. Caratteristiche principali delle MTG [17]

Output termico in applicazioni di co/trigenerazione	Rendono disponibili gas esausti che vanno dai 260 ai 320°C, adatti per produrre acqua calda, vapore e acqua fredda attraverso l'uso di un assorbitore
Diversità dei combustibili di alimentazione	Possono essere alimentate da diverse tipologie di combustibili, come gas naturale, biogas, e combustibili liquidi
Funzionamento a carico parziale	Sono caratterizzate da una riduzione notevole dell'efficienza a carico parziale
Modularità	Possono essere connesse in parallelo per coprire carichi elevati.
Dimensioni	Sono caratterizzate da basso peso.
Affidabilità	Sono da considerare una tecnologia affidabile sulla base di una corretta

	manutenzione.
Emissioni	Le MTG (soprattutto quelle alimentate da gas naturale) sono caratterizzate da basse emissioni di NO _x e monossido di carbonio.

3.2.4. Celle a combustibile

Le celle a combustibile sono dispositivi elettrochimici che convertono direttamente l'energia di un combustibile in energia elettrica e termica. Esse funzionano in modo analogo ad una batteria a secco ma, a differenza di quest'ultima, consumano sostanze provenienti dall'esterno e sono quindi in grado di funzionare senza interruzioni finché al sistema vengono forniti un combustibile ed un ossidante. A seconda dell'elettrolita utilizzato, le celle a combustibile si dividono in:

- AFC (alcaline)
- PEFC (elettrolita polimerico)
- PAFC (ad acido fosforico)
- MCFC (a carbonati fusi)
- DMFC (a metanolo diretto)
- SOFC (ad ossidi solidi)

Tra queste, le PAFC, MCFC e SOFC sono quelle maggiormente utilizzate nell'ambito della generazione distribuita, mentre le AFC sono quelle maggiormente diffuse in commercio. In generale, il principale vantaggio di questa tecnologia è legato all'elevata efficienza, anche a carico parziale, nonché al basso livello di emissioni, e alla quasi assenza di parti rotanti. In applicazioni di cogenerazione, l'efficienza totale può arrivare a valori superiori all'85%. Le caratteristiche principali di questa tecnologia sono sintetizzate in Tabella 5.

Tabella 5. Caratteristiche principali delle celle a combustibile [17]

Output termico in applicazioni di cogenerazione	Possono raggiungere efficienze totali che vanno dal 65% al 95%. Il calore recuperato può essere generalmente utilizzato per produrre acqua calda sanitaria e per riscaldamento ambiente
Disponibilità sul mercato	Sono commercializzabili e la loro disponibilità sul mercato supera il 90%
Funzionamento a carico parziale	L'efficienza risulta essere stabile fino ad un terzo/un quarto della capacità nominale
Funzionamento ciclico	Mentre l'efficienza a carico parziale risulta essere generalmente elevata, le MCFC e SOFC necessitano di lunghi periodi di riscaldamento e raffreddamento, che limitano la loro capacità di operare in molte applicazioni cicliche.
Efficienza	In generale, sono caratterizzate da elevati valori di efficienza elettrica
Durata di vita utile	Se da un lato non presentano parti rotanti, dall'altro sono caratterizzati dalla presenza di assemblaggi molto complessi, che comporta una durata di vita utile alquanto bassa.
Utilizzo del combustibile	La risorsa primaria è l'idrogeno, che può essere ottenuto da gas naturale, metanolo e altri combustibili contenenti idrocarburi.
Emissioni	Nelle celle a combustibile, la combustione può raggiungere emissioni di monossido di carbonio inferiori a 2 ppmv, di NO _x inferiori a 1 ppmv, e emissioni trascurabili di SO _x . Tuttavia, la maggior parte delle celle a combustibile converte metano in idrogeno. Questo processo genera CO ₂ e i livelli di emissioni sono legati all'efficienza della cella a combustibile.

3.2.5. Tecnologie alimentate da fonti rinnovabili

I pannelli fotovoltaici convertono l'energia solare in energia elettrica. Tale tecnologia può funzionare sia in modalità stand-alone che connessa alla rete elettrica. L'energia elettrica fornita è direttamente proporzionale alla superficie installata e alle dimensioni di ingombro, ed è funzione dell'irradianza solare nonché della temperatura ambiente. Il maggiore svantaggio di questa tecnologia è legato all'efficienza alquanto bassa.

Le turbine eoliche convertono l'energia cinetica del vento in energia elettrica. L'energia elettrica fornita dipende sia dalla velocità del vento che dalle caratteristiche della turbina. In generale, si ha produzione di energia elettrica per valori della velocità del vento che vanno dai 4 m/s ai 25 m/s [11]. Le taglie disponibili sul mercato sono alquanto varie e vanno dai 20 kW_e ai 3 MW_e. Il maggiore svantaggio di questa tecnologia è legato agli elevati costi di investimento e manutenzione.

Il solare termico è una tecnologia che converte energia solare in energia termica. Questa tecnologia si classifica in due tipologie, ovvero collettori a bassa, e media temperatura. I collettori a bassa temperatura sono caratterizzati da superfici piane, e forniscono energia termica a bassa temperatura, generalmente utilizzata in applicazioni come riscaldamento delle piscine. I collettori a media temperatura sono anch'essi caratterizzati da superfici piane, e sono generalmente usati per produrre acqua calda in applicazioni residenziali e commerciali.

Le biomasse sono considerate una delle più promettenti fonti di energia rinnovabile. Rappresentano la frazione biodegradabile dei prodotti, rifiuti e residui di origine biologica provenienti dall'agricoltura, dalla silvicoltura, e dalle industrie connesse, comprese la pesca e l'acquacoltura, nonché la parte biodegradabile dei rifiuti industriali e urbani [18]. Secondo l'International Energy Agency, l'11% dell'energia mondiale, sia elettrica che termica, deriva da biomasse [13]. Durante la fase di combustione, esse rilasciano calore, utilizzato a sua volta per produrre vapore, che può essere usato sia per alimentare una turbina e generare elettricità, sia per fini termici in applicazioni industriali, ma anche residenziali e commerciali. In generale però, il processo di combustione della biomassa è attualmente utilizzato per soli fini termici, o per la produzione combinata di energia elettrica e termica in centrali di cogenerazione. In questo ultimo caso, l'energia termica fornita dalla combustione della biomassa è utilizzata in un turbogeneratore del tipo ORC (Organic Rankine Cycle), che converte l'energia termica in energia elettrica secondo un ciclo Rankine.

3.2.6. Sistemi di accumulo

I sistemi di accumulo, sia elettrico che termico, svolgono un ruolo strategico nell'ambito delle reti energetiche distribuite sia perché consentono di disaccoppiare temporalmente produzione e utilizzo dell'energia, sia perché consentono di compensare l'aleatorietà tipica della produzione da rinnovabili.

L'integrazione dei sistemi di accumulo nell'ambito delle reti energetiche distribuite porta evidenti vantaggi, tra cui [19]:

- Possibilità di produrre energia in un periodo di scarsa domanda, accumularla e poi renderla disponibile quando la richiesta è maggiore.
- Riduzione nell'uso di combustibili fossili, con conseguente riduzione dei costi dei vettori energetici da sostenere e dell'impatto ambientale.
- Possibilità di spostare l'acquisto di energia elettrica nelle fasce in cui costa di meno.
- Maggiore flessibilità del sistema.

Per quanto riguarda l'accumulo elettrico, negli ultimi anni sono state sviluppate e applicate tecnologie quali: accumulo di acqua in bacini di pompaggio; volani (flywheels), accumulo di aria compressa in caverne (compressed air energy storage, CAES); magneti superconduttori (superconducting magnets energy storage,

SMES); batterie elettrochimiche; supercondensatori. Gli accumulatori elettrochimici sono attualmente oggetto di intensa attività di ricerca e sviluppo e se ne prevede una crescente penetrazione, soprattutto nell'ambito delle applicazioni distribuite in prossimità dell'utenza, di piccola e media taglia (tra 1 MW e qualche decina di MW). Le tecnologie più promettenti appaiono essere, accanto alle batterie ad alta temperatura quali sodio/zolfo (Na/S) e sodio/cloruri metallici (Na/NiCl), quelle basate su ioni di litio e quelle redox/vanadio [20].

I sistemi di accumulo di energia termica costituiscono una soluzione innovativa per bilanciare la domanda e l'offerta di energia nell'arco del giorno, delle settimane e perfino delle stagioni. I sistemi di accumulo termico possono essere classificati a seconda se effettuano [21]:

- Accumulo di calore sensibile, che si basa sull'immagazzinamento di energia termica mediante il riscaldamento o il raffreddamento di un mezzo di accumulo liquido o solido.
- Accumulo di calore latente, che è basato sul calore assorbito o rilasciato quando un materiale a cambiamento di fase (PCMs - Phase Change Materials) effettua una trasformazione di fase da solido a liquido oppure da liquido a gas.
- Accumulo termo-chimico (TCS - Thermo-Chemical Storage), che è basato sul rilascio e l'accumulo di energia termica durante reazioni chimiche.

Gli impianti di accumulo di calore sensibile rappresentano la soluzione maggiormente utilizzata nell'ambito delle reti energetiche distribuite. Il maggiore vantaggio è legato ai bassi costi di tali sistemi, che sono costituiti semplicemente da un serbatoio contenente il mezzo di accumulo, generalmente acqua, e da uno scambiatore per la fase di caricamento e scaricamento.

4 Pianificazione di reti energetiche distribuite a servizio di distretti mediante approccio multi-obiettivo

4.1 Processo decisionale per la pianificazione di reti energetiche distribuite

La pianificazione di una rete energetica distribuita è sia quel processo decisionale volto ad ottimizzare il suo design, inteso come configurazione, selezionando le tecnologie appropriate in termini di tipologie, numeri e taglie, al fine di conseguire uno o più obiettivi, come ad esempio quello economico minimizzando i costi, e/o quello ambientale minimizzando le emissioni inquinanti, sottoposti ad una serie di vincoli, sia quel processo decisionale volto ad ottimizzare le strategie operazionali dei componenti della rete, sempre al fine di conseguire uno o più obiettivi, sottoposti ad una serie di vincoli. In tal caso, il mix delle tecnologie, il loro numero e le relative taglie è prefissato prima del processo di ottimizzazione.

La complessità di tale processo decisionale è innanzitutto legata alla presenza di molteplici sistemi di conversione e sistemi di accumulo termico che convertono e accumulano una serie di vettori energetici con interazioni tra loro complesse, per soddisfare i carichi di un'utenza o gruppo di utenze in regime dinamico [22, 23]. In Figura 7, è rappresentata una tipica configurazione di una rete energetica distribuita, in cui sono evidenziate le interazioni complesse tra i diversi componenti della rete [24].

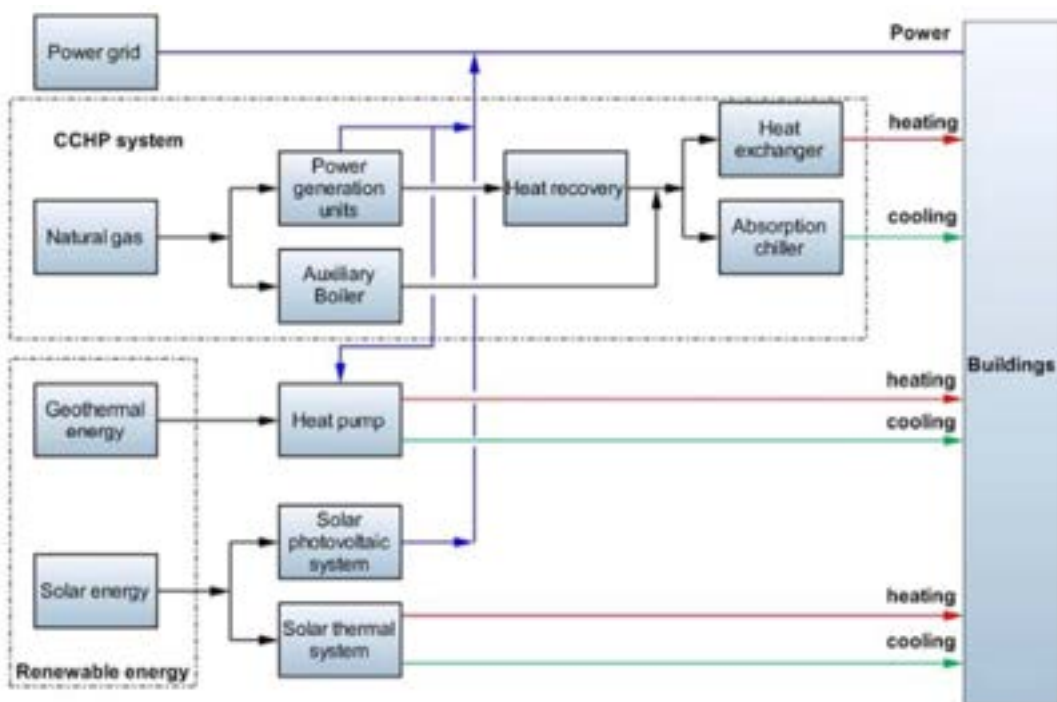


Figura 7. Configurazione tipica di una rete energetica distribuita a servizio di un distretto

La complessità è anche legata alla presenza di diversi stakeholders interessati allo sviluppo e conseguente diffusione delle reti energetiche distribuite a servizio di distretti. Un'ottimizzazione puramente economica volta ad esempio alla minimizzazione dei costi, non è sufficiente per poter assicurare la sostenibilità a lungo termine dell'approvvigionamento energetico, obiettivo, quest'ultimo, considerato sempre più importante dalle legislazioni energetiche europee. In generale, nello scorso secolo, gli sforzi per la pianificazione energetica sono stati principalmente diretti verso modelli energetici volti ad esplorare le relazioni tra energia ed economia. Si utilizzava, pertanto, un approccio mono-obiettivo volto ad identificare le opzioni di approvvigionamento energetico più economiche [25, 26]. A partire dal 1980, con la crescente

consapevolezza della necessità di assicurare uno sviluppo sostenibile dell’approvvigionamento energetico caratterizzato da bassi impatti ambientali, il quadro decisionale legato alla pianificazione energetica è leggermente cambiato [27]. La necessità di integrare considerazioni soprattutto di carattere ambientale nella pianificazione energetica ha infatti portato al crescente utilizzo di approcci multi-obiettivo. Questi metodi forniscono una migliore comprensione delle caratteristiche intrinseche del problema decisionale, promuovendo il ruolo degli stakeholders al processo decisionale, e facilitando decisioni collettive di compromesso. Inoltre, essi contribuiscono a migliorare la qualità della decisione, rendendola esplicita, e pertanto razionale e più efficiente, agevolando non solo negoziazioni tra i diversi stakeholders, ma anche quantificazione e determinazione delle priorità [28].

Si riporta di seguito un esempio esplicativo di un modello di ottimizzazione multi-obiettivo sviluppato da Di Somma et al in [23] per identificare le strategie operazionali ottimali di una rete energetica distribuita a servizio di un distretto schematizzata in Figura 8, con l’obiettivo di ridurre sia i costi dei vettori energetici che l’impatto ambientale in termini di emissioni di CO₂.

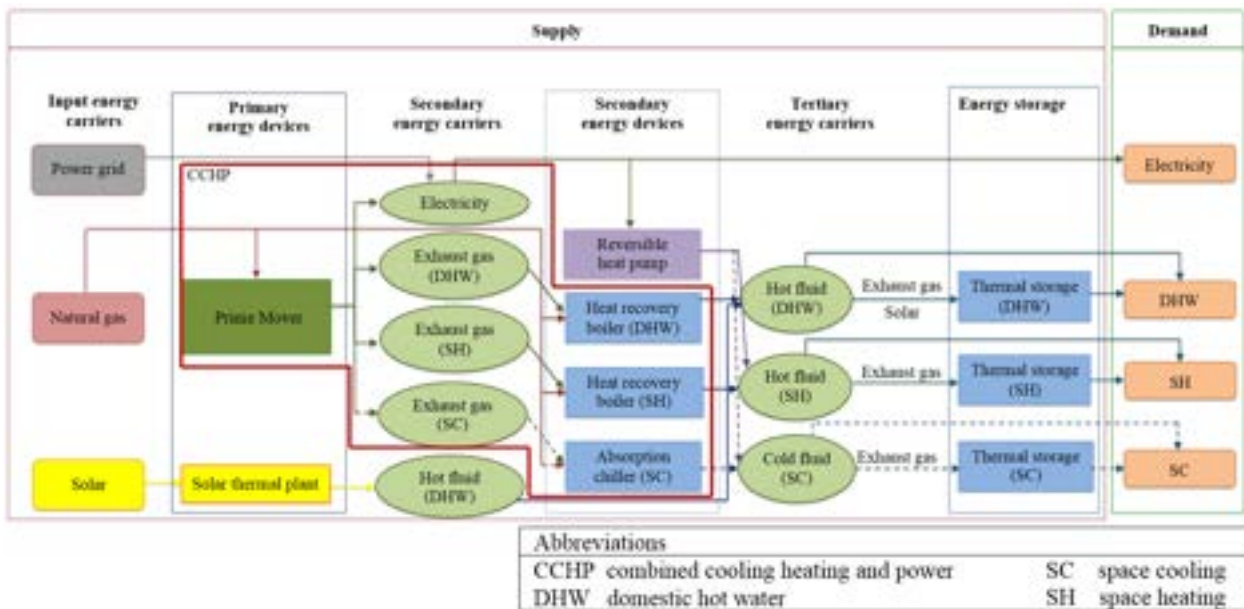


Figura 8. Schema della rete energetica distribuita prefissato a monte dell’ottimizzazione operativa [23]

La rete energetica distribuita comprende diverse tecnologie, elencate di seguito:

- Trigeneratore (Combined Cooling Heat and Power) con relative caldaie a recupero e assorbitori;
- Impianto solare termico;
- Pompe di calore del tipo aria/acqua reversibili;
- Sistemi di accumulo termico.

La domanda dell’utenza comprende: elettricità, acqua calda sanitaria, riscaldamento/raffrescamento.

La funzione obiettivo economica è stata formulata come il costo totale dei vettori energetici da minimizzare. Tale costo dipende dalle strategie operazionali della rete energetica, che sono variabili decisionali del problema formulato. Nel caso specifico, esso è dato dalla somma del costo del gas naturale consumato dal motore a combustione interna e dalla caldaie a recupero e assorbitori, e il costo dell’elettricità di rete utilizzata sia per soddisfare il carico termico dell’utente che per alimentare le pompe di calore reversibili.

La funzione obiettivo ambientale è stata formulata come l’impatto ambientale, in termini di emissioni di CO₂ totali, da minimizzare. Come per il costo dei vettori energetici, anche le emissioni di CO₂ dipendono dalle strategie operazionali della rete energetica. Nel caso specifico, esse sono date dalla somma delle emissioni di CO₂ legate alla combustione del gas naturale nel motore e nelle caldaie a recupero e assorbitori, e le emissioni di CO₂ legate all’uso dell’elettricità di rete. In particolare, le emissioni legate alla combustione del gas sono date dal prodotto del consumo totale di gas dei componenti della rete interessati e l’intensità carbonica del gas, mentre le emissioni legate all’uso dell’elettricità di rete sono date dal prodotto della quantità di elettricità presa dalla rete elettrica e l’intensità carbonica della rete elettrica a cui è connessa la rete energetica. L’intensità carbonica della rete elettrica di riferimento rappresenta la quantità di emissioni di CO₂ emesse per generare 1 kWh di elettricità, e dipende dal mix di risorse energetiche utilizzate per la generazione elettrica, che varia da paese in paese.

In Figura 9, è mostrato il *flow-chart* del modello di ottimizzazione. Integrando gli input necessari a tale modello, esso può fornire supporto decisionale agli operatori del sistema, grazie all’analisi delle possibili soluzioni di compromesso tra i due obiettivi (economico e ambientale) appartenenti al fronte di Pareto mostrato in Figura 10, ottenuto nel caso invernale in assenza del carico di raffrescamento. Ad ogni punto del fronte di Pareto, corrisponde una strategia operativa dei componenti della rete.

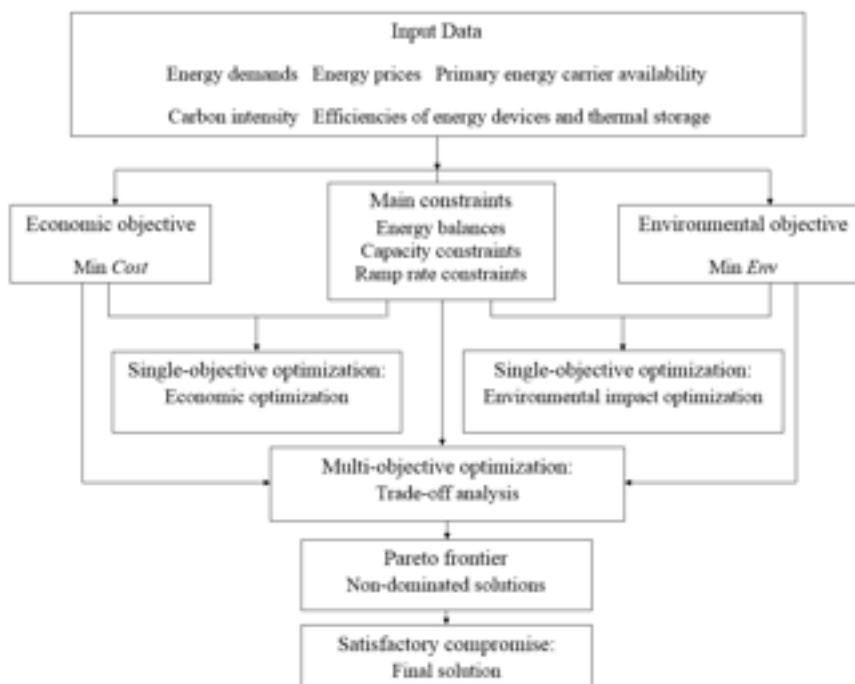


Figura 9. Flow-chart del modello di ottimizzazione per la ricerca delle strategie operazionali ottimizzate della rete energetica di riferimento [23].

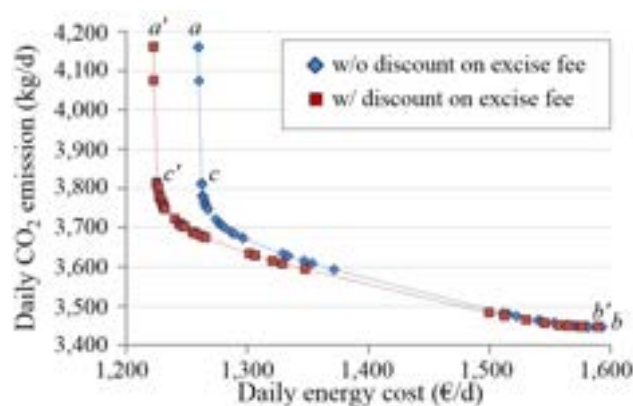


Figura 10. Fronte di Pareto ottenuto in [23].

In Figura 11 si riportano le strategie operative ottimizzate della rete energetica per i diversi punti appartenenti al fronte di Pareto (caso con sconto sull'accisa del gas). In questo modo, viene fornita la possibilità di scelta delle strategie operative ai diversi stakeholders, in base alle loro preferenze e/o priorità.

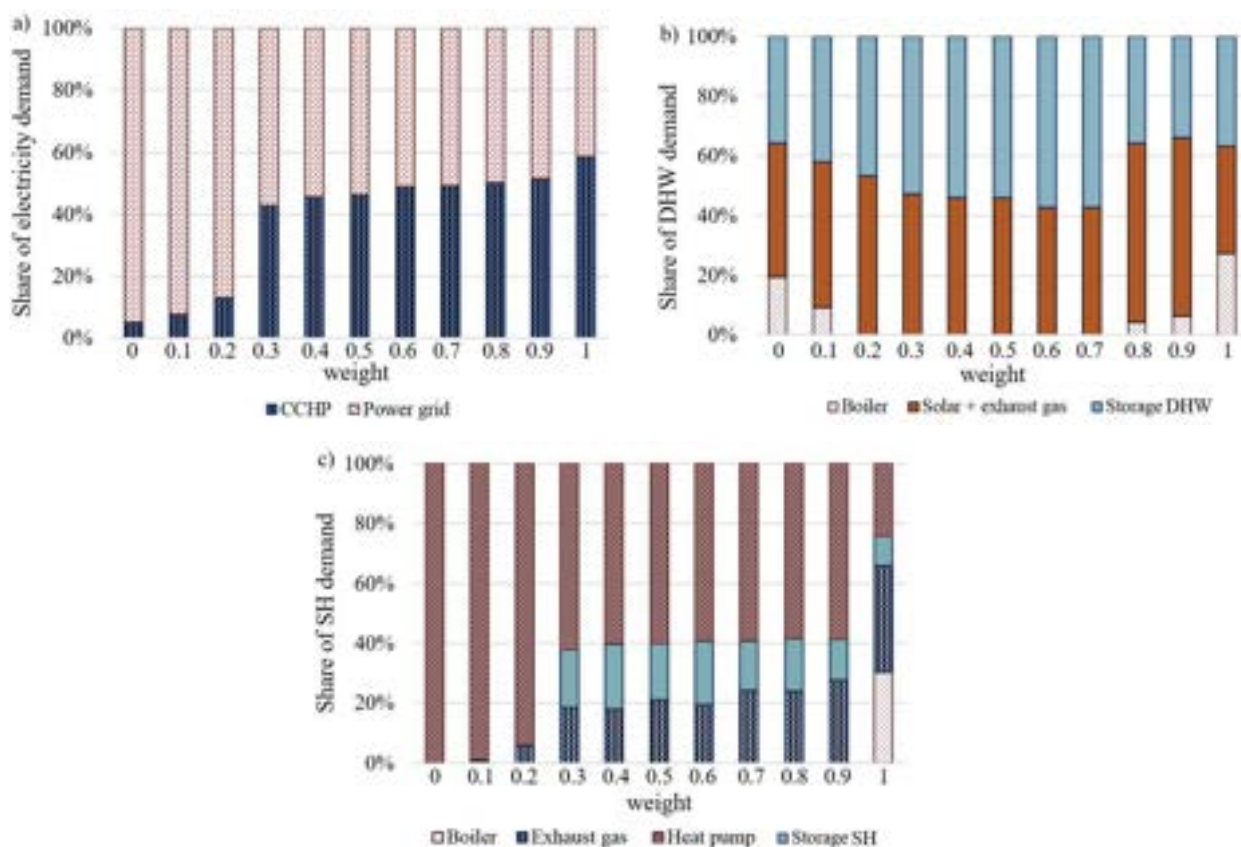


Figura 11. Strategie operative ottimizzate della rete per i punti del fronte di Pareto per il soddisfacimento di a) Carico elettrico; b) Carico di Acqua Calda Sanitaria; c) Carico di riscaldamento [23].

4.2 Problemi di ottimizzazione per la pianificazione di reti energetiche distribuite

Un problema di ottimizzazione formulato per la pianificazione di una rete energetica distribuita può essere formalmente espresso come [29]:

$$\min F_{obj}(y) = \min ([f_1(y), f_2(y), \dots, f_m(y)])$$

soggetto a:

$$y \in \Omega$$

$$G(y) = 0$$

$$H(y) \leq 0$$

dove f_i rappresenta la i -sima funzione obiettivo; m rappresenta il numero delle funzioni obiettivo; y è il vettore delle variabili decisionali (ad esempio taglie delle tecnologie o strategie operazionali delle tecnologie, etc.); Ω è il dominio delle variabili decisionali; $G(y)$ rappresentano i vincoli di uguaglianza (ad esempio bilanci energetici per soddisfare i carichi dell'utenza); $H(y)$ rappresentano i vincoli di disuguaglianza (ad esempio vincoli di capacità delle tecnologie o dei sistemi di accumulo).

Nel seguito sono descritte le caratteristiche principali dei problemi di ottimizzazione formulati per la pianificazione di una rete energetica distribuita, soffermandosi sul dilemma esistente tra modellazione esatta e ottimizzazione esatta, tipico in tale contesto.

4.2.1. Caratteristiche dei problemi di ottimizzazione e relativi metodi di soluzione

In generale, i problemi di ottimizzazione formulati per la pianificazione di una rete energetica distribuita sono del tipo "Mixed-Integer Programming", ovvero del tipo misto intero-continuo, che possono contenere variabili decisionali sia intere che continue. Quando le variabili intere sono limitate ai valori 0 e 1, allora esse sono indicate come variabili decisionali binarie, e possono ad esempio essere utilizzate per modellare decisioni del tipo on/off di una certa tecnologia all'interno della rete. Le variabili decisionali continue, invece, possono assumere qualsiasi valore tra un limite inferiore e superiore, e possono essere rappresentative, ad esempio, della potenza termica o elettrica fornita da una certa tecnologia in un certo istante di tempo.

Inoltre, queste tipologie di problemi di ottimizzazione possono essere lineari o non lineari. Un problema di programmazione lineare è caratterizzato da funzioni obiettivo che sono lineari nelle variabili decisionali, nonché da vincoli che sono uguaglianze o disuguaglianze, anch'essi lineari nelle variabili decisionali [30]. I problemi di ottimizzazione del tipo MILP ovvero "Mixed-Integer Linear Programming" sono solitamente difficili da risolvere, dato che una serie di variabili decisionali sono limitate a valori interi. L'algoritmo del Branch-and-cut è il metodo deterministico più comunemente utilizzato per risolvere tali tipologie di problemi, dato che esso risulta già essere implementato in diversi software di ottimizzazione commerciali. Tale tipo di metodo è un metodo di risoluzione esatta, cioè consente, almeno in linea teorica, di risolvere un problema di ottimizzazione combinatoria in modo esatto, trovando una soluzione ammissibile che corrisponda all'ottimo della funzione obiettivo tra tutte le soluzioni ammissibili.

Un problema di programmazione non lineare comprende almeno una funzione non lineare nelle variabili decisionali, che potrebbe essere una funzione obiettivo o alcuni o tutti i vincoli. I problemi del tipo MINLP ovvero "Mixed-Integer NonLinear Programming" combinano le difficoltà di risoluzione di un problema combinatorio, alla complessità del carattere non lineare (e spesso non convesso) di funzioni obiettivo e/o vincoli [31]. Solitamente, sono due gli approcci utilizzati per risolvere questa tipologia di problemi di programmazione. Il primo approccio consiste nell'applicare delle ipotesi semplificative durante la formulazione del problema stesso, come la linearizzazione della funzione obiettivo e/o dei vincoli. In questo modo, è possibile risolvere il problema di ottimizzazione, trasformandolo in un problema di

programmazione lineare, per cui sono disponibili efficienti metodi di soluzione esatti. L'applicazione di metodi esatti non è sempre possibile, essenzialmente per due motivi concomitanti, come la complessità intrinseca del problema e il tempo a disposizione per generare la soluzione. In generale, la rinuncia all'utilizzo di metodi esatti deve essere una scelta ponderata, basata non solo sulla complessità teorica del problema, ma anche sull'effettiva praticabilità di metodi esatti legata al tempo di elaborazione disponibile e alle dimensioni del problema da risolvere. Ad esempio, non si dovrebbe mai rinunciare al tentativo di formulare il problema con un modello di programmazione matematica (in particolare lineare intero misto), non solo come strumento di analisi del problema, ma anche come strumento operativo, visto che la crescente potenza dei solver potrebbe rendere praticabile la sua implementazione e la sua risoluzione in tempi accettabili. Tuttavia, la complessità del problema potrebbe rendere praticamente impossibile pervenire ad una formulazione sufficientemente accurata e maneggevole [32].

Quando il problema non rende possibile l'applicazione di tecniche di soluzione esatte, diventa necessario fornire delle "buone" soluzioni ammissibili in tempi "ragionevoli". Pertanto, il secondo approccio si basa sull'utilizzo di metodi euristici, come gli algoritmi genetici, e gli algoritmi evolutivi brevemente descritti nel seguito.

Gli algoritmi genetici ereditano e riadattano dalla biologia alcune terminologie che vengono qui preventivamente presentate per una successiva maggiore chiarezza espositiva:

- Cromosoma: una delle soluzioni di un problema considerato. Generalmente è codificata con un vettore di bit o di caratteri;
- Popolazione: insieme di soluzioni relative al problema considerato.
- Gene: parte di un cromosoma. Generalmente consiste in una o più parti del vettore di bit o caratteri che codificano il cromosoma.
- Fitness: grado di valutazione associato ad una soluzione. La valutazione avviene in base ad una funzione appositamente progettata detta funzione di fitness.
- Crossover: generazione di una nuova soluzione mescolando delle soluzioni esistenti.
- Mutazione: alterazione casuale di una soluzione.

Un tipico algoritmo genetico, nel corso della sua esecuzione, provvede a fare evolvere delle soluzioni secondo il seguente schema di base:

1. Generazione casuale della prima popolazione di soluzioni (cromosomi).
2. Applicazione della funzione di fitness alle soluzioni (cromosomi) appartenenti all'attuale popolazione.
3. Selezione delle soluzioni considerate migliori in base al risultato della funzione di fitness e della logica di selezione scelta.
4. Procedimento di crossover per generare delle soluzioni ibride a partire dalle soluzioni scelte al punto 3.
5. Creazione di una nuova popolazione a partire dalle soluzioni identificate al punto 4.
6. Riesecuzione della procedura a partire dal punto 2, utilizzando la nuova popolazione creata al punto 5.

L'iterazione dei passi presentati permette l'evoluzione verso una soluzione ottimizzata del problema considerato. Poiché questo algoritmo di base soffre del fatto che alcune soluzioni ottime potrebbero essere perse durante il corso dell'evoluzione, e del fatto che l'evoluzione potrebbe ricadere e stagnare in "ottimi locali", spesso viene integrato con la tecniche dell'elitarismo e con quella delle mutazioni casuali. La prima consiste in un ulteriore passo precedente al punto 3, che copia nelle nuove popolazioni anche gli individui migliori della popolazione precedente. La seconda, invece, successivamente al punto 4, introduce nelle soluzioni individuate delle occasionali mutazioni casuali in modo da permettere l'uscita da eventuali ricadute in ottimi locali.

Gli algoritmi evolutivi sono anch'essi degli algoritmi euristici, che si ispirano al principio di evoluzione degli esseri viventi. Un algoritmo evolutivo parte da una soluzione, e la fa evolvere con una serie di modifiche casuali fino a giungere ad una soluzione migliore. Concettualmente, un algoritmo evolutivo è molto simile ad un algoritmo genetico e si differenzia da quest'ultima categoria principalmente per l'assenza del meccanismo di crossover con cui più soluzioni appartenenti ad una popolazione in fase di evoluzione, vengono ricombinate.

4.2.2. Dilemma modellazione esatta/ottimizzazione esatta

Nell'ambito della pianificazione di reti energetiche distribuite, la scelta del metodo di soluzione rappresenta un vero e proprio dilemma tra modellazione esatta e ottimizzazione esatta [29]. Quando un problema di ottimizzazione reale è semplificato nella fase di modellazione, ovvero nella fase di formulazione del problema stesso, le soluzioni ottime trovate sono "soluzioni reali a un non-problema", così come sono state definite da Irving e Song in [33]. Ad esempio, un modello lineare semplificato dei componenti della rete, ottimizzato con un metodo di soluzione molto accurato, produrrà soluzioni che, anche se precise, non sono ottimali per il problema reale, data le ipotesi semplificative adottate.

Allo stesso modo, un modello realistico e complesso della rete, ottimizzato con un metodo di soluzione poco accurato, genera "non-soluzioni ad un problema reale" [29], ovvero soluzioni che sono non ottime, nonostante il modello realistico formulato.

Questi esempi illustrano il dilemma tra modellazione esatta e ottimizzazione esatta, rappresentato in Figura 12, affrontato nella risoluzione di problemi di ottimizzazione reali. La formulazione del problema di ottimizzazione dovrebbe essere il più vicino possibile all'angolo in alto a destra in figura. Ciò richiede un buon compromesso tra la precisione del metodo di ottimizzazione, e la complessità, con relativo livello di dettaglio, del modello della rete formulato.

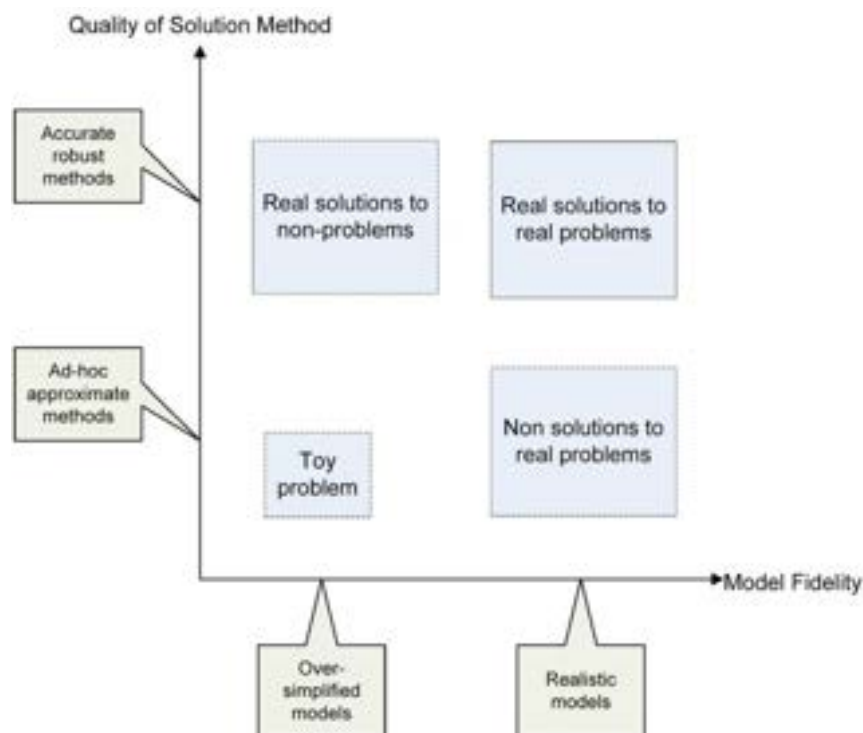


Figura 12. Rappresentazione del dilemma modellazione esatta/ottimizzazione esatta nella pianificazione di reti energetiche distribuite [29].

4.3 Ottimizzazione multi-obiettivo per la pianificazione di reti energetiche distribuite

4.3.1. Necessità di un approccio multi-obiettivo

Nell'ambito della pianificazione di una rete energetica distribuita, un approccio mono-obiettivo volto alla minimizzazione dei costi, è quello pratico per gli addetti alla realizzazione e/o gestione della rete, il cui maggiore interesse è legato al fattore economico. Mediante l'ottimizzazione economica della rete, questo stakeholder infatti può ottenere informazioni sia sulla configurazione della rete che consente di minimizzare i costi totali, sia sulle strategie operazionali dei componenti della rete che consentono di minimizzare i costi dei vettori energetici in input alla rete.

Tuttavia, in uno scenario realistico, la pianificazione di una rete energetica distribuita vede l'interesse di diversi stakeholders, con obiettivi formulati da differenti prospettive. Se da una parte ci sono gli addetti alla realizzazione e/o gestione della rete, il cui maggiore interesse è sicuramente rappresentato dal fattore economico, dall'altra ci sono le legislazioni energetiche, tra cui quelle europee, che sono invece particolarmente interessate a ridurre gli impatti ambientali legati all'approvvigionamento energetico. Tali tipologie di obiettivi sono di natura in conflitto, e di conseguenza non esiste una singola soluzione in grado di soddisfare tutte le parti interessate. Da qui nasce l'esigenza di passare ad un approccio multi-obiettivo che consenta di trovare delle soluzioni di compromesso a beneficio dei diversi stakeholders. Assegnando un ruolo esplicito di funzioni obiettivo agli obiettivi contrastanti, come possono essere quelli economico/ambientale, si migliora la qualità del processo decisionale, rendendolo razionale, e pertanto efficiente. Inoltre l'utilizzo di approcci multi-obiettivo nella pianificazione delle reti energetiche può incoraggiare l'uso di strumenti politici volti a favorire l'integrazione di questi sistemi, mostrando i loro benefici sia di carattere economico che ambientale.

Si riporta di seguito un esempio illustrativo del conflitto economico/ambientale molto comune nell'ambito della pianificazione energetica, così come riportato in Figura 13 [31]. Un pianificatore vuole identificare la migliore fonte energetica che gli consenta di minimizzare i costi e, contemporaneamente, massimizzare le prestazioni in termini di riduzione di emissioni di CO₂. I due obiettivi sono in contrasto tra loro, dato che soluzioni ad elevate prestazioni risultano essere costose, e al contrario, soluzioni di basso costo sono caratterizzate da prestazioni scarse. Le diverse soluzioni costo/prestazioni messe a disposizione del pianificatore appartengono al fronte di Pareto. Poiché le prestazioni aumentano a scapito dei costi da sostenere, il problema di pianificazione energetica è di natura multi-obiettivo, ed è necessario individuare un compromesso tra i due obiettivi economico/ambientale. Il pianificatore, pertanto, si orienterà verso la soluzione più economica, che gli fornisce il livello desiderato di prestazioni, o in alternativa, il suo budget limiterà le prestazioni che può ottenere. Quest'esempio può facilmente essere esteso ai problemi ben più complessi di pianificazione energetica di reti energetiche distribuite a servizio di distretti.

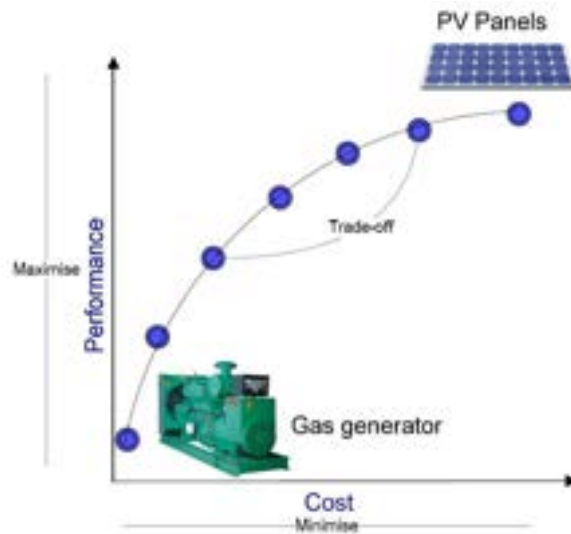


Figura 13. Esempio di problema di ottimizzazione multi-obiettivo per la pianificazione energetica [31].

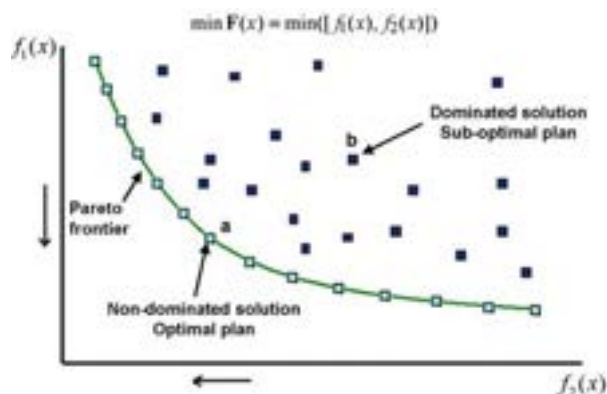
Di seguito, sono discusse in dettaglio le caratteristiche dei problemi di ottimizzazione multi-obiettivo con relativi metodi di soluzione.

4.3.2. Caratteristiche dei problemi di ottimizzazione multi-obiettivo

Quando un problema di ottimizzazione include un'unica funzione obiettivo, esiste un'unica "migliore soluzione". Al contrario, un problema multi-obiettivo con obiettivi conflittuali, non ha un'unica migliore soluzione, bensì un set di soluzioni ottime. In tal caso, il concetto multidimensionale di "dominanza" è utilizzato per valutare se una soluzione è migliore rispetto alle altre. Una soluzione a è dominante su b se le due condizioni di seguito sono vere [34]:

- a non è peggiore di b in tutti gli obiettivi:
- a è migliore di b in almeno un obiettivo.

In tal caso, si dice che b è "dominato" da a , o che a è "non-dominato" da b . Una soluzione dominata è anche detta "sub-ottimo". Pertanto, la soluzione di un problema multi-obiettivo è il set di soluzioni non-dominate, noto come set di Pareto. Con riferimento alle sue funzioni obiettivo, esso diventa fronte di Pareto, la cui rappresentazione grafica è generalmente una superficie, ma nel caso in cui siano presenti solo due funzioni obiettivo, esso degenera in una curva di trade-off. Una soluzione appartiene al fronte di Pareto, se non è possibile migliorare un obiettivo senza avere peggioramenti in tutti gli altri obiettivi. Il fronte di Pareto sotto forma di superficie e curva di trade-off è rappresentato in Figura 14.



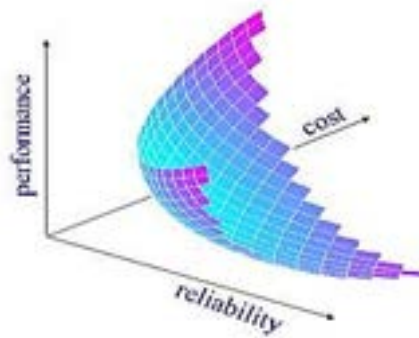


Figura 14. Rappresentazione grafica del fronte di Pareto sotto forma di superficie e curva di trade-off [29, 35].

La ricerca di una singola soluzione di un problema di ottimizzazione multi-obiettivo include due step: ottimizzazione e processo decisionale. A seconda dell'ordine in cui vengono eseguite queste due operazioni, esistono due diversi approcci per ottenere una soluzione unica da un problema di ottimizzazione multi-obiettivo, così come schematizzato in Figura 15 [29]. Il primo approccio utilizza le informazioni di preferenza note a priori e tecniche di ottimizzazione mono-obiettivo. Tutti gli obiettivi sono aggregati in un'unica funzione obiettivo che è ottimizzata ad esempio mediante il metodo della somma pesata o, in alternativa, mediante la determinazione di un obiettivo "master" che è ottimizzato, integrando il resto degli obiettivi come vincoli. In entrambi i casi, il processo decisionale precede il processo di ottimizzazione. Tale procedura è molto utile, quando si hanno precise informazioni sulla preferenza degli stakeholders [34]. È pertanto necessaria una profonda conoscenza del problema per poter definire un metodo di aggregazione adeguato e i pesi da assegnare agli obiettivi, o per decidere quali sono gli obiettivi "master".

Quando tale conoscenza non è adeguata, ad esempio a causa della mancata disponibilità di informazioni legate agli interessi degli stakeholder, il processo di ottimizzazione multi-obiettivo diventa cruciale, e si basa sull'analisi del fronte di Pareto. Quest'ultimo, infatti, rende visibili soluzioni di compromesso tra i diversi stakeholder o tra obiettivi incommensurabili. L'analisi del fronte di Pareto facilita il processo decisionale e consente di comprendere le caratteristiche intrinseche del problema. Pertanto, una volta ottenuto il fronte di Pareto, la preferenza è espressa a posteriori. In letteratura, molti autori credono che questo secondo approccio sia quello più rappresentativo della realtà per le seguenti motivazioni:

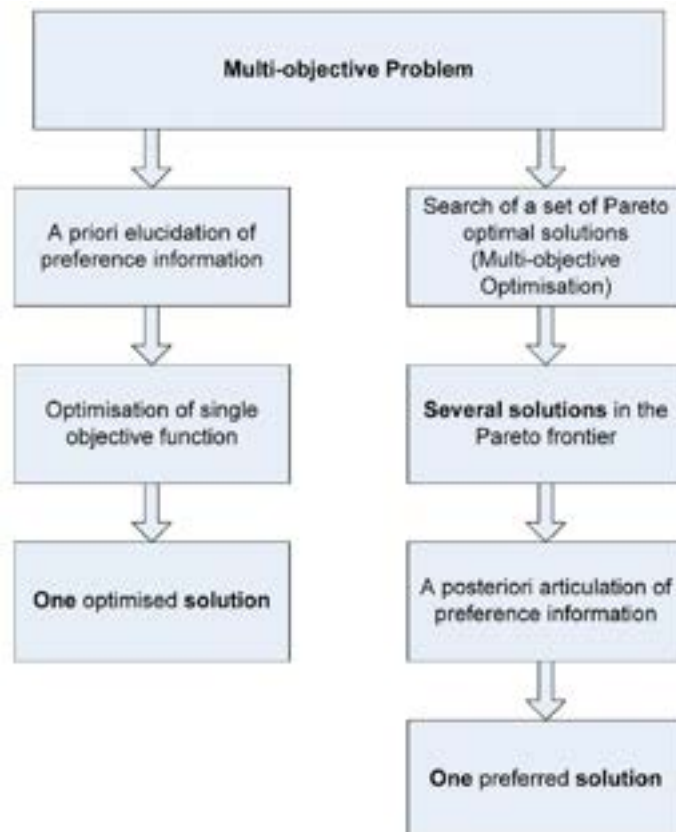


Figura 15. Flow-chart della ricerca di una singola soluzione di un problema di ottimizzazione multi-obiettivo [29].

- Più metodico, più pratico e meno soggettivo rispetto al metodo a priori **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**
- Fornisce un ampio range di possibili alternative ai decisori, consentendo a questi ultimi una scelta più consapevole **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**
- Dato che i problemi reali relativi alla pianificazione delle strategie operazioni di una rete energetica distribuita sono spesso multi-obiettivo, tale approccio consente di ottenere una rappresentazione più realistica del problema **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**
- Attraverso una maggiore trasparenza, tale approccio consente di generare delle informazioni relative alle correlazioni tra i diversi obiettivi **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**

4.3.3. Metodi di ottimizzazione multi-obiettivo

Generalmente, i problemi di ottimizzazione multi-obiettivo hanno un elevato numero di soluzioni appartenenti al fronte di Pareto. Dato che trovare tutte le soluzioni appartenenti al fronte è praticamente impossibile, solitamente si è soliti cercare un sottoinsieme di tali soluzioni. Pertanto, l'ottimizzazione multi-obiettivo è il processo volto alla ricerca di quante più soluzioni possibili appartenenti al fronte di Pareto. La risoluzione di un problema multi-obiettivo include tre requisiti specifici [34, 36 - 38]:

- Accuratezza: il set di soluzioni trovato deve essere il più vicino possibili al fronte di Pareto reale.
- Diversità: il set trovato deve essere caratterizzato da soluzioni più diverse possibili.
- Distribuzione: il set di soluzioni trovato deve catturare l'intero spettro del fronte di Pareto reale.

Tali requisiti sono esemplificati in Figura 16. Nel primo caso, risolvendo il problema, sono ottenute soluzioni accurate. Ciò nonostante le soluzioni sono poche e coincidono negli stessi punti. Nel secondo caso, il fronte di Pareto è ben distribuito, le soluzioni sono diverse, ma non sono accurate. Nel terzo caso, le soluzioni sono sia accurate che diverse, ma gli estremi del fronte non sono analizzati. Infine, il quarto caso rappresenta la soluzione di un algoritmo ideale.

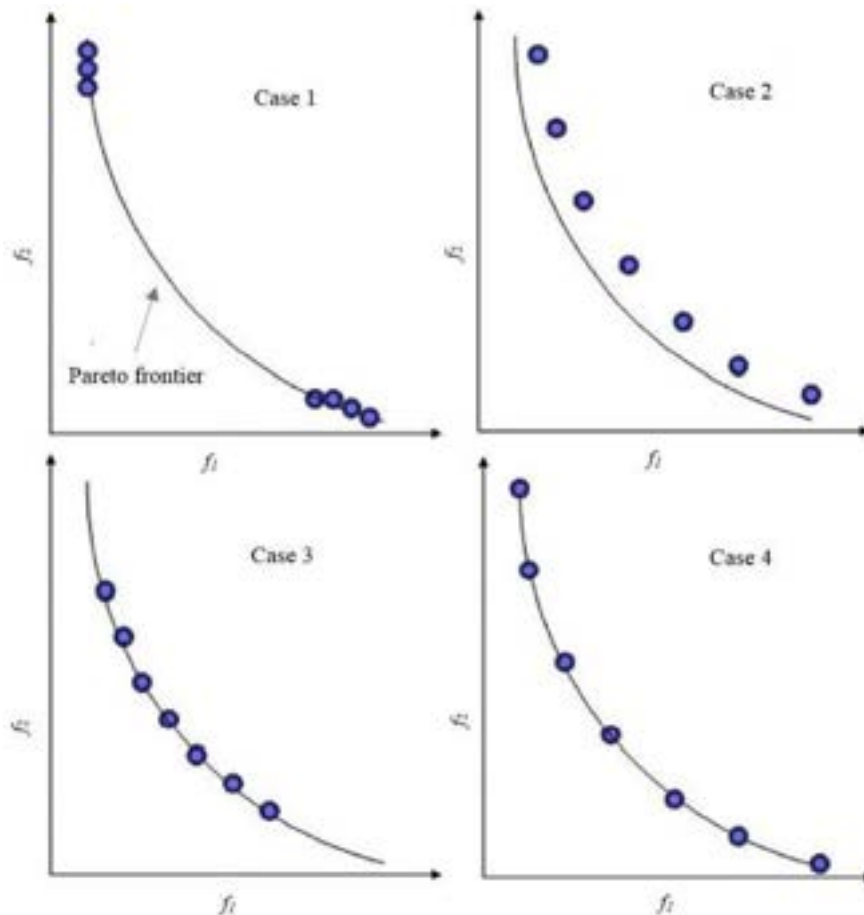


Figura 16. Requisiti nella risoluzione di un problema di ottimizzazione multi-obiettivo [29].

I metodi di risoluzione dei problemi di ottimizzazione multi-obiettivo si dividono in due grandi categorie. Il primo gruppo trasforma il problema multi-obiettivo in un problema mono-obiettivo, facendo uso di informazioni a priori, come già discusso in precedenza. Le diverse soluzioni del fronte di Pareto sono identificate cambiando la funzione di aggregazione o l'obiettivo "master" in maniera iterativa. Tale tipo di approccio è quello classico più usato. I due metodi più comuni sono quello della somma pesata e quello ϵ -vincolato [34].

Il metodo della somma pesata converte le diverse funzioni obiettivo in un'unica funzione obiettivo:

$$\min F_{ob_j}(y) = \sum_{i=1}^m \omega_i f_i(y)$$

dove i pesi ω_i indicano la relativa importanza di ciascuna delle funzioni obiettivo f_i rispetto alle altre. I valori dei pesi vengono assegnati, in modo tale che la loro somma sia uguale a 1:

$$\sum_{i=1}^m \omega_i = 1$$

Pertanto, il fronte di Pareto può essere trovato facendo variare il peso nell'intervallo 0 – 1. Generalmente, le funzioni obiettivo non sono dello stesso ordine di grandezza, e nell'ipotesi in cui il problema di ottimizzazione multi-obiettivo coinvolga due funzioni obiettivo, l'ottimizzazione sarebbe guidata dalla funzione obiettivo con l'ordine di grandezza maggiore, mentre la funzione obiettivo con ordine di grandezza inferiore influirebbe poco sul valore della funzione obiettivo $F_{obj}(y)$. Per evitare quest'effetto, viene effettuata la normalizzazione delle funzioni obiettivo, introducendo un fattore di scala per rendere le funzioni obiettivo dello stesso ordine di grandezza [22, 23, 39]. Tale metodo risulta essere di facile implementazione, ed è stato dimostrato che consente di trovare tutte le soluzioni appartenenti al fronte di Pareto nel caso di problemi convessi [34]. Tuttavia, esso risulta inappropriato quando il numero delle funzioni obiettivo da aggregare è notevole [40].

Il metodo ε -vincolato mantiene un'unica funzione obiettivo (da minimizzare o massimizzare), che rappresenta la funzione "master", tra le diverse incluse nel problema e esprime le altre funzioni obiettivo come vincoli di disuguaglianza. Il vettore dei vincoli ε definisce i limiti superiori per queste funzioni obiettivo:

$$\begin{aligned} & \min f_{\mu}(y) \\ & \text{soggetto a:} \\ & f_j(y) \leq \varepsilon \quad \text{con } j=1,2,\dots,m \text{ e } j \neq \mu \end{aligned}$$

Il valore assunto dal vettore vincolato rappresenta il trade-off tra le funzioni obiettivo. Per ottenere una buona soluzione per $f_{\mu}(y)$ è necessario rilassare i vincoli per la restante parte delle funzioni obiettivo. Il fronte di Pareto può essere trovato variando il vettore dei vincoli ε . Anche in tal caso, questo metodo risulta inappropriato quando il numero di funzioni obiettivo del problema di ottimizzazione è notevole [36].

Il secondo gruppo di metodi di ottimizzazione multi-obiettivo si basa sugli algoritmi evolutivi [34]. Tali algoritmi consentono di gestire insieme di possibili soluzioni simultaneamente, e come risultato, consentono di identificare le diverse soluzioni del fronte di Pareto contemporaneamente. Gli algoritmi evolutivi sono tra i principali metodi per l'esplorazione del fronte di Pareto nei problemi di ottimizzazione multi-obiettivo che risultano essere troppo complessi per essere risolti mediante metodi esatti, come quelli tipici per la programmazione lineare [34, 41, 42]. Grazie al parallelismo e alla loro capacità di esplorare le similarità delle soluzioni con l'operazione della ricombinazione, tali algoritmi riescono ad approssimare il fronte di Pareto in un singolo run di esecuzione. Poiché però gli algoritmi evolutivi non sono esatti, diverse esecuzioni possono produrre soluzioni diverse, quindi è necessario effettuare diverse esecuzioni dello stesso algoritmo su un dato problema per descrivere la performance dell'algoritmo su quel problema.

Uno degli algoritmi evolutivi più comuni è l'algoritmo NSGA-II. Si tratta di un algoritmo genetico multi-obiettivo [43]. La sigla NSGA-II vuol dire *non-dominated sorting genetic algorithm II*, per sottolineare il fatto che in esso le soluzioni del problema di ottimizzazione in questione vengono ordinate in accordo al concetto di non-dominanza. Nell'NSGA-II la popolazione ha bisogno di essere ordinata in un ordine ascendente di non-dominanza. Il principio su cui si basa è quello di assegnare un livello o un fronte di dominanza a tutte le soluzioni di una popolazione. Le migliori soluzioni non dominate sono chiamate soluzioni non-dominate di rank 1, ovvero, una volta trovati tutti gli elementi non dominati di una popolazione ad una determinata generazione, ad essi viene assegnata un rank pari ad 1. Tali elementi vengono poi momentaneamente trascurati per fare in modo che lo stesso procedimento venga applicato agli individui rimanenti, così da determinare il secondo rank, il terzo, e così via. Alla fine del processo ogni individuo apparterrà ad un rank specifico. La Figura 17 mostra un esempio di ordinamento per livelli di una

popolazione di 10 individui in un problema di ottimizzazione multi-obiettivo volto a minimizzare due funzioni obiettivo [44].

La complessità di questa procedura è legata alle complessità richieste nell'identificazione di ogni insieme non dominato. Una volta però identificato il primo insieme non-dominato, il numero di soluzioni rimanenti è minore del numero originale di individui della popolazione, quindi le classificazioni successive alla prima richiederanno una complessità computazionale minore.

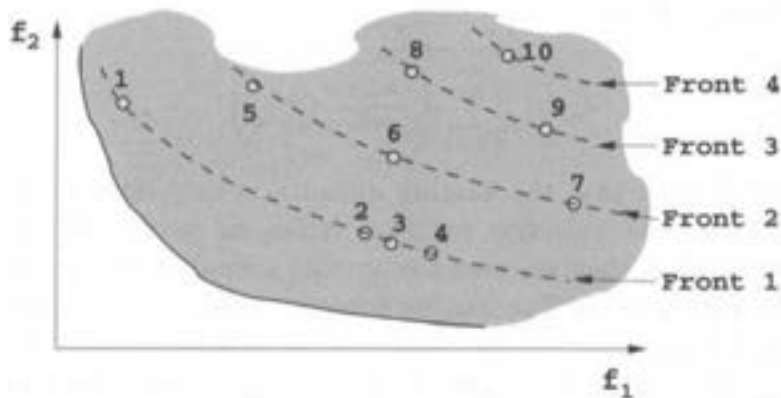


Figura 17. Esempio di ordinamento per livelli nell'NGSA II [44].

Una volta assegnato un rank a tutte le soluzioni, viene assegnata la *crowding distance*, che indica quanto una soluzione è isolata. La *crowding distance* viene assegnata in maniera indipendente ad ogni insieme di soluzioni aventi lo stesso rank. Le soluzioni vengono ordinate iterativamente in ordine peggiorativo rispetto ad ogni funzione obiettivo. Alle soluzioni estreme del fronte di Pareto, aventi la migliore e la peggior fitness in un determinato obiettivo, viene assegnata un valore di *crowding distance* pari a infinito, mentre per le altre viene assegnato un valore proporzionale alla distanza tra la *i*-esima soluzione e le soluzioni precedente e successiva, come mostrato in Figura 18 [44]. Quindi, più alto risulta essere il valore di *crowding distance*, più è isolata la soluzione. Nel confrontare due soluzioni viene comparato prima il rank tra le due soluzioni, e nell'ipotesi in cui il rank è lo stesso, viene comparata la *crowding distance*.

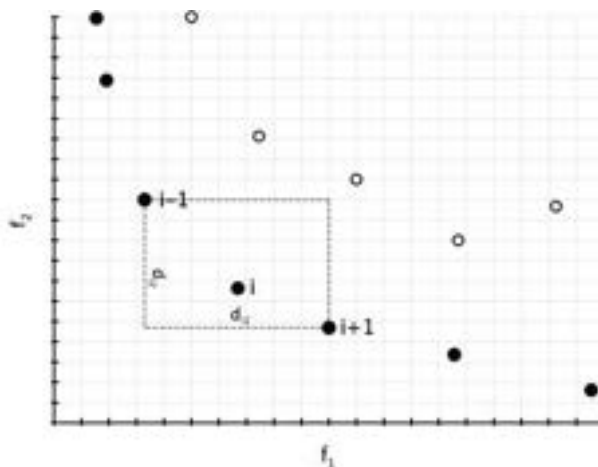


Figura 18. Esempio di assegnazione della *crowding distance* nell'NGSA II [44].

5 Stato dell'arte sulla pianificazione di reti energetiche distribuite a servizio di distretti

5.1 Ottimizzazione operativa e di design

Le caratteristiche principali dei lavori più significativi analizzati in letteratura sulla pianificazione di reti energetiche distribuite a servizio di distretti sono sintetizzate in Tabella 6. Essi si focalizzano sia su singole tecnologie poligenerative, quali cogenerazione [45 - 52] e trigenerazione [53 - 58], sia su reti energetiche distribuite con molteplici tecnologie [22, 23, 39, 60 - 75].

Tabella 6. Caratteristiche delle principali pubblicazioni sull'ottimizzazione di reti energetiche distribuite

Riferimento	Sistema energetico	Obiettivi	Metodo di soluzione
[45, 46]	Cogenerazione	Min {Costi dei vettori energetici}	Programmazione lineare
[47 - 50]	Cogenerazione	Min {Costi totali annuali}	Programmazione lineare
[51, 52]	Cogenerazione	Min {Costi totali annuali}	Programmazione non lineare
[53, 54]	Trigenerazione	Min {Costi dei vettori energetici}	Programmazione lineare
[55]	Trigenerazione	Min {Costi dei vettori energetici}	Algoritmo genetico
[56]	Trigenerazione	Max {Valore Attuale Netto}	Programmazione lineare
[57]	Trigenerazione	Multi-obiettivo: Min {Costi totali annuali, emissioni di CO ₂ }	Programmazione lineare
[58]	Trigenerazione	Multi-obiettivo: Min {Costi totali annuali, emissioni di CO ₂ }	Algoritmo evolutivo
[59]	Trigenerazione	Multi-obiettivo: Max {Risparmio energetico, risparmio economico}	Programmazione non lineare
[60, 61]	Rete energetica distribuita	Min {Costi dei vettori energetici}	Programmazione lineare
[62 - 69]	Rete energetica distribuita	Min {Costi totali annuali}	Programmazione lineare
[70]	Rete energetica distribuita	Max {Valore Attuale Netto}	Algoritmo genetico
[23, 71]	Rete energetica distribuita	Multi-obiettivo: Min {Costi dei vettori energetici, emissioni di CO ₂ }	Programmazione lineare
[72]	Rete energetica distribuita	Multi-obiettivo: Min {Costi dei vettori energetici, emissioni di CO ₂ }	Programmazione non lineare
[22, 73]	Rete energetica distribuita	Multi-obiettivo: Min/Max {Costi dei vettori energetici, efficienza exergetica}	Programmazione lineare
[74]	Rete energetica distribuita	Multi-obiettivo: Min {Costi dei vettori energetici, perdite exergetiche}	Programmazione non lineare
[75]	Rete energetica distribuita	Multi-obiettivo: Min {Costi totali annuali, emissioni di CO ₂ }	Algoritmo evolutivo/Programmazione lineare
[39]	Rete energetica distribuita	Multi-obiettivo: Min {Costi totali annuali, emissioni di CO ₂ }	Programmazione lineare

Una prima classificazione dei lavori analizzati può essere innanzitutto fatta in base allo scopo del problema di ottimizzazione formulato, ovvero:

- Determinazione delle strategie operazionali ottimali della rete [22, 23, 45, 46, 53 – 55, 59 – 61, 71 – 74]
- Determinazione della configurazione ottimale della rete [39, 47 – 52, 56 - 58, 62 – 70, 75].

Nella prima categoria di problemi, le strategie operazionali della rete sono variabili decisionali del problema di ottimizzazione, mentre tipologie, numero e taglie delle tecnologie sono input del problema di ottimizzazione, e ne rappresentano parte dei vincoli, come ad esempio i vincoli di capacità. In questa

categoria di problemi, alcuni sono mono-obiettivo, volti alla minimizzazione dei costi dei vettori energetici in input al sistema [45, 46, 53 – 55, 60, 61], altri sono multi-obiettivo con criteri economico/ambientali [23, 59, 71, 72] e criteri economico/exergetici [22, 73, 74]. Le metodologie di soluzione più utilizzate sono quelle tipiche per i problemi di programmazione lineare.

Nella seconda tipologia di problemi, il mix di tecnologie, il loro numero con le relative taglie e le relative strategie operazionali, sono variabili decisionali del problema di ottimizzazione, e rappresentano pertanto l'output del problema. Tra questi problemi, quelli mono-obiettivo [47 – 52, 62 – 70] hanno come funzione obiettivo la minimizzazione dei costi totali o la massimizzazione del VAN. I problemi di ottimizzazione multi-obiettivo invece utilizzano criteri economico/ambientali intesi come minimizzazione dei costi totali annuali ed emissioni di CO₂ [39, 57, 75]. Anche in tal caso, le metodologie di soluzione più utilizzate sono quelle tipiche per i problemi di programmazione lineare.

5.2 Criteri di ottimizzazione

I criteri di ottimizzazione utilizzati nei lavori analizzati in letteratura e riportati in Tabella 6 sono di carattere economico, ambientale ed exergetico.

Nei problemi di ottimizzazione operativa, siano essi mono-obiettivo o multi-obiettivo, l'obiettivo economico è, nella maggior parte dei casi, formulato come il costo totale dei vettori energetici da minimizzare. Il costo dei vettori energetici dipende dal consumo di combustibile delle tecnologie interessate, e pertanto dipende dalle strategie operazionali della rete, che sono variabili decisionali del problema di ottimizzazione.

L'obiettivo ambientale, sia nei problemi di ottimizzazione operativa, che in quelli di design, è formulato come l'impatto ambientale, in termini di emissioni totali di CO₂, da minimizzare. Le emissioni, come nel caso dei costi dei vettori energetici, dipendono dalle strategie operazionali della rete energetica, che sono variabili decisionali del problema di ottimizzazione.

L'analisi exergetica è stata analizzata nell'ambito dei problemi di ottimizzazione operativa di reti energetiche distribuite mediante approccio multi-obiettivo in [22, 73, 74], per ridurre lo spreco delle risorse energetiche caratterizzate da un elevato livello della qualità dell'energia, quali combustibili fossili ed elettricità, e il relativo impatto ambientale. L'obiettivo exergetico è stato formulato come l'exergia primaria in input alla rete energetica da minimizzare [22, 73], o come la distruzione di exergia, che avviene nei sistemi di conversione primaria, da minimizzare [74]. Come nel caso del costo dei vettori energetici, e delle emissioni di CO₂, sia l'exergia primaria in input che la distruzione di exergia che avviene nei sistemi di conversione primaria, dipendendo dal consumo di fonti primarie, dipendono dalle strategie operazionali della rete che sono variabili decisionali del problema di ottimizzazione.

Nei problemi di ottimizzazione di design, siano essi mono-obiettivo o multi-obiettivo, l'obiettivo economico è nella maggior parte dei casi, formulato come il costo totale del sistema da minimizzare. Tale costo è dato dalla somma di diverse funzioni di costo, quali costo di investimento delle tecnologie da integrare, costo dei vettori energetici, costo di manutenzione delle tecnologie, e costi legati all'eventuale carbon tax, ove presente.

5.3 Ottimizzazione multi-obiettivo per ridurre il costo dei vettori energetici e l'impatto ambientale

In questo paragrafo, sono analizzati in dettaglio i problemi di ottimizzazione multi-obiettivo in Tabella 6, che consentono di ridurre il costo dei vettori energetici e l'impatto ambientale nell'ambito di reti energetiche distribuite caratterizzate dalla presenza di molteplici tecnologie per il soddisfacimento dei carichi di un'utenza.

In [23, 71] sono stati formulati problemi di ottimizzazione lineari multi-obiettivo con lo scopo di identificare le strategie operazionali ottimali di reti energetiche distribuite a servizio di distretti per ridurre sia il costo totale dei vettori energetici, che le emissioni di CO₂. Le reti energetiche di riferimento comprendono diversi sistemi di conversione primaria e secondaria, nonché sistemi di accumulo termico per soddisfare i carichi dell'utenza in regime dinamico.

In [23] il fronte di Pareto, che comprende le soluzioni di compromesso tra obiettivo economico e ambientale, è stato ottenuto mediante il metodo della somma pesata, minimizzando cioè la somma pesata del costo totale dei vettori energetici e delle emissioni totali di CO₂. Il metodo è stato risolto mediante l'algoritmo del branch-and-cut implementato nel software IBM ILOG CPLEX Optimization Studio. I risultati del caso numerico, ottenuti considerando come utente un albergo italiano, mostrano che ottimizzando le strategie operazionali della rete, sia il costo dei vettori energetici che le emissioni di CO₂ si riducono in maniera significativa rispetto ad sistema di approvvigionamento convenzionale, in cui l'elettricità di rete è utilizzata per soddisfare il carico elettrico e caldaie tradizionali sono usate per soddisfare il carico termico.

In [71] il fronte di Pareto è stato ottenuto mediante il metodo della programmazione di compromesso (compromise programming). I risultati del caso numerico, ottenuti considerando la rete energetica di riferimento a servizio di un eco-campus in Giappone, mostrano che l'aumento del grado di soddisfazione dell'obiettivo economico comporta un incremento delle emissioni di CO₂.

In [72] è stato formulato un problema di ottimizzazione multi-obiettivo per una rete energetica a servizio di un cluster di edifici, con lo scopo di identificare le strategie operazionali dei componenti della rete per ridurre sia il costo dei vettori energetici che le emissioni totali di CO₂. Il problema di ottimizzazione formulato, del tipo non lineare, è stato risolto mediante il metodo del rilassamento Lagrangiano surrogato. I risultati del caso numerico mostrano che il costo totale dei vettori energetici e le emissioni di CO₂ sono ridotte mediante l'ottimizzazione delle strategie operazionali dei componenti della rete.

In [22] è stato formulato un problema di ottimizzazione lineare multi-obiettivo con lo scopo di determinare le strategie operazionali di una rete energetica distribuita a servizio di un distretto, che consentono sia di ridurre il costo dei vettori energetici, sia di aumentare l'efficienza exergetica totale del distretto. L'incremento dell'efficienza exergetica del distretto consente di ridurre l'exergia primaria in input al sistema e il conseguente spreco di fonti fossili, andando ad utilizzare fonti energetiche a bassa temperatura, quali solare termico o calore recuperato da sistemi di co/trigenerazione per usi termici dell'utenza. Il fronte di Pareto, che comprende le soluzioni di compromesso tra obiettivo economico ed exergetico, è stato ottenuto mediante il metodo della somma pesata, minimizzando cioè la somma pesata del costo totale dei vettori energetici e dell'exergia primaria in input al sistema energetico. Il metodo è stato risolto mediante l'algoritmo del branch-and-cut implementato nel software IBM ILOG CPLEX Optimization Studio. Dai risultati del caso numerico, ottenuti considerando come utente un albergo cinese, è emerso che le strategie operazionali della rete sono molto sensibili al peso assegnato ai due obiettivi. Inoltre, i risultati mostrano anche che l'ottimizzazione operativa della rete consente di combinare in maniera strategica il funzionamento delle tecnologie alimentate da fonti rinnovabili e non. Ciò consente di ridurre in maniera significativa sia il costo dei vettori energetici che l'exergia primaria in input alla rete rispetto ad un sistema di approvvigionamento convenzionale, in cui l'elettricità di rete è utilizzata per il soddisfacimento di tutte le tipologie di carico dell'utenza.

In [73] è stato esaminato l'effetto dell'ottimizzazione operativa economico/exergetica della rete energetica analizzata in [22] sull'impatto ambientale. Sono state calcolate le emissioni totali di CO₂ per le strategie operazionali della rete ottimizzate secondo l'approccio multi-obiettivo. I risultati, ottenuti considerando come utente l'albergo cinese come in [22], dimostrano che le strategie operazionali della rete ottenute ottimizzando la funzione obiettivo exergetica, consentono di ridurre non solo lo spreco di fonti energetiche caratterizzate da un elevato livello della qualità dell'energia, ma anche l'impatto ambientale.

In [74] è stato formulato un problema di ottimizzazione multi-obiettivo per una rete energetica distribuita, considerando l'intera catena di approvvigionamento energetico dalle fonti di energia primaria alla domanda dell'utenza, con lo scopo di ottenere le strategie operazionali dei componenti della rete che consentono di

ridurre i costi dei vettori energetici e la distruzione dell'exergia che avviene nei sistemi di conversione primaria. Il problema, del tipo non lineare, è stato risolto mediante l'integrazione del metodo del rilassamento Lagrangiano Surrogato e l'algoritmo del branch-and-cut [76 - 78]. Il fronte di Pareto, che comprende le soluzioni di compromesso tra obiettivo economico ed exergetico, è stato ottenuto mediante il metodo della somma pesata, minimizzando cioè la somma pesata del costo totale dei vettori energetici e della distruzione totale di exergia che avviene nei sistemi di conversione primaria. I risultati del caso numerico, ottenuti considerando come utente un albergo cinese, dimostrano che mediante l'ottimizzazione operativa della rete energetica, sia i costi dei vettori energetici, che la distruzione di exergia nell'intera catena di approvvigionamento energetico, si riducono rispetto ad un sistema di approvvigionamento convenzionale, in cui l'elettricità di rete è utilizzata per il soddisfacimento di tutte le tipologie di carico dell'utenza.

In [75] è stato formulato un problema di ottimizzazione multi-obiettivo di design per una rete energetica distribuita caratterizzata da una cella a combustibile SOFC, due assorbitori e uno scambiatore a recupero, per soddisfare i carichi elettrici e termici di un'utenza, con lo scopo di ridurre le emissioni di CO₂ e i costi totali del sistema energetico. Il problema di ottimizzazione è stato formulato su due livelli. Nel primo livello, i parametri di design dei componenti della rete sono stati ottimizzati mediante l'utilizzo di un algoritmo evolutivo, mentre nel secondo livello, le strategie operative giornaliere ottimali sono state identificate mediante un algoritmo tipico per la programmazione lineare. I risultati del caso numerico dimostrano che, mediante il modello di ottimizzazione realizzato, il sistema in esame consentirebbe di ridurre le emissioni di CO₂ del 45% a scapito di un incremento dei costi totali annuali stimato del 290%, rispetto ad un sistema di approvvigionamento convenzionale, in cui l'elettricità di rete è utilizzata per il soddisfacimento di tutte le tipologie di carico dell'utenza.

In [39] è stato formulato un problema di ottimizzazione lineare multi-obiettivo di design per una rete energetica distribuita con lo scopo di ridurre i costi totali del sistema energetico e le emissioni di CO₂. Il problema di design consiste nel determinare la configurazione ottimale della rete energetica, identificando il mix di tecnologie tra quelle prescelte, le relative taglie e strategie operative, a servizio della specifica utenza. Il modello formulato consente di ottenere diverse soluzioni di compromesso tra l'obiettivo economico e ambientale mediante l'identificazione del fronte di Pareto, ottenuto utilizzando il metodo della somma pesata. I risultati del caso numerico, ottenuti considerando come utente un'area industriale italiana, mostrano che l'accoppiamento tra l'impianto solare termico e i sistemi di accumulo termico, con le relative taglie ottimizzate, consente di ottenere sia l'obiettivo economico che quello ambientale.

6 Conclusioni

Il presente studio nasce dall'esigenza di analizzare metodologie e strategie multi-obiettivo adottabili per la riduzione dei costi dei vettori energetici e dell'impatto ambientale nell'ambito di reti energetiche distribuite a servizio di distretti, al fine di individuare delle soluzioni di compromesso tra i diversi stakeholder interessati alla loro pianificazione. Nel caso in esame, la pianificazione viene intesa come quel processo decisionale alla base della scelta della sua configurazione ottimale o delle sue strategie di funzionamento ottimali, allo scopo di conseguire l'obiettivo economico, volto alla riduzione dei costi dei vettori energetici, e quello ambientale, indirizzato alla riduzione dell'impatto ambientale, in termini di emissioni di CO₂.

La finalità generale dell'attività svolta è stata declinata in alcune linee operative i cui obiettivi sono di seguito riportati:

- Descrizione delle caratteristiche principali delle reti energetiche distribuite, con particolare attenzione ai vantaggi conseguibili rispetto ai sistemi di approvvigionamento convenzionali, alle tecnologie, alimentate da fonti rinnovabili e non, maggiormente utilizzate nel contesto di riferimento.
- Descrizione del processo decisionale che è alla base della pianificazione di una rete energetica distribuita, come uno strumento efficace per ottenere i potenziali attesi economico/ambientali di tali sistemi energetici.
- Descrizione dell'approccio multi-obiettivo adottabile nell'ambito della pianificazione di una rete energetica distribuita, con lo scopo di individuare le soluzioni di compromesso economico/ambientale per i diversi stakeholder che partecipano al processo decisionale, analizzando le caratteristiche principali dei problemi di ottimizzazione multi-obiettivo e dei relativi metodi di ottimizzazione.
- Analisi critica dello stato dell'arte sulla pianificazione di reti energetiche distribuite a servizio di distretti, soffermandosi sulla tipologia di ottimizzazione, che può essere di design o operativa, sull'approccio utilizzato, del tipo mono- o multi-obiettivo, sui criteri di ottimizzazione maggiormente utilizzati in letteratura e sui relativi metodi di ottimizzazione adottati.

7 Riferimenti bibliografici

- [1] Yuan J-H, Kang J-G, Zhao C-H, Hu Z-G. Energy consumption and economic growth: evidence from China at both aggregated and disaggregated levels. *Energy Economics* 2008;30:3077–94.
- [2] Soytaş U, Sari R. Energy consumption and income in G-7 countries. *Journal of Policy Modeling* 2006;28:739–50.
- [3] IEA, World Energy Outlook 2013, London, November 2013. Available: <http://www.worldenergyoutlook.org/pressmedia/recentpresentations/londonnovember12.pdf>.
- [4] IEA, CO₂ emissions from fuel combustion, highlights, 2015 Edition. Available: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/CO2EmissionsFromFuelCombustionHighlights2015.pdf>.
- [5] ECBCS – Annex 49 – Low Exergy Systems for High Performance Buildings and Communities, Available <<http://www.ecbcs.org/annexes/annex49.htm>.
- [6] Lucon O, Ürge-Vorsatz D, Zain Ahmed A, Akbari H, Bertoldi P, Cabeza LF, Eyre N, Gadgil A, Harvey LDD, Jiang Y, Liphoto E, Mirasgedis S, Murakami S, Parikh J, Pyke C, Vilariño MV, 2014, Chapter 9: Buildings. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [7] Ren H, Gao W, Zhou W, Nakagami, KI. Multi-criteria evaluation for the optimal adoption of distributed residential energy systems in Japan. *Energy Policy* 2009;37(12):5484-5493.
- [8] Bilgen S, Keles S, Kaygusuz A, Sarl A, Kaygusuz K. Global warming and renewable energy sources for sustainable development: a case study in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2008;12:372–96.
- [9] Abulfotuh F. Energy efficiency and renewable technologies: the way to sustainable energy future. *Desalination* 2007;209:275–82.
- [10] Resnier M, Wang C, Du P, Chen J. The promotion of sustainable development in China through the optimization of a tax/subsidy plan among HFC and power generation CDM projects. *Energy Policy* 2007;35:4529–44.
- [11] Kari A, Arto S. Distributed energy generation and sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2006;10:539–58.
- [12] Akorede MF, Hizam H, Poresmaeil E. Distributed energy resources and benefits to the environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2010;14:724–34.
- [13] Pepermans G, Driesen J, Haesoldoncklx D, Belmans R, D’haeseleer W. Distributed generation: definition, benefits and issues. *Energy Policy* 2005;33:787–98.
- [14] Söderman J, Pettersson F. Structural and operational optimisation of distributed energy systems. *Applied Thermal Engineering* 2006;26:1400–8.
- [15] Ren H, Gao W. A MILP model for integrated plan and evaluation of distributed energy systems. *Applied Energy* 2010;87(3):1001-1014.
- [16] Rivarolo M, Greco A, Massardo AF. Thermo-economic optimization of the impact of renewable generators on poly-generation smart-grids including hot thermal storage. *Energy Conversion and Management* 2013;65:75-83.

- [17] Darrow K, Tidball R, Wang J, Hampson A. Catalog of CHP technologies. ICF Int., funding: US Environmental Protection Agency, Combined Heat and Power Partnership, US Dept. of Energy 2015.
- [18] Art.2 della Direttiva 2009/28/CE.
- [19] Dincer I., Rosen M. Thermal energy storage: systems and applications. John Wiley & Sons 2002.
- [20] Ricerca sul Sistema Energetico - RSE SpA. L'accumulo di energia elettrica – Prima Edizione. IL MELOGRANO Editore srl. 2011;ISBN: 987-88-611-305-3.
- [21] Thermal Energy Storage - Technology Brief. IEA-ETSAP and IRENA Technology Brief E17 – 2013.
- [22] Di Somma M, Yan B, Bianco N, Graditi G, Luh PB, Mongibello L, Naso V. Operation optimization of a distributed energy system considering energy costs and exergy efficiency. Energy Conversion and Management 2015;103:739-751.
- [23] Di Somma M, Yan B, Bianco N, Luh PB, Graditi G, Mongibello L, Naso V. Multi-objective operation optimization of a Distributed Energy System for a large-scale utility customer. Applied Thermal Engineering 2016; DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.02.027.
- [24] Han J, Ouyang L, Xu Y, Zeng R, Kang S, Zhang G. Current status of distributed energy system in China. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2016;55:288-297.
- [25] Samouilidis J, Mitropoulos C. Energy economy models—a survey. European Journal of Operations Research 1982;25:200–15.
- [26] Meirer P, Mubayi V. Modeling energy-economic interactions in developing countries—a linear programming approach. European Journal of Operations Research 1983;13:41–59.
- [27] Nijcamp P, Volwahren A. New directions in integrated energy planning. Energy Policy 1990;18(8):764–73.
- [28] Pohekar SD, Ramachandran M. Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2004;8(4):365-381.
- [29] Alarcon-Rodriguez A, Ault G, Galloway S. Multi-objective planning of distributed energy resources: A review of the state-of-the-art. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2010;14(5):1353-1366.
- [30] Luenberg DG, Yinyu Y. L. Linear and Nonlinear Programming, Third Edition 2008, Springer, ISBN: 978-0-387-74502-2.
- [31] Alarcon-Rodriguez AD. A Multi-objective Planning Framework for Analysing the Integration of Distributed Energy Resources. PhD Thesis. Institute of Energy and Environment, University of Strathclyde; April 2009.
- [32] Korte B, Vygen J. Ottimizzazione Combinatoria (2011). Springer.
- [33] Irving MR, Song YH. Optimization techniques for electrical power systems—part 1 mathematical optimization methods. Power Engineering Journal 2000; 14(October (5)).
- [34] Deb K. Multi-objective optimization using evolutionary algorithms. John Wiley and Sons; 2001,ISBN 047187339X.
- [35] Fleming PJ. Introduction to Multiobjective Optimisation. Available online: <https://www.shef.ac.uk/acse/staff/peter_fleming/intromo>.
- [36] Savic D. Single-objective vs. multi-objective optimization for integrated decision support. In: Proceedings of the first biennial meeting of the international environmental modeling and software society, vol. 1; 2007. p. 7–12.

- [37] Zitzler E. Two decades of evolutionary multi-objective optimization: a glance back and a look ahead (Presentation). In: IEEE symposium on computational intelligence in multi criteria decision making (MCDM); 2007.
- [38] Konak A, Coit DW, Smith AE. Multi-objective optimization using genetic algorithms: a tutorial. *Reliability Engineering and System Safety* 2006;91:992–1007.
- [39] Buoro D, Casisi M, De Nardi A, Pinamonti P, Reini M. Multicriteria optimization of a distributed energy supply system for an industrial area. *Energy* 2013;58:128-137.
- [40] Leyland G. Multi-objective optimization applied to industrial energy problems. Doctoral Dissertation. Ecole Poly-technique Fédérale de Lausanne; 2002.
- [41] Coello CAC. Evolutionary multi-objective optimization: a historical view of the field. *IEEE computational intelligence magazine* 2006;1(1);28-36.
- [42] Coello CAC., Van Veldhuizen DA, Lamont GB. Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems (Vol. 242). 2002; New York: Kluwer Academic.
- [43] Deb K, Pratap A, Agarwal S, Meyarivan TAMT. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE transactions on evolutionary computation* 2002;6(2):182-197.
- [44] Moretti F, Panzieri S. Metodologia di ottimizzazione multi-obiettivo della climatizzazione termica di edifici. Validazione su sistema di simulazione. ENEA, Univ. Roma Tre, Settembre 2013.
- [45] Gustafsson SI, Karlsson BG. Linear programming optimization in CHP networks. *Heat Recovery Systems and CHP* 1991;11(4):231-238.
- [46] Shaneb OA, Taylor PC, Coates G. Optimal online operation of residential μ CHP systems using linear programming. *Energy and Buildings* 2012;44:17-25.
- [47] Oh SD, Lee HJ, Jung JY, Kwak HY. Optimal planning and economic evaluation of cogeneration system. *Energy* 2007;32(5):760-771.
- [48] Ren H, Gao W, Ruan Y. Optimal sizing for residential CHP system. *Applied Thermal Engineering* 2008;28(5):514-523.
- [49] Yokoyama R, Ito K, Matsumoto Y. Optimal sizing of a gas turbine cogeneration plant in consideration of its operational strategy. *Journal of engineering for gas turbines and power* 1994;116(1):32-38.
- [50] Horii S, Ito K, Pak PS, Suzuki Y. Optimal planning of gas turbine cogeneration plants based on mixed - integer linear programming. *International Journal of Energy Research* 1987;11(4):507-518.
- [51] Beihong Z, Weiding L. An optimal sizing method for cogeneration plants. *Energy and Buildings* 2006;38(3):189-195.
- [52] Cui CG, Yang XF, Tian F, Gao TY, Zhu ZC. Optimization of a Combined Heat and Power Generation System with Ice Thermal Storage. In *Low-carbon City and New-type Urbanization 2015* (pp. 13-23). Springer Berlin Heidelberg.
- [53] Kong XQ, Wang RZ, Huang XH. Energy optimization model for a CCHP system with available gas turbines. *Applied Thermal Engineering* 2005;25(2):377-391.
- [54] Kong XQ, Wang RZ, Li Y, Huang XH. Optimal operation of a micro-combined cooling, heating and power system driven by a gas engine. *Energy Conversion and Management* 2009;50(3):530-538.
- [55] Sakawa M, Kato K, Ushiro S. Operation planning of district heating and cooling plants through genetic algorithms for nonlinear 0–1 programming. *Computers & Mathematics with Applications* 2001;42(10): 1365-1378.
- [56] Arcuri P, Florio G, Fragiaco P. A mixed integer programming model for optimal design of trigeneration in a hospital complex. *Energy* 2007;32(8):1430-1447.

- [57] Cardona E, Piacentino A. Optimal design of CHCP plants in the civil sector by thermoeconomics. *Applied Energy* 2007;84(7):729-748.
- [58] Burer M, Tanaka K, Favrat D, Yamada K. Multi-criteria optimization of a district cogeneration plant integrating a solid oxide fuel cell–gas turbine combined cycle, heat pumps and chillers. *Energy* 2003;28(6), 497-518.
- [59] Wu JY, Wang JL, Li S. Multi-objective optimal operation strategy study of micro-CCHP system. *Energy* 2012;48(1):472-483.
- [60] Yan B, Luh PB, Sun B, Song C, Dong C, Gan Z, et al. Energy-efficient management of eco-communities. In: *Proceedings of IEEE CASE; Madison, USA, 2013 August 17–20.*
- [61] Guan X, Xu Z, Jia Q. Energy-efficient buildings facilitated by microgrid. *IEEE Trans Smart Grid* 2011;1:466–73.
- [62] Ren H, Gao W. A MILP model for integrated plan and evaluation of distributed energy systems. *Appl Energy* 2010;87(3):1001-1014.
- [63] Mehleri ED, Sarimveis H, Markatos NC, Papageorgiou LG. A mathematical programming approach for optimal design of distributed energy systems at the neighbourhood level. *Energy* 2012;44:396-104.
- [64] Mehleri ED, Sarimveis H, Markatos NC, Papageorgiou LG. Optimal design and operation of distributed energy systems: Application to Greek residential sector. *Renew En* 2013;51:331-342.
- [65] Hawkes AD, Leach MA. Modelling high level system design and unit commitment for a microgrid. *Appl Energy* 2009;86(7):253-1265.
- [66] Omu A, Choudhary R, Boies A. Distributed energy resource system optimisation using mixed integer linear programming. *Energy Policy* 2013;61, 249-266.
- [67] Wouters C, Fraga ES, James AM, Polykarpou EM. Mixed-integer optimisation based approach for design and operation of distributed energy systems. In *Power Engineering Conference (AUPEC), 2014 Australasian Universities IEEE;1-6.*
- [68] Zhou Z, Liu P, Li Z, Ni W. An engineering approach to the optimal design of distributed energy systems in China. *Appl Therm Eng* 2013;53:387-96.
- [69] Weber C, Shah N. Optimisation based design of a district energy system for an eco-town in the United Kingdom. *Energy* 2011;36(2):1292-1308.
- [70] Li H, Nalim R, Haldi PA. Thermal-economic optimization of a distributed multi-generation energy system—a case study of Beijing. *Appl Therm Eng* 2006;26(7):709–19.
- [71] Ren H, Zhou W, Nakagami KI, Gao W, Wu Q. Multi-objective optimization for the operation of distributed energy systems considering economic and environmental aspects. *Applied Energy* 2010;87(12):3642-3651.
- [72] Yan B, Luh PB, Bragin MA, Song C, Dong C, Gan Z. Energy-efficient building clusters. In: *Proceedings of IEEE CASE Taiwan; Taipei, Taiwan, 2014 August 18–22.*
- [73] Di Somma M, Bing Y, Bianco N, Luh PB, Graditi G, Mongibello L, Naso V. Influence of energy quality management on CO₂ emissions in operation optimization of a distributed energy system. In *Clean Electrical Power (ICCEP), 2015 International Conference pp. 297-304.* IEEE.
- [74] Yan B, Di Somma M, Bianco N, Luh PB, Graditi G, Mongibello L, Naso V. Exergy-based operation optimization of a distributed energy system through the energy-supply chain. *Applied Thermal Engineering* 2016;101:741-751.

- [75] Weber C, Maréchal F, Favrat D, Kraines S. Optimization of an SOFC-based decentralized polygeneration system for providing energy services in an office-building in Tokyo. *Appl Therm Eng* 2006;26(13):1409–19.
- [76] Bragin MA, Luh PB, Yan JH, Yu N, Stern GA. Convergence of the Surrogate Lagrangian Relaxation Method, *J. Optim. Theory Appl.* 2015;164(1):73–201.
- [77] Bragin MA, Luh PB, Yan JH, Yu N, Stern GA. An efficient approach for solving mixed-integer programming problems under the monotonic condition, *J. Control Decis.* (2016) doi:10.1080/23307706.2015.1129916.
- [78] Bragin MA, Luh PB, Yan JH, Stern GA, Novel exploitation of convex hull invariance for solving unit commitment by using surrogate Lagrangian relaxation and branch-and-cut, in: *Proceedings of the IEEE Power and Energy Society, General Meeting. Denver, Colorado, 2015.*