

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II



SCUOLA POLITECNICA E DELLE SCIENZE DI BASE

**CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN
INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO**

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale

ABSTRACT

**ANALISI TERMOECONOMICA DI RETI ENERGETICHE
INNOVATIVE AL
SERVIZIO DI UTENZE RESIDENZIALI**

RELATORE:

CH.MO PROF. ING. FRANCESCO CALISE

CANDIDATO:

ANNA ALFANO

MATR. M67/416

CORRELATORE:

ING. FRANCESCO L. CAPPIELLO

ING. MARIA VICIDOMINI

ANNO ACCADEMICO 2018/2019

Il cambiamento climatico ormai è evidente e sta provocando lo sconvolgimento degli ecosistemi. Le strategie chiave per fuoriuscire da questa drammatica situazione sono l'uso efficiente dell'energia, lo sfruttamento delle fonti energetiche autoctone e soprattutto l'attuazione di politiche di risparmio energetico. Specialmente il settore dei trasporti e quello residenziale devono adottare al meglio queste misure, in quanto risultano essere due dei principali emettitori di gas serra e quindi si presentano come i più grossi ostacoli alla realizzazione degli obiettivi stabiliti dall'Unione Europea in materia di protezione del clima. Infatti, l'UE ha fissato un abbassamento delle emissioni del 40% entro il 2030 a cui fare seguire il loro completo azzeramento entro il 2050. Delle soluzioni promettenti per la riduzione dei consumi di energia primaria e delle emissioni di gas serra sono:

- la diffusione dei veicoli elettrici, di cui uno dei grandi vantaggi è che si possono servire di elettricità prodotta da tecnologie ad alta efficienza di conversione e da fonti rinnovabili;
- l'adozione di sistemi energetici distrettuali, come reti di teleriscaldamento e teleraffrescamento che permettono di ridurre le perdite di trasmissione in loco, di aumentare l'efficienza di conversione, di utilizzare calore di scarto, di mitigare problemi di emissione e di sfruttare energie rinnovabili.

Queste soluzioni sono applicate, nel presente lavoro, ad un blocco di edifici localizzato nel quartiere di Fuorigrotta (Napoli). Attualmente è poco realistico considerare che il grado di penetrazione del veicolo elettrico sia pari al 100%. Perciò si è assunto come orizzonte temporale del sistema proposto l'anno 2050, in cui gli obiettivi di piena decarbonizzazione dovrebbero essere completamente raggiunti.

Affinché ci sia una corretta realizzazione del suddetto sistema proposto, è necessario prima raccogliere tutti i dati possibili in grado di definire al meglio il sistema di riferimento. Dopo aver definito i limiti del distretto residenziale considerato, nell'ipotesi che sia costituito da 50 edifici, si è assunto che questi ultimi sono stati costruiti tra il 1982 e il 1991. Ciò è stato utile per la definizione del tipo di involucro edilizio. Questo dato è molto importante, perché ha permesso di calcolare i valori di trasmittanza di ogni componente costruttivo (soffitto di copertura, solaio interpiano, solaio controterra, parete esterna e finestra). Ovviamente, questi coefficienti sono più alti rispetto a quelli previsti dalla normativa attualmente vigente; ciò significa che gli edifici in esame hanno significative dispersioni di calore verso l'esterno. Particolare attenzione è da volgere ai tipi di utilizzatori degli edifici. Ovviamente per fare una ricostruzione il più fedele possibile del quartiere, sarebbe necessario considerare che ogni appartamento sia occupato da utenze diverse. Tuttavia, implementare un modello così accurato

in un software, significherebbe allungare troppo i tempi di calcolo. Per questione di semplicità modellistica, quindi, si è assunto che un edificio può essere abitato da un solo tipo di utenza: o da famiglie (ciascuna composta da 4 persone) o da coppie di anziani o da gruppi di 3 giovani. Data questa suddivisione e dopo avere consultato i dati ISTAT circa la distribuzione della popolazione di Napoli, deriva che, per il complesso considerato, gli edifici abitati da famiglie sono 34, quelli occupati da anziani 12 e infine quelli da giovani 4. Si è assunto poi che le utenze abbiano abitudini diverse circa l'occupazione e i tempi di utilizzo degli elettrodomestici. Anche in questo caso si tratta di semplificazioni modellistiche, in quanto si sarebbe dovuto definire N profili di comportamenti diversi per N appartamenti. Inoltre, per rendere più verosimile il distretto residenziale analizzato, si è considerato che 14 degli edifici analizzati hanno il piano terra destinato ad attività commerciale. Per il bilancio energetico degli edifici è stato importante definire temperatura di set-point interna, la quale è utile per il dimensionamento degli impianti di riscaldamento e raffrescamento. In particolare, per l'utenza residenziale è stato fissato come valore di comfort invernale 20°C e per la stagione estiva 27°C , in accordo con la normativa attualmente vigente. Mentre per l'utenza commerciale è stata fissata come valore di comfort invernale 20°C e per la stagione estiva 26°C . Queste temperature vengono garantite da impianti di riscaldamento (caldaia) che a Napoli si possono accendere dal 15 novembre al 31 marzo e da sistemi di raffrescamento (pompe di calore elettriche aria/aria) che si possono attivare dal 1° maggio al 30 settembre. Anche tali limiti temporali sono desunti dalla normativa vigente.

Invece il carico elettrico si deve all'utilizzo degli elettrodomestici che varia a seconda dell'utenza e della stagione. Anche in questo caso è stato necessario un lavoro di ricerca. In particolare, il parametro tecnico utile è la potenza media. Per la sua determinazione si è fatto riferimento: all'etichetta energetica, a valori di letteratura, a formule.

Una volta raccolti tutti i dati, è stato sviluppato un tool in ambiente TRNSYS in grado di calcolare la domanda termica ed elettrica in regime dinamico. Dato che parte degli input sono stati stimati, è stata necessaria un'opera di calibrazione tramite un numero N di simulazioni, in modo che i risultati prodotti siano il più vicino possibile a quelli reali, dato che sono noti i consumi termici ed elettrici annui di un'utenza residenziale a Napoli. In particolare, risulta che la domanda termica di riscaldamento di un distretto residenziale di Napoli è maggiore rispetto a quella di raffrescamento. La massima domanda di riscaldamento è stata riscontrata nel mese di gennaio con un valore di energia termica pari a 1.06 GWh, mentre il picco estivo si raggiunge nel mese di luglio con una richiesta di energia frigo pari a 0.2 GWh. Questi risultati sono in contrasto con quanto ci si aspetterebbe dal clima partenopeo. Essi sono giustificati dall'effetto delle ombre dei palazzi, che limitano l'effetto della radiazione solare. Si ricorda che la

radiazione solare ha un effetto positivo d'inverno (riducendo il carico necessario al riscaldamento) e negativo d'estate (incrementando il carico frigo).

Per quanto riguarda la domanda elettrica, essa risulta essere abbastanza costante durante l'anno e si aggira intorno a 312-320 MWh al mese.

Il distretto ha mostrato un consumo di energia primaria pari a 17.33 GWh/anno e un costo operativo di 1.51 M€/anno, senza considerare l'impatto della mobilità privata sulla performance energetica ed economica.

Inoltre, è stato valutato anche il contributo dei veicoli, il cui numero è stato stimato essere pari a 2589. Questo valore è stato derivato dal numero di abitanti del quartiere (4700 abitanti) e dal rapporto del numero di veicoli su abitante, ovvero 0.55 veicolo/abitante (valore che è stato ricavato dai dati Istat riferiti a Napoli). È stato assunto che il parco veicolare del quartiere è composto solamente da auto a benzina e a diesel. Per rendere il modello più realistico si sono distinte 5 gruppi di veicoli aventi profili di guida e consumi diversi.

Considerando anche l'apporto dei veicoli emerge che il consumo di energia primari è di 57.20 GWh/anno, le emissioni di anidride carbonica sono 11631 ton/anno e che il sistema ha un costo di 8.32 M€/anno.

I carichi termici ed elettrici definiti in questa prima parte del lavoro sono stati utilizzati come curve di domanda, ovvero dati input, per il sistema proposto, che consiste di un cogeneratore che produce energia termica ed elettrica. Inoltre, è stato considerato che il parco veicolare del sistema di riferimento venga completamente sostituito da veicoli elettrici serviti dell'elettricità prodotta dal cogeneratore. Di seguito è mostrato il layout del sistema proposto (Figura 1). Il modello di simulazione dell'impianto comprende anche una serie di controllori necessari a gestire i diversi componenti (pompe, motori, valvole, ecc.) tramite le strategie di controllo desiderate.

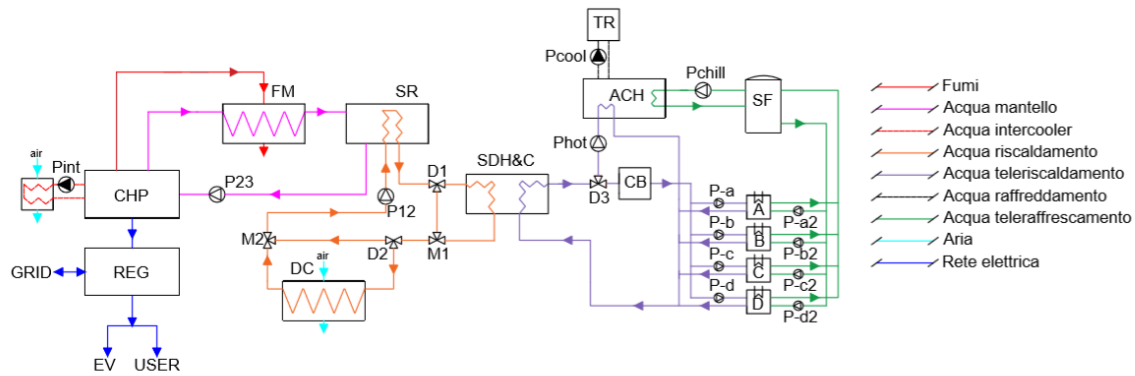


Figura 1 Layout del sistema proposto

IC Intercooler

COG Cogeneratore

FM Scambiatore Fumi-acqua Mantello

SR Scambiatore riscaldamento

SDH&C Scambiatore teleriscaldamento

DC Dissipatore Cogeneratore

D Diverter

M Miscelatore

ACH Assorbitore

TR Torre di Raffreddamento

SF Serbatoio Freddo

A-B-C-D Sottostazioni edifici

REG Regolatore

EV Veicoli Elettrici

USER Elettrodomestici e illuminazione dell'utenza

L'energia termica viene ottenuta principalmente dall'acqua di raffreddamento del motore, inoltre è presente un ulteriore recupero termico sui fumi del cogeneratore. Se la potenza termica prodotta dal cogeneratore non riesce a soddisfare l'intera domanda termica di riscaldamento, la caldaia interviene a garantire così da garantire la temperatura minima di mandata, assunta pari a 55 °C. Durante il periodo estivo l'energia termica per il raffrescamento è prodotta da un assorbitore alimentato dal calore prodotto dal cogeneratore. Le energie termiche così prodotte sono inviate all'utenza attraverso una rete di teleriscaldamento e teleraffreddamento in cui fluisce rispettivamente acqua calda e acqua fredda.

La potenza elettrica prodotta dal cogeneratore è dispacciata con priorità all'utenza residenziale/commerciale, e solamente la rimanente aliquota di potenza è impiegata per ricaricare i veicoli elettrici. Questa energia residua viene proporzionalmente distribuita fra le categorie di veicoli che sono attaccate alla colonnina di ricarica. La gestione della ricarica di ogni gruppo di veicoli è affidata ad un regolatore inverter che assicura che lo stato di carica (SoC) della batteria non superi mai 0.95 che rappresenta il limite superiore assunto per evitare il prematuro deterioramento della batteria. Il limite inferiore della batteria è assunto pari a 0,40, per cui questo rappresenta lo stato di carica minimo garantito ai veicoli prima che lascino la colonnina. Pertanto, se la potenza del cogeneratore non è sufficiente a raggiungere questo valore è previsto che una certa aliquota di potenza sia prelevata dalla rete. Sono state analizzate e poi confrontate due diverse modalità di prelievo dalla rete nazionale che avviene quando l'energia residua riservata ai veicoli elettrici non riesce a portare lo stato di carica al di sopra del 40%:

- Prelievo di 9 kW per macchina, 2 ore prima della sconnessione dalla colonnina, vale a dire prima del suo utilizzo;
- Prelievo di 3 kW per auto, costanti durante tutto l'intervallo temporale di collegamento alla colonnina.

Tutto ciò è stato implementato in TRNSYS, in cui ho assemblato una serie di type, individuati da una libreria già esistente all'interno di Simulation Studio. Tutti i type sono descritti da un modello matematico ed interagiscono tra loro in modo da permettere lo svolgimento di una sequenza ordinata di operazioni.

I sistemi proposti così definiti sono stati posti a simulazione. Dal punto di vista termico producono i medesimi risultati che vengono riassunti nella figura successiva (Figura 2):

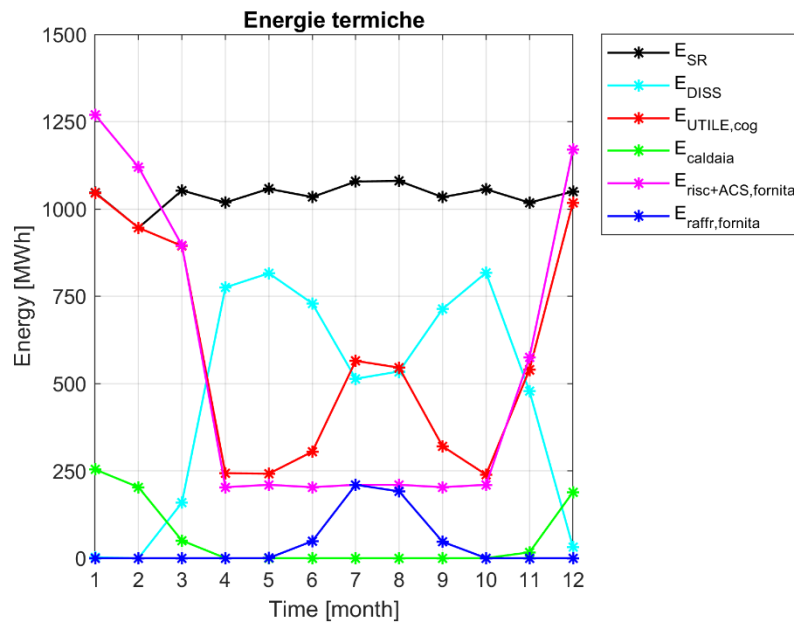


Figura 2 Energie termiche mensili

Come si era previsto, l'energia termica utile, valutata come differenza tra il calore scambiato in SR e quello ceduto nel dissipatore è massima agli estremi dell'anno, grazie alla richiesta di riscaldamento, raggiungendo i 1000 MWh mensili. Si abbassa a 600 MWh in estate quando solo una parte del calore viene convertito in energia frigorifera, mentre il restante non può essere sfruttato e deve essere dissipato. Durante le mezze stagioni, cioè quando vengono a mancare domanda di riscaldamento e di raffrescamento ambientale, l'energia utile è sui 250 MWh al mese e va a colmare solamente la richiesta di acqua calda sanitaria. In quest'ultimo caso l'energia da dissipare arriva a 800 MWh mensile, che è un valore abbastanza alto in quanto è confrontabile con l'energia termica utile durante i mesi invernali.

I risultati sul lato elettrico circa i due sistemi differenti per le strategie di ricarica sono confrontabili visivamente grazie alla figura di seguito mostrata.

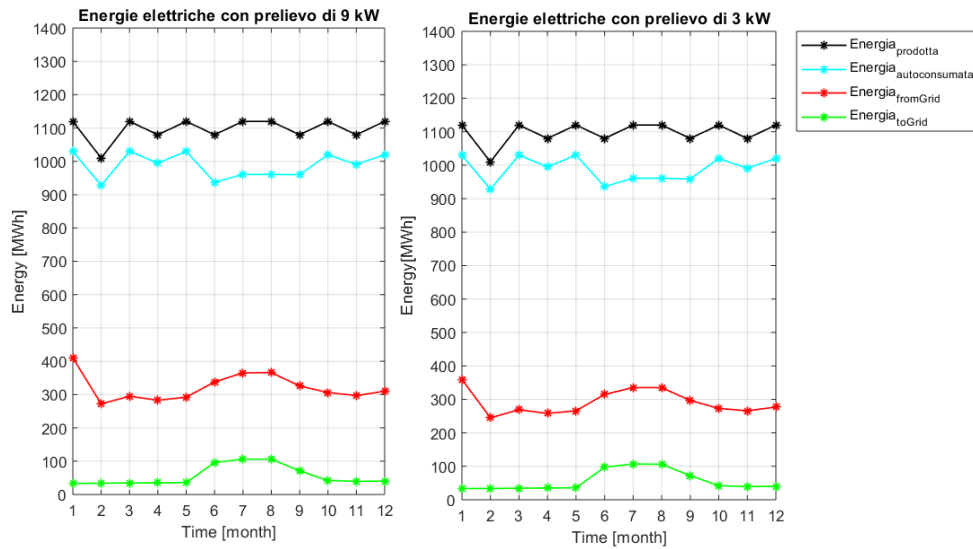


Figura 3 Energie elettriche mensili

Non ci sono evidenti differenze, a parte sulle energie prelevate dalla rete nei mesi estivi che si presentano più elevate nel sistema con strategia di prelievo 9 kW. In entrambi gli scenari si assiste allo stesso andamento per ogni tipo di energia. Risulta che l'energia prodotta è costante durante tutto l'anno perché l'impianto lavora a punto fisso, l'energia auto-consumata subisce un abbassamento nei mesi estivi dato che l'utenza è meno presente in casa e quindi l'utilizzo degli elettrodomestici si concentra in pochi momenti della giornata. Da ciò consegue che la potenza residua destinata ai veicoli elettrici è minore, per cui necessitano di prelevare dalla rete.

I risultati annuali circa i consumi termici sono riassunti nella Tabella 1:

$ET_{prodotta,cog}$ [GWh/anno]	ET_{SR} [GWh/anno]	ET_{diss} [GWh/anno]	$ET_{caldaia}$ [GWh/anno]	ET_{utile} [GWh/anno]	EF_{assorb} [GWh/anno]
18.03	12.48	5.57	0.69	6.91	0.51

Tabella 1 Energie termiche annuali

Per $ET_{prodotta,cog}$ si intende tutta la produzione di calore da parte del cogeneratore vale a dire sul fronte olio lubrificante, acqua di raffreddamento, intercooler e raffreddamento del generatore elettrico, fumi di scarico e dispersione in ambiente. ET_{SR} è l'energia sfruttabile per soddisfare le richieste termiche. ET_{diss} è l'energia annuale che durante l'anno viene dissipata ed è quasi la metà di ET_{SR} . ET_{utile} è quella effettivamente utilizzata. Parte di questa diventa energia frigorifera EF_{assorb} . $ET_{caldaia}$ è l'energia che bisogna integrare per compensare la domanda di riscaldamento. Risulta che la caldaia si accende 366 ore all'anno, mentre l'assorbitore si attiva per 126 ore.

Invece in Tabella 2 sono confrontate le energie elettriche annue tra il sistema che preleva 9 kW per auto e quello con strategia di prelievo di 3 kW.

	SP PRELIEVO 9 KW	SP PRELIEVO 3 KW
EE_{PRODOTTA} [GWh/a]	13.14	13.14
EE_{AUTOCONSUMATA} [GWh/a]	11.90	11.91
EE_{FROM GRID} [GWh/a]	4.00	3.63
EE_{TO GRID} [GWh/a]	0.64	0.64

Tabella 2 Energie elettriche annuali

Dopo aver definito i consumi, si può procedere con l'analisi energetica e ambientale che ha prodotto i seguenti risultati:

	SP PRELIEVO 9 KW	SP PRELIEVO 3 KW
EP [GWh/a]	39.61	38.74
ΔEP [GWh/a]	17.59	18.46
PES [%]	30.74	32.28
CO₂ [kg/a]	8075509	7882484
ΔCO₂ [kg/a]	3555894	3748920
ΔCO₂ [%]	30.57	32.23

Tabella 3 Analisi energetica e ambientale

Risulta che il sistema con le migliori performance energetiche e ambientali è quello che utilizza la strategia di controllo dei 3 kW. Essa è anche più conveniente dal punto di vista della costruzione dell'impianto elettrico, in quanto una potenza di 9 kW necessiterebbe di cavidotti più spessi e complessi che comportano maggiori strumenti di controllo per migliorare la sicurezza; mentre la potenza di 3 kW è più facile da gestire alla colonnina e non sono richiesti accorgimenti troppo complessi dell'impianto elettrico. È riportata quindi solo l'analisi economica relativa a quest'ultimo scenario, la cui redditività tiene conto anche degli incentivi fiscali sul gas naturale e dei certificati bianchi.

Nella Tabella 3 sono riportate tutte le voci dell'investimento:

Spesa	Valore	Unità
Impianto di cogenerazione (comprensivo di tutti gli scambiatori e le pompe del circuito primario)	2.252	M€
Torre di raffreddamento	0.117	M€
Assorbitore	0.719	M€
Pompe circuito secondario		
- 9 pompe a portata variabile (modello SIE 415-22/11-2G di Salmson)	0.118	M€
- 3 pompe a portata variabile (modello SIE 412-21/5.5-2G di Salmson)		
Rete di teleriscaldamento		
- Anello principale costituito da 4 tubi (2 di mandata e 2 di ritorno) in acciaio con diametro di 350 mm e lunghezza 500 m	0.390	M€

- Diramazioni costituite da 16 tubi (8 rami di mandata e 8 di ritorno) in acciaio di diametro 250 mm e lunghezza 125 m.		
Rete di teleraffrescamento		
- Anello principale costituito da 2 tubi (1 di mandata e 1 di ritorno) in acciaio con diametro di 400 mm e lunghezza 500 m		
- Diramazioni costituite da 6 tubi (3 rami di mandata e 3 di ritorno) in acciaio di diametro 150 mm e lunghezza 125 m.	0.176	M€
- Diramazioni costituite da 2 tubi (1 ramo di mandata e 1 di ritorno) in acciaio di diametro 200 mm e lunghezza 125 m.		
Veicoli	35.741	M€
Caldaia	0.46	M€

Tabella 4 Investimento

I risultati finali relativi all'analisi economica sono riportati nella Tabella 4.

	Investimento (M€)	SPB (anni)	VAN (M€)	IP (-)
SP	39.97	6.23	40.26	1.01

Tabella 5 Indici economici

Il VAN è stato calcolato utilizzando considerando il tasso di attualizzazione pari al 5% e la vita utile dell'opera fissata a 20 anni.

Dato la domanda di energia termica è concentrata soprattutto in determinati mesi dell'anno, una grossa aliquota di energia termica prodotta dal cogeneratore viene dissipata. Si è voluto studiare come cambiano le performance del sistema nel caso in cui una parte o tutta l'energia dissipata viene venduta a centri sportivi presenti nei dintorni del quartiere. In questo modo, infatti, ci sono degli ulteriori ricavi, dovuti alla vendita di energia termica e ai certificati bianchi, in quanto all'aumentare dell'energia termica recuperata e utilizzata, crescono gli incentivi. Considerando una tariffa di vendita di 0.09 €/kWh_{th}, il SPB si abbassa a 5.65 anni. Quindi questo aspetto ha un effetto limitato sulle performance economiche del sistema proposto.

Nel caso in cui, invece, si considera una riduzione del 40% del prezzo di acquisto dei veicoli elettrici, si registra che il SPB si abbassa al di sotto di un anno. In definitiva è l'investimento dei veicoli ad influenzare pesantemente le performance economiche del sistema proposto. Questo scenario è irrealistico attualmente, ma in futuro un eventuale crollo dei prezzi del veicolo elettrico può rendere l'attuazione di questa soluzione estremamente conveniente, dato i tempi di ritorno dell'investimento così piccoli.

Infine, si è voluto studiare come cambiano i risultati considerando una località più fredda rispetto a Napoli, come Torino, assumendo validi gli stessi dati definiti per Napoli.

Si registra che la richiesta di riscaldamento di Torino è più alta rispetto a quella di Napoli; difatti, la potenza di picco della città del Nord Italia è 12 MW, mentre quella di Napoli tocca 10 MW. Per quanto riguarda la potenza di raffrescamento, essa è nettamente più bassa a Torino in cui raggiunge 140 kW rispetto a Napoli dove viene richiesta una potenza frigorifera fino a 3500 kW. Queste differenze evidenziano l'incidenza che ha il clima sulla richiesta termica. Va altresì ricordato che in questo modello si tiene conto anche dell'ombra che i palazzi si fanno l'un l'altro. La cosa sicuramente limita fortemente la domanda di energia termica per il raffrescamento per la città di Torino. Per quanto riguarda la richiesta elettrica non si discosta troppo da quella analizzata per Napoli.

A questo sistema di riferimento si è proposta la stessa soluzione impiantistica adottata per Napoli e si è considerata solamente una strategia di carica, cioè quella secondo cui il prelievo dalla rete avviene con una potenza di 3 kW nel momento in cui lo stato di carica del veicolo è minore del 40%.

I consumi termici mensili sono mostrati in Figura 4 in cui si nota che l'energia termica prodotta non viene per nulla dissipata nei primi tre mesi e nell'ultimo mese dell'anno. Per cui tutta l'energia termica prodotta in questi mesi viene auto-consumata. Va altresì sottolineato che il clima più freddo di Torino obbliga un impiego maggiore della caldaia. Durante i mesi estivi la richiesta di energia frigorifera bassa comporta che gran parte dell'energia prodotta venga dissipata.

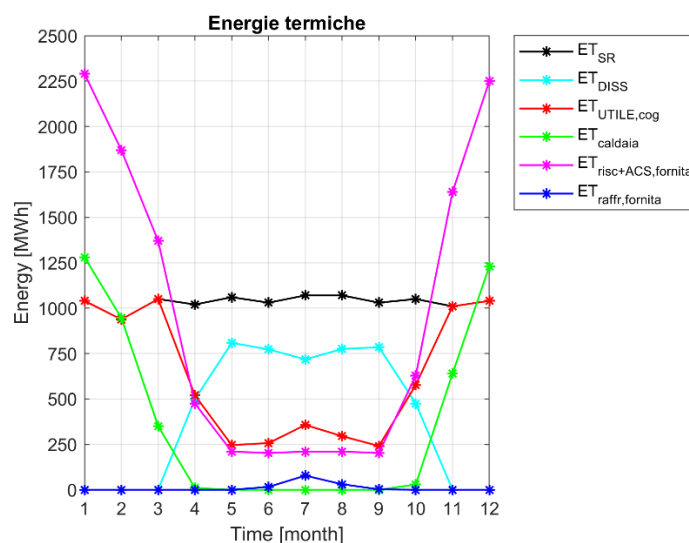


Figura 4 Energie termiche mensili

Nella Figura 5 si possono osservare gli andamenti relativi all'energia elettrica.

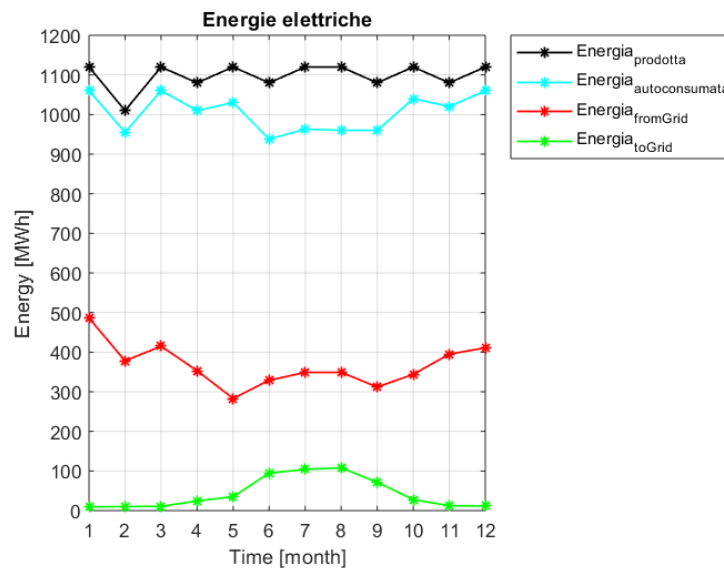


Figura 5 Energie elettriche mensili

Da quest'ultima figura emerge che la maggior parte dell'energia prelevata dalla rete si concentra agli estremi dell'anno quando le pompe del circuito di teleriscaldamento movimentano portate più grandi e quindi consumano più energia.

Nella tabella seguente sono mostrati i risultati annuali prodotti dalla simulazione espressi in GWh/anno:

$ET_{PRODotta,COG}$ [GWh/anno]	ET_{SR} [GWh/anno]	ET_{DISS} [GWh/anno]	$ET_{CALDAIA}$ [GWh/anno]	ET_{UTILE} [GWh/anno]	EF_{ASSORB} [GWh/anno]
18.03	12.40	4.83	4.48	7.56	0.13

Tabella 6 Energie termiche annuali

Risulta che la caldaia è accesa 1592 ore l'anno e l'assorbitore si attiva per 32.85 ore.

Le energie riferite all'elettrico sono riepilogate in Tabella 7.

	SP TORINO
$EE_{PRODotta}$ [GWh/a]	13.14
$EE_{AUTOCONSUMATA}$ [GWh/a]	12.05
$EE_{FROM GRID}$ [GWh/a]	4.40
$EE_{TO GRID}$ [GWh/a]	0.52

Tabella 7 Energie elettriche annuali

Di seguito si riportano i principali indici energetici, ambientali ed economici.

	EP [GWh/a]	PES [%]	CO2 [kg/a]	Δ CO2 [%]	Inv. [M€]	SPB [anni]	VAN [M€]	IP [-]
SP TORINO	42.98	36.35	4205870.29	36.16	40.31	6.19	41.04	1.03

I risultati dell'analisi termo-economica di Torino sono molto simili a quelli di Napoli perché i vantaggi e gli svantaggi dei due sistemi si compensano. Torino presenta una maggiore energia termica utile del cogeneratore, tuttavia ha bisogno di un'integrazione più importante da parte della caldaia. Oltretutto sul lato elettrico, una grossa aliquota dell'energia prodotta dal cogeneratore viene utilizzata dalle pompe dell'impianto e quindi è necessario un forte prelievo dalla rete per la ricarica dei veicoli.

D'altro canto, l'energia termica utile del cogeneratore di Napoli è più bassa, ma la caldaia di integrazione si attiva di meno. Sul piano elettrico, l'energia prodotta dal cogeneratore riesce a soddisfare una domanda maggiore, comportando un minore prelievo dalla rete.