

POLITECNICO DI TORINO

**Corso di Laurea Specialistica in
Architettura per il Progetto Sostenibile**



Geotermia a bassa entalpia in ambiente urbano

Relatore:

Prof.ssa Glenda Taddia

Correlatori:

Prof.ssa Cristina Becchio

Dott. Alessandro Berta

Candidata:

Alice Perucchiatti

Matr. 275208

Anno Accademico 2023/2024

INDICE

Abstract.....	p.5
Introduzione.....	p.6
CAPITOLO 1: La Decarbonizzazione e la Neutralità climatica.....	p.9
1.1 Direttive: Cenno alla rapida evoluzione della politica energetica europea	p.12
1.2 Green Deal europeo	p.13
1.3 Fit for 55%.....	p.14
1.4 Direttiva EPBD (Energy Performance of Building Directive).....	p.21
1.5 L'edificio a "Emissioni Zero"	p.26
1.6 Differenze tra ZEB (Zero Emission Building) e NZEB (Nearly Zero Energy Building).....	p.28
CAPITOLO 2: Le fonti energetiche rinnovabili termiche nel territorio piemontese.....	p.32
2.1 L'iniziativa europea: "100 Climate Neutral Cities by 2030"	p.33
2.2 Le città	p.35
2.2.1 Città studio: Torino e il suo Piano d'Azione.....	p.37
2.3 Il concetto di "Quartieri urbani climaticamente neutri e a Zero Emissioni"	p.37
CAPITOLO 3: Il teleriscaldamento	p. 43
3.1 Cogenerazione e trigenerazione.....	p. 52
3.2 Funzionalità.....	p. 54
3.3 Normativa	p.55
3.4 Il teleriscaldamento come soluzione in aree urbane	p. 56
3.5 Reti di teleriscaldamento a bassa temperatura	p. 57
3.5.1 Reti di teleriscaldamento di 4° generazione.....	p. 58
3.5.2 Reti di teleriscaldamento di 5° generazione	p. 60
CAPITOLO 4: La geotermia e le pompe di calore.....	p.62
4.1 L'energia geotermica.....	p. 61
4.2 Pompa di calore geotermica	p.64
4.3 Tipologie di impianti	p.67
4.4 Normative	p.72
4.5 Vantaggi e Svantaggi.....	p.72

CAPITOLO 5: Analisi territoriale piemontese	p.74
5.1 Inquadramento geografico, geologico piemontese e della città di Torino.....	p. 74
5.1.2 Studio geologico del terreno.....	p.77
5.1.3 Urbanizzazione nel contesto geologico del territorio torinese	p.79
5.2 Analisi demografica di Torino.....	p.80
5.2.1 Classificazione climatica	p.81
5.2.2 Studio delle Temperature atmosferiche e precipitazioni annuali	p.82
5.3 Analisi sull’assetto idrogeologico	p.84
5.5 Caso studio: Distretto a Zero Emissioni “UpTown Milano, 2017	p.94
CONCLUSIONI	p.96
BIBLIOGRAFIA	p.97

ABSTRACT

La crescente consapevolezza degli impatti del cambiamento climatico ha spinto molte comunità urbane a perseguire obiettivi ambiziosi come la neutralità climatica e la decarbonizzazione. Questa tesi si focalizza sulla città di Torino e i suoi quartieri, con l'intento di trasformarli in aree climaticamente neutre e decarbonizzate entro il 2030. Il lavoro è articolato in diverse fasi.

Innanzitutto, viene analizzato l'impatto del cambiamento climatico a scala globale ed europea, evidenziando gli effetti sulla vita quotidiana. Dopo aver individuato il problema, si esplorano due soluzioni fondamentali: la decarbonizzazione e la neutralità climatica. Questi concetti vengono definiti e analizzati nelle loro direttive, con particolare riferimento al Green Deal Europeo e al programma Fit for 55%. Quest'ultimo è collegato alla direttiva sull'efficienza energetica degli edifici (EPBD, Energy Performance Building Directive), la cui ultima versione, presentata nel marzo 2024 dal Consiglio Europeo, ridefinisce le classi energetiche e introduce il concetto di "Zero Emission Buildings". Questi edifici, in grado di produrre zero emissioni, sono confrontati con i precedenti Nearly Zero Energy Buildings (NZEB).

Per creare una rete di complessi a zero emissioni a livello cittadino, si esaminano le fonti rinnovabili termiche più comuni, concentrandosi sugli impianti geotermici a bassa entalpia in ambiente urbano. Vengono analizzate le caratteristiche, i vantaggi e gli svantaggi di questi impianti, sottolineando la loro importanza.

Ci si concentra su Torino, scelta poiché è una delle città selezionate dall'Unione Europea per il piano d'azione "100 Città climaticamente neutre" entro il 2030, fungendo da laboratorio per l'innovazione. Essa è inoltre leader in Italia e tra le prime in Europa per l'espansione della rete di teleriscaldamento, rendendola un caso ideale per l'evoluzione verso la neutralità climatica. Si propongono azioni specifiche per ridurre le emissioni di CO₂, basate su reti efficienti, impianti di energia rinnovabile e interventi di efficienza energetica per interi distretti e gli edifici che li compongono. Si propone quindi una sinergia con il sistema di teleriscaldamento e impianto geotermico, per renderlo più efficiente ed ecologico, esplorando i possibili miglioramenti futuri.

In una fase successiva, viene effettuata una mappatura generale dei quartieri esistenti, al fine di sviluppare un piano dettagliato su scala più ampia per il contesto urbano.

Dunque, l'obiettivo finale è trasformare i quartieri studiati, in distretti climaticamente neutri, presentando azioni concrete per raggiungere questo ambizioso traguardo, con particolare attenzione alla decarbonizzazione attraverso l'utilizzo di impianti di teleriscaldamento e geotermia.

INTRODUZIONE

Nell'ultimo decennio si è assistito ad una trasformazione sempre più evidente sulla situazione climatica a scala mondiale. Il tema del cambiamento climatico, ad oggi, porta con sé una certa importanza da non sottovalutare. Infatti, se visto da una prospettiva diversa, può essere un punto di svolta per portare alla luce nuovi studi, innovazioni e conseguenti azioni, per giungere infine ad una conversione della problematica stessa in più punti di forza, aumentando soluzioni e riducendone le conseguenze negative, che se protratte nel tempo senza attuare un piano specifico, possono peggiorare di gran lunga la situazione attuale.

I principali motivi per cui si è immersi in questa tematica vengono ricondotti alle attività antropiche, le quali rilasciano nell'atmosfera molti inquinanti dannosi per la salute dell'uomo, degli animali e dell'ambiente. Alcune delle azioni possono essere collegate alle emissioni di gas serra tra cui:

1. Anidride carbonica (CO_2) presente in maggior quantità e derivante dalla combustione di combustibili fossili come il carbone, il petrolio e il gas naturale, utilizzati per la produzione di energia e i trasporti;
2. A seguire il metano (CH_4), secondo per quantità rispetto alla CO_2 , derivante dall'estrazione di gas naturale e petrolio. La CO_2 e la CH_4 anche se presentano una percentuale maggiore in atmosfera, possono derivare anche da funzioni di tipo naturale come la respirazione delle piante, degli animali, degli uomini e da eruzioni vulcaniche.
3. L'ossido nitroso (N_2O), il quale ha origine da fertilizzanti ed alcuni processi chimici;
4. Gli idrofluorocarburi (HFC) utilizzati in alcuni sistemi di refrigerazione o schiume isolanti. Non hanno effetti sull'ozono ma sull'effetto serra;
5. Gli idrocarburi perfluorati (PFC) usati ad esempio nei climatizzatori o in alcuni imballaggi alimentari;
6. L'esafluoruro di zolfo (SF_6) originato nel settore metallurgico per la produzione di alluminio o altri elementi simili.

Questi gas hanno la caratteristica di creare l'"effetto serra", un fenomeno che può essere suddiviso in due categorie:

- *Origine naturale*: gas necessari per filtrare e trattenere le radiazioni infrarosse del sole, che garantiscono al contempo il giusto ed equilibrato riscaldamento, consentendo la vita sulla Terra. Dunque, è importante la sua esistenza;
- *Origine antropica*: Al contrario, i gas prodotti in modo eccessivo ostacolano la fuoriuscita delle radiazioni solari e creano una sorta di accumulo di calore. Questo processo diventa un serio problema ambientale, alterando l'ecosistema e diventando alla lunga un punto debole a cui si ricerca un rimedio.

Questi punti costituiscono la base di questo lavoro di tesi:

- Abbattere i gas ad effetto serra e climalteranti per l'ambiente, l'uomo e l'intero ecosistema, attraverso soluzioni portate a scala edilizia e a livello energetico, perciò giungendo a soluzioni innovative, capaci di poter mediare in parte a questa problematica.

Il sistema dei gas serra è chiamato in questo modo proprio per similitudine con quanto avviene nelle serre, cioè il trattenimento di una gran parte del calore ambientale. Di norma una frazione di queste radiazioni solari che raggiungono la superficie della Terra viene riemessa sotto forma di raggi infrarossi, parlando così di energia termica.

I gas riflettono parte di questi raggi solari, irradiandoli nuovamente sulla Terra e mantenendo la temperatura di superficie pari a circa 15°C.

In assenza di questi gas invece, la superficie avrebbe una temperatura pari a -18°C, perciò la vita sul pianeta non potrebbe sopravvivere. Purtroppo con l'avvento dell'era industriale, quest'ultimi vengono prodotti in modo eccessivo.

Altre sostanze da citare, altamente dannose per l'uomo e per l'ambiente, sono gli ossidi di azoto (NO_x), ossidi di zolfo (SO_x), particolato atmosferico (PM₁₀ e PM_{2,5}), i clorofluorocarburi (CFC) e gli idroclorofluorocarburi (HCFC), al contrario dei gas serra citati, sono impattanti per il tema legato all'ozono. Nel 2001 vengono resi pubblici alcuni studi scientifici estrapolati dalla Società Chimica Italiana, dove si attesta la dannosità di queste due sostanze responsabili del suo assottigliamento [1]. Solo nel 1987, attraverso il *Protocollo di Montreal* ¹ vennero messi al bando e si fornirono delle regole comuni a cui attenersi per sospendere la produzione dei CFC, cercando altri gas surrogati e meno dannosi, permettendo così alla fascia di ozono di ripristinarsi.

Le sostanze citate sono solo una delle cause che portano dei seri danni al pianeta, contribuendo al riscaldamento globale e al cambiamento climatico, manifestando ondate di calore estreme, squilibri nell'ecosistema e minaccia per la biodiversità. Inoltre, i cambiamenti nei modelli di precipitazione alterano la disponibilità di risorse idriche, mentre il livello del mare in aumento mette a rischio tutte le coste, così come l'acidificazione degli oceani. Per non parlare della scarsità della produzione alimentare a causa della siccità, presente in diversi Stati del mondo e le ulteriori inondazioni. Vi sono conseguenze negative ed impattanti anche per la salute umana tra cui la diffusione di malattie infettive e gli impatti psicologici derivanti da questi eventi climatici estremi. Dunque, la presente tesi si propone di esplorare in modo più approfondito, le varie dinamiche del cambiamento climatico e riuscire ad identificare delle strategie per mitigare le cause derivanti dalle questioni sopra riportate.

Attraverso un'analisi approfondita delle normative, delle innovazioni tecnologiche e degli intenti che si hanno a livello europeo, nazionale e locale, si punta ad un futuro migliore, più sostenibile e resiliente.

Negli ultimi anni, dal 2007 al 2016, è stata studiata dall'IPCC la correlazione tra: emissione di CO₂ e l'aumento repentino delle temperature di anno in anno.

L'indagine statistica è stata riportata nel rapporto del Working Group I dell'Intergovernmental Panel on Climate Change (*IPCC, 2021*) [2], dove si attesta che la temperatura media della superficie globale è incrementata di 1,1 °C rispetto all'era preindustriale.

¹ | Il Protocollo di Montreal è un accordo internazionale per proteggere l'ozono stratosferico, entrato in vigore nel 1989. Essenzialmente, limita la produzione e l'uso di sostanze nocive per lo strato di ozono, come clorofluorocarburi. L'Italia ha ratificato il Protocollo e ha adottato normative per gestire in modo responsabile queste sostanze. Fonte: <https://www.europarl.europa.eu/topics/it/article/20230316STO77629/cambiamento-climatico-gas-a-effetto-serra-che-causano-il-riscaldamento-globale#:~:text=Quali%20sono%20i%20principali%20gas,anche%20generati%20dalle%20attivit%C3%A0%20umane>.

Anche se ad oggi risulta ancora difficile tale obiettivo, si stanziava un budget o, meglio, una soglia dedicata all'anidride carbonica, chiamata "Carbon Budget".

Il termine, come citato dall'IPCC [3] indica:

"La quantità cumulativa di anidride carbonica (CO₂) che può ancora essere immessa in atmosfera se si intende mantenere il riscaldamento globale al di sotto di limiti specifici (1,5-2°C)."

Dell'argomento se n'era già parlato grazie all'Accordo di Parigi² nel 2015. Quindi, data la dicitura si presuppone che, riducendo ipoteticamente le emissioni annuali globali di CO₂ a zero, le emissioni totali che si possono rilasciare in atmosfera si mantengono entro un determinato limite. Come si è visto, uno dei focus fondamentali di questo periodo e dei prossimi anni è riuscire a mitigare le emissioni di gas serra e di CO₂ per preservare il pianeta, seguito dal perseguimento di un approccio responsabile e oculato nell'uso delle risorse naturali e di conseguenza, promuovere un'ambiente sano e sostenibile per tutti, partendo dalla propria vita quotidiana, con piccoli accorgimenti che possono fare la differenza. Di per sé, la gestione dei gas inquinanti e la promozione del concetto di "sostenibilità" sono argomenti interconnessi tra loro. Per cui il tema che si andrà a trattare, offre una risposta chiave a questa sfida, premettendo però, che lo "zero netto" ad oggi non è ancora possibile raggiungerlo.

2 | L'Accordo di Parigi, entrato in vigore nel novembre 2016, è un importante impegno globale per affrontare il cambiamento climatico. I suoi principali punti includono:

- Obiettivo di limitare l'aumento della temperatura globale a ben sotto i 2°C rispetto ai livelli preindustriali, con sforzi per raggiungere 1,5°C;
- Presentazione di piani nazionali per ridurre le emissioni di gas serra;
- Revisione e aumento dell'ambizione dei piani d'azione ogni cinque anni;
- Trasparenza nella comunicazione dei progressi nell'attuazione degli obiettivi;
- Continuazione del sostegno finanziario ai paesi vulnerabili per ridurre le emissioni e aumentare la resilienza ai cambiamenti climatici.

Fonte: <https://www.consilium.europa.eu/it/policies/climate-change/paris-agreement/>

CAPITOLO 1.

La Decarbonizzazione e la Neutralità Climatica

Le tematiche protagoniste di cui: la “Decarbonizzazione” e la “Neutralità climatica” rappresentano i pilastri fondamentali per affrontare le sfide ambientali a livello globale, europeo e nazionale. Questi concetti, dunque, si basano sugli sforzi per mitigare il cambiamento climatico e costruire nei limiti del possibile, un futuro sostenibile per gli esseri viventi e il nostro pianeta.

L'analisi condotta su diversi articoli scientifici e varie tesi ha lo scopo di offrire una comprensione approfondita sulla “Decarbonizzazione”. In particolare, si cerca di definirne il significato e di chiarire il motivo per il quale questo processo sia essenziale per garantire uno scenario migliore anche alle prossime generazioni, a cui fa anche riferimento il *Rapporto Brundtland*³.

La “Decarbonizzazione”, come definita dalla tesi (*Razzuoli L., 2020*) [4] viene esplorata sotto tre punti di vista:

1. *Dal punto di vista scientifico*: si tratta della progressiva riduzione del rapporto tra atomi di carbonio (C) e atomi di idrogeno (H) all'interno delle fonti di energia utilizzate;
2. *In un contesto aziendale*: significa la cessazione o la riduzione delle attività che impiegano combustibili fossili, sostituendoli con soluzioni a basso impatto ecologico. L'obiettivo è quello di ridurre le emissioni rilasciate nell'atmosfera durante l'intera catena di produzione;
3. *Dal punto di vista energetico*: si attua una transizione verde, la quale rappresenta la costante diminuzione delle fonti energetiche fossili (quali carbone, petrolio e gas naturale), sostituite da fonti energetiche rinnovabili (FER) come: l'energia solare, eolica, idroelettrica e geotermica (*Verdolini E., 2022*) [5]. Infatti, queste forme di energia emettono una quantità di CO₂ di gran lunga inferiore o quasi nulla. Inoltre, si punta a migliorare l'efficienza nell'uso dell'energia per ridurre la domanda complessiva e, di conseguenza, le emissioni di CO₂ associate.

Questo processo può includere l'adozione di tecnologie più efficienti, come l'isolamento termico degli edifici (*Commissione europea, 2020*)[6], l'ottimizzazione dei processi industriali e dei trasporti (*Pozzi M. et al.*)[7], l'installazione urbana di reti di teleriscaldamento attraverso pompe di calore per il riscaldamento e il raffrescamento dei complessi edilizi (esempio impianti di TLR di 4° o 5° generazione), e via dicendo.

3 | Il rapporto “Il futuro di tutti noi” della Commissione Brundtland del 1987 promuove lo sviluppo sostenibile come risposta alla sfida globale di bilanciare i bisogni presenti e futuri. Si concentra sulla partecipazione di tutti nella definizione di politiche equilibrate ed equità nella distribuzione delle risorse. Il rapporto affronta temi come crescita economica, sicurezza alimentare, conservazione dell'ambiente e gestione delle risorse. In tre sezioni, esplora le preoccupazioni comuni, le sfide collettive e gli sforzi comuni per affrontare i problemi ambientali e di sviluppo a livello globale.

Fonte: <https://www.isprambiente.gov.it/files/agenda21/1987-rapporto-brundtland.pdf>

Siccome la maggior parte dell'inquinamento deriva dalle industrie, ad oggi è importante comprendere "se e come", queste aziende possano rispondere efficacemente alle sfide della "profonda decarbonizzazione", definita come:

"Il processo di riduzione delle emissioni di CO₂, quindi comprendendo anche la neutralità del carbonio entro il 2050, fino a raggiungere lo zero o quasi (80-100%). Questo obiettivo mira a limitare il riscaldamento globale a 1,5°C al di sopra dei livelli preindustriali, per prevenire scenari catastrofici come tempeste, siccità, inondazioni e gravi impatti economici e sociali". (Verdolini E., IPCC 2022) [5].

In sintesi, la decarbonizzazione è un processo volto a ridurre le emissioni di gas serra, principalmente la CO₂, mitigare il cambiamento climatico e limitare il riscaldamento globale.

L'argomento riguardante invece la "Neutralità climatica", come definita dal Consiglio dell'Unione Europea, rappresenta un obiettivo più ampio, che va oltre la semplice compensazione delle emissioni di anidride carbonica (CO₂) provenienti dalle attività umane. In mere parole, come il motto utilizzato dall'UE: "emettere meno e assorbire di più", è la chiave per raggiungere questo concetto entro il 2050.

Perciò, sono necessarie due azioni principali:

1. "Meno Emissioni": Questo implica che le emissioni di gas serra devono essere ridotte al minimo possibile, soprattutto per quelle legate all'uso di combustibili fossili.
2. "Assorbire di più": Nonostante tutti gli sforzi che si stanno attuando per ridurre le emissioni, alcune di esse saranno inevitabili. Pertanto, è importante considerare come neutralizzare o compensare queste emissioni residue. (European Council, 2022) [8]

Per definire meglio la differenza tra "neutralità climatica" e "neutralità carbonica":

- *Neutralità climatica*: Questo concetto bypassa la semplice mitigazione delle emissioni di CO₂. Si concentra infatti, sulla mitigazione stessa e la compensazione di tutte le emissioni di gas a effetto serra. Inoltre, la neutralità climatica implica anche misure per adattarsi ai cambiamenti climatici e preservare la biodiversità, affrontando gli impatti attuali e futuri del cambiamento climatico a scala globale.
- *Neutralità carbonica*: Questo termine è più specifico e si riferisce solo alla diminuzione delle emissioni di biossido di carbonio (CO₂) attraverso l'adozione di fonti di energia pulita e sostenibile, l'efficienza energetica e la transizione verso un'economia a basse emissioni di carbonio (Matthews J.B.R., et al. 2022) [9].

Si può constatare che, la neutralità climatica e la neutralità carbonica sono obiettivi distinti ma nello stesso tempo sono comunque intrecciati, ed entrambi i concetti richiedono azioni concrete per ridurre le emissioni di gas serra [Fig. 1] e adottare strategie per compensare o rimuovere le emissioni residue, contribuendo a mitigare gli effetti di questa alterazione climatica e a preservare il nostro pianeta e di chi lo abita.

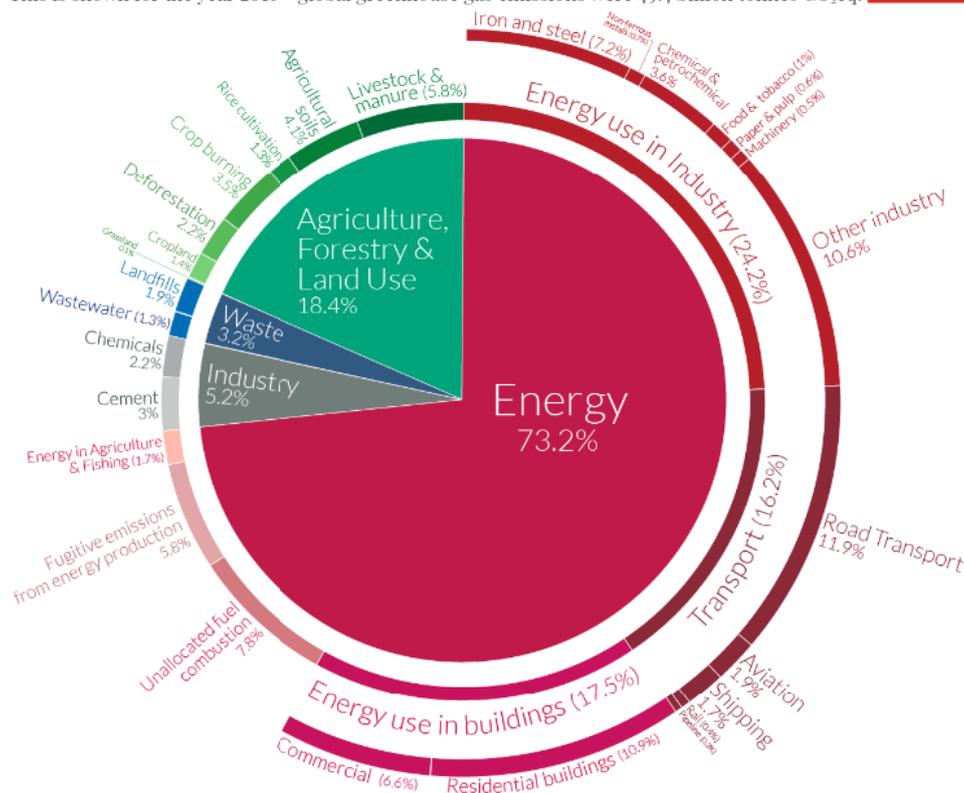
Per definire meglio, si esprime secondo un altro studio (Shabb K. et al., 2022) [10] che:

"La neutralità climatica si riferisce alla mitigazione e compensazione di tutte le emissioni di gas a effetto serra, mentre la neutralità del carbonio si riferisce solo alla mitigazione del biossido di carbonio (CO₂)."

Global greenhouse gas emissions by sector

Our World
in Data

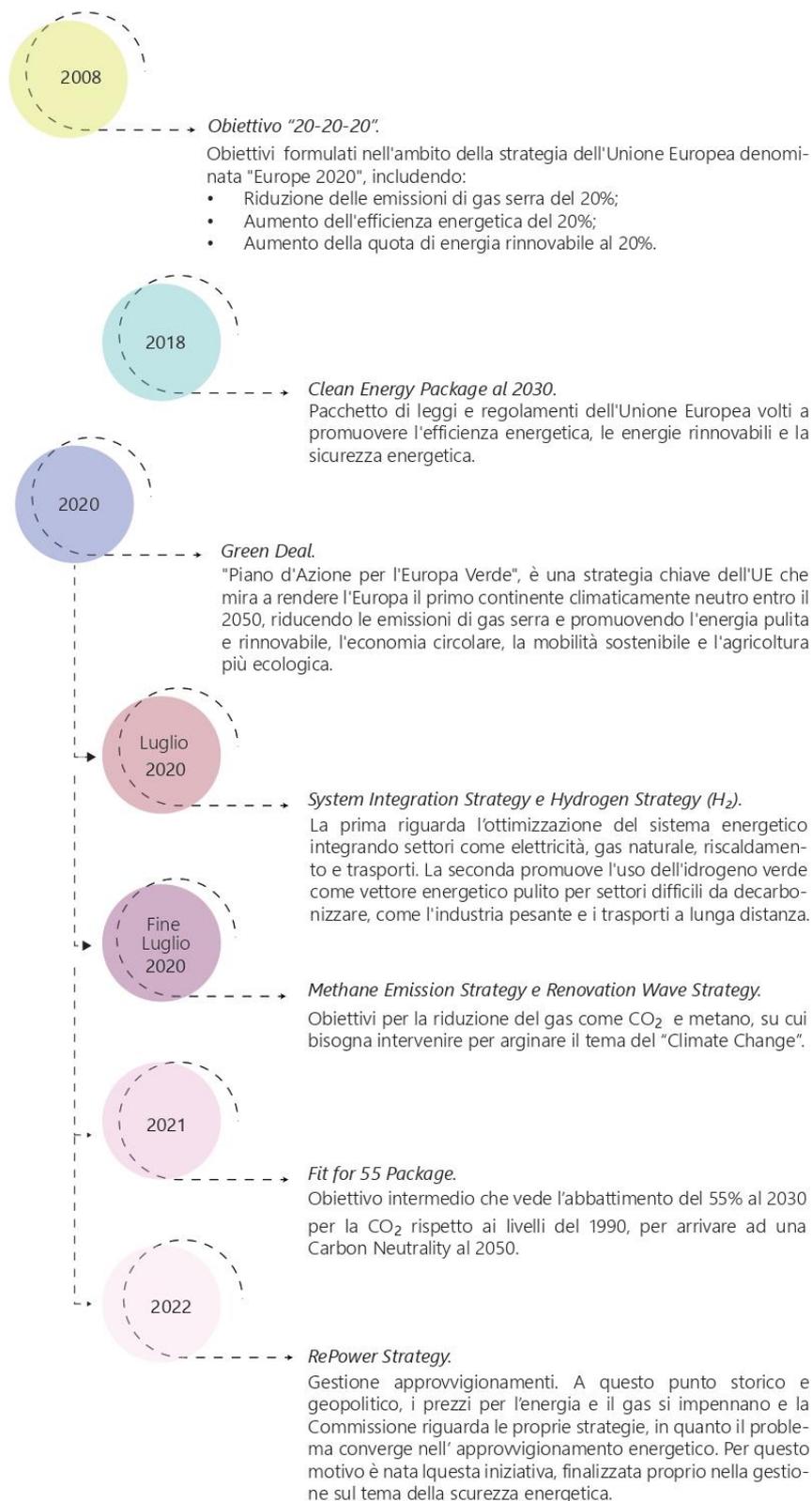
This is shown for the year 2016 – global greenhouse gas emissions were 49.4 billion tonnes CO₂eq.



[Fig. 1] Nell'immagine vengono ripartiti in percentuale i vari settori che contribuiscono all'aumento dei gas serra. Fonte: [Ritchie, H. Roser, M. e Rosado, P., 2020. *CO₂ and Greenhouse Gas Emissions* [Online]. Disponibile su <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>].

In figura 1, si può vedere come il settore dell'energia (73,2%), già nel 2020, occupa la maggior parte delle emissioni, di cui la porzione utilizzata per gli edifici in generale è pari a (17,5%), suddividendosi in unità commerciali con un 6,6% e le strutture residenziali con un 10,9%. Questa porzione dedicata all'edilizia arriva solo seconda all'energia utilizzata a scopi industriali (24,2%), mentre la restante parte è dedicata al settore dei trasporti (16,2%).

1.1 DIRETTIVE. Cenno alla rapida evoluzione della politica energetica europea



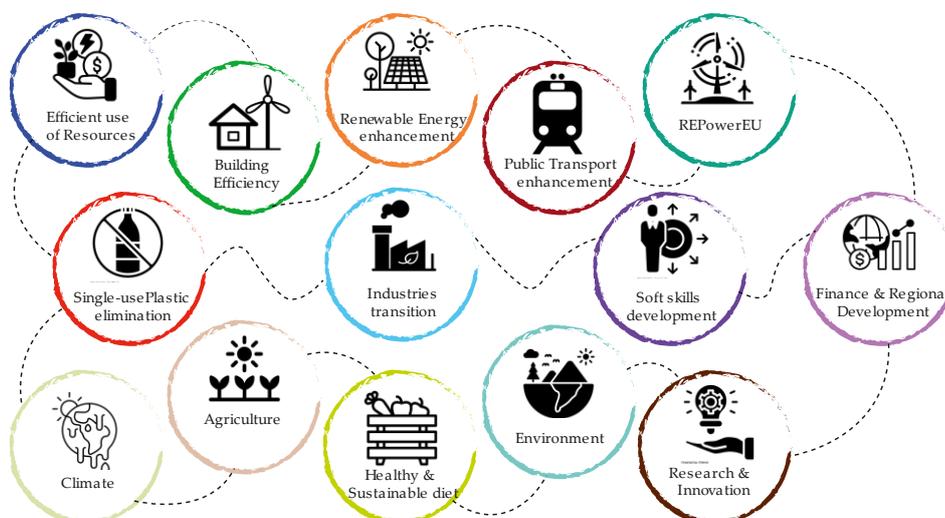
[Fig. 2] Rielaborazione personale su uno schema cronologico: le date e le direttive che hanno segnato i passi importanti nell'intera Unione Europea.

Nella [Fig. 2], vengono riportate in uno schema cronologico le Direttive più impattanti e prese come punti di svolta nella società odierna.

1.2 Il Green Deal Europeo

La transizione ecologica spicca anche su scala europea. A partire dalla fine del 2019, infatti, il Parlamento europeo ha annunciato la crisi climatica come modalità per presentare una nuova strategia denominata "Green Deal". Esso è parte integrante dell'Agenda 2030, creata dalle Nazioni Unite a livello mondiale e che comprende a sua volta i noti SDGs, i quali includono i 17 obiettivi. Il progetto prevede strategie che perdureranno dal 2019 al 2024, attraverso piani d'azione di cui si riassumono cinque proposte:

1. Promuovere la *biodiversità* e l'*economia circolare*: aria, acqua e suoli puliti, alimenti sani e a prezzi accessibili per tutti, prodotti più duraturi, che possono essere riparati, riciclati e riutilizzati (applicando le "3R" dell'Economia Circolare);
2. *Industria*: collaborare con i partner internazionali per migliorare gli standard ambientali mondiali con un occhio di riguardo per la transizione ecologica;
3. *Energia pulita e innovazione tecnologica*: rispettosa dell'ambiente e all'avanguardia affrontando la povertà energetica e le dipendenze da altri Paesi;
4. *Edilizia rinnovata*: attraverso le ristrutturazioni si avranno edifici più efficienti sotto un profilo energetico (decarbonizzando il settore dell'energia);
5. *Trasporti*: dovranno essere adeguati alle esigenze future riducendo le emissioni, rendendo sia il trasporto pubblico che quello privato il più possibile sostenibili.



[Fig. 3] Rielaborazione grafica personale delle aree di intervento proposte per il Green Deal europeo.

Si tratta quindi di un progetto ambizioso ma effettivamente necessario per preservare la salute, l'ambiente e l'economia, coinvolgendo perciò tutti i settori della società e richiedendo un grande impegno e dedizione da parte di tutti i Paesi dell'Unione Europea, ma un'ottima base che porterà alla fine ad un investimento importante per le generazioni che verranno [11].

Il focus fondamentale dovrà essere raggiunto dai 27 Stati membri, i quali dovranno impegnarsi per trasformare l'UE nel primo continente climaticamente neutro entro l'anno 2050 con il raggiungimento dello "zero netto" per le emissioni. Per riuscirci, però, si dovrà arrivare ad una riduzione delle emissioni di almeno il 55% entro il 2030 (preso come anno transitorio), rispetto ai

livelli del 1990. La questione viene approfondita secondo il nuovo intento per il Clima: “Pronti per il 55%” o “Fit for 55%”.

1.3 Il “Fit for 55%”

La “Normativa europea sul Clima” UE 2021/1119⁴ del Parlamento europeo e del Consiglio ha avuto l’iniziativa di portare tutti i settori alla neutralità climatica e alla decarbonizzazione entro il 2050, così anche per i gas inquinanti, con una riduzione del 55% rispetto ai livelli del 1990. In breve, questa proposta richiederà nei prossimi decenni una riduzione degli attuali livelli di emissioni di gas ad effetto serra (o *GHG-Greenhouse Gas Emissions*).

Tramite questa normativa, si è potuto formalizzare a luglio 2021, un pacchetto denominato “Pronti per il 55%” (o in inglese “*Fit for 55%*”), dove contiene al suo interno le proposte legislative per raggiungere entro il 2030 gli obiettivi descritti dal Green Deal, di cui questa normativa ne fa parte.

Il 2030, preso come anno determinante, ha il compito di essere una tappa intermedia per arrivare al secondo step finale del 2050.

L’obiettivo del “55%” è un traguardo complesso, in quanto si può immaginare che in trent’anni, dal 1990 al 2020, le emissioni dell’UE si sono ridotte solo del 20%. Mentre ad oggi, il Green Deal intende passare dal 20% al 55% solo in una decina di anni.

Già nel 2008, l’Unione Europea aveva mirato alla “neutralità climatica” attraverso la definizione del “Pacchetto Clima-Energia 20-20-20” con l’aspirazione di arrivare all’anno 2020 con i seguenti obiettivi:

- Ridurre del 20% le emissioni di gas ad effetto serra;
- Aumentare del 20% l’efficienza energetica;
- Un aiuto del 20% derivante dalle fonti energetiche rinnovabili (FER), il tutto entro l’anno 2020 (come il pacchetto “Clima-Energia 20-20-20”). [12].

⁴ | La “Normativa europea sul Clima” dell’UE, identificata con il numero 2021/1119, è un insieme di regolamenti e disposizioni volte a stabilire obiettivi e misure concrete per affrontare il cambiamento climatico all’interno dell’Unione Europea. Questa normativa si propone di promuovere la riduzione delle emissioni di gas serra, l’adozione di energie rinnovabili, l’efficienza energetica e altre azioni mirate a mitigare l’impatto ambientale. Tra gli obiettivi principali vi è quello di raggiungere la neutralità climatica entro un determinato periodo di tempo, fissato entro il 2050, ma come anno di transizione al 2030.

Fonte: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32021R1119>

Il Pacchetto Fit for 55% ha altri obiettivi precisi su cui concentrarsi:

1. Interventi sull'efficientamento energetico e utilizzo di fonti rinnovabili;
2. Uso del suolo e silvicoltura;
3. Condivisione degli sforzi e scambio di quote di emissione (ETS);
4. Infrastrutture per i combustibili alternativi;
5. Aumentare entro il 2030 la quota delle energie rinnovabili nel sistema energetico dell'UE (ad oggi prevista al 32%) arrivando almeno ad un 40% del consumo finale lordo di energia, per poi giungere ad un 49% entro la data prestabilita;
6. Incrementare l'obiettivo del risparmio energetico del 2030 (ad oggi stabilito al 32,5%), raggiungendo un:
 - 39% per quanto riguarda il consumo di energia primaria;
 - 36% per il consumo di energia finale rispetto al 2007.

Significa che quest'obiettivo propone inoltre:

- L'obbligo per gli altri Paesi UE di ristrutturare per ogni anno un 3% degli edifici pubblici rendendoli a "energia quasi zero" (NZEB, Nearly Zero Energy Building);
- Ridurre i consumi totali del settore pubblico (-1,7% all'anno, tra cui gli edifici);
- Integrazione di infrastrutture per i combustibili alternativi nei complessi immobiliari [13].

Quest'ultimo pacchetto è stato proposto in due parti:

1. *Luglio 2021*: puntando sull'efficienza energetica (EED-*Energy Efficiency Directive*), sulle energie rinnovabili (RED-*Renewable Energy Directive*) e sullo scambio dei permessi legati all'ETS (*Energy Trading System*);
2. *Dicembre 2021*: ha posto l'accento sulla riforma del pacchetto "gas" (*Gas Package*), sulla riforma inerente all'efficienza energetica degli edifici (EPBD-*Energy Performance of Buildings Directive*) e alla riduzione di metano nel settore energetico.

Nel contesto riguardante gli edifici e le energie rinnovabili è importante citare la:

- EED-*Energy Efficiency Directive*;
- RED-*Renewable Energy Directive*;
- EPBD-*Energy Performance of Buildings Directive*.

- **Direttiva EED – Energy Efficiency Directive**: Direttiva dell'Unione Europea 2012/27/UE, promuove l'efficienza energetica per raggiungere gli obiettivi climatici. L'obiettivo principale consiste in: *migliorare l'efficienza energetica del 20% entro il 2020 anche nei vari settori, partendo dall'edilizia, il trasporto e l'industria*. Futura rettifica: Direttiva 2018/844/UE [14];
- **Direttiva RED – Renewable Energy Directive (I)**: come già stipulato dalla direttiva EED, viene adottata il 23 aprile 2009 (Direttiva 2009/28/CE, che abroga le Direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE), stabilendo che entro il 2020 una quota obbligatoria del 20 % del consumo energetico dell'UE sarebbe dovuta provenire da fonti rinnovabili;
- Nel dicembre 2018, con il pacchetto "*Clean Energy Package*" è entrata in vigore (Direttiva (UE) 2018/2001) avente l'obiettivo di aiutare i Paesi europei a rispettare gli impegni di

riduzione delle emissioni assunti nel quadro dell'accordo di Parigi. Questo documento ha stabilito un nuovo step vincolante in termini di energie rinnovabili pari ad almeno il 32 % (con un rialzo del +14%);

- **Direttiva RED (II):** vede la modifica della RED I originaria. Nel luglio 2021, la Commissione ha proposto di aumentare la quota di energie provenienti da fonti rinnovabili nel mix energetico dell'UE al **40 %** entro il 2030 e promuovendo la diffusione dei combustibili rinnovabili, ad esempio l'idrogeno nell'industria e nei trasporti;
- **Direttiva RED (III):** Nel maggio 2022 viene integrato il piano "REPowerEU" per accelerare la transizione verso l'energia pulita in linea con la graduale eliminazione della dipendenza dai combustibili fossili russi, incrementando la sovranità energetica di ogni Paese europeo e diminuendo al contempo queste sostanze [Fig. 4]. La proposta fa riferimento all'installazione di pompe di calore, aumentando di conseguenza la capacità solare fotovoltaica e importando idrogeno rinnovabile e biometano per innalzare al **45 %** l'obiettivo di fonti energetiche rinnovabili per il 2030 e di puntare a nuovi obiettivi, tra cui:



[Fig.4] Rielaborazione personale. Obiettivi del Piano RePower EU.

Approfondendo:

Impianti di teleriscaldamento: Si tratta di infrastrutture capaci di distribuire energia termica atte a riscaldare e raffreddare case e strutture private e pubbliche. Offrono diversi vantaggi, tra cui *l'efficienza energetica, la riduzione di gas serra e la flessibilità nell'uso di varie fonti di energia rinnovabile come: biomassa, geotermia o cogenerazione*, per ridurre la dipendenza dai combustibili fossili. Questi sistemi sono spesso utilizzati in aree urbane dense o in contesti industriali. Infatti, la Commissione punta proprio verso i nuovi impianti di riscaldamento con lo scopo di trasmettere calore di scarto, generato da processi industriali, piuttosto che disperderlo nell'ambiente [13].

- **Direttiva RED (IV):** Nel marzo 2023 il Parlamento e il Consiglio hanno deciso informalmente di innalzare l'obiettivo per il 2030 in materia di fonti energetiche rinnovabili portandolo al **42,5 %**, mentre gli Stati membri puntano a raggiungere **il 45 %** [15].
- **EPBD- Energy Performance Buildings Directive:** Direttiva 2002/91/CE e 2010/31/UE che introduce l'Energy Performance Certificate (EPC) finalizzato a misurare la performance energetica degli edifici. Essa è basata sulla prestazione energetica nell'edilizia, contribuendo a raggiungere gli obiettivi di costruzione e ristrutturazione stabiliti nel Green

Deal europeo. Gli edifici che si formeranno attraverso questa normativa saranno costruzioni sicuramente migliori, soprattutto più dal punto di vista energetico, in quanto miglioreranno la qualità della vita degli utenti e riducendo la povertà energetica, apportando al contempo ulteriori benefici all'economia e alla società, come la salute, migliori livelli di comfort interno e posti di lavoro "green" [16].

- Il regolamento delegato (UE) n.244/2012 del 16/01/2012 che integra la Direttiva 2010/31/EU viene citata da (Fregonara E., 2015) [17], dove si istituisce un modello di riferimento per calcolare i livelli ottimali, nella sfera dei costi, per stabilire i requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici e degli elementi edilizi.

Le principali misure della nuova proposta sono riportate in [Fig. 5]:



[Fig. 5] Rielaborazione grafica personale che sintetizza le principali proposte della Direttiva EPBD.

Inoltre, per un immobile che viene venduto o affittato, è necessario rilasciare gli attestati di prestazione energetica e predisporre un'ispezione degli impianti di riscaldamento e condizionamento.

Esiste anche una valutazione per i dispositivi intelligenti, legati al discorso "domotica". Tuttavia, la direttiva ha introdotto requisiti sull'installazione di sistemi di automazione e controllo negli immobili e sui dispositivi che regolano la temperatura a livello ambientale. L'ambito si occupa anche della salute e del benessere degli utenti dell'edificio, ad esempio prendendo in considerazione la qualità dell'aria e la ventilazione [18].

Come ampliamento alla precedente "Fit for 55%", nel 2021 è stata revisionata la "Normativa sulla prestazione energetica degli edifici", (EPBD), con l'intento finale di ridurre le emissioni di gas nocivi e climalteranti, causati

soprattutto nel settore edilizio, attraverso lo sviluppo di un piano d'azione migliore e realizzando un insieme di edifici completamente sostenibili entro il 2050, definiti a "Emissioni Zero".

In breve, la descrizione spiega come questa tipologia di edifici, sia caratterizzata da un'elevata prestazione energetica. Come si vedrà nel capitolo successivo, il loro consumo è estremamente ridotto e totalmente soddisfatto attraverso l'uso di fonti rinnovabili, sia partendo da una scala più piccola, quindi a livello di edificio, ma anche in scala più ampia, come un quartiere o una comunità.

A partire dal 2027 e il 2030, questi nuovi modelli “a zero emissioni” dovrebbero puntare a divenire il nuovo punto di svolta per le future costruzioni residenziali e pubbliche.

Fino a queste date, vale a dire, all’adozione dei requisiti stabiliti per gli “edifici a emissioni zero” da marzo 2024, ogni nuova costruzione doveva almeno rispondere al criterio precedente a quello attuale, per cui puntare ad edifici “a Energia Quasi Zero”, ricondotti agli “NZEB”.

Per attuare queste modifiche dovranno essere stabiliti degli incentivi finanziari utilizzabili da tutti gli Stati membri UE (esempio: fondo sociale per il clima o fondi per la ripresa e la resilienza).

Negli ultimi anni, precisamente dal 2020 si è potuto constatare un aumento su casi di edifici in ristrutturazione, facente parte appunto della strategia adottata: “Un’ondata di ristrutturazioni”, attraverso l’attuazione di norme minime di prestazione energetica, con lo scopo di mantenere bassi i consumi energetici nei complessi residenziali. Questa proposta è poi sfociata in quello che viene definito “Piano REPowerEU” registrato a maggio del 2022 (facente parte della Direttiva RED III).

Dalle fonti estrapolate dai documenti della Commissione, gli edifici presenti nell’UE contribuiscono [Fig. 6] per il:

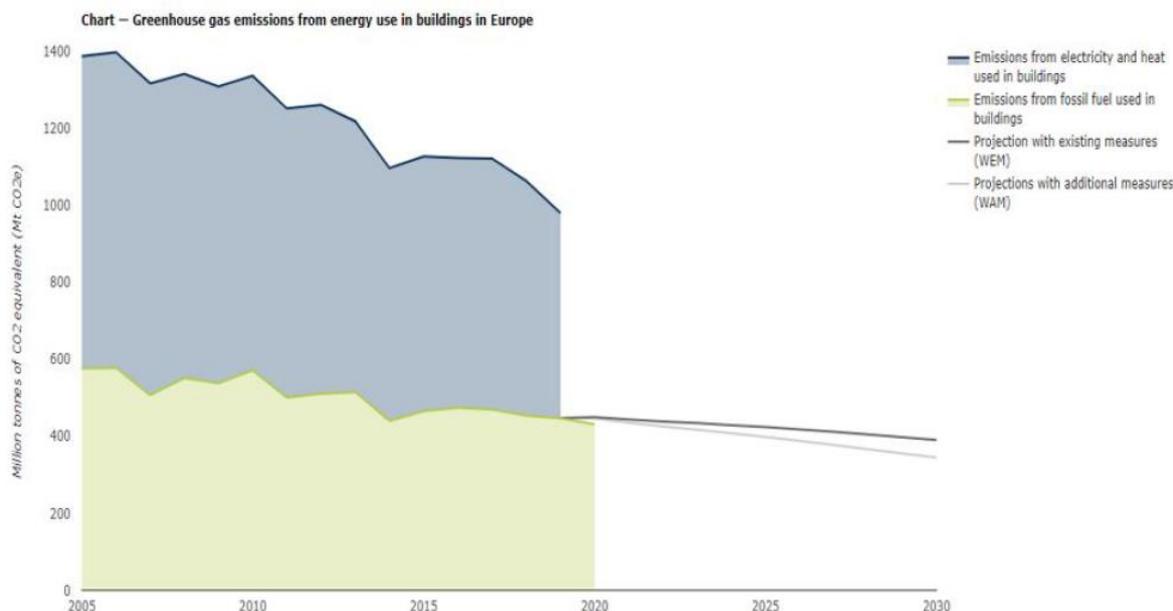


[Fig. 6] Rielaborazione grafica personale inerente le percentuali sul consumo energetico di un edificio.

Secondo la Commissione europea il tasso di ristrutturazione annua è incrementato solo dell'1%, e in questo caso l'obiettivo finale consiste nel prevederne il raddoppio.

Per favorire questo punto di arrivo, sono necessari alcuni accorgimenti che riguardano i singoli edifici, come i sistemi di riscaldamento e di raffrescamento, quindi la tipologia di impianto, ma anche un ottimo isolamento termico per cui l'applicazione di cappotti termici in facciata o la sostituzione degli infissi esterni.

Questo settore, per rientrare nella soglia del “55%” entro il 2030, dovrebbe ridurre le emissioni di almeno un 60%. Di seguito viene riportata una tabella [Fig. 7] sulle emissioni di gas ad effetto serra derivanti dall’utilizzo di energia negli edifici in tutta l’UE [13].



[Fig. 7] Emissioni di gas ad effetto serra derivanti dai consumi di energia degli immobili nell’UE. La parte in **giallo** indica le emissioni prodotte dal consumo di combustibili fossili e in **blu** quelle prodotte da elettricità e riscaldamento. A lato, sono presenti due traiettorie che indicano le riduzioni attese con le misure esistenti (linea blu) e con le misure addizionali previste (linea grigia). Fonte: Agenzia europea per l’Ambiente, 2021. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/greenhouse-gas-emissions-from-energy/assessment>

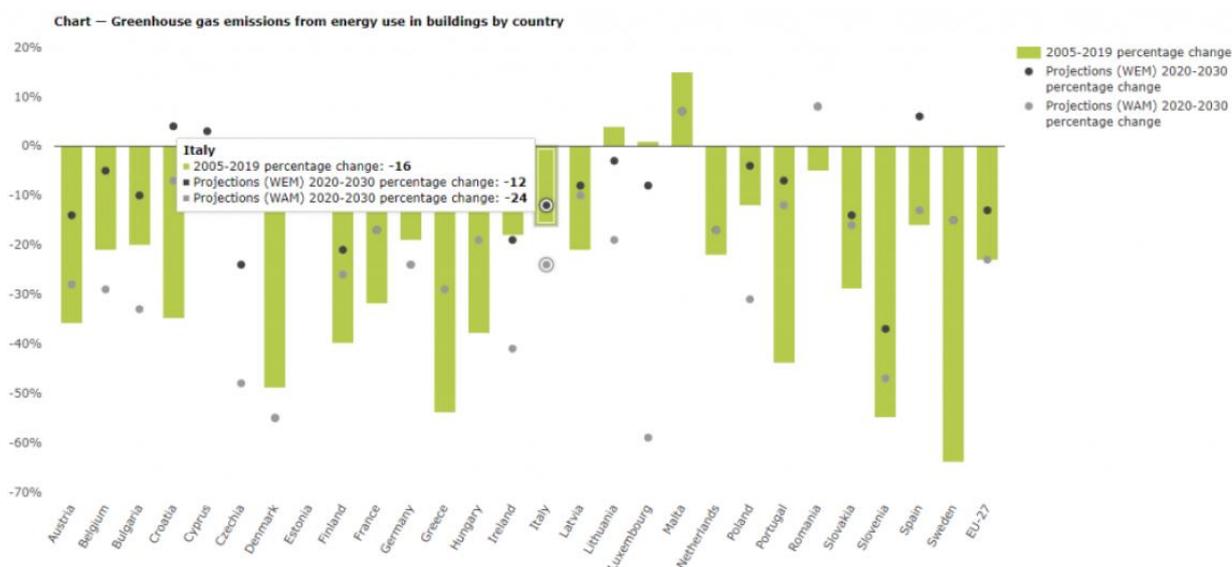
Il secondo grafico [Fig. 8], invece, mostra l’analisi sulla riduzione percentuale dei singoli Stati europei tra l’anno 2005 e il 2019. Come si evince, in questo lasso di tempo, le emissioni da parte degli edifici presenti nel nostro paese si sono ridotte del 16%, mentre le proiezioni future per arrivare al 2030 prevedono un ulteriore ribasso, ancora del 12% solo con le misure esistenti, ma se si volessero restringere ancora di più le norme, si arriverebbe ad un 24%.

Dal grafico si notano anche gli altri Stati membri come la Spagna che è allo stesso livello dell’Italia con una riduzione pari al 16%, la Germania solo un 19%, mentre la Francia ha raggiunto una diminuzione più favorevole, pari al 32%. I primi paesi in classifica sono la Svezia, la Slovenia, la Grecia, la Danimarca e il Portogallo [13].

Sempre secondo gli studi [13] in Europa in un anno vengono edificati:

- 85 milioni di m² per il settore degli edifici residenziali;

- 40 milioni di m² per il settore degli edifici pubblici.



[Fig. 8] Emissioni di gas ad effetto serra derivanti dall'uso di energia negli edifici in tutti gli Stati dell'UE tra l'anno 2005 e il 2019, con prospettive di riduzione future entro il 2030.

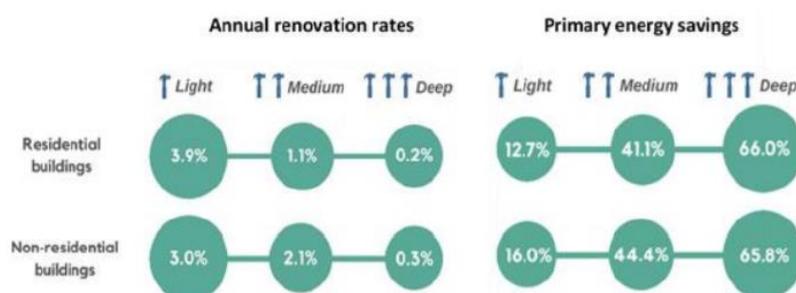
Fonte: https://documenti.camera.it/leg19/dossier/testi/AT017.htm?_1694765841499

Purtroppo, questi numeri non rientrerebbero nel quadro finale della “valutazione d’impatto”, ideato per le varie stime e utile, comunque, per riuscire ad arrivare ad una sufficiente decarbonizzazione e una conseguente neutralità climatica.

Da questa valutazione europea emergono chiaramente le limitazioni legate al problema delle ristrutturazioni “leggere”, vale a dire i complessi edilizi che alla fine dei lavori presentano un impatto davvero limitato in termini di risparmio energetico primario. Questo significa che gli interventi più importanti, chiamati “profondi”, come per esempio la sostituzione di un impianto, sono di gran lunga inferiori.

Questa tipologia di ristrutturazione più importante però, sarebbe capace di generare risparmi di energia primaria oltre il 40%, se non al 60%.

L'illustrazione grafica successiva [Fig. 9] fornisce una rappresentazione dei risparmi energetici associati a ciascun tipo di intervento di ristrutturazione edilizia, delineando l'efficacia dei diversi approcci.



[Fig. 9] Tasso annuale di ristrutturazioni e risparmio energetico. Fonte: Camera dei deputati Ufficio Rapporti con L'unione Europea, XIX Legislatura. Documentazione per le Commissioni, Dossier n. 17, 13 febbraio 2023. “La revisione della direttiva sulla prestazione energetica degli edifici.”

A livello europeo, la trasformazione energetica degli edifici rappresenta un'opportunità di vasta portata, promettendo benefici significativi sia per il settore edile che per l'intera economia.

Tuttavia, a livello nazionale, come nel caso dell'Italia, la propensione a destinare considerevoli risorse finanziarie per la "profonda" ristrutturazione energetica degli edifici, data la fragilità della sua economia che si è potuta riscontrare su diversi fronti negli ultimi anni, probabilmente non figura ancora tra le massime priorità del Paese.

Nonostante ciò, l'intento per l'Italia è cercare di perseguire, come gli altri Stati membri, le Direttive europee e di portarle a termine anche se in tempistiche più lunghe. Di seguito viene approfondita la "Normativa sulla prestazione energetica degli edifici".

1.4 Direttiva EPBD

La Direttiva EPBD, (in inglese, *Energy Performance of Building Directive*) è importante in quanto punta a migliorare l'efficienza energetica delle unità edilizie e a ridurre le emissioni di gas serra entro il 2050, considerando le condizioni climatiche esterne e locali, nonché la qualità degli ambienti indoor, cercando inoltre di migliorare il profilo economico. Secondo l'Art. 2, punto 50 [13], la normativa comprende migliorie riguardanti le funzioni per il riscaldamento, raffrescamento, acqua calda ad uso domestico (ACS), la ventilazione, l'illuminazione e altri servizi utili per il risparmio energetico.

Lo storico della direttiva parte dal 2002, subendo diverse modifiche:

1. *Direttiva 2002/91/CE*: Prima versione adottata nell'anno 2002, stabilendo i requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici, l'introduzione dei certificati energetici (APE- Attestato di Prestazione Energetica, includendo la classificazione energetica con una valutazione in una scala di lettere (da A a G), dove "A" rappresenta un'alta efficienza energetica e G comprende la più bassa e infine il consumo energetico, cioè la stima di energia totale consumata dall'edificio per il riscaldamento, il raffrescamento, l'illuminazione e altre necessità;
2. *Direttiva 2010/31/UE*: Questa direttiva adottata successivamente, nel 2010, è stata una revisione significativa, in quanto ha introdotto nuovi requisiti per promuovere gli edifici a "energia quasi zero" (NZEB), migliorando gli standard minimi di prestazione energetica e inoltre ha introdotto l'obbligo di ristrutturare gli edifici esistenti;
3. *Revisione del 2018 (Direttiva 2018/844/UE)*: è stata implementata per allineare la direttiva agli obiettivi più ambiziosi in materia di efficienza energetica, rimpiazzando e abrogando la direttiva del 2010/31/UE. Tale proposta ha introdotto disposizioni relative all'introduzione di nuove norme minime di prestazione energetica, i passaporti di ristrutturazione e i piani nazionali per gli edifici, nonché i nuovi "edifici intelligenti" e le infrastrutture per la mobilità elettrica sostenibile.
4. *Rifusione EPBD 2023*. Testo modificato nel 2023 e approvato a marzo 2024 dal Parlamento europeo e dal Consiglio, sulla prestazione energetica dell'edilizia. Per descrivere i principali obiettivi di questa modifica, si parte dall'Accordo di Parigi emanato nel 2015 dall'UE, che come già enunciato, si impegna a mantenere l'aumento medio della temperatura globale per il 2030, al di sotto dei 2 °C rispetto ai livelli preindustriali, con l'obiettivo di limitarlo a 1,5 °C riducendo gli impatti avuti dai cambiamenti climatici nell'ultimo decennio. L'accordo politico è stato raggiunto il 7 dicembre 2023. Inoltre, un focus da considerare riguarda proprio i nuovi "Zero Emission Buildings" o Edifici ad emissioni zero.

In sintesi, le disposizioni della direttiva includono:

- Stabilire un quadro comune per il calcolo della prestazione energetica degli edifici, assicurandosi che gli attestati riflettano la situazione climatica ed energetica dei complessi edilizi su base annua;
- Definire requisiti minimi per la prestazione energetica degli edifici nuovi, esistenti e ristrutturati;
- Implementare norme per elementi edilizi, sistemi tecnici e involucri quando vengono rinnovati o sostituiti;
- Valutare il potenziale di riscaldamento globale (GWP, Global Warming Potential) nel ciclo di vita delle strutture, cruciale per valutare il contributo complessivo all'emissione di gas serra e trattenute nei materiali da costruzione, insieme alle emissioni dirette e indirette rilasciate successivamente nella fase di utilizzo;
- Promuovere l'energia solare e altre energie rinnovabili nelle unità edilizie;
- Gradualmente eliminare l'uso dei combustibili fossili per gli ambienti indoor;
- Introdurre passaporti di ristrutturazione e piani nazionali di ristrutturazione;
- Sviluppare infrastrutture di mobilità sostenibile;
- Promuovere edifici intelligenti e soluzioni basate sulla natura per migliorare il risparmio energetico e l'adattabilità degli spazi pubblici;
- Garantire la loro certificazione energetica e ispezioni periodiche dei sistemi di riscaldamento, ventilazione e condizionamento d'aria, migliorando la qualità negli ambienti interni;
- Implementare sistemi di controllo indipendenti per gli attestati di prestazione energetica;
- Utilizzare materiali naturali e a basso impatto ambientale per la costruzione, come il legno e la progettazione di pareti e tetti verdi capaci di trattenere acqua piovana, ridurre l'effetto "isola di calore" e abbattere le emissioni di PM 10 e 2,5, il tutto per soluzioni edilizie alternative, includendo l'economia circolare e le tecniche di costruzioni passive;
- Ridurre il consumo energetico e aumentare l'utilizzo di energie rinnovabili nell'edilizia per ridurre le emissioni di gas serra e combattere la povertà energetica nell'Unione, oltre a rafforzare l'efficienza energetica e le fonti rinnovabili per ridurre la dipendenza dai combustibili fossili e ottenere benefici ambientali, economici e sociali;

Dovrebbero essere adottate delle metodologie consone sia a livello nazionale, sia regionale e locale, comprendendo:

1. Le caratteristiche termiche dell'edificio;
2. Il tipo di impianto di riscaldamento e condizionamento;
3. L'utilizzo di energie rinnovabili;
4. Sistemi di automazione e controllo;
5. Recupero del calore dalle acque reflue;
6. Ventilazione;
7. Raffrescamento;
8. Recupero di energia;

9. Soluzioni passive di riscaldamento e raffrescamento, così da ridurre il consumo di energia proveniente da combustibili fossili;
10. Sistemi di ombreggiamento;
11. Qualità dell'ambiente interno;
12. Illuminazione naturale;
13. Caratteristiche e conformazioni architettoniche.

Il divieto graduale dei combustibili fossili negli edifici sta a poco a poco diventando una strategia chiave per ridurre la dipendenza energetica, abbattere i costi per i cittadini e mitigare l'inquinamento atmosferico. L'usufrutto degli impianti implementati ad oggi in ogni condominio, dovrebbero essere eliminati entro il 2035-2040, come da piani europei.

Si spiega in questa parte, il motivo per cui si punta alla "ristrutturazione profonda", già citata in precedenza, approfondendo la proposta denominata "ondata di ristrutturazioni".

Si divide in: "*Ristrutturazione profonda*" o di I Livello che prevede, come da articoli della EPBD, la capacità di seguire il principio dell'efficienza energetica riuscendo a ridurre le emissioni complessive in modo significativo, tra cui alcune azioni:

- L'isolamento completo delle murature esterne, coperture e pavimentazioni;
- Isolamento delle fondazioni e ponti termici;
- Riconsolidamento strutturale (migliorie per la resistenza sismica e la stabilità dell'edificio);
- Sostituzione completa degli impianti di riscaldamento e raffrescamento ad alta efficienza come pompe di calore geotermiche o impianti idraulici ed elettrici;
- Introduzione di fonti di Energia Rinnovabile (come pannelli solari fotovoltaici o termici per la produzione di energia rinnovabile);
- Sistemi di accumulo per ottimizzare l'uso dell'energia prodotta dalle fonti rinnovabili;
- Automazione e Smart Building tramite l'installazione completa di sistemi di automazione per il controllo dell'illuminazione, riscaldamento e ventilazione negli ambienti interni, migliorando allo stesso tempo l'efficienza operativa e la qualità della vita degli utenti.

La ristrutturazione dedicata all'impianto è un punto a favore per sostenere la decarbonizzazione in tutta l'UE. Al fine di garantire questa ristrutturazione con conseguente riduzione di almeno il 60% della domanda per l'energia primaria dedicata agli edifici, portandoli al livello stabilito come "Zero Emission Buildings", si segue che:

1. **entro** il 1° gennaio 2027 un edificio dovrà già aver raggiunto l'obiettivo NZEB, a energia quasi zero;
2. **dal** 1° gennaio 2027 comincerà la prerogativa per gli "edifici a zero emissioni" [13].

Questo tipo di ristrutturazione tiene conto degli interventi migliorativi legati all'efficienza energetica, ma senza un rifacimento completo, come per esempio l'installazione di nuovi infissi esterni.

Mentre, la "*Ristrutturazione importante*" (o di II livello), è differenziata dalla prima, in base allo Stato membro:

1. Il costo complessivo del riadeguamento, per quanto riguarda l'involucro dell'edificio o i sistemi tecnici per l'edilizia, supera il 25 % del valore dell'edificio, escluso il valore del terreno sul quale è situato;
2. Secondo gli articoli n. 5,6,8 della Direttiva, la modifica riguarda più del 25 % della superficie dell'involucro dell'edificio.

Si riassume che le ristrutturazioni importanti sono interventi che coinvolgono solo una parte dell'edificio senza modificare radicalmente la struttura o l'intero sistema energetico, tra cui:

- Isolamento termico: applicazione esterna del cappotto termico, tramite materiali isolanti, sulle pareti perimetrali dell'unità immobiliare;
- Isolamento della copertura;
- Sostituzione di infissi esterni con l'installazione di finestre e porte-finestre ad alta efficienza energetica;
- Aggiornamenti di impianti tecnici: come gli impianti di riscaldamento, per esempio una sostituzione di vecchie caldaie con modelli più efficienti oppure il rinnovo degli impianti di raffrescamento con nuovi sistemi di climatizzazione;
- Riqualificazione degli impianti elettrici: per l'illuminazione si opta ad una sostituzione delle vecchie lampadine con LED a basso consumo o migliorie al quadro elettrico.

La scelta tra un tipo di ristrutturazione o l'altra dipende dalle condizioni iniziali dell'edificio, dagli obiettivi che si vogliono raggiungere per il tema sull'efficienza energetica e sostenibilità, le tempistiche, ma soprattutto e tra la più importante, le risorse economiche disponibili da parte delle utenze.

Vi sono altri punti fondamentali esistenti in questa normativa e che meritano di essere analizzati, come:

- *Lo sfruttamento del calore residuo*, di cui è necessario un approfondimento e che riguarda il suo utilizzo in modo efficiente, cosicché, il calore rimanente dei sistemi di produzione di acqua calda sanitaria domestica (esempio docce o altri usi), possa offrire una delle tante opportunità per un ulteriore risparmio;
- Da prendere in considerazione, vi è anche il tema della *povertà energetica*, purtroppo ad oggi molto sentito in diverse realtà, come anche solo pensare alle singole città e ai quartieri che la compongono. Le azioni fino ad ora citate dovrebbero essere riportate anche in queste zone e in quartieri vulnerabili (composta da famiglie poco agiate), il tutto per effettuare delle migliorie attraverso l'individuazione di aree più piccole e meno sviluppate (rurali e urbane) che si ritrovano inglobate in distretti più grandi e più avanzati. Queste microzone formate da unità immobiliari inefficienti energeticamente hanno problemi legati all'illuminazione, al riscaldamento e al raffrescamento. Molte delle problematiche come muffe, marciume e umidità contribuiscono a creare ambienti poco salubri, portando a complessi di pessime condizioni energetiche.

Per raggiungere la decarbonizzazione però, ci si ricollega al discorso precedente riguardante la vasta ristrutturazione energetica dei complessi immobiliari ancora inefficienti, i quali, secondo delle statistiche riportate all'interno dell'EPBD, è *pari al 75%* del totale edificato.

Secondo una prospettiva più ampia, è importante quindi, sostenere la ristrutturazione a scala distrettuale per accelerare il processo in modo più efficiente ed economico possibile e magari in un futuro poter raggiungere un buon livello creando nuove comunità energetiche ed altamente performanti, arrivando ad un approvvigionamento di energia rinnovabile prodotta in loco (esempio pompe di calore o tecnologie solari, autoconsumo, recupero dell'energia di scarto) diminuendo la povertà energetica di ogni singolo edificio.

Per ottenere complessi edilizi a zero emissioni entro l'anno 2050 secondo l'UE, si devono pensare nuove soluzioni impiantistiche affiancati agli impianti già esistenti, delle soluzioni più "green" e sostenibili come le fonti rinnovabili:

- Solare termico,
- Solare fotovoltaico,
- Impianti geotermici e pompe di calore,
- Impianto idroelettrico,
- Biomassa

Tutto ciò può essere implementato soprattutto per gli immobili selezionati con una classe energetica peggiore.

Infatti, grazie a delle norme minime di prestazione energetica si potrà, con le dovute tempistiche, arrivare all'eliminazione delle unità immobiliari che presentano performance scadenti tramite le modifiche edilizie. Le classi energetiche di queste unità immobiliari sono pari alla lettera "G" e la percentuale totale dovrà essere uguale al 15% su tutto il parco immobiliare in ogni Stato membro. Al contrario, quelli con la classe migliore denominata "A" dovrà essere pari ai nuovi complessi "ad emissioni zero".

Quindi, ci si dovrebbe dedicare alla "ristrutturazione profonda" come obiettivo principale, definendo quest'ultima come una iniziale trasformazione degli edifici a "energia quasi zero" quindi NZEB, fino al processo finale che ne definisce le migliorie, sostituendo quest'ultimo concetto con quello nuovo in "edifici a zero emissioni" o ZEB.

I miglioramenti dettati dalla normativa, non solo riguardano le prestazioni energetiche, ma si estendono anche alla qualità degli ambienti interni e alla promozione di pratiche sostenibili come la circolarità e la resilienza ai cambiamenti climatici.

Tra gli obiettivi principali:

- Aumento degli standard ambientali e sanitari,
- Il potenziamento della sicurezza antincendio ed elettrica;
- L'eliminazione di sostanze pericolose come l'amianto;
- Favorire l'accessibilità per le persone con disabilità;
- Potenziamento dei sistemi di assorbimento del carbonio, ad esempio tramite l'implementazione di pareti o tetti verdi, che contribuiscono a mitigare gli impatti ambientali negativi e costi più compatibili per gli utenti.
- Per quanto riguarda l'intero distretto, la ristrutturazione offre una visione completa e sistemica per migliorare l'efficienza energetica e la sostenibilità in gruppi di edifici condivisi, come i complessi residenziali urbani. Questi approcci comprendono il campo dell'energia, trasporto e ambiente, promuovendo perciò soluzioni come la mobilità verde e i sistemi di teleriscaldamento e teleraffrescamento, arrivando alla riduzione delle emissioni di gas serra a livello distrettuale. Inoltre, si contribuisce a contrastare la povertà energetica su vasta scala, migliorando complessivamente la qualità della vita delle comunità coinvolte.

A farne parte dovrebbero essere anche gli edifici storici. La Commissione, infatti, dovrebbe fornire delle linee guida per la ristrutturazione di queste tipologie edilizie rimanendo nel rispetto della loro conservazione ma anche degli obiettivi ecologici.

Infatti, secondo l'Art.3 dell'EPBD [13] del documento di riferimento, include l'analisi del patrimonio immobiliare nazionale per i vari tipi di edifici, compresi quelli storici o protetti, e valutando epoche

di costruzione e zone climatiche. Si vede anche la disponibilità di materiali da costruzione, definendo obiettivi per l'uso circolare dei materiali e per l'eliminazione graduale dell'uso di combustibili fossili entro il 2035.

1.5 L' Edificio a "Emissioni Zero"

Secondo l'Art. 2 e allegato III della Direttiva proposta dall'UE [13] come già accennato, definisce che cos'è un edificio a emissioni zero (*Zero Emission Building* - ZEB).

Riassumendo un edificio ZEB è:

Un edificio caratterizzato da un'elevata prestazione ed efficienza energetica, in cui il consumo minimo di energia è completamente soddisfatto da:

1. *Fonti rinnovabili locali,*
 2. *Da un sistema di teleriscaldamento/teleraffrescamento, o fonti rinnovabili vicine ma collegate da una rete come da (UE)2018/2001;*
 3. *Da comunità energetiche (come definito nell'allegato I della Commissione europea).*
- Questi complessi non generano emissioni di CO₂ proveniente dai classici combustibili fossili".*

La prestazione energetica di questa tipologia di immobile è misurata in kilowattora per metro quadro all'anno [kWh/m²a], rappresentando il consumo di energia primaria per unità di superficie coperta annuale, perciò un bilancio netto annuale nullo.

Dunque, l'allegato III di questa proposta stabilisce le direttive per definire un edificio "a zero emissioni", in base alle quali il consumo totale annuale di energia primaria, (vale a dire il totale di parte energetica che deriva da fonti rinnovabili e non rinnovabili) che non ha ancora avuto trasformazioni o vari processi di conversione [13], non deve superare i massimi parametri variabili per tipologia di edificio (ma possono comprendere quelli residenziali, gli uffici e anche edifici con funzione non residenziale) e area climatica dell'UE (che vengono evidenziate in quattro tipologie: oceanica, nordica, continentale e mediterranea).

Ad esempio, l'Italia viene circoscritta in una zona mediterranea. Qui, gli edifici residenziali ex novo e classificabili come *Zero Emission Building* devono avere un consumo energetico totale annuo inferiore a 60 kWh/m²a, mentre per gli uffici il limite è di 70 kWh/m²a. Si evince che tali restrizioni variano in base alla tipologia dell'area climatica.

A questo è importante allegare la conoscenza della Legge 10/91 con le "Norme per l'attuazione del Piano energetico nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia". Nato con l'intento di razionalizzare l'uso dell'energia per il riscaldamento. È una legge importante che detterà il futuro di tutta la politica del risparmio energetico, ponendosi di regolamentare il settore termotecnico: si propone un percorso per la valutazione del bilancio energetico invernale di un dato edificio in cui vi sono apporti e dispersioni di calore: la somma algebrica tra questi dati rappresenta il bilancio energetico [19].

All'interno della normativa vengono specificate *date* importanti che scandiscono gli obiettivi di marcia:

La missione che punta ad arrivare agli ZEB deve essere stipulata entro il 30 giugno 2025. In sintesi, si deve garantire l'ammmodernamento degli edifici esistenti secondo gli obiettivi di decarbonizzazione al 2050, mirando a trasformarli quindi in edifici ZEB. Stessa cosa per raggiungere la neutralità climatica, attraverso le stime sui risparmi energetici, si deve arrivare

all'eliminazione graduale dei combustibili fossili generati per la maggior parte dagli impianti di riscaldamento e raffrescamento.

Il piano deve includere:

1. Una valutazione del consumo di energia primaria e finale di tutto il parco immobiliare nazionale;
2. Gli edifici residenziali devono raggiungere classi di prestazione energetica superiori alle classi F ed E, entro le annate 2030/2033, mentre gli edifici pubblici e non residenziali entro gli anni 2027/2030.
3. L'obbligo di eliminare i combustibili fossili provenienti dal riscaldamento e dal raffrescamento, si pone entro il 2040.

Essi diventeranno il nuovo standard del futuro, andando a rimpiazzare il concetto dei vecchi NZEB.

Attestati di prestazione energetica:

Questi nuovi complessi dovranno essere dotati di un attestato di prestazione energetica, conosciuto come APE. Un documento dove viene indicato il potenziale di riscaldamento globale del ciclo di vita (GWP-Global Warming Potential).

Il GWP sostanzialmente è definito come misura utilizzata per valutare il contributo di un gas ad effetto serra rispetto a quello del biossido di carbonio (CO₂) su un determinato periodo di tempo. Come già accennato, gli attestati APE devono includere, oltre alla prestazione energetica dell'edificio, anche i valori (espressi in lettere) che fungono da riferimento, associabili al range di consumo totale di un dato immobile. Perciò, questo si applica anche agli edifici NZEB e ZEB, specificando la classe a cui appartiene la struttura e variando dalle classi "A, B, C, D, E, F, G".

In generale: la "A" indica per esempio gli edifici a emissioni zero e quindi con alta efficienza energetica mentre la classe "G" rappresenta la classe peggiore di tutta la scala, vale a dire le strutture che purtroppo, sono molto energivori per riuscire a mantenere condizioni di comfort interno ideale e non hanno avuto modo di apporre ristrutturazioni per svariati motivi (povertà energetica o altro), ma che prossimamente dovrà rappresentare solo più il 15% degli edifici, come spiegato. Inoltre, sono spesso caratterizzati da un cattivo isolamento termico, composti da inefficienti sistemi di riscaldamento e raffrescamento, e apparecchiature obsolete. Essi possono contribuire in modo significativo all'incremento dei costi e all'impatto ambientale negativo dovuto alle emissioni di gas serra.

La validità massima di questo documento, rilasciato anche in forma digitale per nuove costruzioni, vendite e locazioni, viene ridotta a cinque anni, salvo per gli edifici con classificazione energetica A, B o C, per i quali rimane di dieci anni.

I punti fissati:

A partire dal 2022 si riassume che per gli edifici di nuova costruzione:

- Pubbliche: dovranno essere a emissioni zero a partire dal 2028;
 - Residenziali: dovranno essere a emissioni zero a partire dal 2030;
 - Eccezioni per: immobili storici, di culto e quelli utilizzati a scopi di difesa.
-

Mentre per gli edifici già esistenti:

- *Le strutture non residenziali:* limite massimo basato sul consumo di energia primaria, stabilendo che:
-

- Primo limite fissato all'anno 2030 con le prestazioni peggiori (Classe G), dove il loro consumo totale dovrà essere inferiore al 15%;
- Il secondo limite, previsto al 2034 per le altre categorie (superiori alla G) riguarda il consumo totale che si dovrà attenere al di sotto del 25%.
- *Per gli edifici residenziali*, con la proiezione futura al 2050, si è previsto che il loro consumo medio di energia primaria dovrebbe corrispondere con quanto segue:
 - Gli immobili dovranno, entro il 2033, scalare alla classe di prestazione energetica D;
 - Entro il 2040, il consumo medio di energia primaria degli edifici residenziali dovrebbe raggiungere un valore determinato a livello nazionale.

Secondo quanto emanato dal Consiglio si aggiungeranno due nuove categorie:

- "A0" corrispondente agli Zero Emission Buildings;
- "A+" per edifici Zero Emission Buildings che contribuiscono nel sostenere la rete energetica dalle loro fonti rinnovabili locali.

Inoltre, si stabilisce una nuova regola per l'installazione di impianti solari per ottimizzare il potenziale di produzione di energia:

- Entro il 31 dicembre 2026, su tutti i nuovi edifici pubblici e non residenziali con una superficie coperta utile superiore a 250 m²;
- Entro il 31 dicembre 2027, su tutti gli edifici pubblici e non residenziali esistenti sottoposti a ristrutturazioni importanti o profonde con una superficie coperta utile superiore a 400 m²;
- Entro il 31 dicembre 2029, su tutti i nuovi edifici residenziali.

1.6 Differenze tra ZEB ed NZEB

Gli ZEB (Zero Emission Building), come già enunciato, si prestano come edifici a "Emissioni zero", progettati per consumare, su base annua, un quantitativo di energia pari o inferiore a quello che produce da fonti rinnovabili integrate nel complesso stesso, come pannelli solari o altre fonti rinnovabili. In altre parole, l'energia consumata è compensata dall'energia rinnovabile generata sul posto, e per questa caratteristica è considerato ad altissima efficienza energetica.

Gli NZEB (Nearly Zero Energy Building) che verranno rimpiazzati nel tempo, costituiscono un insieme di edifici a "Energia Quasi Zero" basandosi sullo stesso concetto degli ZEB, ma con una differenza chiave: il bilancio energetico deve essere quasi zero, ma non necessariamente completamente a zero come per gli ZEB.

In altre parole, può ancora ricevere una certa quantità di energia dalla rete elettrica e termica tradizionale, purché in parte sia coperta da fonti rinnovabili locali o integrate.

In sintesi, la differenza principale tra ZEB e NZEB si trova nella quantità di energia che l'edificio può ricevere dalla rete tradizionale. Mentre un ZEB deve essere completamente autosufficiente in termini energetici, esso può ancora dipendere parzialmente dalla rete, ma con un'enfasi sull'uso delle fonti rinnovabili per coprire la maggior parte del suo fabbisogno energetico [20,21].

Quest'ultima tipologia rimarrà in vigore fino all'introduzione dei nuovi ZEB, quindi fino al 2030 tramite la "ristrutturazione profonda", anche se questo obiettivo ad oggi, sembra ancora lontano per gli standard italiani.

Quindi lo scopo principale per la progettazione di un edificio ZEB e NZEB è ottenere: Un'alta prestazione energetica, un adeguato comfort e qualità dell'aria in funzione dei costi d'investimento e del ritorno economico. L'attenzione va posta alle scelte architettoniche ed energetiche per raggiungere gli standard minimi.

Infatti, l'analisi iniziale deve cominciare dalla base "costi-benefici", in secondo luogo, dalla scelta delle tecnologie per ridurre i consumi attraverso l'involucro e successivamente su un impianto efficiente tramite energie rinnovabili.

Gli autori del testo [22], indirizzano la questione di cosa significhi oggi abitare in modo sostenibile e come le case "green" possano conseguire l'efficienza massima con l'impatto ambientale minimo. Questa sinergia coinvolge l'intera catena del settore edilizio, con l'obiettivo di adottare strategie per ridurre l'inquinamento, contenere i consumi energetici e i costi associati.

Il concetto di "smart" e di Sustainable Development Goals (SDGs) è sempre più rilevante e viene promosso insieme alle direttive principali, come la "Energy Performance Buildings Directive, EPBD" appena citata. Inoltre, vengono valutate e differenziate le varie tipologie di edifici green, partendo dalla "Low energy house" fino agli "Autonomous buildings", al fine di chiarire il concetto di ciascuna tecnologia costruttiva per avere una visione più chiara.

A corredo del testo, è presente una tabella riassuntiva che fornisce informazioni sulla tipologia, la definizione e le caratteristiche energetico-ambientali dei diversi edifici green [Fig. 10].

 TIPOLOGIA	 DEFINIZIONE	 PECULIARITA' ENERGETICO-AMBIENTALI
LOW ENERGY HOUSE (Casa a basso consumo)	Casa con prestazioni energetiche migliori rispetto a quelle medie del parco immobiliare esistente	In Italia le case che presentano un fabbisogno < 50% rispetto al valore medio del patrimonio esistente
PASSIVHAUS (Casa passiva)	Casa nella quale il clima interno viene mantenuto nelle condizioni di comfort senza l'uso di impianti di riscaldamento e raffrescamento	Fabbisogno energetico < 15 kWh/m ² anno
NEARLY ZERO ENERGY BUILDING (NZEB)	Edificio progettato e realizzato in accordo con la normativa e in linea con quanto è stato deciso dalla Direttiva EPBD (2010/31/UE)	Corrispondente alla Classe energetica ≥ ad A1
ZERO ENERGY BUILDING (ZEB) o NET ZERO ENERGY BUILDING (n-ZEB)	Il loro fabbisogno energetico è sufficientemente basso da comporta e un bilancio netto annuale, consumo/generazione nullo, grazie all'utilizzo delle fonti rinnovabili	Fabbisogno energetico nel bilancio annuale = 0 kWh/m ² anno
PLUS ENERGY BUILDING	Rappresentano dei complessi immobiliari il cui l'energia che viene prodotta è maggiore a quella consumata	Fabbisogno energetico < 0 kWh/m ² anno e produzione di energia in eccesso (il "plus")
GREEN BUILDING O SUSTAINABLE BUILDING	Casa in cui il concetto di sostenibilità si espande sotto tutti gli aspetti che possono determinare l'utilizzo di fonti, comprendendo l'impatto ambientale che il complesso edilizio genera	Fabbisogno energetico ≤ 0 kWh/m ² anno. Utili i materiali naturali, il verde pensile, un'attenta progettazione del microclima indoor e outdoor, focus sul rapporto tra edificio e servizi del territorio, comprendendo la mobilità
AUTONOMOUS BUILDING	Unità completamente autosufficiente e indipendente al 100% dalle reti infrastrutturali (rete elettrica, del gas, dei sistemi idrici municipali, reti di scarico, servizi di comunicazione e reti di trasporto)	Fabbisogno energetico = 0 ,compresa l'autosufficienza di approvvigionamento. L'autarchia garantisce il funzionamento di questi edifici anche in caso di calamità naturali o eventi bellici

[Fig. 10] Rielaborazione grafica personale per la definizione delle diverse tipologie di edifici. Fonte: DALL'Ò G., GALANTE A., "ABITARE SOSTENIBILE - Come affrontare l'emergenza energetica e ambientale", Editore il Mulino Farsi un'idea, 2° edizione, pp.58, 59, 60, 61, Bologna, 2023.

Per quanto riguarda il tema delle classi energetiche, a livello europeo e come da Art.9 dell'EPBD [13] si riassume che:

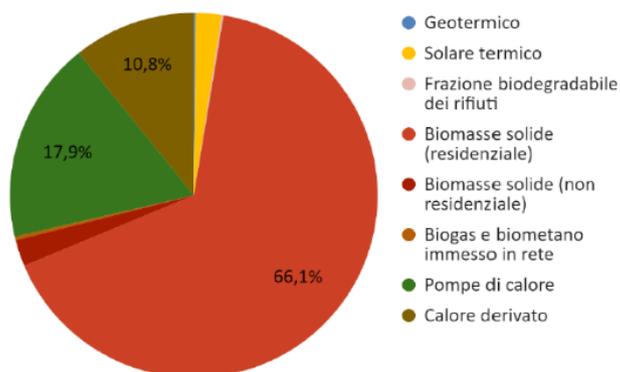
- Classe A per edifici a emissioni zero;
- Classe G dovrà corrispondere solo al 15% degli edifici con le prestazioni peggiori,
- Edifici pubblici: raggiungere almeno la classe F entro il 2027 e la classe E entro il 2030;
- Edifici residenziali peggiori devono arrivare alla classe F entro il 2030 e alla classe E entro il 2033;
- Ogni edificio dovrà avere un passaporto di ristrutturazione entro la fine del 2024, contemplando un percorso per ognuno e arrivare a renderli a Zero Emissioni entro il 2050, in modo graduale, sarebbe ottimale se, le caldaie alimentate da combustibili fossili, fossero sostituite con alternative più sostenibili. In questo punto si hanno eccezioni per edifici storici, di culto, temporanei o di superficie inferiore a 50 m².
- A fine 2025 verranno aggiornate le linee guida e verranno utilizzati fondi europei per finanziare questi investimenti. Gli aiuti di Stato a favore del clima, dell'ambiente e dell'energia includono la riduzione delle emissioni di gas serra, promozione delle energie rinnovabili, miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici, e l'installazione di impianti per la generazione di energia rinnovabile, stoccaggio o infrastrutture di ricarica per veicoli elettrici.
- Secondo gli Articoli 13 e 14, gli edifici a Zero Emissioni dovranno adottare tecnologie informatiche, con l'introduzione obbligatoria dello Smart Readiness Indicator (SRI) dal 2026 per edifici non residenziali con una potenza superiore a 290 kW, per ottimizzare il loro funzionamento e migliorare le prestazioni energetiche.
- L'UE prevede inoltre che i nuovi edifici residenziali siano a Zero Emissioni entro il 2028, con l'installazione di tecnologie solari fino al 2032, mentre quelli pubblici dovranno raggiungere questo obiettivo già dal 2026;
- Gli edifici residenziali esistenti devono raggiungere almeno la classe E entro il 2030 e la classe D entro il 2033, mentre quelli non residenziali devono migliorare tra il 2027 e il 2030. Sono previste esenzioni per edifici storici e sociali, con una graduale eliminazione dei combustibili fossili entro il 2035.
- Il governo italiano ha sottolineato che gli Stati membri possono definire le proprie traiettorie verso gli obiettivi comuni senza obbligo di ristrutturazione entro il 2030, concentrandosi sugli edifici a emissioni zero entro il 2050, senza restrizioni su vendita o affitto di edifici non ristrutturati, e con la facoltà di esentare alcune categorie di edifici.

CAPITOLO 2.

Le Fonti Rinnovabili Termiche nel territorio piemontese

Come già accennato, per ottenere un parco immobiliare improntato su edifici a zero emissioni nel rispetto del limite consolidato dall'UE, esistono diverse soluzioni impiantistiche volte alla produzione di energia attraverso fonti rinnovabili, riassunte in [Fig. 11]:

Queste fonti, nelle città possono essere coniugate anche alla rete di teleriscaldamento/teleraffrescamento.



[Fig. 11] Produzione termica da fonti rinnovabili. Fonte: GSE- Rapporto Statistico sull'Energia in Piemonte, 2021, p.27. Online:https://www.regione.piemonte.it/web/sites/default/files/media/documenti/202206/piemonte2021_dgr25_5126_2022.pdf

Prendendo in considerazione la regione Piemonte, secondo il Rapporto Statistico sull'Energia dell'anno 2021 emergono delle considerazioni interessanti riguardo le fonti rinnovabili termiche. Come viene riportato dal grafico a torta [Fig. 10], la maggior parte delle biomasse solide derivano dagli edifici residenziali (66,1%), al secondo posto vi sono le pompe di calore (17,9%), il terzo in classifica risulta il calore derivato (10,8%). Esso si riferisce all'energia termica prodotta come scarto da parte di un altro processo come, per esempio, la produzione di energia elettrica, la quale può provenire da altri processi industriali o dalla produzione di energia primaria.

Le percentuali più basse sono dedicate al solare termico, alle biomasse per immobili di uso non residenziale e all'impianto geotermico, ancora molto poco presente.



[Fig. 12] Ripartizione delle fonti rinnovabili termiche nel 2019. Fonte: GSE- Rapporto Statistico sull'Energia in Piemonte, 2021, p.26 .

Online:https://www.regione.piemonte.it/web/sites/default/files/media/documenti/2022-06/piemonte2021_dgr25_5126_2022.pdf

Dai dati riportati in [Fig. 12], si evince che fino al 2019 la produzione di biomassa rimane quasi costante e con un impiego maggiore rispetto alle altre fonti, il solare termico registra un trend di crescita abbastanza lineare ed equamente distribuito tra le varie province piemontesi, ma poco utilizzato. Anche per le pompe di calore i valori rimangono quasi lineari, mentre il geotermico, anche dalla Fig. nel grafico a torta, si nota meglio che è davvero quasi inesistente la sua presenza, infatti ha una bassa percentuale rispetto a tutte le altre fonti termiche [23].

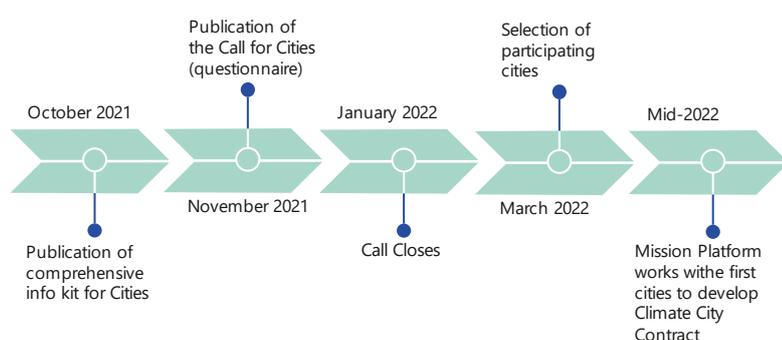
2.1 L'iniziativa Europea: "100 Climate Neutrale Cities By 2030".

In un mondo che si impegna e si interessa sempre di più in questioni riguardanti la "Decarbonizzazione" e la "Neutralità climatica", come risposta a questo cambiamento in atto, emergono molte iniziative determinanti e impegnative, come il progetto per le "100 Città climaticamente neutre entro il 2030". Questo progetto europeo molto ambizioso cerca di assumersi l'impegno per affrontare le problematiche di carattere ambientale e raggiungere la neutralità climatica entro il 2050, come enunciato nel capitolo precedente.

Dunque, l'iniziativa mira a coinvolgere 100 città europee verso una transizione ecologica portando una drastica riduzione alle emissioni di gas serra, soprattutto la CO₂, immaginando così un futuro a basse emissioni di carbonio o comunque di gas inquinanti, già entro l'anno 2030.

Lo scopo della missione si riassume in:

1. Realizzare almeno 100 Smart City climaticamente neutre entro il 2030. Per tutte le altre città europee vale comunque il "Fit for 55%" per il 2050;
2. Garantire che queste città protagoniste fungano da "laboratorio" di sperimentazione e innovazione per consentire perciò, a tutte le altre città europee di seguirne l'esempio.



La parte operativa del progetto è cominciata quasi a fine 2021 per la pubblicazione delle "info kit" per le città [Fig.13].

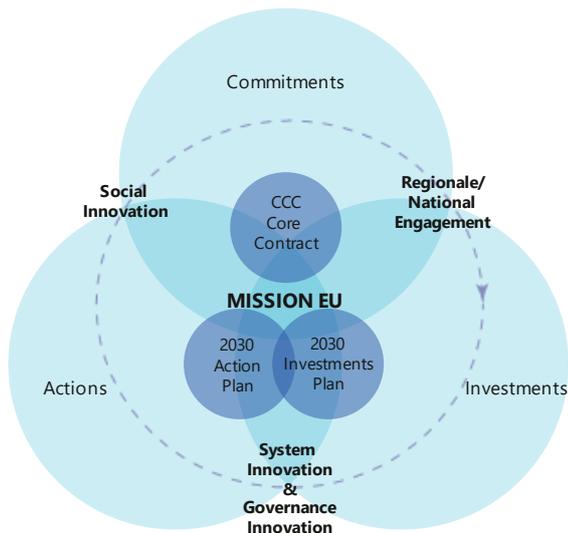
Nella prima fase la candidatura prevede la compilazione di un questionario che descrive la situazione attuale della Città a livello di emissione di gas serra e le misure adottate per contrastarle in campo energetico, nei rifiuti, nel trasporto e in ambito Smart City. In questa candidatura si utilizzeranno successivamente, i risultati dell'ultimo inventario delle emissioni

[Fig. 13] Rielaborazione grafica personale inerente i diversi punti della Mission UE. Fonte: European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, Gronkiewicz-Waltz, H., Larsson, A., Boni, A. et al., *100 climate-neutral cities by 2030 - by and for the citizens - Report of the mission board for climate-neutral and smart cities*, Publications Office, 2020, <https://data.europa.eu/doi/10.2777/46063>

di CO₂ riferito al 2019. A marzo 2022 vi è stata la selezione e la pubblicazione delle Città che andranno ad aderire al progetto. Quest'ultimo concerne una "Mission Platform", la quale è in aiuto alle città nel sviluppare il "Climate City Contract"; un contratto stipulato e firmato dal Sindaco e

dalla Commissione come sorta di impegno, politicamente vincolante ma non con valenza legale, che la “città” ha deciso con le autorità regionali, locali, gli stakeholders e con la stessa UE.

Infatti, le città sono aiutate dall’Unione Europea grazie al programma “Net Zero Cities”, (facente parte del Green Deal) il quale ha proprio l’incarico di assisterle per sviluppare il Climate City Contract, adottando misure concrete per ridurre le emissioni di gas inquinanti e giungere più velocemente alla neutralità climatica. Questo piano supporta inoltre, dei piani di gemellaggio tra le metropoli, consentendo di imparare dagli sforzi e dalle esperienze degli altri.



[Fig.14] Rielaborazione grafica personale sulla MISSION EU per l’impegno che si prende in carico per le città. Fonte: European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, Gronkiewicz-Waltz, H., Larsson, A., Boni, A. et al., *100 climate-neutral cities by 2030 - by and for the citizens - Report of the mission board for climate-neutral and smart cities*, Publications Office, 2020, <https://data.europa.eu/doi/10.2777/46063>

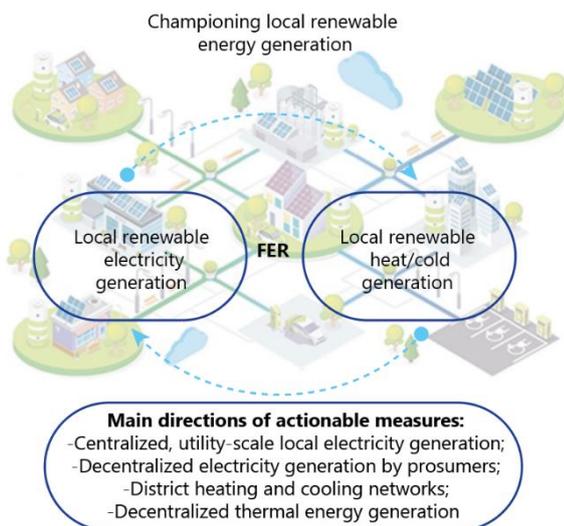
In [Fig. 14] vi è il resoconto del “contratto”, visto attraverso una suddivisione: “Commitments” come l’impegno assunto dalle città, le azioni che si intendono cominciare, attraverso un “Action Plan” e gli investimenti di cui si ha bisogno, “Investments Plan”, per realizzare il piano europeo al 2030 [24].

E’ importante prendere come caso studio i centri urbani, perché godono di un maggior potenziale diventando dei veri centri di sperimentazione e innovazione.

Precisamente, sono il luogo dove si può effettuare la Smart Sector Integration, cioè le infrastrutture che trovano una densità più impattante nelle città. A maggior ragione, ci si concentra meglio sulla decarbonizzazione, sulle strategie per l’energia, sulle trasformazioni in ambito dei trasporti, dell’edilizia, dell’industria e dell’agricoltura. Questi punti fondamentali coesistono e si intersecano, in quanto si considera che:

- Le città in Europa occupano solo il 4% della superficie terrestre;
- I tre quarti della popolazione vive nei centri urbani, e bensì equivale al 75%, prevedendo che questo dato cresca del 10% entro il 2050;
- In città le emissioni superano il 65% dei consumi energetici e si è al di sopra del 70% per i consumi di CO₂.
- È fondamentale che questo focus della missione si presti nel coinvolgimento dei cittadini.
- Le azioni che devono intraprendere le città candidate riguardano:
- Gli edifici: per i consumi elettrici e termici (come da aggiornamento della normativa EPBD, la quale dopo la crisi Ucraina-Russia, prevede che le unità edilizie esistenti dovrebbero puntare a diventare ad emissioni nulle entro il 2050, quelli privati già entro il 2030);

- Trasporti: la “Sustainable & Smart Mobility Strategy” prevede in futuro la sostituzione data da 30 milioni di vetture elettriche, ponendo soprattutto al centro, il problema del riciclo dei materiali;
- Rifiuti;
- Aree industriali;
- Aree agricole;
- FER: base per la neutralità climatica [Fig. 15].



[Fig. 15] Cosa si ottiene dalle FER. Fonte: https://www.infosostenibile.it/sites/default/files/styles/immagine_in_evidenza/public/immagini/news/schermata_2022-03_03_alle_18.55.44.png?itok=UG2DZmzL

L'obiettivo ulteriore che si pone per le città consiste nella formazione di comunità energetiche, contribuendo al conseguimento degli obiettivi di sostenibilità. Sfruttando fonti rinnovabili di energia elettrica e termica locali, si possono adottare una serie di azioni, tra cui:

- Generare energia elettrica sul posto;
- Distribuire l'elettricità prodotta localmente dai produttori-consumatori (gli utenti che generano la propria energia attraverso fonti energetiche rinnovabili e, contemporaneamente, prelevano energia dalla rete quando necessario);
- Implementare reti di teleriscaldamento e raffrescamento;
- Decentralizzare la produzione di energia termica.

Queste iniziative mirano a favorire l'auto-sufficienza energetica delle comunità urbane e a ridurre l'impatto ambientale derivante dal consumo di energia.

Secondo gli studi [25], entro il 2030, il 20% dell'energia prodotta in città dovrebbe provenire dalle comunità energetiche, in conformità con la normativa REPowerEU. Gli Stati membri devono adeguare i loro piani di ripresa e resilienza e allocare finanziamenti supplementari per raggiungere questo obiettivo. Le azioni previste includono semplificazioni delle procedure autorizzative, installazione graduale di pannelli solari su nuovi edifici, aumento delle pompe di calore e integrazione dell'energia geotermica e solare termica nei sistemi di riscaldamento comunali.

2.2 Le Città

Le città italiane selezionate devono supportare una popolazione di almeno 50.000 abitanti. Questa scelta riflette un'attenzione particolare verso le grandi metropoli, le quali sono fortemente incoraggiate a partecipare. Di fatto, il loro coinvolgimento è essenziale, data l'elevata ambizione nel raggiungimento dell'obiettivo finale che predilige la neutralità climatica e il loro stesso potenziale, mostrandosi come un esempio da seguire per altre realtà urbane.

I centri urbani selezionati sono: Bergamo, Bologna, Firenze, Milano, Padova, Parma, Prato, Roma e Torino.

Ovviamente, come è stato riportato dall'Info kit for Cities [26], l'obiettivo delle 100 città non dovrebbe essere letto come un limite massimo, poiché alcune di loro potrebbero non raggiungere l'obiettivo del 2030. Questo scenario dovrebbe essere previsto (e comunque tollerato) per la complessa sperimentazione.

Perciò, dato il numero delle città europee e le difficoltà di alcune, nel portare a termine la missione solo in qualche anno, si considera l'applicazione del progetto a diverse scale, come:

- Distretto, quartiere o zona di particolare interesse;
- Un semplice Comune, rappresentato da una sola unità governativa;
- Unione di più aree, composta da diversi centri urbani o con unità governative vicine.

Questa caratteristica, quindi, tiene in considerazione proprio la diversità di ogni singola città europea per dimensioni, contesto spaziale, governance, bilancio, capacità di finanziamenti necessari e dell'attuale "livello climatico" dove poter attuare azioni concrete.

Inoltre, per giungere effettivamente all'obiettivo, è stato deciso di monitorare il processo attraverso:

- Il calcolo di un indicatore utile per le emissioni provenienti da diverse fonti, includendo edifici, industrie, trasporti, trattamento dei rifiuti, agricoltura e altre attività, all'interno dei confini geografici della città.
- L'indicatore tiene conto anche delle emissioni indirette derivanti dalla produzione e dal consumo di elettricità fornita dalla rete, così come dal riscaldamento e raffrescamento forniti dalla stessa fonte.
- Entro il 2030, questo indicatore sarà ulteriormente elaborato per includere emissioni al di fuori dei confini cittadini, come quelle derivanti dal trattamento dei rifiuti, le emissioni dovute alla trasmissione e la distribuzione dell'energia consumata, i trasporti urbani e le emissioni legate al consumo di beni e servizi.
- Coinvolgimento dei cittadini, misurato dal numero e tipo di interazioni con i residenti sulla questione della neutralità climatica.
- Pianificazione e sviluppo urbano sostenibile, valutato attraverso la riduzione del consumo energetico degli edifici (kWh/m² o kWh/persona/anno) e la percentuale di quest'ultimi sottoposti a ristrutturazione con lo scopo di migliorare le prestazioni energetiche.
- Creazione di ecosistemi urbani e relativi benefici, come la qualità dell'aria e la percentuale di spazi verdi disponibili nella città;
- Produzione di energia pulita;
- Monitoraggio delle emissioni legate ai trasporti urbani e al consumo di energia per abitante.

2.2.1 Città-Studio: Torino e il suo Piano D'azione

Torino è tra i centri urbani scelti per la sfida delle "100 città climaticamente neutre". Il Piano d'Azione per l'Energia e il Clima (PAESC) [27], redatto in collaborazione con i Comuni aderenti al Patto dei Sindaci, mira a raggiungere gli obiettivi di mitigazione e adattamento al cambiamento climatico.

Questo piano si distingue dal precedente con il nome di TAPE ("Turin Action Plan for Energy"), in quanto incorpora azioni già finanziate e punta a ridurre le emissioni di CO₂ del 68% entro il 2030. Solo nel 2020 è stato raggiunto il 47%. Perciò la prima percentuale da raggiungere entro il 2030 risulta effettivamente più alta (pari al -30% circa di emissioni). Questo obiettivo, più ambizioso, è sostenuto da varie misure, tra cui l'efficientamento energetico e l'uso di fonti rinnovabili.

Il PAESC integra azioni in diversi settori, come il residenziale, il pubblico, il terziario e i trasporti urbani, con lo scopo di trasformare Torino in una città a emissioni zero. Le iniziative in corso includono oltre all'efficientamento energetico degli edifici pubblici, l'installazione di illuminazione a LED e la promozione della mobilità alternativa. Questa transizione verso una città sostenibile non solo potrebbe migliorare nel tempo l'immagine della città, ma potrebbe offrire anche un ambiente urbano più salubre e piacevole per i cittadini che la abitano e la vivono quotidianamente.

Il concetto di città ad emissioni zero, legato alla neutralità climatica e del carbonio, più in generale, mira inoltre a mitigare e compensare tutte le emissioni di gas serra, creando un equilibrio con l'ambiente circostante. Esse sono pensate per includere spazi verdi e pozzi di assorbimento del carbonio, promuovendo anche il benessere degli utenti legato ai servizi, incentivandoli ad utilizzare più mezzi di trasporto sostenibili, come ad esempio, i mezzi pubblici, la bicicletta o le camminate, rispetto all'utilizzo dell'auto [28].

2.3 Il concetto di "Quartieri urbani a zero emissioni e climaticamente neutri"

Quale sarebbe per Torino la soluzione per poter raggiungere questo obiettivo?

Nel presente studio, si propone di condurre un'analisi focalizzata su una scala ridotta, concentrato sui distretti urbani, con l'obiettivo di perseguire la decarbonizzazione e renderli climaticamente neutri, grazie alle linee guida del PAESC. Questo implica un lavoro mirato sulle reti e sugli impianti termici ed elettrici, con un'attenzione particolare all'efficienza energetica degli edifici, compresi i loro involucri, l'illuminazione e altri aspetti rilevanti, dunque riuscire a ridurre al minimo l'impatto ambientale del quartiere in termini di emissioni di gas serra, CO₂ e consumo di energia.

Fino ad oggi ci si è concentrati sugli NZED (Nearly Zero Energy District) come livello transitorio per passare ad un nuovo modello che formerà l'intera città.

Al capitolo 1, si è data una spiegazione su questi due concetti; tuttavia, si può definire un distretto climaticamente neutro come quello che bilancia le emissioni di gas serra prodotte con azioni che le compensano completamente, come l'uso di tecnologie di cattura del carbonio o l'investimento

in progetti di compensazione delle emissioni (ad esempio, piantare alberi). Mentre la decarbonizzazione implica la riduzione delle emissioni di anidride carbonica (CO₂) e di altri gas serra derivanti dall'uso di combustibili fossili. Questo si ottiene attraverso l'adozione di energie rinnovabili (come solare, eolica, geotermica), l'efficienza energetica e l'elettrificazione dei settori che attualmente dipendono dai combustibili fossili (come il riscaldamento, i trasporti e l'industria). A tal fine, gli edifici a emissioni zero saranno la base per formare il quartiere decarbonizzato e climaticamente neutro.

Già negli anni '90, con concentrazione maggiore nel Nord Europa, si sono sviluppati concetti di nuovi quartieri "green", attuando l'idea di "sostenibilità distrettuale" incoraggiando la sensibilità per l'ambiente e la qualità di vita. Gli "eco-quartieri", così definiti da [29] vengono presi come esempio:

- *"Bo01", Malmö (Svezia)*: distretto di nuova costruzione delle tecnologie innovative a basso impatto ambientale (1998-2002) [Fig.16 a];
- *Eco-Viikki (Finlandia)*: test della costruzione del terreno rispetto alle tendenze dell'edilizia ecologica (1999-2004) [Fig. 16b];
- *BedZED (Sutton, Regno Unito)*: progetto pilota di nuova costruzione (1999-2005) [Fig. 16 c];
- *Vauban (Germania)*: primo distretto etichettato come 'sostenibile' e il più famoso esempio di 'eco-progetti' (1993-2006) [Fig. 16d]



[Fig. 16 a] "Bo01", Malmö (Svezia)



[Fig. 16 b] Eco-Viikki (Finlandia)



[Fig. 16 c] BedZED (Sutton, Regno Unito)



[Fig. 16 d] Vauban (Germania)

Anche in questo caso vengono elencati i vantaggi e gli svantaggi. Partendo da una visuale più concreta, si attestano gli svantaggi con:

- Costi iniziali elevati. Bisogna comprendere che per sviluppare un distretto a zero emissioni (o quasi) sono necessari ingenti finanziamenti iniziali, i quali possono essere emessi dai governi stessi. L'investimento richiede di portare modifiche anche sostanziali agli edifici.
- Necessità di apposite infrastrutture per il collegamento alle reti esistenti della città, generando però ostacoli tecnici e finanziari e rendendo a volte difficile la progettazione;
- La gestione per fasi, come per esempio difficoltà nell'investire in sistemi come il teleraffrescamento/teleriscaldamento, i quali non potrebbero essere utilizzate appieno fino al completamento delle fasi seguenti. Questo può rallentare la progettazione dei nuovi distretti su ampia scala.

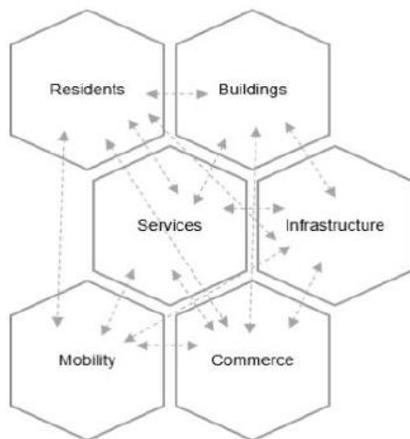
Tuttavia, vi sono anche dei vantaggi:

- Miglior qualità della vita cittadina: i progetti green consentono di avere un ambiente salubre, una fornitura energetica continua, contribuendo così al benessere e alla salute degli abitanti;
- Risparmi sui costi operativi che si possono avere grazie all'efficienza energetica e all'utilizzo di tecnologie innovative (sia per l'energia, sia per l'acqua);
- Indipendenza energetica. Si riduce la dipendenza dalle reti energetiche nazionali, assicurando una maggior sicurezza energetica, preservano le risorse naturali, riducono l'inquinamento attraverso il calo dei gas serra e altre forme di inquinanti presenti ad oggi nell'aria.

Questo studio recente [29], introduce una prospettiva innovativa sullo sviluppo urbano, concentrata sul concetto di "città intelligente" o "Smart City". Questo concetto è centrale negli sforzi delle aree metropolitane globali per migliorare le infrastrutture e i servizi urbani al fine di promuovere una migliore qualità della vita in termini ambientali, sociali ed economici.

Sebbene esista un dibattito aperto sulla definizione di "Città Intelligente", comunemente si intende come un centro urbano che promuove la sostenibilità e l'efficienza, garantendo al contempo un alto livello di vita attraverso l'ottimizzazione delle risorse naturali e l'adozione di tecnologie innovative. In questo caso, la gestione dell'energia emerge come una sfida chiave. Infatti, l'iniziativa europea per le città e le comunità intelligenti, a partire dal 2020, ha promosso misure ambiziose per ridurre le emissioni di gas serra del 40%.

La sfida principale consiste nell'adattare e modernizzare il patrimonio edilizio esistente per raggiungere un bilancio energetico annuale pari a zero, o quasi, in quanto al momento non sembra ancora possibile arrivare allo zero netto. Lo studio fa emergere diverse soluzioni per trasformare i quartieri in distretti più sostenibili, introducendo anche il concetto di "terreno intelligente" (Smart Ground), che mira all'ibridazione del luogo e della morfologia attraverso l'utilizzo di tecnologie avanzate e sistemi di monitoraggio per gestire e ottimizzare l'uso del suolo in vari contesti, come l'agricoltura, tramite l'utilizzo di sensori e tecnologie IoT (Internet of Things) per monitorare le condizioni del suolo (umidità, nutrienti, temperatura) e ottimizzare l'irrigazione, la fertilizzazione e altre pratiche agricole, migliorando così la produttività e riducendo gli sprechi; la gestione urbana (con l'implementazione dei sistemi di monitoraggio del suolo nelle città per rilevare e gestire i rischi geologici (come frane o subsidenza) e migliorare la pianificazione urbana e la resilienza delle infrastrutture), la costruzione (uso di tecnologie avanzate per analizzare le caratteristiche del suolo e garantire la stabilità e la sicurezza delle strutture edili, riducendo il rischio di cedimenti e altri problemi strutturali), e la conservazione ambientale delle aree attraverso il monitoraggio e la gestione delle risorse naturali per proteggere gli ecosistemi e promuovere la sostenibilità ambientale, ad esempio attraverso il controllo dell'erosione del suolo e la conservazione della biodiversità. Infine, pensando anche alla produzione locale di energia rinnovabile e il consumo energetico per i trasporti.



[Fig. 17] Componenti distrettuali e interconnessioni. Fonte: S. KOUTRA, V. BECUE, C.S. IOAKIMIDIS, From the 'Smart Ground' to the 'Smart City' An Analysis of Ten European Case-studies, in Google Scholar (articolo on-line), ERA Chair 'Net-Zero Energy Efficiency on City Districts' Research Institute for Energy, University of Mons, Belgium - Department of Architecture and Urban Planning, IEEE, April 2016, <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7951340/>, (consultazione 12 maggio 2023).

Un altro concetto rivisitato vede il "Distretto Energetico", simile a quello NZED, Edificio a Energia Quasi Zero, nel senso che, entrambi mirano a ridurre al minimo l'impatto ambientale legato all'energia. Tuttavia, ci sono differenze significative tra i due concetti.

Gli NZED, cioè "Distretto ad Energia quasi Zero" a cui si è puntato fino a questi ultimi anni, si riferisce a una zona urbana, in cui il consumo energetico complessivo degli edifici e dei trasporti degli abitanti è bilanciato dalla produzione locale di energia rinnovabile. Un Distretto Energetico mira a integrare diverse fonti di energia rinnovabile, come solare, eolica, geotermica, e a

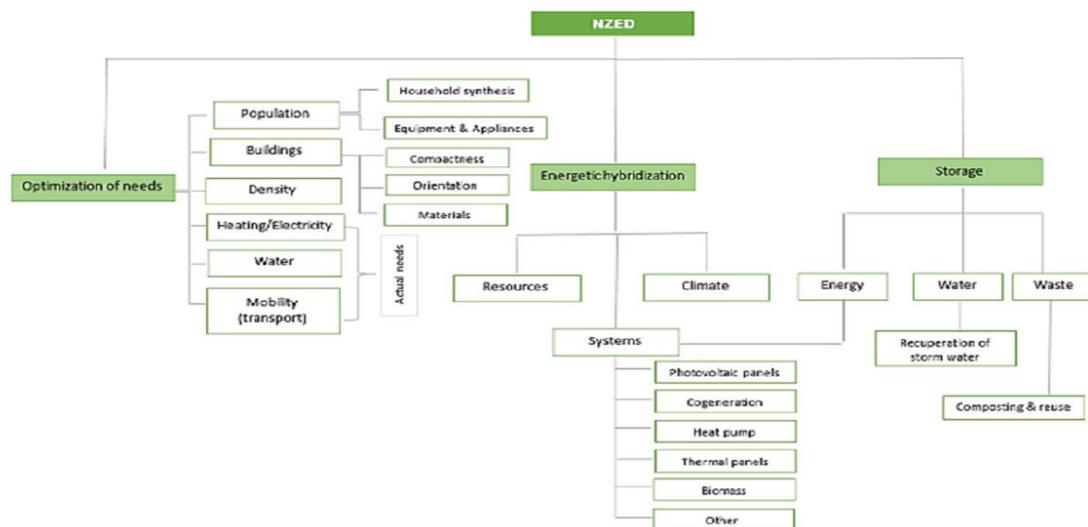
coordinare l'offerta e la domanda di energia all'interno dell'area.

In breve, mentre un Distretto Energetico si occupa dell'equilibrio energetico su scala più ampia, coinvolgendo sia gli edifici che i trasporti all'interno di un'area geografica definita, un "Edificio a Energia Quasi Zero" si concentra specificamente sulla riduzione del consumo energetico di un singolo complesso, cercando di renderlo il più autosufficiente possibile. Entrambi i concetti sono fondamentali per ridurre l'impatto ambientale e promuovere uno sviluppo urbano sostenibile. La [Fig.17] dello studio, illustra gli elementi distrettuali e le loro interconnessioni.

Si identificano i pilastri fondamentali, per raggiungere un distretto a zero emissioni, tra cui:

- **L'area geografica:**
Si considera il clima del luogo scelto come potenziale risorsa naturale (temperatura esterna, luce diurna, vento) andando in contro alle esigenze di zone con clima caldo, mite o freddo, inoltre si considera il terreno, utile per conoscere la zona in cui si installeranno futuri impianti e/o strutture;
- **La morfologia del luogo:**
Comprende la densità residenziale, l'orientamento che offrono gli edifici per un ottimo guadagno solare e la compattezza del tessuto urbano, il tutto per una buona progettazione urbanistica di un distretto e ridurre i consumi energetici;
- **Tecnologie:**
L'uso di tecnologie applicate agli edifici, come isolamento, ventilazione, nuovi materiali eco-compatibili per la costruzione e la domotica per migliorare l'efficienza energetica e il comfort abitativo (illuminazione, areazione, riscaldamento);
- **Accessibilità:**

L'utilizzo dei servizi, come ad esempio l'accesso a una rete di trasporto già esistente, offre vantaggi significativi. Questo non solo consente di risparmiare tempo ed energia, ma anche di mantenere collegamenti efficaci con il resto della città. Si promuove perciò la mobilità sostenibile, che come già spiegato, riducendo la dipendenza dall'uso dell'auto e incentivando la modalità di trasporto più ecologiche, come il trasporto pubblico o la bicicletta.



[Fig. 18] Analisi dei tre pilastri di un NZED. Fonte: S. KOUTRA, V. BECUE, C.S. IOAKIMIDIS, From the 'Smart Ground' to the 'Smart City' An Analysis of Ten European Case-studies, in Google Scholar (articolo on-line), ERA Chair 'Net-Zero Energy Efficiency on City Districts' Research Institute for Energy, University of Mons, Belgium - Department of Architecture and Urban Planning, IEEE, April 2016, <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7951340/>, (consultazione 12 maggio 2023).

In [Fig. 18], viene preso come esempio il modello di NZED, il quale comprende la combinazione di sistemi energetici, creando energia in loco attraverso fonti come pannelli fotovoltaici, cogenerazione, pompe di calore geotermiche o biomassa. Inoltre, è importante l'installazione di meccanismi in grado di stoccare energia, acqua piovana, rifiuti ma anche il riutilizzo dei materiali [29].

Nonostante ciò, raggiungere l'obiettivo di distretto decarbonizzato e climaticamente neutro soprattutto se riguarda un distretto urbano, è un processo complesso. Molte zone possono raggiungere solo una percentuale limitata di energia rinnovabile, rendendo di conseguenza difficile l'ottenimento di un bilancio energetico totalmente neutro. Pertanto, talvolta i distretti possono raggiungere solo alcune fasi verso lo stato NZED, distretti a energia quasi zero, prima di raggiungere l'obiettivo completo.

L'analisi [30] spiega il concetto di distretto come evoluzione delle città: dal tessuto urbano intero, ci si focalizza su ogni singolo distretto, per poi puntare alla scala più piccola, quindi al singolo edificio. A livello distrettuale si può puntare a soluzioni vantaggiose con investimenti su:

- Illuminazione stradale;
- Mobilità urbana;
- Rifiuti;
- Sicurezza pubblica;

- Energia rinnovabile e autoprodotta all'interno del quartiere stesso. Lo step successivo sarà dato dalle future singole strutture (Edificio a Zero Emissioni), che saranno capaci di incorporare strategie di energia rigenerativa come per esempio: il verde verticale, ma anche proprio coperture verdi, stoccaggio dell'acqua piovana per il suo riutilizzo e una migliore gestione dei rifiuti tramite l'economia circolare. Inoltre, si conetteranno alle infrastrutture energetiche ma in sinergia con altre fonti rinnovabili, contribuendo di conseguenza ad una domanda di energia nettamente inferiore al consumo totale attuale.

Se ogni unità edilizia fosse creata in questa modalità, ci vorrebbero pochi anni per raggiungere un intero quartiere decisamente più smart, a energia zero grazie all'installazione di nuovi impianti e perciò anche a impatto nullo, come alcuni accorgimenti rappresentati in [Fig.19].



[Fig. 19] Esempio di Edificio ad alte prestazioni energetiche. Fonte: [12] R. JAYSAWAL, S. CHAKRABORTY, et al., Concept of net zero energy buildings (NZEB) - A literature review, in Science Direct (articolo on-line), Cleaner Engineering and Technology, Vol.11, December 2022, 100582, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666790822001872?via%3Dihub> (consultazione 10 maggio 2023)

CAPITOLO 3.

IL TELERISCALDAMENTO

Puntando agli Zero Emission Buildings, è necessario pensare di integrare la rete elettrica e termica da parte di fonti rinnovabili per arrivare agli obiettivi già descritti. I piani di sviluppo per Torino hanno comportato notevoli investimenti mirati alla sua modernizzazione, con l'ambizione di diventare un modello esemplare per altre città. Al centro di questa trasformazione, gli sforzi si sono concentrati sull'efficienza energetica, intesa come riduzione dei consumi attraverso il miglioramento dei sistemi energetici [30], promuovendo la crescita di una rete di teleriscaldamento nel corso degli anni. Storicamente parlando, a partire dal 1870, un certo Birdsill Holly⁵ introdusse il primo sistema di teleriscaldamento a Lockport, negli Stati Uniti. Quest'ultimo utilizzava una caldaia per generare vapore, distribuito poi attraverso tubazioni per riscaldare case e industrie. Fu un successo, estendendosi rapidamente anche a New York [31 e 32]. In Europa, il teleriscaldamento fu adottato solo nel 1920, mentre in Italia comparve nel 1971 a Brescia, diffondendosi negli anni '80 a Torino, Roma e Reggio Emilia [33].

Questa infrastruttura è diventata un pilastro fondamentale per ridurre le emissioni e garantire un approvvigionamento costante di calore per tutte le strutture urbane presenti nei quartieri, comunità o intere città, affrontando così la sfida del cambiamento climatico. Grazie alla sua struttura centralizzata, permette di sfruttare economie di scala, consentendo una gestione più efficiente delle risorse e una diminuzione dei costi energetici per gli utenti finali. Quindi l'impresa è stata anche un'opportunità per ottenere benefici tangibili sia dal punto di vista ambientale che economico, contribuendo significativamente alla riduzione delle emissioni di gas serra e al miglioramento della qualità dell'aria urbana. Questa iniziativa rappresenta solo una delle numerose sfide che Torino ha affrontato e che continua ad affrontare nel suo percorso verso una città più sostenibile.

Dunque, il processo di teleriscaldamento rappresenta un servizio innovativo di riscaldamento a distanza, che sfrutta un'ampia rete di tubazioni interrate e isolate, avendo così con il compito di evitare le dispersioni. Questo strumento ha la capacità di trasportare il calore dalle centrali di produzione o la classica centrale termica (caratterizzate da tecnologie all'avanguardia sia dal punto di vista ambientale che tecnologico) alle varie strutture cittadine. Brevemente, il calore prodotto è veicolato sotto forma di acqua calda o surriscaldata verso le varie utenze localizzate in un'area precisa e circoscritta. Grazie a questa rete di distribuzione, l'acqua calda o acqua surriscaldata (noti come fluidi termovettori) oppure tramite il vapore, giungono direttamente ai singoli edifici, sostituendo le tradizionali caldaie e garantendo un efficiente riscaldamento degli ambienti indoor, oltre che riuscire a fornire acqua calda sanitaria (ACS).

5 | Birdsill Holly (1820-1894) è stato un ingegnere statunitense noto per i suoi contributi nel campo dell'ingegneria sanitaria e idraulica. È famoso soprattutto per aver progettato e realizzato i primi sistemi di approvvigionamento idrico potabile moderni negli Stati Uniti, introducendo l'uso di tubazioni in ghisa per il trasporto dell'acqua potabile nelle città. Uno dei suoi maggiori successi è stato il sistema di approvvigionamento idrico per la città di Lockport, New York, completato nel 1842, che è stato il primo sistema di distribuzione di acqua potabile negli Stati Uniti ad utilizzare tubazioni in ghisa. Holly è stato anche coinvolto nella progettazione di sistemi di drenaggio e di depurazione delle acque. Il suo lavoro ha contribuito significativamente al miglioramento delle condizioni igieniche e alla prevenzione delle malattie legate all'acqua contaminata, avendo un impatto duraturo sulle città e sulle comunità in tutto il paese. Fonte: <https://www.invent.org/inductees/birdsill-holly-jr>

Sempre secondo l'articolo 2 della Direttiva EPBD [13] si definisce il Teleriscaldamento come: *La distribuzione di energia termica in forma di vapore, acqua calda o liquidi refrigerati da una fonte centrale di produzione verso una pluralità di edifici o siti tramite una rete, per il riscaldamento o il raffrescamento di spazi o di processi di lavorazione*".

La produzione di calore che avviene in queste centrali che utilizzano varie fonti energetiche, puntano perciò a ridurre l'uso dei combustibili fossili favorendo al contempo la decarbonizzazione. Soprattutto negli ultimi anni si è vista un'adozione crescente di nuove tecnologie come l'integrazione senza problemi tra queste reti e le fonti rinnovabili come le biomasse, l'energia solare termica e geotermica, le pompe di calore, collettori solari, limitando nell'ambiente le emissioni nocive [34].

Attualmente a Torino, il servizio di teleriscaldamento è gestito dalla società IREN Energia, fondata nel lontano 1907 con l'obiettivo iniziale di produrre e distribuire energia elettrica. Utilizzando la cogenerazione e i processi industriali, questo sistema si estende anche alle zone circostanti, come Collegno, Rivoli, Grugliasco, Moncalieri, Nichelino e Beinasco [35].

In città, la rete di teleriscaldamento ha avuto origine nel 1982 con la realizzazione del primo impianto di cogenerazione nella zona "Le Vallette". [36] Nel corso degli anni, il numero di utenti è cresciuto a dismisura, raggiungendo circa un numero pari a 400.000 abitanti solo nei primi anni del 2000. Oggi, con una copertura di oltre il 57% della volumetria urbana complessiva, Torino si attesta tra le prime città più teleriscaldate d'Italia e una delle più importanti in Europa. [37]

La produzione di calore per questa rete è principalmente garantita da due impianti di cogenerazione: la centrale di Moncalieri e la centrale di Torino Nord.

La centrale di Moncalieri (entrata in vigore dal 1953) rappresenta un'eccellenza tecnologica nella produzione simultanea di energia elettrica e termica, insieme alla centrale di Torino Nord, costituendo la principale fonte di calore per la rete di teleriscaldamento della città.

La centrale, alimentata a gas naturale, è dotata di due avanzati impianti di cogenerazione a ciclo combinato, noti come il 2° GT e il 3° GT, che insieme offrono una potenza elettrica totale di circa 800 MW e una potenza termica di circa 520 MW in modalità di cogenerazione.

Questi due cogeneratori raggiungono notevoli rendimenti: come già descritto, oltre il 57% in termini di produzione di energia elettrica e superiore all'87% in modalità di cogenerazione. Inoltre, all'interno della centrale è presente un impianto di integrazione e riserva del calore con una potenza complessiva di 141 MWt, che contribuisce ulteriormente all'efficienza e alla affidabilità del sistema.

Esso si suddivide in 2° GT e 3° GT:

- Il 2° GT è un generatore di turbina a gas con una capacità di 400 MWe (megawatt elettrici) e 260 MWt (megawatt termici). Questa turbina genera circa 270 MW di potenza elettrica e alimenta un generatore di vapore a recupero di calore con tre livelli di pressione. Questo generatore di vapore utilizza i gas di scarico caldi provenienti dalla turbina a gas, senza l'utilizzo di un camino di bypass dei fumi. Inoltre, è collegato a una turbina a vapore a condensazione con una potenza nominale di circa 130 MWe, che preleva vapore a bassa pressione per produrre calore per la rete stessa. Il sistema di produzione di calore per la rete di teleriscaldamento funziona attraverso la distribuzione di acqua surriscaldata a una temperatura di 120°C.

- Analogamente, il 3° GT è un generatore di turbina a gas con una capacità di 390 MWe e 260 MWt. Questa turbina produce circa 260 MW di potenza elettrica e alimenta un generatore di vapore a recupero di calore con tre livelli di pressione, simile al sistema presente nel 2° GT. Anche qui, la turbina a vapore a condensazione è dotata di una potenza nominale di circa 130 MWe preleva vapore a bassa pressione per produrre calore e trasportarlo in rete. Anche in questo caso, il sistema di produzione di calore per la rete di teleriscaldamento distribuisce acqua surriscaldata sempre ad una temperatura di 120°C.

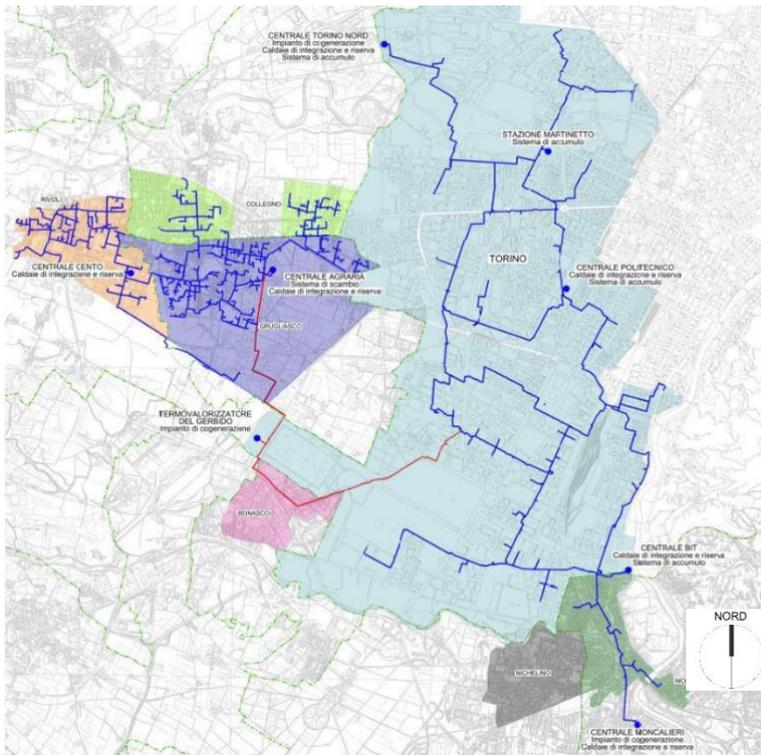
L'impianto di cogenerazione di Torino Nord, alimentato anch'esso a gas naturale, ha una potenza elettrica di 390 MWe e una potenza termica di 220 MWt. Questo impianto include una turbina a gas che genera circa 270 MW di potenza elettrica e un generatore di vapore a recupero di calore. Una turbina a vapore a condensazione, con una potenza nominale di circa 120 MWe, preleva vapore a bassa pressione per il riscaldamento della rete di teleriscaldamento. Infine, *il sistema di produzione di calore per la rete di teleriscaldamento distribuisce acqua surriscaldata a 120°C*. L'impianto di cogenerazione a ciclo combinato, alimentato a gas naturale, raggiunge un notevole rendimento elettrico, superiore al 56%, che sale oltre l'85% in modalità di cogenerazione.

La funzione importante di questi generatori di turbina a gas sono componenti chiave dell'impianto di cogenerazione e vengono utilizzati per convertire il gas naturale in energia elettrica e termica. L'energia elettrica prodotta viene immessa in rete, mentre l'energia termica viene utilizzata per il teleriscaldamento, contribuendo così alla fornitura di calore alle abitazioni e alle strutture industriali collegate alla rete stessa.

Inoltre, ci sono vari impianti di integrazione e riserva (potenza termica pari a 340 MW), nonché sistemi di accumulo del calore, che contribuiscono al funzionamento efficiente della rete di teleriscaldamento. A completare la rete si è disposti di quattro impianti di integrazione:

- *"Martinetto"* (composto da sei serbatoi in pressione con capacità uguale a 5000 metri cubi);
- *"Politecnico"*. Qui la produzione del calore che avviene tramite teleriscaldamento, viene prodotto da uno scambiatore di calore che ha una potenza termica di 255 MW, compreso di sistema di accumulo da 2500 metri cubi;
- *"Mirafiori Nord"*, dotato di potenza termica uguale a 35 MW;
- *"BIT"*, la cui potenza termica è pari a 255MW.

Tutti questi impianti principali di cogenerazione (quindi Moncalieri e Torino Nord) sono alimentati principalmente da gas naturale, mentre i sistemi di accumulo/integrazione vengono ricaricati tramite la cogenerazione. Essi sono capaci di recuperare calore che solitamente verrebbe disperso nell'ambiente esterno, e questo meccanismo di recupero può variare da un 30° un 50%.



[Fig. 20]. Planimetria del sistema di Teleriscaldamento metropolitano presente nell'area di Torino, 2021. Scala grafica: Fuori scala. Fonte: http://www.cittametropolitana.torino.it/cms/risorse/ambiente/dwd/comitato-locale-di-controllo/Sedute_e_Assemblee/2021/IREN_teleriscaldamento.pdf, pag.3.

La mappa [Fig. 20] rappresenta lo stato di fatto della distribuzione locale del teleriscaldamento estrapolati dal sito di IREN Energia all'anno 2021 per l'area metropolitana di Torino. Come si evince, vengono evidenziati con colori diversi le zone come Torino e le aree limitrofe. La linea blu delinea la rete di teleriscaldamento che si dirama in tutta la città con i vari sistemi, tra cui quelli di cogenerazione e quelli di integrazione. Nel suo complesso la lunghezza della rete di doppia tubazione sotterranea si sviluppa per oltre 700km. e consente di convogliare il calore prodotto nelle centrali fino agli utenti finali, vale a dire oltre 7500 unità abitative (circa 71 m³ riscaldati).

Si ribadisce quanto Torino si trovi in prima linea nel panorama del teleriscaldamento in Italia e tra le città più innovative in Europa. Ciò che sorprende è che oltre il 90%

dell'energia termica inserita nella rete proviene dagli impianti di cogenerazione, risultato reso possibile grazie all'utilizzo di accumulatori di calore installati sia nelle centrali che lungo la rete stessa. L'energia termica residuale necessaria è fornita tramite caldaie di integrazione e recupero, consolidando così l'efficienza e la sostenibilità del sistema di teleriscaldamento a Torino.

I dati che sono stati estrapolati da IREN presentano:

- 73,2 milioni di m³ allacciati;
- 726 km di doppia tubazione;
- 500.000 abitanti serviti;
- 1.930 MWt e 1.200 MWe di potenza installata;
- Oltre 2.500 GWh/anno di energia immessa nelle reti [38]

Si presume perciò, che attraverso l'implementazione del teleriscaldamento proveniente dal termovalorizzatore, è ragionevole attendersi un significativo risparmio sul costo del calore riportato nelle bollette degli utenti. Il teleriscaldamento, da sempre considerato un sistema efficiente, offre vantaggi economici notevoli rispetto ai tradizionali metodi di produzione energetica, come le caldaie condominiali a gas o gasolio, spesso adottate nelle zone urbane. Gli edifici già connessi alla rete di teleriscaldamento continueranno a godere di questi benefici, mentre quelli che saranno raggiunti dall'estensione della rete, come nel caso del Comune di Beinasco, potranno anch'essi beneficiare di tali vantaggi. I prezzi dell'energia termica nel sistema

metropolitano di Torino sono già mediamente inferiori rispetto ad altre zone del Nord Italia, grazie all'esperienza consolidata di IREN [39].

Grazie alla cogenerazione si ha l'80% di energia prodotta ad alto rendimento. Questo straordinario risultato è ottenuto in seguito all'utilizzo di accumulatori di calore installati sia nelle centrali che lungo la rete, garantendo un funzionamento ottimale del sistema.

La composizione di un accumulatore di calore include:

- La principale centrale termica di produzione;
- La rete sotterranea che trasporta il calore e di dirama in condotti di mandata e ritorno per la distribuzione;
- Vari sistemi di pompaggio e sottostazioni di servizio distribuite lungo tutta la rete.

Per usufruire dell'allacciamento al servizio di un dato edificio sono necessarie alcune condizioni tecniche tra cui:

- La presenza di un impianto di riscaldamento centralizzato nell'edificio;
- Temperatura massima di funzionamento dell'impianto interno non superiore a 80°C, che corrisponde alla temperatura di mandata del circuito di riscaldamento secondario;
- Temperatura massima di ritorno dal circuito interno compresa tra 65°C e 68°C, per garantire una temperatura massima di ritorno sulla rete di teleriscaldamento di 70°C;
- Disponibilità di un locale dedicato (centrale termica) per ospitare la sottostazione di scambio termico, che consentirà il collegamento con la rete di teleriscaldamento [40].

I vantaggi del teleriscaldamento che si possono desumere sono:

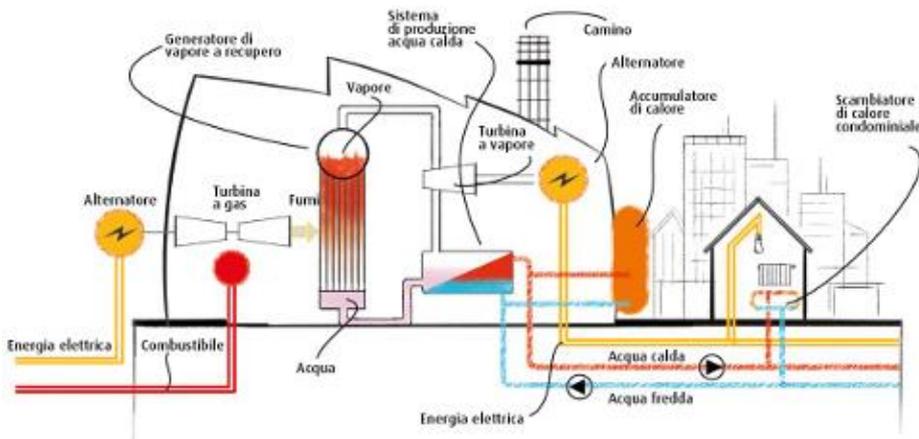
- Riduzioni delle emissioni: Il teleriscaldamento riduce significativamente le emissioni inquinanti, con una diminuzione fino al 20% delle emissioni di CO₂ e fino al 50% di NO_x rispetto alle caldaie tradizionali, eliminando completamente le emissioni di SO_x, quindi gas serra e polveri;
- Sicurezza e manutenzione più semplice: la necessità di avere una caldaia all'interno delle abitazioni, il teleriscaldamento riduce il rischio di incidenti e libera i clienti dagli oneri legati alla manutenzione, inclusi gli adempimenti normativi e le certificazioni della canna fumaria.
- Servizio continuativo: Il servizio di riscaldamento continuo garantisce un comfort costante all'interno degli edifici, evitando interruzioni o variazioni di temperatura indesiderate.
- Sottostazioni silenziose: Le sottostazioni per lo scambio termico nel teleriscaldamento sono molto più silenziose rispetto alle tradizionali caldaie a combustibili fossili, contribuendo a mantenere un ambiente tranquillo negli edifici. [41]
- Assenza di combustione;
- Nessun costo di manutenzione dell'impianto di produzione del calore;

- Costi di allacciamento contenuti;
- Minori adempimenti burocratici rispetto alla centrale termica tradizionale;
- Assistenza e pronto intervento garantiti durante l'anno. [42]

In [Fig.21] viene riportato in modo stilizzato il funzionamento del teleriscaldamento.

Come spiegato, dal gruppo Iren viene utilizzato un sistema di cogenerazione e trigenerazione. Questi due sistemi possono essere utilizzati in caso di più consumatori in complessi residenziali

applicati al teleriscaldamento.



[Fig. 21] Funzionalità di una rete di teleriscaldamento.

Fonte online:
https://www.irenlucegas.it/content/dam/iren/offerte-e-prodotti/casa/risparmio-energetico/teleriscaldamento-domestico/documenti/CARTA_DEL_SERVIZIO_TLR_2023.pdf

Nel sistema di teleriscaldamento si distinguono tre componenti fondamentali:

1. Il sistema di generazione di calore;
2. La rete di distribuzione;
3. Le sottostazioni di scambio termico

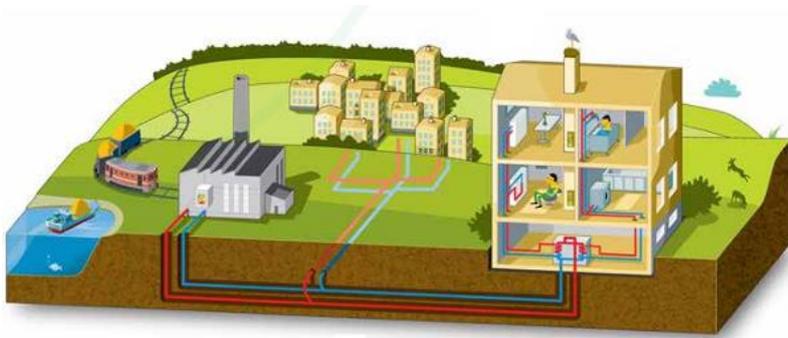
Questi tre elementi sono interconnessi e dipendenti l'uno dall'altro. Il sistema di generazione di calore utilizza diverse fonti energetiche, come la cogenerazione, il calore residuo industriale, l'energia solare, geotermica o biomasse, rendendo il teleriscaldamento più versatile e meno impattante per l'ambiente.

La rete di teleriscaldamento è costituita da una doppia tubatura interrata e isolata. L'acqua calda che le tubazioni di mandata a circa 120°C, come quella di Torino, raggiunge le utenze per lo scambio termico e ritorna alla centrale tramite le tubazioni di ritorno a circa 70°C. L'isolamento termico riduce le perdite di temperatura lungo il percorso, migliorando l'efficienza complessiva del sistema e riducendo il carico sulle centrali.

La rete di trasporto, porta il calore dalle centrali agli stacchi della rete di distribuzione, mentre la rete di distribuzione conduce direttamente il calore alle utenze di quartiere o aree circostanti. Quest'ultima presenta tubazioni di diametro progressivamente ridotto man mano che si avvicina all'utenza finale. I Baricentri di Carico Termico (BCT) rappresentano i punti di partenza della rete di distribuzione, consentendo di alimentare o intercettare una parte significativa degli utenti.

Le stazioni di pompaggio mantengono la pressione dell'acqua sufficientemente elevata per raggiungere tutte le utenze, specialmente nei tratti di mandata dove la portata e la velocità devono soddisfare immediatamente la domanda.

Le Sottostazioni Termiche (SST), posizionate negli edifici serviti, sono dotate di scambiatori di calore che permettono lo scambio termico tra l'acqua della rete di teleriscaldamento e quella dell'impianto del cliente, senza mescolare i due fluidi. Ogni SST è equipaggiata con contatori che



monitorano vari parametri, inclusi temperatura, portata, potenza. Dopo essere stato generato, il calore deve essere distribuito dai generatori di calore ai punti di utilizzo attraverso una rete di distribuzione dedicata, un elemento vitale per il funzionamento del sistema. In

[Fig. 22] Esempio tridimensionale del teleriscaldamento in area urbana.
 Fonte online: Kjell Thorsson/Fortum,
https://www.desmi.com/media/ljfl3gk4/utility_segmentfolder.pdf

questa rete, il fluido termovettore scorre attraverso tubazioni di mandata, raccogliendo il calore dalla centrale di generazione a una temperatura specifica. Attraverso la rete, il fluido raggiunge le sottostazioni di scambio termico, dove il calore viene trasferito agli utenti finali, per poi ritornare alla centrale di generazione con un livello termico ridotto.[33]

Il fluido termovettore è cruciale per il funzionamento ottimale del sistema di teleriscaldamento, influenzando la progettazione e le prestazioni dell'intera rete di distribuzione. Le sue proprietà specifiche sono determinanti per garantire un'elevata efficienza energetica e contenere i costi operativi. Idealmente, il fluido dovrebbe essere economico, con bassi rischi ambientali in caso di dispersione accidentale, considerando che spesso la rete è interrata, e dovrebbe possedere un alto calore specifico per immagazzinare grandi quantità di energia e consentire un flusso ridotto.

Tra i vari fluidi considerati, come il vapore d'acqua, l'acqua surriscaldata e oli diatermici, solo alcuni sono comunemente utilizzati. Ad esempio, il vapore d'acqua e l'acqua surriscaldata sono le scelte più diffuse, mentre oli diatermici e altre opzioni, pur presentando vantaggi fisici, spesso vengono scartati a causa dei loro costi elevati e degli impatti ambientali.[34]

L'impiego del vapore d'acqua presenta sfide, come la necessità di operare in contropressione e il controllo complesso della temperatura, mentre l'acqua surriscaldata è preferita per la sua gestione più semplice e le prestazioni più stabili. Sebbene il vapore d'acqua sia stato ampiamente utilizzato storicamente, la maggior parte degli impianti di teleriscaldamento attuali preferisce l'acqua surriscaldata per i suoi costi di gestione più contenuti e le prestazioni più affidabili.

La scelta del fluido termovettore è principalmente influenzata dalla necessità di ridurre le portate di massa nella rete per contenere i costi di pompaggio, e i fluidi liquidi sono preferiti rispetto ai gas per il trasferimento di calore in sistemi aperti, in accordo con il primo principio della termodinamica.

$$\Phi = m \cdot c \cdot \Delta T$$

ϕ = Flusso termico [W];

$m \cdot$ = Portata in massa [kg/s]

c = Calore specifico del fluido [J/kgK]

ΔT = Differenza di temperatura subita dal fluido [°C]

In sintesi, un aumento della temperatura nel circuito idraulico di distribuzione del teleriscaldamento comporta un aumento della pressione e dei costi di pompaggio, oltre a perdite termiche maggiori e la necessità di fornire calore a temperature più elevate. Pertanto, è preferibile mantenere la rete a livelli termici contenuti.

Per quanto riguarda la generazione di calore nel teleriscaldamento, i sistemi "Combined Heat and Power (CHP)" rappresentano una soluzione interessante. Questi sistemi consentono la produzione combinata di calore ed energia elettrica, offrendo maggiore efficienza e minori impatti ambientali rispetto alla produzione separata di calore tramite caldaie.

All'interno dei sistemi CHP, i fumi provenienti dalla turbina a gas possono essere mescolati con gas naturale e inviati a un post-combustore per fornire il calore necessario al teleriscaldamento. In alternativa, possono essere impiegati impianti a vapore in controcompressione per generare calore. Esistono anche schemi semplificati di possibili impianti associati, come quelli con motore a combustione interna o cicli combinati con turbina a vapore in controcompressione. [43]

Più dettaglio si esaminano:

- *Circuito primario*: Questo circuito trasporta il calore dalla centrale di produzione fino alle sottostazioni degli edifici. È il principale condotto attraverso cui il calore viene distribuito dalla fonte di produzione agli utenti finali;
- *Circuito secondario*: Questo circuito è interno agli edifici e consente di distribuire il calore dalle sottostazioni alle singole unità abitative. Ad esempio, questo avviene tramite i termosifoni o altri sistemi di riscaldamento presenti all'interno degli immobili. Quindi, le sottostazioni termiche sono poste alla base degli edifici, svolgendo un ruolo cruciale nel sistema. Qui avviene lo scambio termico tra il circuito primario e il circuito secondario, trasformando il calore proveniente dalla centrale in calore domestico e acqua calda per gli impianti sanitari. Inoltre, vengono monitorati e registrati i consumi energetici per una gestione efficiente del sistema.

La fornitura di energia, sia in termini di quantità sia di temperatura, è regolata in base alle esigenze degli utenti finali, tenendo conto delle diverse necessità durante il giorno e la notte e considerando anche gli utilizzi specifici negli ambienti professionali, ad esempio ospedali, ristoranti ecc. [41]

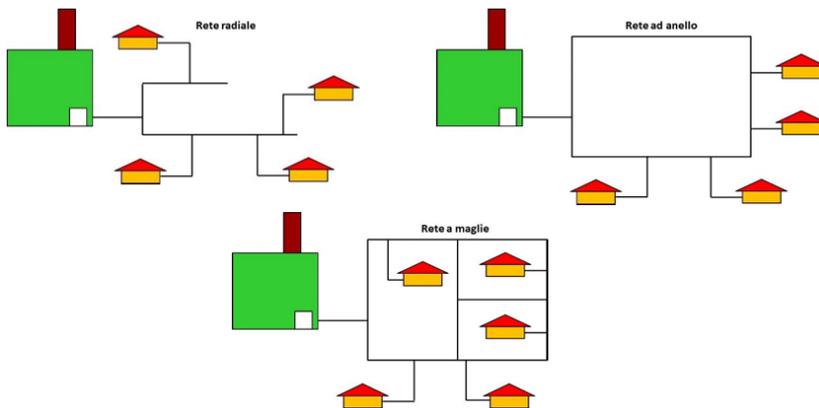
Il sistema viene propriamente suddiviso in due categorie:

1. *Tipo diretto*: con un solo circuito idraulico con collegamento tra la centrale di produzione e corpo scaldante del fruitore finale, quindi un filo diretto produttore-consumatore tramite il classico termosifone;
2. *Tipo indiretto*: In questa configurazione, invece, sono presenti due circuiti separati, uno per il trasporto del calore dalla centrale alla zona residenziale e uno per distribuire il calore all'interno delle singole abitazioni. Questi due circuiti rimangono collegati tramite uno scambiatore di calore posizionato vicino alle unità abitative; quindi, si parla di una rete di trasporto e distribuzione con doppie condotte sotterranee (mandata e ritorno).

Le tipologie di reti di distribuzione sono suddivise in:

- Reti ramificate;
- Reti ad anello;
- Reti a maglie

In [Fig. 23] vengono riportate le diverse tipologie di reti.



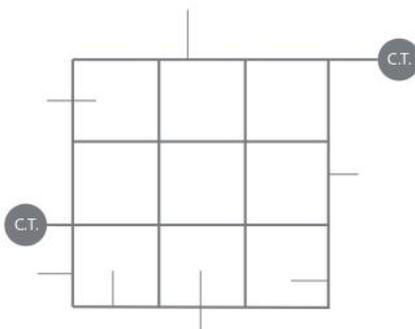
Quest'ultime vengono attraversate da dei fluidi termovettori come:

1. Vapore;
2. Acqua calda;
3. Acqua surriscaldata;
4. Oli diatermici

In Italia generalmente si utilizza per lo più l'acqua calda ad una temperatura pari a **80/90°C** o lievemente surriscaldata al massimo di **110/120°C**.

[Fig. 23] Differenti tipologie di distribuzione per le reti di teleriscaldamento. Fonte online: https://www2.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/adp-mise-enea-2019-2021/tecnologie-efficienza-risparmio-edifici/report-rds_ptr_2019_058.pdf, pag. 9.

Nella rete di teleriscaldamento di Torino, sono presenti diversi anelli di circolazione che



[Fig. 24] Rappresentazione grafica personale solo sulla tipologia impiantistica di rete a maglie.

formano una *struttura a maglie* [Fig. 24]. Questo design consente una gestione ottimale del sistema, specialmente in caso di malfunzionamento di un segmento di tubazione. Se si verifica un guasto in una parte della rete a maglie, è possibile isolare facilmente il tratto danneggiato senza interrompere il flusso nelle altre tubazioni. Questa flessibilità permette di mantenere la circolazione del calore senza interruzioni significative. Inoltre, le reti a maglie tendono ad avere minori perdite di pressione, semplificando ulteriormente la gestione del sistema, soprattutto quando la richiesta di calore è elevata. Le reti di distribuzione utilizzate nei sistemi di teleriscaldamento si distinguono in base alle modalità con cui

vengono soddisfatti i fabbisogni di calore e acqua calda sanitaria, nonché alla loro configurazione. Per quanto riguarda il soddisfacimento dei fabbisogni, le reti possono essere:

1. *Reti chiuse:* in queste reti, il fluido termovettore che circola nelle tubazioni di andata e ritorno è lo stesso e si connette alla sottostazione di scambio termico attraverso scambiatori di calore.
2. *Reti aperte:* qui, gli utenti possono prelevare direttamente acqua calda sanitaria dalla rete per soddisfare i propri bisogni.

3. *Sistemi a tre tubi*: in questo caso, la rete è composta da due tubazioni di andata e una di ritorno. Le due tubazioni di andata operano a pressioni e temperature diverse per rispondere in modo differenziato ai fabbisogni di calore e acqua calda sanitaria.

Le reti ramificate, sebbene siano tra le più semplici da costruire e progettare, presentano il rischio di disservizi estesi in caso di guasto. Al contrario, le reti magliate offrono una maggiore affidabilità, ma richiedono una progettazione più complessa e comportano costi maggiori a causa del numero elevato di tubazioni necessarie. Tuttavia, esistono anche reti con configurazioni miste che cercano di bilanciare i vantaggi di entrambe le tipologie.

Indipendentemente dalla tipologia, il diametro delle tubazioni varia in base alla distanza dalla centrale di generazione, con diametri che diminuiscono man mano che ci si avvicina alle utenze:

1. Le dorsali cittadine hanno diametri compresi tra 500 e 1000 mm.
2. Le tubazioni della distribuzione principale hanno diametri tra 200 e 500 mm.
3. Le tubazioni della distribuzione secondaria hanno diametri compresi tra 80 e 200 mm.

Le dorsali principali consentono il trasferimento di maggiori quantità di fluido termovettore e da esse si diramano le varie ramificazioni che portano l'acqua surriscaldata verso le singole utenze. A volte lungo la rete vengono predisposti baricentri termici, sezioni specifiche da cui si dirama una rete di distribuzione secondaria di grandi dimensioni. Questi baricentri possono interfacciarsi con la rete secondaria tramite scambiatori di calore, per diversificare le pressioni di esercizio delle due reti.



[Fig. 25] Tipologia reale dell'inserimento di tubature per le reti di teleriscaldamento. Fonte: <https://www.airu.it/annuario-airu-situazione-del-teleriscaldamento-al-31-dicembre-2015/>

Le stazioni di pompaggio sono elementi fondamentali della rete, dove avviene il ripompaggio del fluido termovettore. Queste stazioni sono importanti per mantenere l'acqua allo stato liquido a temperature superiori a 100°C e garantirne la corretta circolazione.

Le tubazioni interrate e isolate sono un'altra caratteristica importante della rete, costituite da tubi precoibentati in acciaio [Fig. 25], isolato con poliuretano e protetti da una guaina di polietilene. [44]

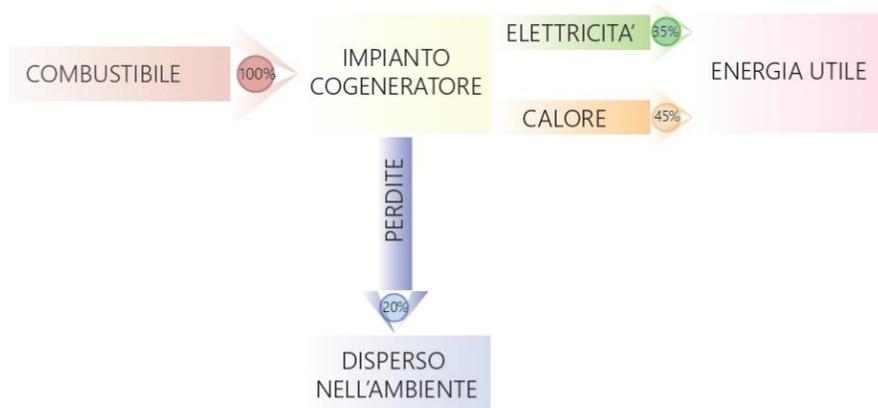
3.1 Cogenerazione e Trigenerazione

Esistono delle differenze tra cogenerazione e trigenerazione:

La cogenerazione, o CHP (Combined Heat and Power) utilizzata anche a Torino, vede un sistema integrato che produce contemporaneamente energia elettrica e termica utilizzando un unico combustibile, sia esso di origine fossile o rinnovabile. Questo avviene tramite l'impiego di un motore termico che converte il combustibile in energia meccanica, sfruttando poi il calore

residuo per generare energia termica. Questa tecnologia rappresenta una soluzione efficace per il risparmio energetico e la riduzione delle emissioni, soprattutto considerando che la climatizzazione è una delle maggiori voci di consumo energetico nelle abitazioni. Per comprendere appieno il funzionamento di tale impianto, possiamo confrontarlo con il tradizionale processo di generazione termoelettrica.

Infatti, considerando una centrale termoelettrica per la produzione di energia elettrica e una caldaia tradizionale per l'energia termica, si possono osservare due tipi di efficienza: circa il 40% per la centrale e circa l'80% per la caldaia. Questo significa che, se consideriamo l'intera quantità di combustibile come 100% dell'energia disponibile per la trasformazione, una centrale termoelettrica genera solo il 40% di energia utile, perdendo il restante 60% come dispersione. Al contrario, una caldaia tradizionale cogenerativa produce circa il 35% di energia elettrica utile e il 45% di energia termica, con solo il 20% di perdite [Fig. 26].



energia elettrica e termica attraverso processi separati, sarebbe necessario utilizzare una quantità di energia 1,43 volte superiore. Inoltre, l'efficienza dei processi separati, misurata come il rapporto tra l'energia totale prodotta e l'energia immessa sotto forma di combustibile, risulta essere solo del 55%.

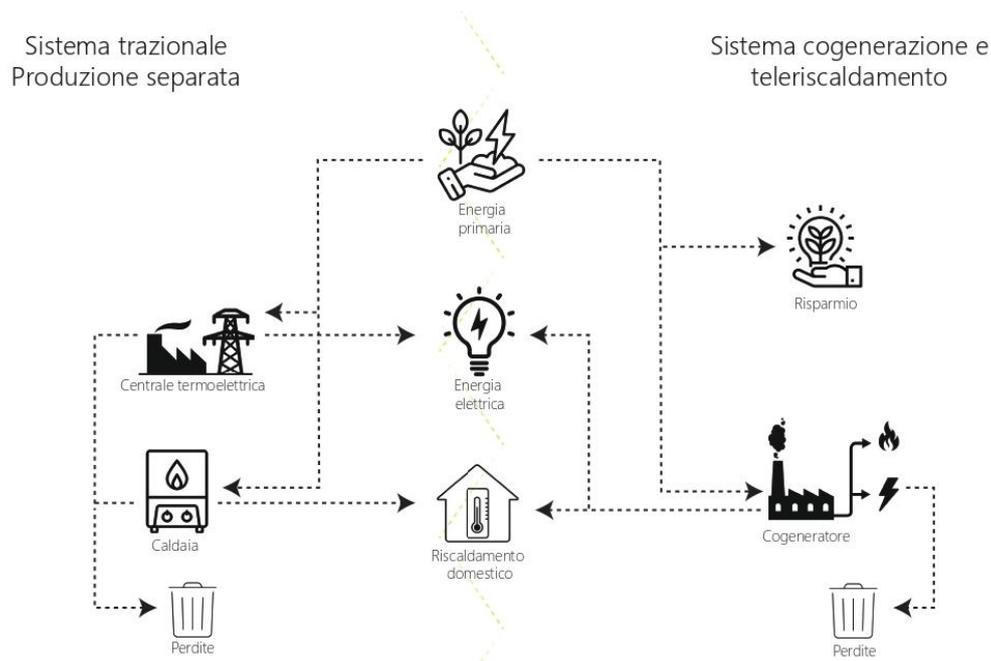
[Fig. 26] Rappresentazione grafica personale sul bilancio termico per un sistema cogenerativo. Fonte: Rubini L., Sangiorgio S., Le Noci C., *Il nuovo edificio green. Soluzioni per il benessere abitativo e l'efficienza energetica*, Green Tech, HOEPLI, Milano, 2020, p. 144.

Nella figura sottostante [Fig. 27], viene spiegato in breve come la produzione di sola

energia elettrica avviene attraverso centrali termoelettriche tradizionali che, impiegando combustibili fossili, generano energia elettrica usufruibile solo del 40-50% e successivamente disperdendo il calore prodotto in ambiente. Per la produzione di energia termica, invece, vengono utilizzate comunemente caldaie che convertono l'energia primaria del combustibile. [45]

In questo contesto, la cogenerazione (denominata in inglese anche "CHP, acronimo di "Combined Heat and Power") di cui si è ampiamente discusso in questo studio, si fa carico di numerosi vantaggi. Infatti, questo sistema è utilizzato per la necessità di soddisfare contemporaneamente richieste di energia elettrica e termica. In tal caso, è possibile ottimizzare un ciclo termodinamico che sfrutta i livelli di temperatura più elevati per la produzione di energia elettrica, cedendo il calore residuo a temperature più basse per il riscaldamento. Si giunge perciò alla possibilità di utilizzare una singola centrale per fornire calore a diverse abitazioni, eliminando così la necessità di installare caldaie singole o condominiali e riducendo il numero di camini e le relative emissioni inquinanti. [46]

3.2 Funzionalità



[Fig.27] Rappresentazione grafica personale per il confronto tra sistema con sistema tradizionale di produzione e sistema combinato cogenerazione con il teleriscaldamento. Fonte: Rubini L., Sangiorgio S., Le Noci C., *Il nuovo edificio green. Soluzioni per il benessere abitativo e l'efficienza energetica*, Green Tech, HOEPLI, Milano, 2020, p.147

Nei contesti residenziali, dove spesso si parla di piccola cogenerazione (potenza installata inferiore a 1 MegaWatt) e microgenerazione (potenza inferiore a 50 kW), vengono utilizzati vari tipi di motori termici come i motori alternativi a combustione interna, microturbine a gas e celle a combustibile.

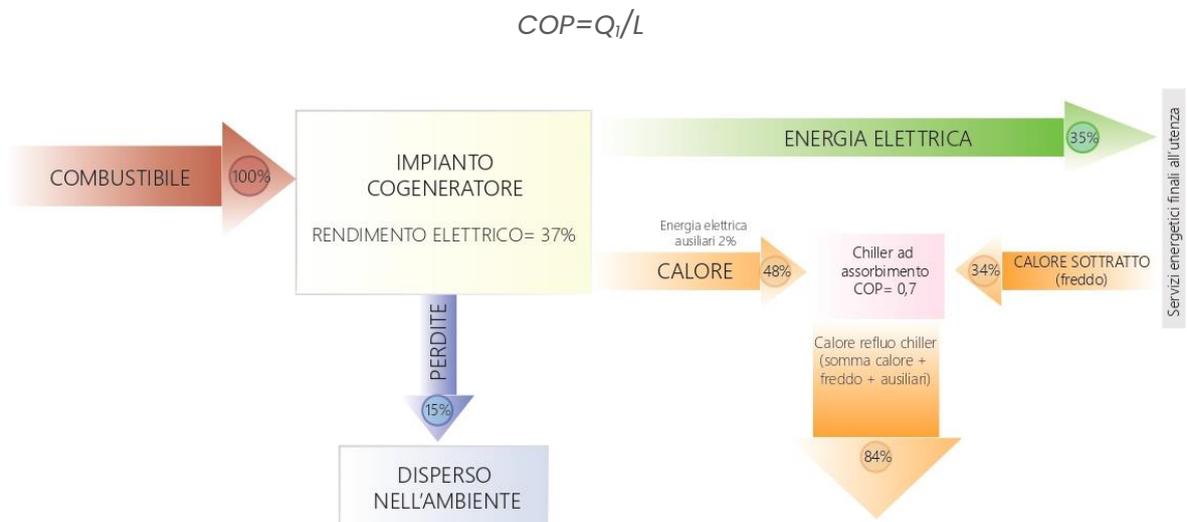
La cogenerazione può essere applicata sia a singoli fruitori, come per esempio un condominio, sia a gruppi di utenze. Tuttavia, nell'ultimo caso se si prevede di alimentare un sistema di teleriscaldamento o fornire energia elettrica a dei gruppi che possono concernere una scala di quartiere o un semplice isolato, le potenze richieste saranno notevolmente superiori.

Per quanto riguarda la trigenerazione, invece, si prevede un processo che tratta bensì, sia la produzione di energia elettrica e termica insieme, ma anche di energia frigorifera utile per il raffrescamento indoor durante la stagione estiva.

Il bilancio energetico di un sistema di trigenerazione prevede una produzione di energia elettrica di circa il 38%, di cui una parte viene utilizzata dal sistema stesso, e una produzione di energia termica pari al 48%. Quest'ultima, unita a una quota di calore prelevata da una fonte fredda, come l'aria esterna, consente di generare sia calore che raffrescamento. Le perdite del sistema sono stimabili intorno al 15%.

Nel contesto del ciclo frigorifero, è fondamentale considerare il parametro COP (Coefficient of Performance), che rappresenta il rapporto tra il calore prelevato dalla sorgente a temperatura più alta e il lavoro necessario per trasferirlo. Nei sistemi frigoriferi tradizionali, il COP è

generalmente intorno a 3, mentre nei sistemi trigenerativi questo coefficiente raggiunge solitamente solo lo 0,7. Tuttavia, i sistemi trigenerativi rimangono validi in quanto sfruttano energia di recupero, rendendoli economicamente vantaggiosi nonostante il COP inferiore. [45]



[Fig. 28] Rielaborazione grafica personale sul bilancio energetico di un ciclo trigenerativo. Fonte: Rubini L., Sangiorgio S., Le Noci C., *Il nuovo edificio green. Soluzioni per il benessere abitativo e l'efficienza energetica*, Green Tech, HOEPLI, Milano, 2020, p.147

Brevemente si riassume che: le centrali termoelettriche dotate di sistemi cogenerativi, forniscono il calore necessario per soddisfare la domanda termica della rete. La cogenerazione rappresenta un approccio efficiente in cui l'energia elettrica e il calore utile vengono prodotti simultaneamente, permettendo il recupero del calore altrimenti disperso. Tale recupero può raggiungere dal 30% al 50% dell'energia primaria immessa nel sistema, apportando notevoli benefici in termini di efficienza energetica e riduzione delle emissioni ambientali, soprattutto nelle zone urbane [Fig.28].

3.3 Normativa sul teleriscaldamento

Il quadro normativo italiano sul teleriscaldamento ha subito una significativa evoluzione nel tempo. Inizialmente privo di una disciplina specifica, il teleriscaldamento è stato definito per la prima volta nel decreto ministeriale del 24 ottobre 2005, in relazione alla produzione combinata di energia elettrica e calore, abbinata a una rete di teleriscaldamento utile per la sua distribuzione a diverse strutture. Questo provvedimento ha individuato caratteristiche fondamentali tra cui:

- La capacità di soddisfare la domanda di molteplici edifici;
- La possibilità di allacciamento di ogni utenza;
- Regolamentazione sull'erogazione dell'energia termica attraverso contratti specifici (somministrazione e vendita).

Inoltre, il decreto ha introdotto il meccanismo dei Certificati Verdi per incentivare il risparmio energetico nel teleriscaldamento. Successivamente, con il Decreto Ministeriale del 5 settembre 2011, sono state aggiunte ulteriori caratteristiche, dove la rete di teleriscaldamento doveva

possedere, tra cui l'ampliamento della rete su terreni pubblici o privati non di proprietà esclusiva dell'operatore, l'utilizzo di contabilizzatori per misurare i flussi di energia termica, controllarla, oltre alla distribuzione della stessa attraverso contratti di somministrazione e vendita.

Questi aggiornamenti hanno contribuito a definire e regolamentare in modo più dettagliato il settore del teleriscaldamento in Italia.[46]

3.4 Il teleriscaldamento come soluzione in aree urbane

Il teleriscaldamento, definito anche con l'acronimo di DH "District Heating" in inglese, o "DHC" per il teleraffrescamento (District Heating and Cooling) come già spiegato si configura come una risorsa di notevole interesse per la riduzione dei consumi energetici primari e delle emissioni locali. E' una soluzione di riscaldamento, e anche in certi casi raffrescamento, che può servire interi quartieri o aree urbane. La sua efficacia dipende dalla concentrazione delle utenze in un'area ben definita, come appunto delle zone cittadine, un'area commerciale o industriale, oppure un insieme di utenze pubbliche. La caratteristica rimane la distanza percorribile da queste tubazioni, le quali possono arrivare ad una distanza massima di 60 km.

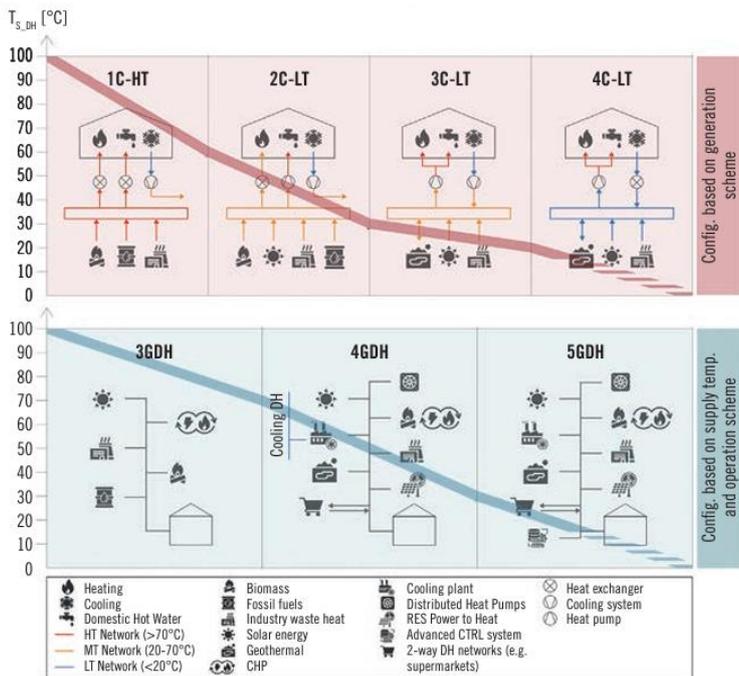
Come si è visto, si sono sviluppate nelle varie epoche. Storicamente, nel tardo XIX secolo, l'origine del sistema di TLR come 1° generazione, era caratterizzato da una rete di distribuzione basata su vapore ad alta temperatura; infatti, la T° di mandata era pari a circa 300°C. Con il tempo la tendenza è stata quella di abbassarla per la distribuzione e integrarla successivamente con nuove tecnologie, come il calore residuo del vapore utilizzato nelle caldaie a tubi di acciaio per la produzione di energia, le fonti rinnovabili.

Tuttavia, a partire dagli anni '30 del XX secolo, si è assistito alla transizione dal vapore all'acqua pressurizzata, come fluido vettore passante nelle reti di teleriscaldamento, ma caratterizzate da temperature di fornitura poco superiori a 100 °C, vale a dire 120°C circa. Questa evoluzione verso la 2° generazione ha portato alla luce il problema delle perdite di calore lungo le condutture.

Nel tempo, grazie al progresso tecnologico e il miglioramento dell'efficienza degli edifici, la temperatura di mandata della terza generazione di reti di teleriscaldamento è stata ottimizzata, raggiungendo valori compresi tra 70 °C e 100 °C. Ciò ha comportato l'eliminazione della necessità di pressurizzare l'acqua nel circuito idraulico, consentendo l'introduzione di tubazioni prefabbricate attraverso l'uso di rivestimenti plastici coibentati e appositi per le moderne reti di teleriscaldamento e raffreddamento.

La maggiore efficienza dell'edificio ha permesso di ridurre ulteriormente la temperatura di mandata della terza generazione di DH (District Heating) da 70 ° C a massimo 100 ° C. [47]

Negli ultimi anni, si è visto un netto miglioramento tecnologico, con temperature di mandata bassissime, le quali arrivano a 55°C per il tlr di quarta generazione e tra i 10-30°C per i sistemi di quinta generazione.



[Fig.29] Differenze tra le generazioni di teleriscaldamento del metodo svizzero (sopra) e il metodo danese (sotto). Fonte online: Caputo et al., 2020-https://repository.supsi.ch/12697/1/2726dss_2021-1_6.pdf

modello denominato 1GDH (First Generation District Heating), ai successivi 2GDH, 3GDH, 4GDH, 5GDH. Le ultime generazioni possono sfruttare T° di mandata ancora più basse, anche arrivando a meno di 30°C.

Questo permette di ottenere diversi vantaggi in termini di sostenibilità, come maggiore efficienza energetica, riduzione delle perdite di rete, maggiore usufrutto del calore di scarto, fusione con fonti di energia rinnovabile e possibilità di incorporare la rete con un altro sistema energetico locale [48].

3.5 Reti di teleriscaldamento a bassa temperatura

Le reti di teleriscaldamento a bassa temperatura stanno emergendo come una soluzione promettente per affrontare le sfide legate alla sostenibilità e all'efficienza energetica. Tuttavia, i cogeneratori impiegati per soddisfare la domanda termica di queste reti, sebbene altamente efficienti, (esempio di Torino) dipendono ancora in larga misura da fonti non rinnovabili, come il gas naturale, e presentano significative perdite di calore e costi di installazione elevati.

In particolare, durante i mesi estivi, quando molte reti di teleriscaldamento operano principalmente per fornire acqua calda sanitaria, le perdite termiche possono rappresentare il 30% dell'energia fornita, a causa della lunga permanenza dell'acqua nelle tubature. Questi problemi, insieme alla diminuzione della domanda di riscaldamento dovuta al rinnovo del patrimonio edilizio esistente, possono compromettere la redditività economica delle infrastrutture tradizionali di teleriscaldamento ad alta temperatura.

Ad oggi sono stati comparati alcuni esempi di due paesi esteri che hanno classificato il teleriscaldamento secondo i loro standard:

Il metodo svizzero classifica i sistemi di teleriscaldamento in base allo schema di generazione del calore. Questo metodo suddivide le reti in quattro classi 1C-HT, 2C-LT, 3C-LT, 4C-LT, distinguendo tra sistemi ad alta temperatura e sistemi che utilizzano calore a temperature più basse [Fig.29]. Infatti, la prima lavora ad alta T° , mentre le altre riescono a sfruttare il calore sotto i 60-70°C;

Il metodo danese invece, classifica i sistemi di teleriscaldamento in base alla temperatura di mandata e al modello di funzionamento. Anche questo metodo suddivide i sistemi in quattro generazioni partendo dal primo

Per affrontare tali prove, si è visto che la ricerca si è concentrata sullo sviluppo delle reti di teleriscaldamento e raffreddamento di quarta e quinta generazione, che operano a temperature ancora più basse. Questo approccio permette di ridurre le perdite di trasporto e di diversificare le fonti di calore, integrando fonti rinnovabili come il calore residuo da incenerimento dei rifiuti (termovalorizzatori) o le fonti geotermiche.

Secondo (Lund et al., 2014) [49], le future generazioni di teleriscaldamento dovrebbero puntare verso l'utilizzo di fonti energetiche rinnovabili e ridurre la domanda complessiva di calore degli edifici. A tal fine, sono state definite una serie di caratteristiche che queste nuove reti dovrebbero possedere, tra cui la capacità di fornire calore a bassa temperatura agli edifici esistenti e nuovi, ridotte perdite di rete, riciclo del calore e integrazione di fonti rinnovabili, inclusa la possibilità di far parte di un sistema multi-energia rinnovabile (MES) che comprenda anche il raffreddamento, oltre a un solido modello di business che consideri la transizione verso fonti di energia sostenibili [53].

3.5.1 Reti di teleriscaldamento di Quarta Generazione

Le reti di teleriscaldamento di quarta generazione segnano un notevole progresso nell'ambito dell'efficienza energetica [Fig.30]. Questi sistemi operano a temperature più basse, fino a 55°C, migliorando notevolmente l'allineamento tra domanda e offerta di riscaldamento [Fig. 31]. [50]



Tramite un'indagine condotta dall'Agenzia danese per l'energia [47] si evince che il fabbisogno energetico specifico per il riscaldamento delle nuove abitazioni si aggira intorno a 42,6 kWh/m². Essa ha altresì dimostrato che persino gli edifici esistenti risalenti agli anni '70 possono beneficiare di un riscaldamento efficiente con temperature di distribuzione inferiori a 55°C, grazie a

[Fig. 30] Rielaborazione grafica personale che riassume i vantaggi delle future generazioni di teleriscaldamento (quarta e quinta generazione).

diversi interventi di ristrutturazione relativamente semplici. [51]

L'attuazione di questi interventi rappresenta un passo cruciale. Tuttavia, la gestione dell'acqua calda sanitaria (ACS) diventa più complessa quando la temperatura di alimentazione scende sotto i 55°C, a causa delle normative riguardanti il rischio di crescita della legionella [52]. Per affrontare questa sfida, sono stati esplorati diverse modalità per riuscire a decentralizzare la preparazione dell'ACS. Una delle soluzioni prevede l'utilizzo di uno scambiatore di calore istantaneo e un micro-serbatoio con riscaldatore ad immersione sul lato del consumatore.

Questo sistema, oltre a ridurre notevolmente la dispersione di calore, consente anche una significativa limitazione della temperatura media di ritorno.



Lund et al. [49] analizzano la possibilità di adottare micro-pompe di calore per incrementare la temperatura

[Fig. 31] Rappresentazione schematica personale sulla tipologia del sistema di teleriscaldamento di Quarta generazione

dell'acqua calda sanitaria in ogni edificio. Tuttavia, i costi iniziali elevati di questa soluzione sollevano dubbi sulla sua convenienza economica. Nonostante ciò, va sottolineato che tale approccio comporta una rilevante riduzione della richiesta di energia primaria, offrendo vantaggi significativi in termini di costo per la produzione del calore [55]. Inoltre, attraverso lo studio effettuato da Østergaard et al. [54] si suggerisce che mediante la riduzione della temperatura di mandata, in modo da corrispondere alle esigenze termiche specifiche di ogni singolo edificio, è possibile ridurre ulteriormente le perdite di calore durante la distribuzione fino ad un 30% rispetto ai sistemi di terza generazione. Questa diminuzione risulta molto vantaggiosa ed interessante per lo sviluppo delle reti di teleriscaldamento nelle aree rurali, aventi bassa densità abitativa e fuori dal cerchio urbano, presentando una domanda di riscaldamento in parte più bassa rispetto alle aree urbane e cittadine, ad alta densità [56].

3.5.2 Reti di teleriscaldamento di Quinta Generazione

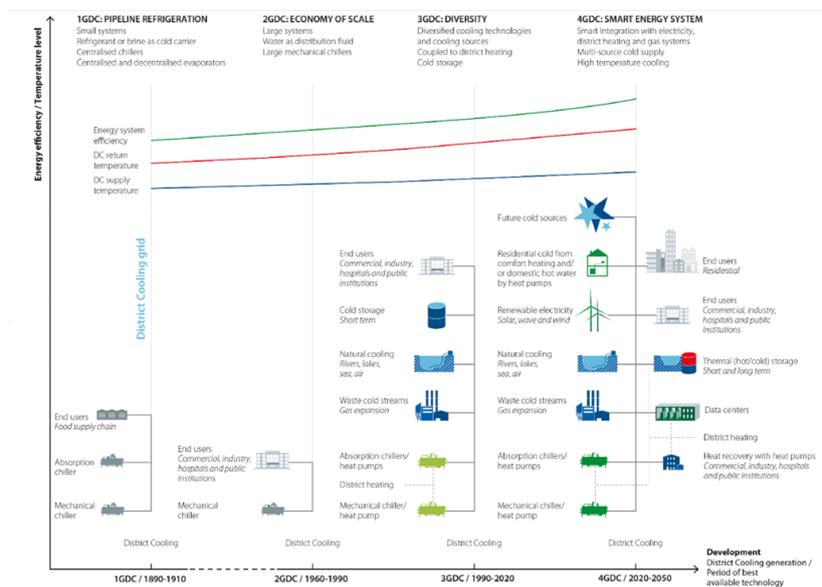
Il nuovo concetto di teleriscaldamento e teleraffreddamento di quinta generazione (5GDHC) rappresenta un notevole balzo in avanti nell'integrazione delle fonti di energia rinnovabile e nell'ottimizzazione dell'efficienza energetica [Fig.32]. Questi sistemi combinano in modo sinergico le peculiarità dei sistemi locali di energia rinnovabile con le prospettive innovative del teleriscaldamento futuro, come illustrato da (Lund et al., 2014) [49]. Secondo (Buffa et al., 2019) [55], la temperatura di mandata tipica in un sistema 5GDHC varia solitamente tra i 10 e i 25 °C, ma tale gamma può flettersi in base alle esigenze specifiche dell'edificio, alle risorse termiche disponibili, alle strategie di controllo personalizzate e alle condizioni climatiche locali. Molte



infrastrutture a bassa temperatura trovano collocazione in zone con falde acquifere altamente produttive, dove sfruttano le acque sotterranee come fonte termica

[Fig.32] Rappresentazione schematica sulle caratteristiche di un sistema di teleriscaldamento di Quinta generazione.

tramite pozzi di estrazione e iniezione. Allo stesso modo, altre infrastrutture traggono beneficio dall'energia termica proveniente da mari o laghi, risorse per ora "inesauribili". Quando mancano fonti idrotermali, si ricorre a soluzioni differenti, come ad esempio l'installazione di una rete a circuito chiuso collegata a un'area di perforazione, utile per sfruttare il calore del terreno sottostante. [57]



[Fig. 33] Differenze tra efficienza energetica e generazione di teleriscaldamento. Fonte online: https://vbn.aau.dk/files/469954387/_The_four_generations_of_district_cooling_A_categorization_of_the_development_in_district_cooling_from_origin_to_future_prospect_.pdf

Vantaggi del teleriscaldamento di quinta generazione secondo gli studi effettuati da [58]:

- Possibilità di distribuire contemporaneamente riscaldamento e raffrescamento. Per questo motivo la quinta generazione di reti termiche è riconosciuta come teleriscaldamento e teleraffrescamento (DHC);

- Basse temperature di esercizio flottanti, solitamente molto vicine alla temperatura del suolo circostante;
- Partecipazione attiva ed economicamente riconosciuta degli utenti per i loro comportamenti e impatti sulla rete, con nuove possibili opportunità di business model per il mercato dell'energia.

Gen	Name	Temperature	Features
1G	First generation district heating (1GDH)	<200 °C	<ul style="list-style-type: none"> • Steam as heat carrier • Coal-fired systems • Concrete pipes
2G	Second generation district heating (2GDH)	>100 °C	<ul style="list-style-type: none"> • Pressurized hot-water • Fossil-based centralized plants
3G	Third generation district heating (3GDH)	~100 °C	<ul style="list-style-type: none"> • Pressurized hot-water • Industrialized substations • Heat storage integration • High-efficient CHP plants
4G	<ul style="list-style-type: none"> • Fourth generation district heating (4GDH) • Low-temperature district heating (LTDH) • Low-enthalpy systems 	50–80 °C	<ul style="list-style-type: none"> • Low-temperature water • Renewables integration • Heat waste recovery
5G	<ul style="list-style-type: none"> • Fifth generation district heating (5GDH) • District heating and cooling (DHC) • Decentralized heat pump smart grid • Water loop heat pumps systems • Cold District Heating (CDH) • Bidirectional low temperature networks 	<30 °C	<ul style="list-style-type: none"> • Heating and cooling supply • Reversible heat pumps substations • Decentralized production • Heat sharing metering

Si riassumono di seguito i vantaggi del sistema del teleriscaldamento:

[Fig. 34] Vengono riportate nella tabella sottostante le generazioni termiche con i loro corrispettivi nomi, temperature e caratteristiche. Fonte: M. Bilardo , F. Sandrone et al., *Modelling a fifth-generation bidirectional low temperature district heating and cooling (5GDHC) network for nearly Zero Energy District (nZED)*, in *Science Direct* (articolo on-line), *Energy Reports*, Vol. 7, November 2021, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484721002729?via%3Dihub>

- Comfort dato da accensione e spegnimento dell'impianto, e regolarizzazione personalizzata;
- Risparmio economico in quanto non vi sono costi di manutenzione della caldaia, energetico per le bollette e maggior sicurezza in quanto non vi è combustione;
- Installazione del sistema semplificato e non vi sono vincoli o obblighi di certificazione;
- Sostenibile per la riduzione delle emissioni inquinanti presenti nei centri urbani, soprattutto la CO₂.
- Ad oggi le normative prevedono che tutti i nuovi edifici costruiti a meno di 1 km dalla rete, siano già predisposti per l'allaccio.

Nonostante questi vantaggi, vi sono anche degli svantaggi:

- Si può vedere come le reti di teleriscaldamento, possano ancora essere dipendenti da una singola fonte di combustibile, come il gas naturale. Sebbene il teleriscaldamento possa ridurre le emissioni complessive rispetto ai sistemi di riscaldamento individuali, se la fonte di energia primaria non è rinnovabile, il sistema può comunque contribuire alle emissioni di gas serra e all'inquinamento atmosferico;
- Inizialmente costosa per gli scavi dovuti all'impianto nelle aree urbane, tubature e le centrali di produzione del calore;
- Efficienza variabile: L'efficienza del sistema di teleriscaldamento può variare a seconda della distanza tra la centrale di produzione e i punti di utilizzo. Le perdite di calore lungo le tubature possono ridurre l'efficienza complessiva del sistema, specialmente in aree molto estese.

CAPITOLO 4

LA GEOTERMIA E LE POMPE DI CALORE



[Fig. 35] Schema sulle fonti alternative legate al teleriscaldamento. Fonte online: <https://www.a2acaloreservizi.eu/teleriscaldamento/come-funziona>

Dopo aver discusso le caratteristiche, i vantaggi e gli svantaggi, compresi i benefici di un impianto di teleriscaldamento, è importante considerare alternative sostenibili per la produzione di calore e la riduzione delle emissioni dovute a gas inquinanti. Una di queste alternative è la geotermia, una fonte rinnovabile di energia termica che sfrutta il calore naturale proveniente dal sottosuolo. A differenza dei combustibili fossili, la geotermia non produce emissioni nocive nell'atmosfera e offre un approvvigionamento di calore costante [Fig. 35].

4.1 L'energia Geotermica

L'energia geotermica ha origine dal decadimento radioattivo degli isotopi presenti negli strati più profondi della Terra, come il nucleo, il mantello e la crosta terrestre. La radioattività di questi elementi genera un flusso di calore, stimato tra i 50 e i 70 mW m^{-2} , che si propaga fino agli strati più superficiali della Terra. Questo flusso geotermico si trasmette verso la superficie principalmente per conduzione termica. Quando il flusso geotermico risale attraverso gli strati più profondi e incontra una falda idrica, il calore viene trasportato principalmente attraverso i meccanismi di advezione e dispersione. L'intensità del flusso geotermico è direttamente proporzionale alla conducibilità termica del mezzo, che è una proprietà intrinseca dei materiali presenti nel sottosuolo. Poiché i materiali in questo strato di suolo sono spazialmente disomogenei, l'intensità del flusso varia da zona a zona. Tuttavia, si può osservare un aumento della temperatura a partire da alcune decine di metri di profondità dalla superficie terrestre, con circa 3 K ogni 100 m. L'assorbimento di energia solare nel terreno e lo scambio di calore con l'aria in superficie generano un'alterazione termica limitata ai primi metri di crosta terrestre. A profondità superiori a 10-15 m dalla superficie, le variazioni di temperatura causate dalle fluttuazioni stagionali diventano trascurabili, consentendo di assumere una T° costante del sottosuolo durante tutto l'anno. Questa caratteristica, combinata al flusso geotermico, consente lo sfruttamento del sottosuolo come potenziale risorsa [59].

Date le analisi condotte dall'Unione Italiana per la Geotermia [60], si definisce l'energia geotermica meramente come calore presente all'interno della Terra. Esso è responsabile di diversi fenomeni geologici su scala planetaria. Tuttavia, comunemente, quando si fa riferimento all' "energia geotermica", ci si interfaccia alla porzione di calore terrestre che può essere estrapolata dal sottosuolo e utilizzata dall'uomo. Utilizzando pompe di calore geotermiche, è

possibile estrarre il calore dal terreno o dalle acque sotterranee per riscaldare gli edifici in modo efficiente ed ecologico. Inoltre, la geotermia presenta un vantaggio significativo rispetto ad altre fonti rinnovabili come il sole o il vento, poiché il calore al di sotto del suolo è disponibile in modo continuativo, è sempre presente, indipendentemente dalle condizioni meteorologiche. Questo rende la geotermia una soluzione ideale per soddisfare i bisogni di riscaldamento soprattutto nelle regioni con climi freddi o variabili. Si può aggiungere che, integrare la geotermia come fonte di calore nei sistemi di teleriscaldamento, quindi, può contribuire in modo significativo alla riduzione delle emissioni di carbonio e all'adozione di pratiche energetiche più sostenibili ed efficienti.

Infatti, in questa parte ci si è focalizzati sulle varie caratteristiche, differenze, vantaggi e svantaggi che esistono in un impianto geotermico.

Le pompe di calore geotermiche emergono come una tecnologia promettente e altamente efficace, il che giustifica un'analisi più approfondita sull'argomento. Questa tecnologia potrebbe contribuire in modo significativo a diversi ambiti:

1. Riduzione del consumo di energia primaria destinata al riscaldamento e al raffreddamento, soprattutto nelle zone urbane, dove la domanda è particolarmente elevata.
2. Conformità agli obiettivi dell'Unione Europea: le pompe di calore geotermiche offrono molteplici integrazioni con fonti energetiche anche non costanti, come l'eolico o il fotovoltaico, combinando produzione di calore ed elettricità.
3. Sostituzione dei sistemi di riscaldamento tradizionali, come le caldaie, con sistemi basati su pompe di calore a livello generale. Tale sistema di distribuzione del calore, migliora il monitoraggio e il controllo delle emissioni.
4. Utilizzo di sistemi di produzione distribuita basati su fonti rinnovabili, contribuendo così alla riduzione delle emissioni di CO₂, come evidenziato da (Verda et al., 2012) [61].

Tuttavia, sorgono interrogativi relativi allo scarico delle acque a temperature diverse rispetto a quelle di base (più calde in estate e più fredde in inverno). Queste problematiche riguardano l'utilizzo delle acque sotterranee esistenti.

Nel capitolo verranno descritte le diverse tipologie di impianto geotermico, le caratteristiche delle pompe di calore geotermiche (open-loop e closed-loop), con un esempio riportato dal Politecnico di Torino attraverso l'impiego di questi strumenti in combinazione con le indagini geologiche, idrogeologiche e simulazioni prese in considerazione per definire le scelte progettuali dei sistemi a pompa di calore ad acqua sotterranea (definiti come "Ground Water Heat Pump", GWHP).

4.2 Pompa di calore geotermica

Esiste un'apparecchiatura chiamata "pompa di calore" che ha la capacità di spostare energia termica da una fonte di temperatura più bassa a un serbatoio termico a temperatura più alta. Questo trasferimento di calore, regolato dal secondo principio della termodinamica⁶, richiede un contributo energetico, che può essere fornito tramite il lavoro meccanico di un compressore (utilizzando il ciclo a compressione del vapore) o attraverso uno scambio termico (mediante il ciclo ad assorbimento).

Una pompa di calore può funzionare in modalità "riscaldamento" o "raffrescamento" a seconda dell'effetto desiderato:

- Nel primo caso, il calore viene ceduto al serbatoio termico caldo, che può essere rappresentato dai dispositivi di riscaldamento dell'edificio o da un serbatoio di acqua calda sanitaria (ACS);
- Nel secondo caso, il calore viene estratto dalla fonte a temperatura più bassa, che può essere costituita da dispositivi di raffreddamento. L'efficienza energetica della pompa di calore è determinata dal rapporto tra l'energia utile prodotta e l'energia assorbita durante il processo, cioè l'energia elettrica consumata [62].

In generale, la peculiarità di questo tipo di macchina riguarda propriamente l'utilizzo di quest'ultima come condizionamento dell'aria, sia aria calda per la stagione invernale e sia aria fresca per la stagione estiva, di solito accoppiate, per avere maggior comfort termico all'interno degli ambienti e per gli utenti stessi.

Le pompe di calore presentano una varietà di configurazioni, ognuna ottimizzata per specifiche applicazioni:

- Le pompe di calore aria-aria: Estraggono calore dall'aria esterna e lo trasferiscono all'interno degli ambienti. Tuttavia, in zone con temperature molto basse, potrebbe essere necessario attivare il processo di sbrinamento o "defrosting", con conseguente aumento del consumo energetico.
- Le pompe di calore acqua-acqua: Utilizzano l'acqua come fonte di calore, che può provenire da fonti salate o dolci. Nelle abitazioni, si preferisce spesso l'uso dell'acqua dolce, integrata con un fluido antigelo per prevenire il congelamento durante i mesi invernali. Il prelievo di calore da falde acquifere risulta particolarmente interessante per i sistemi geotermici.
- Le pompe di calore terreno-acqua o terreno-aria: Sfruttano il terreno come fonte di calore. Il fluido termovettore, che trasporta il calore dalla fonte sotterranea all'utenza, può essere aria o acqua. Le combinazioni possibili includono terreno/acqua e terreno/aria.

La scelta della pompa di calore più adatta dipende dalle specifiche esigenze dell'applicazione, dalle condizioni climatiche locali e dalle caratteristiche dell'edificio o dell'impianto [45].

⁶ | Il secondo principio della termodinamica è uno dei principi fondamentali della fisica che riguarda il comportamento dei sistemi termodinamici, legato anche all'entropia ed enunciato da Kelvin e Planck, inerente i sistemi che coinvolgono calore e lavoro. Esso può essere formulato in diverse maniere, ma una delle espressioni più semplici e comprensibili è: "Il calore non può fluire spontaneamente da un corpo freddo a uno più caldo". Questa formulazione implica che in un sistema isolato, il calore tende naturalmente a fluire dai corpi a temperatura più alta a quelli a temperatura più bassa, ma non il contrario. In altre parole, il calore non fluisce spontaneamente da un ambiente freddo a uno caldo senza l'intervento di lavoro esterno o di un sistema più complesso. Se ne differenzia dalla teoria di Clausius. Fonte: https://www.univpm.it/Entra/Engine/RAServeFile.php/f/P002590/allegati_ins/Lez09ter.pdf

Come enunciato in precedenza, vi sono due tipologie di pompe di calore che si suddividono per la loro operatività. La più utilizzata anche a livello commerciale è la “pompa di calore a compressione di vapore” [Fig.36], la quale, nella sua lavorazione prevede quattro fasi importanti:

1. *Evaporazione*: Questa fase implica la rimozione di calore dalla "sorgente fredda" attraverso un dispositivo chiamato evaporatore. All'interno di questo evaporatore, un fluido refrigerante che, con un basso punto di ebollizione circola e quando entra in contatto con un ambiente circostante a temperatura più elevata, evapora, assorbendo calore dall'ambiente;
2. *Compressione*: Durante questa fase, il vapore compresso aumenta la sua temperatura grazie al lavoro svolto da un motore. Questo processo permette di riqualificare l'energia termica appena estratta dalla "sorgente fredda".
3. *Condensazione*: In questa fase, il calore proveniente dalla "sorgente fredda" viene trasferito al sistema di riscaldamento attraverso un secondo scambiatore di calore chiamato condensatore. L'energia termica trasferita include la componente prelevata dall'ambiente esterno freddo, oltre al lavoro meccanico svolto dal compressore e convertito in calore.
4. *Espansione*: Durante questa fase, il fluido di processo ritorna alle sue condizioni iniziali attraverso un processo di depressurizzazione realizzato tramite una valvola di espansione. Durante questo processo, il fluido si espande e rilascia calore, preparandosi per il ciclo termico successivo [45].

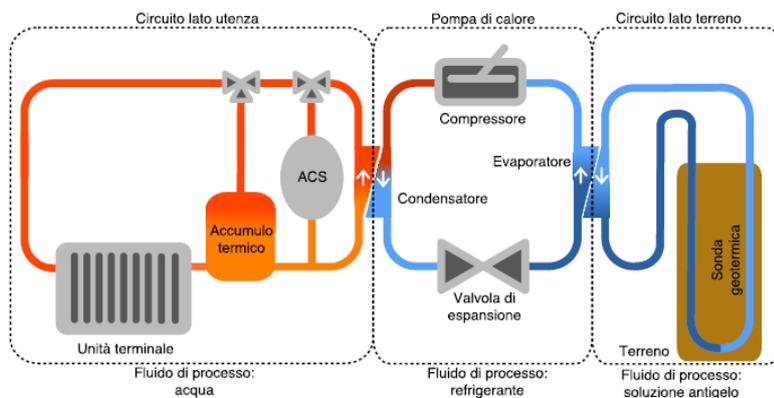


Figura 1.1 – Funzionamento di un sistema di riscaldamento a pompa di calore a circuito chiuso.

[Fig. 36] Funzionamento di un sistema di riscaldamento a pompa di calore in un closed-loop/circuito chiuso. Fonte: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.01.047>

Lo schema in [Fig. 36] illustra un esempio in un contesto di un sistema di riscaldamento. La pompa di calore è integrata con una sorgente di calore esterna (circuito lato terreno, a sinistra) e un sistema di distribuzione del calore all'interno dell'edificio (circuito lato utenza, a destra), la parte intermedia è costituita dalla pompa di calore, che ha il compito di trasformare l'energia. Ad esempio, durante il ciclo di raffreddamento, il condensatore e l'evaporatore invertono i ruoli e il flusso di calore, interagendo

rispettivamente con la fonte esterna, come una sonda geotermica e il sistema di distribuzione del calore interno alle abitazioni (come radiatori, fan coils o pannelli radianti a pavimento).

Attraverso l'evaporatore, il refrigerante assorbe calore dalla sorgente a bassa temperatura, aumentando il suo volume specifico attraverso una trasformazione isoterma.

Successivamente, il compressore aumenta la temperatura e la pressione del vapore prima che questo entri nel condensatore. Qui, il vapore compresso rilascia il calore latente di evaporazione, trasformandosi in liquido caldo [61].

Infine, il fluido viene espanso attraverso una valvola di laminazione per ridurre sia la pressione sia la temperatura, in modo da consentire una nuova evaporazione e il continuo ciclo termico.

Il vantaggio delle pompe di calore risiede soprattutto nella loro capacità di inviare una quantità di energia termica superiore rispetto a quella elettrica impiegata per il loro funzionamento. Questo è possibile grazie al calore estratto dalla "sorgente fredda" e all'apporto derivato dalla trasformazione dell'energia elettrica durante la sua funzione, con conseguente dissipazione del calore residuo. L'efficienza di una pompa di calore è misurata attraverso il Coefficiente di Prestazione denominato "COP": maggiore è il COP, e più sarà inferiore la differenza di T° tra la sorgente fredda e la sorgente calda. Inoltre il COP è dato dal rapporto tra energia termica utile ceduta ad alta T° indicata con "E_u" e l'energia consumata per il funzionamento della macchina "E".

$$COP = E_u / E \quad [45]$$

Tuttavia, affinché la pompa di calore sia efficiente, il COP deve essere maggiore di 1, solitamente i valori richiesti si avvicinano a 3, anche se la scala varia da 1 a 5. Questo vuol dire che, se un COP = 3 indica che per ogni kWh di energia elettrica consumata, la pompa di calore renderà 3 kWh di calore.

Se, ad esempio, all'interno di un appartamento si volesse aumentare la T° e quindi riscaldare l'ambiente, il parametro di Coefficiente di Prestazione "COP" viene definito secondo il principio definito prima:

$$COP = \frac{Q_{HP, riscaldamento}}{E_{HP}} \quad (1.1) \quad Q_{HP, riscaldamento} \text{ (1.1 e 1.2) è la quantità di calore ceduta al pozzo caldo e } E_{HP} \text{ la quantità di energia elettrica richiesta dal compressore. Considerando}$$

$$COP \leq \frac{T_{calda}}{T_{calda} - T_{fredda}} \quad (1.2) \quad \text{la temperatura del pozzo caldo (} T_{calda} \text{) e quella della sorgente fredda (} T_{fredda} \text{) è possibile}$$

evidenziare che il COP è sempre minore o uguale all'inverso del rendimento di un ciclo di Carnot (66).

Nel caso di raffrescamento, l'indice di prestazione assume la denominazione *Energy Efficiency Ratio* (EER, in italiano "Rapporto di efficienza energetica") ed è definito come:

$$EER = \frac{Q_{HP, raffrescamento}}{E_{HP}} \quad (1.3) \quad EER \leq \frac{T_{fredda}}{T_{calda} - T_{fredda}} \quad (1.4)$$

$Q_{HP, raffrescamento}$ rappresenta la quantità di calore assorbito dalla sorgente fredda (1.3 e 1.4)

Il Coefficient Of Performance (COP) rappresenta l'efficienza della pompa di calore durante la stagione invernale, quando è utilizzata per il riscaldamento. Indica quanti kW di calore vengono prodotti per ogni kW di energia elettrica consumata.

L'Energy Efficiency Ratio (EER), invece, valuta l'efficienza della pompa di calore durante la stagione estiva, quando è impiegata per il raffrescamento. Anch'esso misura la quantità di calore rimossa rispetto all'energia elettrica consumata.

In un'ipotesi ideale, dove la pompa di calore non generi un aumento di entropia durante le fasi di compressione ed espansione del fluido, il rendimento può essere calcolato utilizzando il ciclo di Carnot inverso come riferimento. Questo fornisce un parametro di confronto per valutare l'efficienza delle pompe di calore nel mondo reale.

4.3 Tipologie di Impianti

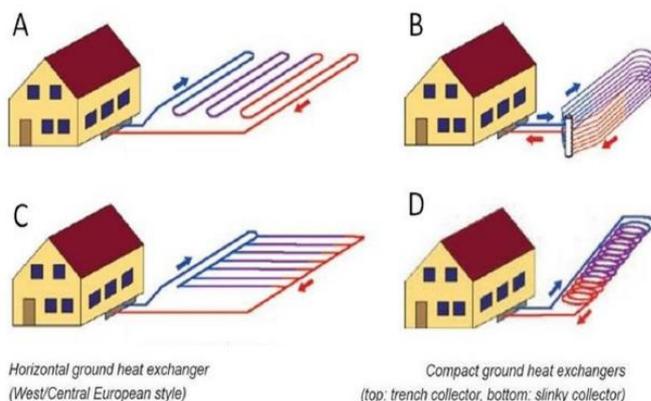
Come già enunciato, un elemento fondamentale dell'impianto è la sorgente esterna da cui la pompa assorbe calore (in modalità di riscaldamento) o lo cede (in modalità di raffreddamento), una distinzione fondamentale per le pompe di calore. Le più utilizzate e conosciute sono quelle che utilizzano l'aria come sorgente esterna, chiamate "aerotermitiche", ma si citano soprattutto quelle che utilizzano il terreno, denominate "geotermiche" [67]. A differenza delle prime, quest'ultime possono esercitare la loro funzione anche in modalità passiva, significa che estraggono comunque il calore dall'unità edilizia veicolando nel sistema l'acqua fredda o il liquido antigelo, senza l'azione di una pompa vera e propria [45].

Le pompe di calore si distinguono in base alla fonte di calore con cui operano, che può essere aria, terreno o acqua, sia superficiale (come fiumi, laghi e stagni) sia proveniente da falde sotterranee. Nello specifico si ricorda che, nell'ambito dell'energia geotermica a bassa entalpia, le pompe di calore sono in grado di trarre calore dal terreno o dall'acqua presente nel sottosuolo.

Nei sistemi di questo tipo, lo scambio di calore con il terreno può avvenire attraverso vari metodi, tra cui l'uso di pozzi di estrazione dall'acquifero, l'utilizzo di pali di fondazione o l'installazione di sonde verticali o orizzontali, a seconda della direzione delle perforazioni e del tipo di impianto geotermico da realizzare.

Queste ultime, si possono dividere in due categorie:

- A circuito chiuso ("Closed Loop");
- A circuito aperto ("Open Loop").



[Fig. 37] Schema che sintetizza i diversi sistemi di tipo orizzontale a circuito chiuso, con pompa di calore geotermica (GSHP). Vi sono diverse configurazioni: A) In serie, B) in trincea, C) in parallelo, D) a spirale. Fonte: (Rafferty, 2000; Lund, 2007)

I primi sono i sistemi "Closed Loop" (Ground Source Heat Pump, GSHP), come quello rappresentato in [Fig. 37]. Il loro scambio termico avviene attraverso il terreno, con la circolazione di un fluido termovettore all'interno di un circuito idraulico chiuso. Il fluido termovettore di solito è una soluzione di acqua e ulteriori componenti antigelo (ad esempio: il glicole etilenico o quello propilenico). Essi, si basano principalmente sullo scambio di

calore per conduzione tra il terreno e questo fluido termovettore presente nel circuito.

Quest'ultimo è costituito da tubi posati nel sottosuolo e collegati alla pompa di calore geotermica. Nell'ambito di tali impianti, i sistemi di scambio termico possono essere realizzati con sonde orizzontali o verticali. Le sonde orizzontali, posizionate a una profondità compresa tra 1 e 4 metri dalla superficie, sono soggette a fluttuazioni termiche, vale a dire a variazioni di temperatura durante la giornata, che ne influenzano l'efficienza. Inoltre, richiedono una maggiore superficie di terreno disponibile rispetto alle sonde verticali.

Al contrario, le sonde verticali di tipo Open Loop, pur garantendo un'elevata efficienza energetica, richiedono pozzi molto più profondi, con profondità variabili tra 50 e 200 metri. Ciò comporta costi iniziali più elevati associati alle operazioni di perforazione. Per ottimizzare l'uso delle sonde geotermiche, vengono impiegati pali geotermici e altre strutture simili, che consentono lo scambio termico durante la costruzione di elementi strutturali come appunto, pali di fondazione, conci, diaframmi e platee, soprattutto in contesti di nuova edificazione.

Gli impianti geotermici closed-loop possono essere installati in diversi contesti geologici, ad eccezione di quelli caratterizzati da instabilità. Pur richiedendo investimenti iniziali significativi, presentano vantaggi economici a lungo termine grazie ai minori costi di manutenzione rispetto agli impianti geotermici open-loop [63]. Il meccanismo di un sistema Closed-Loop è chiarito in dettaglio in [Fig. 36], analizzata prima.

Questa tipologia (configurazione orizzontale) come in figura 32, è solitamente la configurazione più conveniente quando è disponibile uno spazio adeguato nell'area circostante all'edificio e le trincee sono facili da scavare, soprattutto mentre un edificio è ancora in costruzione. Il loro COP varia da 3,1 a 4,9, la EER TRA 2,9 E 4,5 [45].

Esistono al loro interno delle sub-categorie rispetto agli impianti a circuito chiuso:

- Sistema a circuito chiuso orizzontale [Fig. 32] posti nel sottosuolo:
 - a. (Fig. 1A), Collegamento in serie;
 - b. (Fig. 1B) Collegamento in trincea;
 - c. (Fig. 1C) Collegamento in parallelo;
 - d. (Fig. 1D) Collegamento a spirale.
- Sistema a circuito chiuso verticale con scambiatore di calore downhole (DHE, District Heating and Cooling) [Fig. 38-A.] [63]



Fig. 38-A



Fig. 38-B

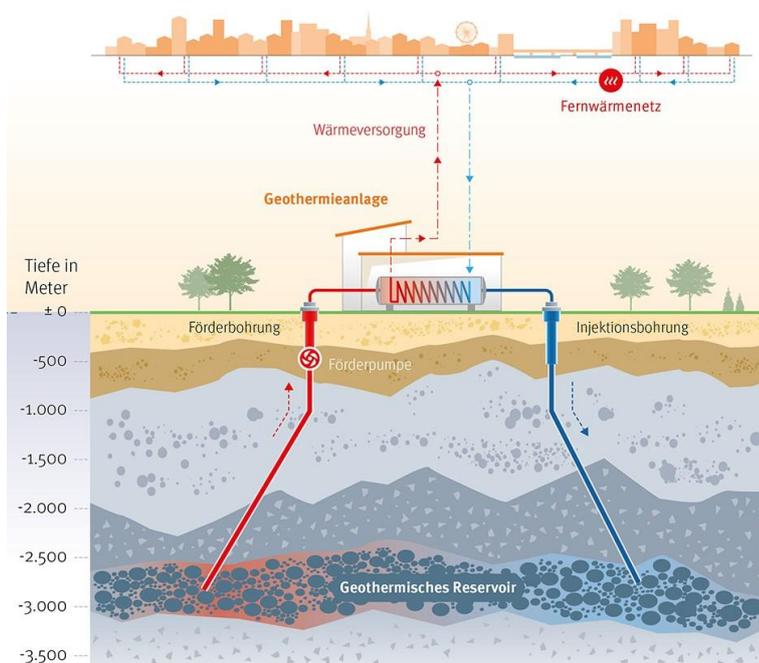
[Fig. 38] A sinistra è rappresentato un sistema verticale a circuito chiuso con scambiatore di calore downhole (DHE). A destra vi è un sistema a circuito aperto, con pompa di calore ad acqua di falda (GWHP). Fonte: Taddia G., trad. 2018. "Sfruttamento del sottosuolo in aree urbane mediante Sistemi Geotermici a pompe di calore: L'esempio del Test Site del Politecnico Di Torino (NW Italia)". *Quaternario alpino e mediterraneo* 31 (2): 235-44. <https://doi.org/10.26382/AMQ.2018.18>

I sistemi di riscaldamento "Open Loop" (o "a circuito aperto"), noti anche come Ground Water Heat Pump (GWHP), [Fig. 38-B] operano attraverso lo scambio diretto di calore con l'acqua prelevata dalle falde acquifere sotterranee. Dopo aver ceduto o assorbito calore tramite l'evaporatore (in modalità riscaldamento) o il condensatore (raffrescamento), questa acqua viene riportata nel suo luogo d'origine. Anche se talvolta i sistemi che

sfruttano le acque superficiali (come fiumi, laghi o mare) per lo scambio termico vengono classificati come "a circuito aperto".

Nei sistemi geotermici open-loop (o a circuito aperto), vi è l'acqua di falda che viene prelevata da un pozzo e condotta alla pompa di calore per lo scambio termico. Successivamente, l'acqua trattata viene reinserita nella stessa falda attraverso un secondo pozzo, evitando di sfruttare eccessivamente la risorsa idrica sotterranea. In alternativa, meno comunemente, l'acqua può essere prelevata da fonti superficiali come fiumi o laghi e poi restituita all'ambiente tramite un corpo idrico ricettore, assicurandosi che la temperatura dell'acqua dopo lo scambio termico con la pompa di calore non differisca di più di 3°C rispetto alla temperatura originaria del corpo idrico superficiale.

In questo tipo di impianti, la disponibilità di una portata d'acqua sufficiente per alimentare la pompa di calore è fondamentale. Rispetto ai sistemi a circuito chiuso, quelli a circuito aperto offrono un maggiore rendimento energetico poiché il terreno che circonda la sonda mantiene una temperatura più costante nel corso dell'anno. Tuttavia, è importante evitare che l'acqua estratta abbia una temperatura troppo bassa durante i mesi invernali, altrimenti potrebbe compromettere l'efficienza del riscaldamento. L'acqua trattata, dopo lo scambio termico con la pompa di calore, viene reintrodotta nell'acquifero con una temperatura più elevata durante l'estate e più bassa durante l'inverno. Questo può comportare un aumento del carico idraulico vicino al pozzo di reimmissione e la formazione di un plume termico (corrente di fluido caldo che si muove verso l'alto e causa variazioni di T°), che richiede particolare attenzione nella gestione per evitare potenziali problematiche [64].

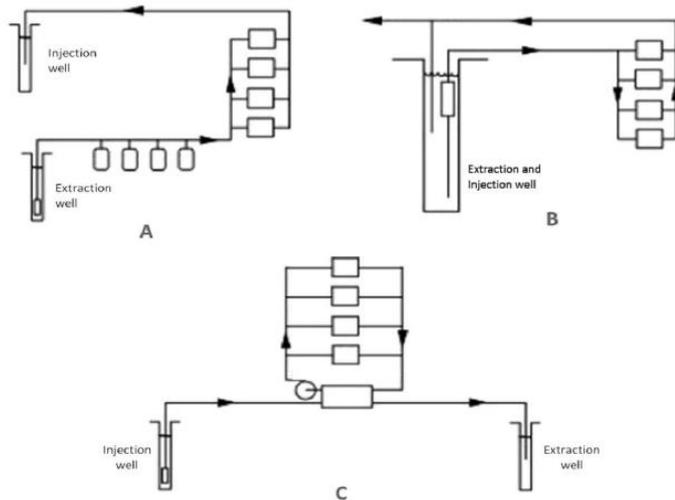


[Fig. 38- C] Rappresentazione di un sistema geotermico Open-Loop.
FONTE: <https://ilgiornaledellarchitettura.com/2024/01/08/infrastrutture-energetiche-per-la-citta-sostenibile/>

Le pompe di calore a circuito aperto, specialmente quelle che utilizzano le acque sotterranee [Fig. 38-C], sono capaci di estrarre calore dall'acqua durante l'inverno per riscaldare gli ambienti. In estate, grazie alla loro reversibilità, possono trasferire il calore dagli ambienti interni all'acqua sotterranea, raffreddando l'aria. Questi sistemi risultano particolarmente adatti nelle aree con falde acquifere ampie e poco profonde, dove l'estrazione dell'acqua è relativamente semplice e conveniente [63]. In questo caso il COP varia da 3,6 a 5,2 e un EER tra 3,4 e 5,0 [45].

Esistono principalmente tre configurazioni come si evince dagli studi effettuati da (Taddia G.,2018) [67]:

- Come in [Fig. 39-A], le pompe di calore a circuito aperto, dove l'acqua viene direttamente utilizzata per lo scambio termico con la pompa di calore, adatte per applicazioni residenziali e commerciali di piccole dimensioni. Tuttavia, è importante notare che l'uso di acque ad alta salinità può causare incrostazioni nei componenti dell'impianto;
- In [Fig. 39-B]: I sistemi con pozzi a colonna, utilizzati in zone dove i pozzi sotterranei non forniscono sufficiente acqua per un sistema a circuito aperto convenzionale. In questi casi, l'acqua sotterranea viene ricircolata da un'estremità all'altra del pozzo, garantendo un flusso costante di acqua con una buona qualità chimica.



[Fig.39] Tipologie di sistemi a circuito aperto: **A)** Pompe di calore dirette a circuito aperto; **B)** Tipologia a sistemi di colonne fisse (SCW); **C)** Sistemi indiretti ad anello aperto (Rafferty, 2001). Fonte: <https://doi.org/10.26382/AMQ.2018.18>

- Nei sistemi indiretti a circuito aperto [Fig. 39-C], tipicamente si utilizza uno scambiatore di calore che funge da interfaccia tra il circuito dell'edificio e l'acqua sotterranea. Questo dispositivo consente di evitare qualsiasi contatto diretto tra i componenti dell'edificio e le acque sotterranee, garantendo così una maggiore sicurezza e durata del sistema.

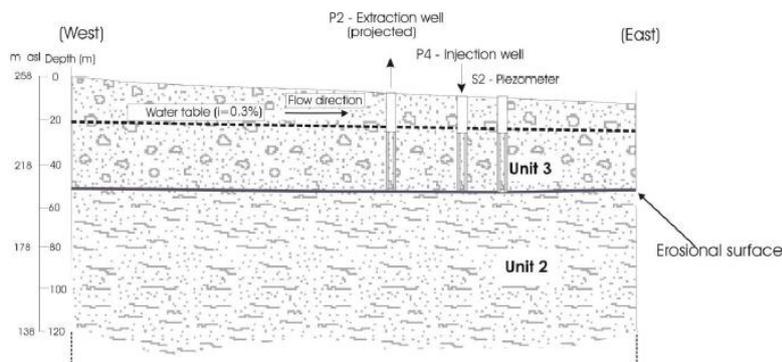
E' da tenere conto che per progettare un GWHP, si ha bisogno di avere grandi quantità di acqua sotterranea a una T° stabile e costante. Di solito, come viene riportato nel caso studio effettuato a Torino presso il sito del Politecnico, una falda acquifera che sia produttiva e con minima profondità (30 m dalla superficie) potrebbe agevolare efficacemente il sistema [63].

L'analisi effettuata dal Politecnico di Torino ha previsto l'implementazione di un sistema di pompa di calore ad acqua di falda (GWHP), cioè Open Loop per il raffreddamento degli edifici universitari. Il sistema utilizza due pozzi profondi 47 metri per l'estrazione e l'iniezione dell'acqua sotterranea, insieme a un piezometro posto a 35 metri per il monitoraggio. Le sonde sono state utilizzate per registrare il livello dell'acqua, la temperatura e la conducibilità nelle acque sotterranee. La modellazione numerica è stata eseguita per simulare il flusso dell'acqua sotterranea e il trasferimento di calore. Infine, i dati sperimentali sono stati utilizzati per validare i modelli e determinare la geometria e il funzionamento ottimali del sistema. Per conoscere le caratteristiche del terreno è molto utile studiarne le caratteristiche geomorfologiche e idrogeologiche dell'area,

attraverso indagini geognostiche svolte tramite l'utilizzo di pozzetti con involucro in acciaio (diametro 355 mm.).

Dallo studio quindi si è estrapolato una sezione trasversale delle perforazioni effettuate per un Sistema Open Loop.

Il caso studio evidenzia che Torino è un luogo ideale per esaminare gli effetti delle pompe di calore sulle falde acquifere. Nella zona, si sono già realizzate molte installazioni di pompe di calore ad acqua di falda di varie dimensioni. Inoltre, le pompe di calore ad anello aperto reiniettano l'acqua nella falda con una temperatura diversa rispetto all'originale, generando un effetto termico che si diffonde nelle acque sotterranee. Questa variazione può influenzare la temperatura dell'acqua prelevata da altri impianti situati più a valle [Fig. 40].



[Fig. 40] Sezione trasversale del Sistema Open Loop (GWHP), installato presso il Politecnico di Torino per il raffreddamento di alcuni edifici universitari. Fonte: <https://doi.org/10.26382/AMQ.2018.18>

Poiché l'efficienza delle pompe di calore dipende dalla temperatura dell'acqua in ingresso, le variazioni non previste delle prestazioni possono causare problemi.

La ricerca, infine, si è concentrata sull'impatto dei sistemi di pompe di calore geotermiche a bassa entalpia, con particolare attenzione alla falda acquifera nella pianura della città. Le analisi

hanno dimostrato che la disponibilità di risorse idriche abbondanti presenti nell'area favoriscono l'efficacia di tali sistemi. I risultati hanno evidenziato l'importanza della modellazione previsionale per valutare gli impatti ambientali e ottimizzare le decisioni progettuali. È stata confermata l'influenza della componente avvertiva del flusso di calore sulla Zona Termica Interessata (TAZ), sottolineando la necessità di una caratterizzazione accurata della geologia e dell'idrogeologia del sottosuolo. La determinazione della TAZ intorno ai punti di iniezione è essenziale per la progettazione dei sistemi geotermici, consentendo di valutare la compatibilità della falda acquifera con le infrastrutture esistenti e gli utilizzi del territorio [65].

Il Decreto Legislativo italiano 22/2010 ordina le risorse geotermiche in: alta, media e bassa entalpia [66].

Le differenze, come nell'impianto di teleriscaldamento, riguardano le temperature.

- Le risorse ad *alta entalpia* sono costituite da un fluido estratto dal sottosuolo con temperature superiori ai 150°C, comunemente impiegato per generare energia elettrica tramite turbine a vapore;
- A *media entalpia*, invece, riguardano fluidi con temperature comprese tra i 90° e i 150°C, utilizzati sia per il teleriscaldamento diretto che per processi industriali;
- Infine, le risorse a *bassa entalpia* si riferiscono a fluidi con temperature inferiori a 90°C, spesso impiegati per il riscaldamento diretto. Quando la temperatura del fluido è

significativamente al di sotto dei 90°C, l'utilizzo delle pompe di calore geotermiche consente di ampliare le possibilità di sfruttamento di questa risorsa, tra cui la produzione di acqua calda sanitaria o il riscaldamento e il raffrescamento di edifici privati e pubblici.

In questo studio ci si concentra perciò sull'utilizzo della risorsa geotermica a bassa entalpia tramite pompe di calore, con l'obiettivo di riscaldare e/o raffrescare gli ambienti interni degli edifici.

4.4 Normative

A livello nazionale, la normativa a cui si fa riferimento è il Decreto Legge del 1° marzo 2022, articolo n. 17 introducendo gli articoli sulle misure urgenti per contenere i costi dell'energia elettrica e del gas naturale, promuovere lo sviluppo delle energie rinnovabili e rilanciare le politiche industriali. Tra le disposizioni principali vi sono gli interventi per ridurre le bollette energetiche per i consumatori, incentivare gli investimenti nelle fonti energetiche rinnovabili e promuovere lo sviluppo del settore industriale in linea con gli obiettivi ambientali.

Inoltre, integra l'articolo 25 comma 6 del decreto legislativo 199/2021, stabilendo che entro 60 giorni dall'entrata in vigore:

Devono essere definite le prescrizioni per l'installazione degli impianti di produzione di calore da risorsa geotermica, ovvero le sonde geotermiche, destinate al riscaldamento, alla climatizzazione degli edifici e alla produzione di energia elettrica. In aggiunta, si specificano i casi in cui l'installazione può essere considerata libera, purché gli impianti non superino una potenza di 2 MW e scambino solo energia termica con il terreno tramite fluido vettore circolante in sonde geotermiche appositamente posizionate a contatto con il terreno, senza prelievo o immissione di fluidi nel sottosuolo [67].

Si fa riferimento, inoltre, alle norme emanate dal Comitato Termotecnico Italiano (CTI) del 2012:

- La norma *UNI 11466:2012* per le tipologie di impianto, i criteri di progettazione e il dimensionamento della pompa di calore;
- *UNI 11467* per le diverse strutture (i sistemi a circuito chiuso o aperto, caratteristiche del terreno, dimensionamento, metodologie di calcolo, geosonde verticali o orizzontali e pozzi di scambio di acqua di falda);
- *UNI 11468:2012* per i molteplici requisiti ambientali [68].

Per quanto riguarda gli impianti che implicano lo scarico dell'acqua nel sottosuolo, è essenziale consultare il Decreto Legislativo 152/2006, il quale proibisce generalmente lo scarico diretto in falda per gli impianti geotermici [79].

4.5 Vantaggi e Svantaggi

I vantaggi di un impianto geotermico non sono pochi, soprattutto se sono installati in un'area urbana:

-
1. L'energia geotermica è pulita e rinnovabile, riduce l'emissione di anidride carbonica e altre sostanze inquinanti responsabili dell'effetto serra e del cambiamento climatico. Utilizzando il calore dal sottosuolo, si elimina la necessità di combustibili fossili.

2. A differenza di altre fonti rinnovabili come l'eolico e il solare, l'energia geotermica è costantemente disponibile e la sua produzione non dipende da stagioni, clima o variazioni diurne.
3. Gli impianti geotermici, sia domestici che industriali, sono silenziosi e non producono inquinamento acustico.
4. Gli impianti richiedono poca manutenzione e hanno bassi costi per la manutenzione. La loro struttura a circuito chiuso riduce il rischio di guasti e non comporta rischi di emissioni nocive o incendi.
5. Occupa spazi modesti e richiede poca acqua. Inoltre, i moderni impianti sono progettati per reimmettere in circolo il calore non utilizzato, riducendo l'impatto sul territorio e sulle risorse idriche.
6. Adattabilità agli edifici: Gli impianti geotermici possono essere utilizzati per il riscaldamento e il raffrescamento di una vasta gamma di edifici, riducendo i consumi energetici primari e fungendo anche da caldaia o boiler per l'acqua sanitaria ed essere unita come fonte rinnovabile ad un impianto di teleriscaldamento.

Gli svantaggi includono:

1. Difficoltà nella localizzazione dei giacimenti: I giacimenti geotermici sono dispersi e spesso situati a profondità elevate, rendendo difficile il loro individuazione e sfruttamento.
2. L'installazione di un impianto geotermico può essere inizialmente costosa, e non tutti i terreni sono adatti per ospitarne uno.
3. Effetti sulla stabilità del terreno: possono verificarsi effetti sulla stabilità del terreno; quindi, è necessario andare a studiare il terreno su cui si andrà ad operare.
4. Gli impianti geotermici open-loop presentano sfide legate alla gestione del plume termico (cioè quella zona con temperatura alterata dell'acqua di falda dell'acquifero causata dallo sfruttamento geotermico. Questo fenomeno si verifica intorno al pozzo di reimmissione dell'acqua estratta per lo scambio termico con la pompa di calore geotermica. Esso può influenzare la temperatura dell'acqua nell'acquifero circostante e può migrare verso altri pozzi geotermici, compromettendo il rendimento del sistema e influenzando le condizioni termiche dell'acquifero), attorno ai pozzi di reimmissione, che possono compromettere l'efficienza energetica e causare alterazioni nei prelievi d'acqua. È cruciale adottare misure preventive e monitoraggi per garantire uno sfruttamento equo e sostenibile delle risorse idriche sotterranee [64].

L'ipotesi di questa tesi è voler studiare un'alternativa più sostenibile per il teleriscaldamento presente nel centro urbano di Torino attraverso l'impiego di un impianto geotermico.

Dal punto di vista ambientale, l'impianto di teleriscaldamento rappresenta un'opzione da non sottovalutare, in quanto è in grado di fornire calore alle utenze che abitano nell'area urbana fungendo da sistema in grado di veicolare calore geotermico alle utenze. Vi è una convenienza sia per l'ambiente, sia in termini energetici; infatti, questa opzione dipende molto dal totale della richiesta energetica annua, dall'efficienza che si ha per la produzione di calore e dalla densità di

popolazione dell'area presa in esame. Per questo motivo, questa tipologia di installazione unito ad un impianto geotermico permetterebbe di svolgere un ruolo di collaborazione e dare al teleriscaldamento un'alternativa sostenibile rispetto a quella presente oggi nelle centrali di Torino.

CAPITOLO 5.

Analisi territoriale piemontese: Inquadramento geografico, geologico e morfologico

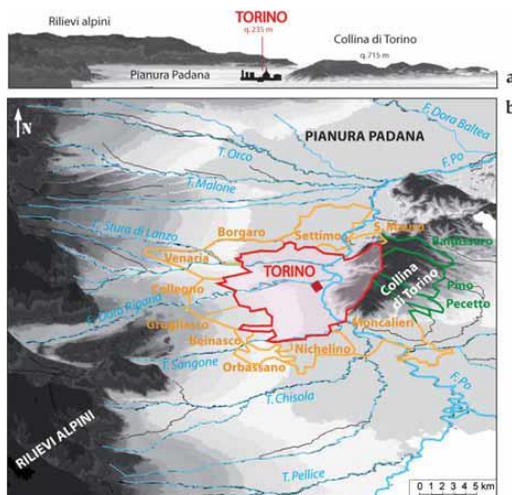
Per poter comprendere meglio come può un impianto geotermico essere implementato a livello urbano, si devono necessariamente andare ad analizzare dei punti salienti:

1. Analisi territoriale attraverso l'inquadramento geografico, geologico e morfologico piemontese e della città di Torino;
2. Analisi demografica della città di Torino;
3. Analisi sull'assetto climatico e idrogeologico.

5.1 Inquadramento geografico e geologico piemontese e della città di Torino

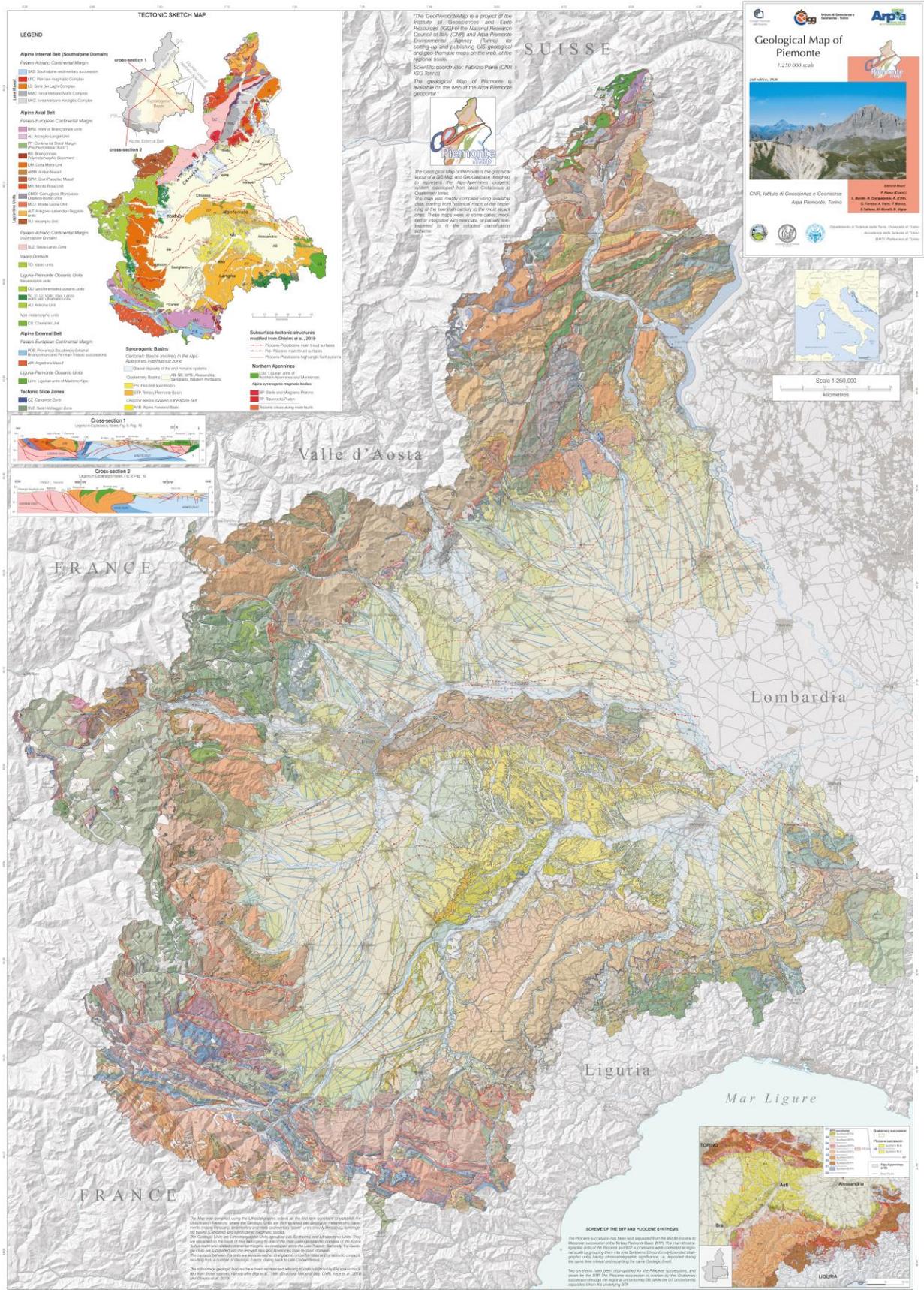
Attraverso la pubblicazione della Carta Geologica del Piemonte estrapolabile in scala 1:250.000 dal sito di ARPA Piemonte [Fig. 42] [70]. In alto a sinistra viene riportata la mappa per lo studio della struttura tettonica estesa all'intera regione, rappresentando la distribuzione e le due sezioni, trasversale e longitudinale, inerenti le faglie, le pieghe, le placche e le origini storico-geologiche del territorio.

Il capoluogo si trova in una posizione geografica molto particolare, situata nella parte ovest della pianura padana, collocata tra le Alpi occidentali e le colline circostanti. La sua posizione, tuttavia, è piuttosto singolare, come mostrato nella [Fig. 41] sottostante [Forno e Lucchesi, 2014][71]. Come si vede, la sua posizione non è al centro della pianura, ma si accosta in modo marginale ai piedi delle colline, lungo il corso del Fiume Po. Questa posizione privilegiata ha avuto un impatto significativo sullo sviluppo asimmetrico della città, come indicato dalla linea rossa nella figura



[Fig. 41] – Nel profilo (a) e nel modello digitale del terreno (b) l'area metropolitana di Torino, corrisponde ad una ristretta fascia di pianura (Pianura Padana occidentale) compresa tra il margine dei rilievi alpini e il rilievo della Collina a Est. Attorno alla parte concentrica e centrale di Torino (in rosso) si sviluppano i comuni della prima cintura, di pianura (in giallo) e quelli collinari (in verde). Fonte: FORNO M. G., Dipartimento di Scienze della Terra, UniTO, LUCCHESI S. Dipartimento di Scienze della Terra, UniTO, "La successione pliocenico-quadernaria su cui è edificata la Città di Torino e il suo significato per l'utilizzo del territorio", Geologia dell'Ambiente, Supplemento al n. 1/2014, pp.1-2.

41b. La città si distingue per il suo tessuto urbano: oltre alla parte pianeggiante da cui è composta l'area urbana, i comuni circostanti si estendono in maniera irregolare, creando una sorta di configurazione a raggiera che si estende come una sorta di "stella" nelle direzioni nord, ovest e sud di Torino, come evidenziato dalla linea gialla nella figura 1b. Le zone residenziali più dense, con ampie aree verdi e boschi circostanti, si trovano a est, dove la città è nettamente interrotta dalla presenza delle colline.

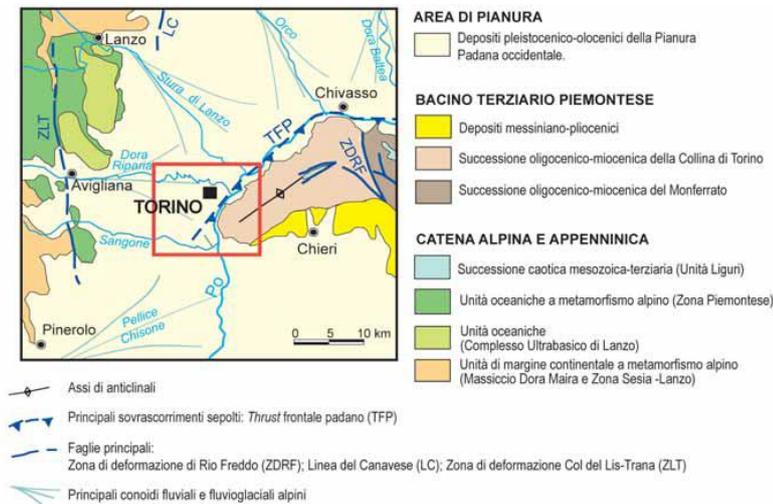


[Fig. 42]. Carta geologica del Piemonte, scala 1 : 250.000, 2nd edition, anno 2021. Fonte: Arpa Piemonte, CNR Istituto di Geoscienze e georisorse. Web: <https://webgis.arpa.piemonte.it/agportal/apps/storymaps/stories/1d810af57020440abla57ec99d00a3a2>

5.1.2 Studio geologico del terreno

Le storiche successioni sedimentarie della città di Torino vengono mostrate nella figura 3, dividendo le tre zone differenti [Fig.43]:

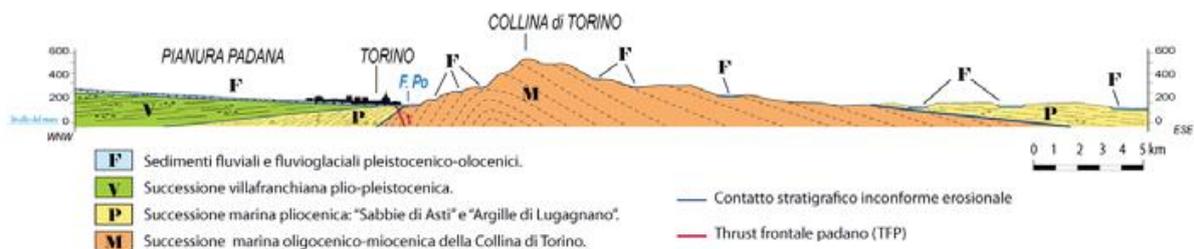
- L'area di pianura, come riportato in legenda, è costituita da rocce metamorfiche derivanti dai depositi pleistocenico-olocenici (corrispondente a 2,5 milioni di anni fa a 1000 anni fa circa);
- L'area collinare, indicata come bacino terziario piemontese, è suddivisa in depositi di era messiniano-pliocenici estendendosi fino alla successione oligocenico-miocenica (periodo dai 34 ai 23 milioni di anni fa). Si tratta di sedimenti marini terziari, più antichi rispetto a quelli presenti nell'area pianeggiante della città;
- Le alpi, in legenda sono mostrate come catena alpina e appenninica, formate da unità oceaniche a metamorfismo alpino (Zona Piemontese e delle Valli di Lanzo);



[Fig. 43]. Schema geologico dell'area in esame con l'indicazione degli estesi conoidi laterali che costituiscono il tratto di pianura padana occidentale considerato. Il riquadro indica l'area rappresentata in Fig. 4. Fonte: FORNO M. G., Dipartimento di Scienze della Terra, UniTO, LUCCHESI S. Dipartimento di Scienze della Terra, UniTO, "La successione pliocenico-quadernaria su cui è edificata la Città di Torino e il suo significato per l'utilizzo del territorio", Geologia dell'Ambiente, Supplemento al n. 1/2014, p. 2. Modificato da Festa et al., 2010.

Secondo gli studi effettuati da Forno e Lucchesi [71], l'inclinazione più modesta del versante ovest si aggira intorno al 5-10% e corrisponde a una minore inclinazione dei corpi sedimentari, i quali sono interessati da una più recente deformazione.

Dalla sezione [Fig.44], vi si distinguono in maggior dettaglio i sedimenti fluviali pleistocenico-olocenici (F) i quali presentano uno spessore ridotto e più sottile con un minimo di 10 mt., estendendosi fino al margine della Collina di Torino, per poi aumentare spessore con un massimo



[Fig. 44]. Profilo schematico dell'area in cui è edificata la Città di Torino, con altezze fuori scala (x2). Gran parte del tessuto urbano si sviluppa su una estesa superficie di erosione modellata sulla successione terziaria della Collina di Torino. Fonte: FORNO M. G., Dipartimento di Scienze della Terra, UniTO, LUCCHESI S. Dipartimento di Scienze della Terra, UniTO, "La successione pliocenico-quadernaria su cui è edificata la Città di Torino e il suo significato per l'utilizzo del territorio", Geologia dell'Ambiente, Supplemento al n. 1/2014, p. 2.

di 80 mt., in direzione dell'arco alpino. Questa stratificazione è la più recente di tutte ed è la più esposta in superficie.

Le diverse stratificazioni e le conseguenti discontinuità erosive che si sono susseguite nel tempo, sono state rilevate da studi diagnostici ambientali, potendo dunque arrivare ad una migliore comprensione storica degli sviluppi avvenuti in epoche più antiche e datate, ma anche più recenti, presenti nell'area pianeggiante.

In effetti, quest'area non manifesta una pianura alluvionale con depressioni tettoniche causate dal deposito di sedimenti fluviali, piuttosto ci si trova di fronte ad un'area che ha avuto recenti sollevamenti.

Questi fenomeni hanno un impatto sulla geometria dei depositi sedimentari, nonché sull'assetto idrografico e la configurazione del fiume Po.

Al di sotto della parte più superficiale (*F*), giacciono altre stratificazioni, indicate in legenda con le lettere (*V, P, M*).

A ovest della città, tendente verso le alpi, (*V*), si incontra la successione fluviolacustre villafranchiana plio-pleistocenica composta dall'alternanza di *elementi sabbiosi misto a ghiaia fine e corpi siltosi*, avendo percentuali di argilla, torbe e ligniti molto rilevanti.

Nella stratigrafia (*P*) di successione marina pliocenica nota come "Sabbie di Asti" o "Argille di Lugagnano", si traducono in sabbie fini e silt argillosi ricchi di fossiliferi.

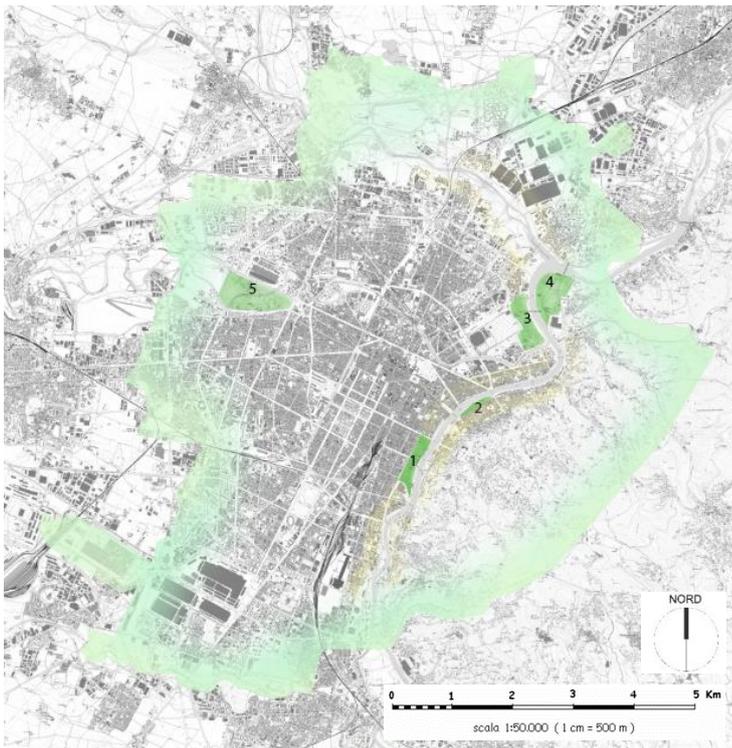
Come si evince sempre dalla figura 4, il terreno è composto da una parte pianeggiante dove giace la città di Torino e il suo centro storico, composta da depositi fluviali e una formazione eterogenea.

A est, dove si erge la collina, si trovano i sedimenti marini oligocenici-miocenici (*M*), dove la composizione vede la formazione di rocce sedimentarie di depositi fluviali.

I sedimenti più ghiaiosi fanno riferimento alle fasi più antiche e storiche, mentre quelli più sabbiosi sono collocati in periodi fluviali postglaciali, poco più recenti.

Grazie all'analisi effettuata da [82], si è visto come gran parte della città sia stata edificata sopra successioni ghiaiose-sabbiose con qualche decina di metri di spessore, dove ancora al di sopra di questi ultimi giacciono sedimenti sabbioso-limosi. [71]

5.1.3 Urbanizzazione nel contesto geologico del territorio torinese



Dalle caratteristiche geologiche descritte, si può notare come l'ampia estensione delle zone di pianura, grazie alla prevalenza di terreni ghiaioso-sabbiosi e all'andamento leggermente inclinato del terreno (circa 1‰), ha agevolato la crescita e l'espansione nel tempo della struttura urbana.

Il tessuto urbano sviluppatosi nel centro cittadino è costituito da edifici storici che continuano sulle superfici terrazzate delle colline, poste a diversi metri sopra i corsi d'acqua. L'espansione della città in pianura, invece, vede lo sviluppo di strutture più recenti.

Talvolta, durante la fase di costruzione di questi nuovi insediamenti, emergono sfide legate al raggiungimento del livello della falda acquifera da parte

[Fig. 45]. Mappa geologica con dettaglio sulla città di Torino. Fonte: Geoportale Arpa Piemonte. Base cartografica di riferimento annuale 2021, raster b/n, 1:10.000, Regione Piemonte. Web: <https://geoportale.arpa.piemonte.it/app/public/?pg=mappa&ids=39dad8e2f7df43d2a011c13a5fccb8eb,9733847665364bfb8c448e286de6ca17>

delle fondazioni degli edifici, oltre a possibili danni futuri dovuti a eventi alluvionali.

Dunque, come si vede sulla mappa estrapolata dal Geoportale Arpa Piemonte [Fig.45], le aree in cui vi sono edifici molto vicini ai corsi d'acqua (in giallo), si denota un arretramento di alcuni metri, riuscendo a custodire i parchi che fiancheggiano i fiumi principali tra cui: 1.Parco del Valentino, 2.Parco Michelotti, 3.Parco della Colletta, 4.Riserva naturale del Meisino, 5.Parco della Pellerina.

Per quanto riguarda l'area collinare, invece, ospita meno edifici abitativi, questo perché i sedimenti marini siltoso-argillosi citati in precedenza e l'accentuata pendenza del terreno, ne hanno impedito la costruzione su vasta scala. Le antiche ville padronali sono state costruite solo nelle zone pianeggianti influenzate dal modellamento del fiume durante l'era del Pleistocene.

Caratteristiche morfologiche della città

Nello specifico si possono distinguere due aree:

- La *zona pianeggiante* riportata in rosso (Fig.41b), la quale si estende maggiormente verso ovest, a un'altitudine compresa tra circa 200 e 350 metri sul livello del mare (s.l.m.) ed è prevalentemente caratterizzata da una morfologia sub-pianeggiante con una leggera pendenza verso est e nord-est, dell'ordine di circa 1‰ (Fig. 41a). Di recente, la pianura ha subito significative trasformazioni dovute all'interferenza antropica, particolarmente evidente nelle zone urbanizzate [71].
- A est, invece, si trova la *zona collinare* (in verde, fig. 41b), situata a un'altitudine che varia dai 200 ai 715 metri (fino all'altezza del Colle della Maddalena) presentando una

morfologia più articolata. Le forme predominanti sono di origine fluviale e includono scarpate ridotte e depressioni correlate ad alvei abbandonati.

Nelle aree attraversate dai corsi d'acqua, come sottolineato da [71], si estendono in modo più costante una sequenza di terrazzamenti disposti a gradoni, delimitati da scarpate di erosione che raggiungono un'altezza di alcuni metri. Essi sono responsabili del drenaggio di significativi bacini alpini.

In base alle più recenti ricerche, emergono evidenze riguardo al versante frontale della città di Torino, andando per percentuali, si sono rilevate inclinazioni del 10-15% accentuate verso ovest e nord-ovest, create attraverso strette creste montuose orientate da est a ovest nella zona nordoccidentale e da sud-est a nord-ovest in quella nordorientale.

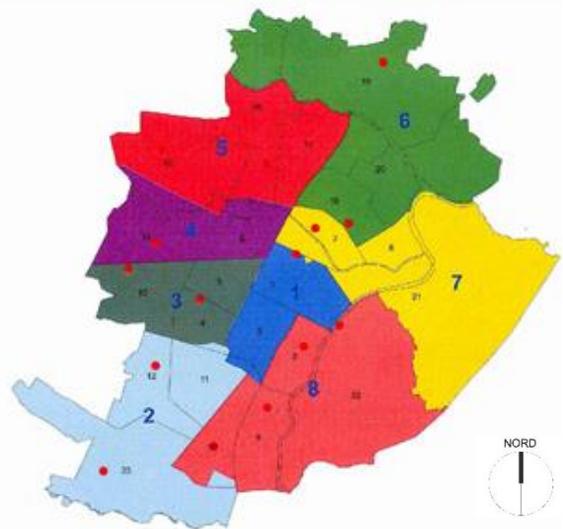
Mentre, sul versante opposto e con inclinazione verso sud, le pendenze sono più moderate, oscillando tra il 5% e il 10%. Il profilo delle dorsali è interrotto da tratti pianeggianti e depressioni, risultando come resti di antiche conformazioni fluviali, formando così una successione terrazzata. L'area collinare, pertanto, è drenata principalmente dagli affluenti sulla sponda destra del fiume Po. Il terreno presenta notevoli pendenze, circa del 5%, con un orientamento ovest-est sul versante occidentale, sud-est e nord-ovest su quello nord-occidentale. Questi corsi d'acqua contribuiscono a formare una rete idrografica locale con portate mediamente modeste, caratterizzate da una notevole variabilità nel corso dell'anno.

5.2 Analisi demografica della città di Torino

Ad oggi, secondo i dati ISTAT [72], Torino presenta un'estensione complessiva di 130,01 km² (densità pari a 6508,59 ab./km²) con localizzazione della maggior parte dell'abitato in pianura (l'80% dell'estensione cittadina) con un totale di 846.926 abitanti dal bilancio mensile del 2024.

Essa è suddivisa da 8 macro-distretti denominati "circoscrizioni" [73] [Fig.46]:

1. Centro-Crocetta;
2. Santa Rita-Mirafiori Nord-Mirafiori Sud;
3. San Paolo-Cenisia-Pozzo Strada-Cit Turin-Borgata Lesna;
4. San Donato-Campidoglio-Parella;
5. Borgo Vittoria-Madonna di Campagna-Lucento-Vallette;
6. Barriera di Milano-Regio Parco-Barca-Bertolla-Falchera-Rebaudengo-Villaretto;
7. Aurora-Vanchiglia-Sassi-Madonna del Pilone;
8. San Salvario-Cavoretto-Borgo Po- Nizza Millefonti-Lingotto-Filadelfia



[Fig. 46]. Fuori scala. Rappresentazione della città di Torino e la suddivisione delle zone urbane. Fonte: <http://www.comune.torino.it/decentr/>

5.2.1 Classificazione Climatica

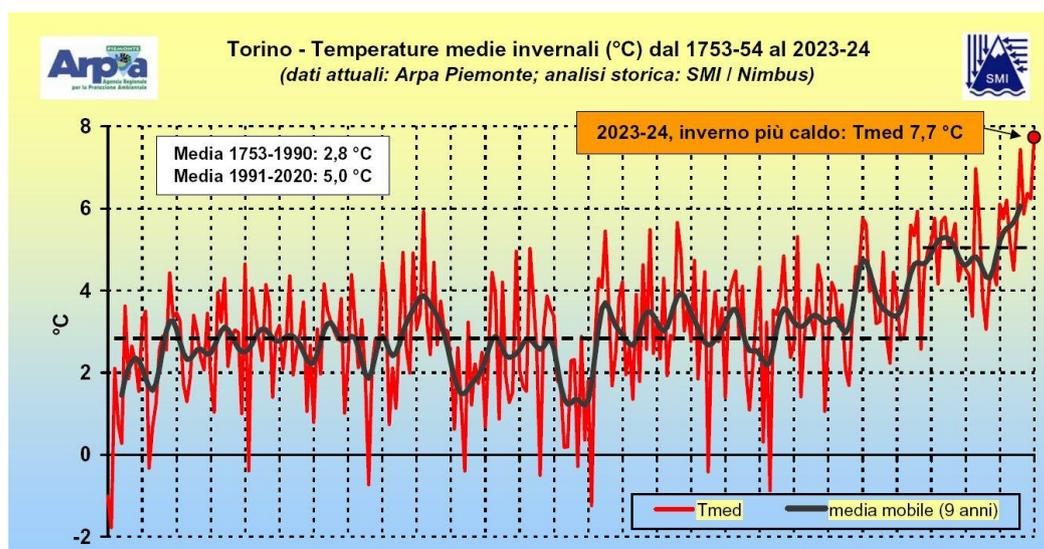
La *classificazione climatica* dei comuni italiani è stata istituita per sincronizzare l'efficienza e i tempi di funzionamento dei sistemi di riscaldamento degli edifici, al fine di regolare il consumo energetico in specifiche zone o città. In linea generale, l'Italia è divisa in sei diverse zone climatiche, determinate principalmente dai gradi-giorno. Questo approccio consente di adattare le pratiche di riscaldamento alle esigenze specifiche del clima locale, contribuendo così a una gestione più razionale delle risorse energetiche.

Secondo il Decreto del Presidente della Repubblica n. 412 del 26 agosto 1993, [74] riporta i dati inerenti la zona climatica per il territorio di *Torino* i quali sono così composti da:

- *Zona climatica E*, accensione degli impianti termici per la stagione invernale ottobre-aprile;
- *Gradi Giorno: 2617*. Il grado-giorno (GG) di una località è l'unità di misura che valuta il consumo energetico per mantenere una temperatura confortevole negli edifici. Si ottiene sommando gli incrementi medi giornalieri di temperatura necessari per raggiungere i 20 °C durante un periodo annuale convenzionale di riscaldamento. Più alto è il valore del GG, maggiore è la richiesta di riscaldamento e di conseguenza la necessità di utilizzare l'impianto termico [75];
- *Rischio sismico: zona 3* dal 2019, identificata come area non a rischio e con bassa probabilità che si verifichino forti terremoti. La rete sismica regionale rileva ogni anno centinaia di terremoti con epicentri localizzati in Piemonte (per esempio la Valle di Susa, Valle di Lanzo e Langhe) o in zone limitrofe.

Accanto alle aree epicentrali vengono percepiti all'circa dieci terremoti all'anno ma con effetti in genere di lieve entità. E' stata perciò definitiva una stima sull'attività sismica della zona torinese, segnalando scarsi movimenti tettonici [76].

Secondo i dati Arpa Piemonte in [Fig. 47], viene proposta una tabella inerente l'analisi storica (SMI/Nimbus) delle temperature medie invernali espresse in °C, nell'arco di tempo che parte dal 1753/[54 al 2023/24, dove si evince il suo incremento già dal 1974.



[Fig. 47]. Analisi storica delle temperature medie invernali (°C) dal 1753-54 al 2023-24.

Fonte: <https://www.arpa.piemonte.it/rischinaturali/tematismi/clima/confronti-storici/temperatura/giornaliere.html?delta=0>

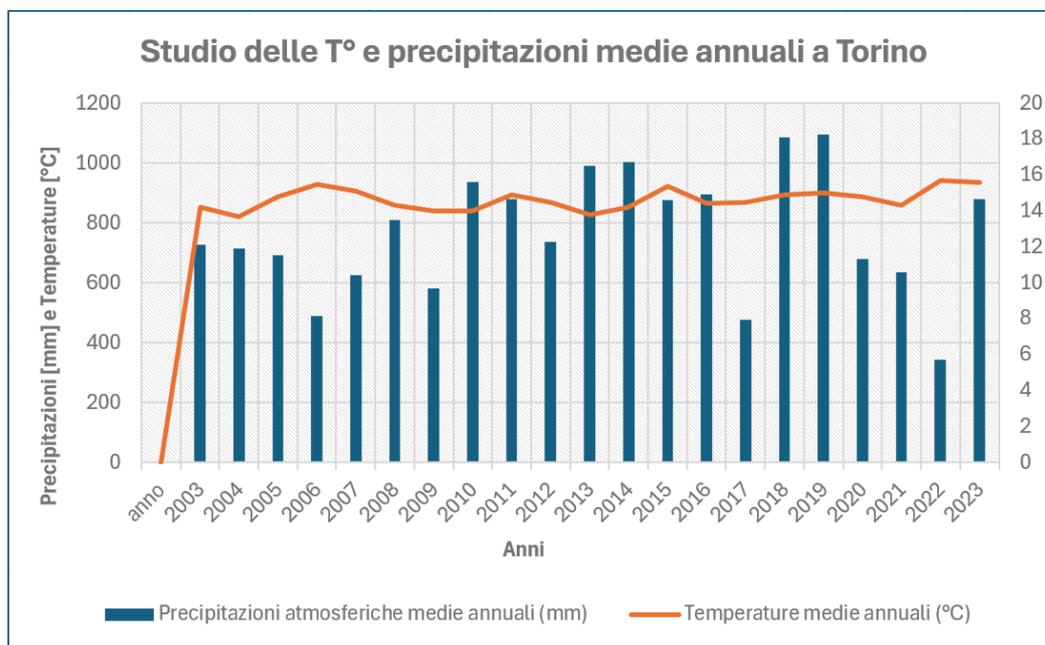
In alto a sinistra viene riportata la legenda inerente la media della temperatura partendo dal 1753 e arrivando al 1990, dove si può notare l'incremento delle T° pari a + 2,8°C, mentre dal 1991 al 2020 la T° media è pari a + 5,0°C. Tra lo scorso anno e l'inizio del 2024, si è potuto constatare una T° media di +7,7°C rispetto agli anni passati, definendo l'inverno più caldo degli ultimi tempi.

5.2.2 Studio delle temperature atmosferiche e precipitazioni annuali

Dai dati estrapolati dalla Stazione Meteorologica di Fisica dell'Atmosfera di Torino (UniTO) [78] per le temperature (°C) e dai dati dell'ARPA Piemonte stazione Giardini Reali [77], per le precipitazioni atmosferiche (mm), si può vedere che negli ultimi vent'anni, a partire dal 2003 fino al 2023 sono tendenzialmente moderate, ad eccezione degli anni 2018 e 2019 con più di 100 mm all'anno di pioggia. L'annata con meno piogge è stata il 2022, presentando una temperatura media annuale pari a 15.7°C, la più alta in tutto l'arco di tempo preso in considerazione, superando il 2003.

Per la maggior parte dei casi Torino ha un clima continentale moderato, con inverni freddi-umidi ed estati calde. Infatti, in inverno le T° possono scendere sotto lo zero, anche se negli ultimi anni le temperature sono state meno rigide, mentre le estati possono essere molto afose, come di recente, dove si sono superati di gran lunga i 30°C [Fig. 48].

Anche secondo gli studi riportati dalla Regione Piemonte in collaborazione con ARPA, vengono definiti i valori di riscaldamento e raffreddamento [Fig.48 a], la temperatura [Fig. 48b], precipitazioni [Fig. 48c].



[Fig. 48]. Breve studio creato tramite tabella Excel delle temperature [°C] e delle precipitazioni [mm] nella città di Torino, dal 2003 al 2023. Dati estrapolati dalla Stazione Meteorologica di Fisica dell'Atmosfera_Dipartimento di Fisica - Università degli Studi di Torino: www.meteo.dfg.unito.it e <https://www.arpa.piemonte.it/rischinaturali/tematismi/clima/confronti-storici/precipitazioni/anno-per-anno.html?delta=5>

- *Dati su riscaldamento-raffrescamento*



[Fig. 48 a]. **Riscaldamento-raffrescamento:** L'incremento delle T° porta alla riduzione delle esigenze di riscaldamento ad un aumento della necessità di raffrescamento estivo. Fonte: https://www.regione.piemonte.it/web/sites/default/files/media/documenti/2020-07/cc_card_come_cambia_il_clima_6_hd.pdf

- *Temperature*



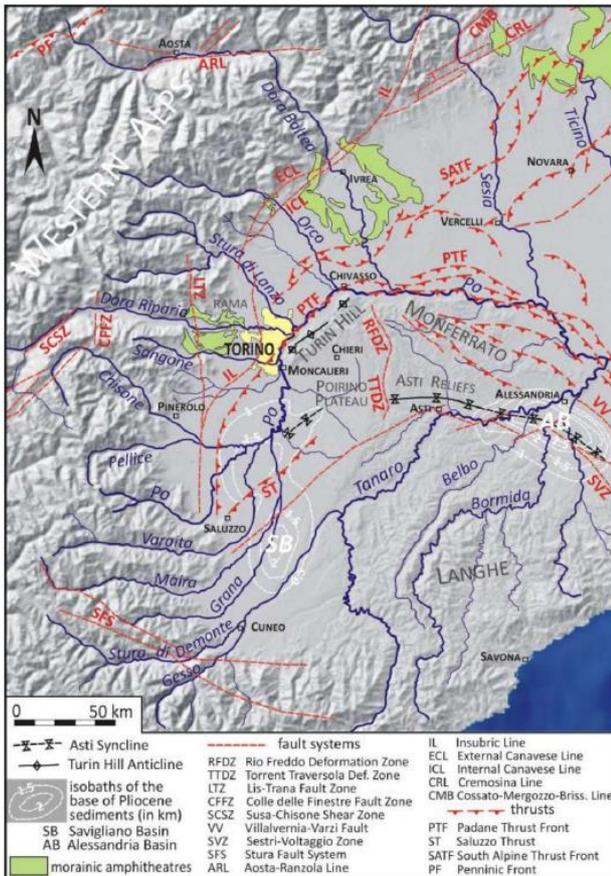
[Fig. 48b]. **Temperatura:** Le notti e i giorni tropicali evidenziano una leggera tendenza all'aumento (1 giorno ogni 20 anni circa) nelle zone di pianura e T° > ai 20-30°C, mentre per i giorni di gelo si hanno +1 giorno ogni 20 anni in montagna e dove di solito sono previste T° < 0°C. Fonte: https://www.regione.piemonte.it/web/sites/default/files/media/documenti/2020-07/cc_card_come_cambia_il_clima_6_hd.pdf

- *Precipitazioni*



[Fig.48 c]. **Per le precipitazioni,** i valori medi sul territorio si sono ridotti negli ultimi 30 anni di un 4% circa, soprattutto in pianura e di un 13/14% negli ultimi 60 anni, sia in pianura, sia in montagna. I massimi delle precipitazioni cumulate durante il giorno tendono ad aumentare di 1,28 mm/anno circa per l'area di pianura e 1,38 mm/anno per le aree montane. Fonte: https://www.regione.piemonte.it/web/sites/default/files/media/documenti/2020-07/cc_card_come_cambia_il_clima_6_hd.pdf

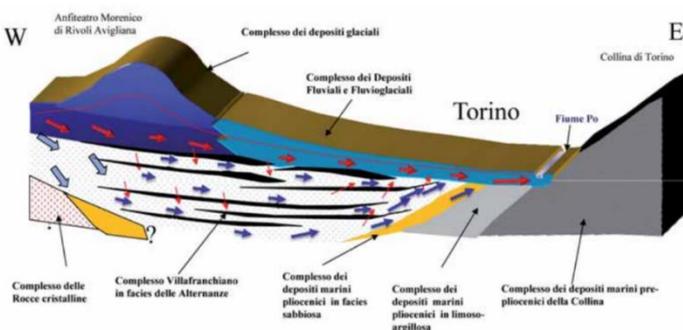
5.3 Analisi sull'assetto Idrogeologico



[Fig. 53]. Localizzazione di Torino e periferia (area urbana in giallo) tra le Alpi Occidentali e la Collina Torinese, che mostra una posizione asimmetrica lungo il fiume Po. La minore estensione della pianura fluviale (circa 17 km) è nei pressi di Moncalieri. Viene mappato anche l'Anfiteatro Morenico di Rivoli-Avigliana (RAMA, a ovest di Torino). Fonte: Forno, M. G., D. A. De Luca, M. Bonasera, A. Buccì, F. Gianotti, M. Lasagna, S. Lucchesi, S. Pelizza, G. Taddia, and F. Piana, trans. 2018. "SYNTHESIS ON THE TURIN SUBSOIL STRATIGRAPHY AND HYDROGEOLOGY (NW ITALY)". *Alpine and Mediterranean Quaternary* 31 (2): 147-69. <https://doi.org/10.26382/AMQ.2018.10>.

La rete idrografica dell'area presenta molte peculiarità. Il fiume Po, di recente formazione (dopo il Paleo Po), segna il confine tra la zona pianeggiante e collinare [Fig. 53]. Questa disposizione crea un'asimmetria nella rete dei suoi affluenti: a sinistra, ci sono importanti corsi d'acqua con portate considerevoli e pendenze moderate, come il Torrente Sangone, la Dora Riparia, il Torrente Stura di Lanzo e Orco; a destra, ci sono piccoli corsi d'acqua collinari con portate più basse ma pendenze più accentuate.

Questa configurazione della rete idrografica è la principale causa delle sfide legate al drenaggio durante le alluvioni.



[Fig. 54]. Schema della circolazione idrica sotterranea dell'area torinese (litostratigrafica). Fonte: *Geologia dell'Ambiente*. Periodico trimestrale della SIGEA (Società Italiana di Geologia Ambientale). Supplemento al n.1/2014-Anno XXII-gennaio-marzo 2014. ISSN 1591-5352, *Geologia urbana di Torino* (a cura di Masciocco L.), ProGEO, p. 14.

L'attraversamento del Po nella città crea una netta "spaccatura" tra la zona pianeggiante e quella collinare, scorrendo in diverse direzioni: da sud a nord e da sud-ovest a nord-est. Inoltre, vi sono numerosi affluenti che si diramano in varie direzioni proseguendo per tutta la regione. Lo schema sviluppato dalla Società Italiana di Geologia Ambientale (SIGEA) [79], illustrato nella [Fig. 54], descrive come avviene il movimento dell'acqua sotterranea nell'area di Torino. Esso coinvolge sia le acque che scorrono in profondità poste nel

Partendo da un'analisi più generale della regione Piemonte, si può vedere di seguito lo studio sulla piezometria della falda superficiale [Fig. 55] estrapolata dal sito ARPA Piemonte e la sua soggiacenza [Fig. 56].

Lo studio della piezometria della falda superficiale come illustrato in [Fig. 55] [80] è intrinseco nella branca della geologia e dell'idrologia occupandosi sull'analisi delle pressioni e dei livelli di acqua in una determinata zona. La ricerca si riferisce alla misurazione delle pressioni dell'acqua nella falda superficiale, costituendo la parte della falda idrica più vicina alla superficie del terreno. In sostanza, la piezometria coinvolge la misurazione del livello dell'acqua in pozzi o piezometri installati nella zona interessata. Perciò, le linee isopiezometriche sono linee che collegano punti con la stessa pressione piezometrica in una data area. Esse, infatti, vengono tracciate su mappe piezometriche per mostrare la distribuzione delle pressioni dell'acqua in una certa zona. Le linee possono essere utilizzate per comprendere il flusso dell'acqua sotterranea e che viene immagazzinata nel sottosuolo, la direzione del flusso e l'interazione tra le diverse porzioni della falda e può essere utilizzata per fini come la gestione delle risorse idriche, la progettazione di pozzi o la valutazione del flusso idrico in una determinata area.

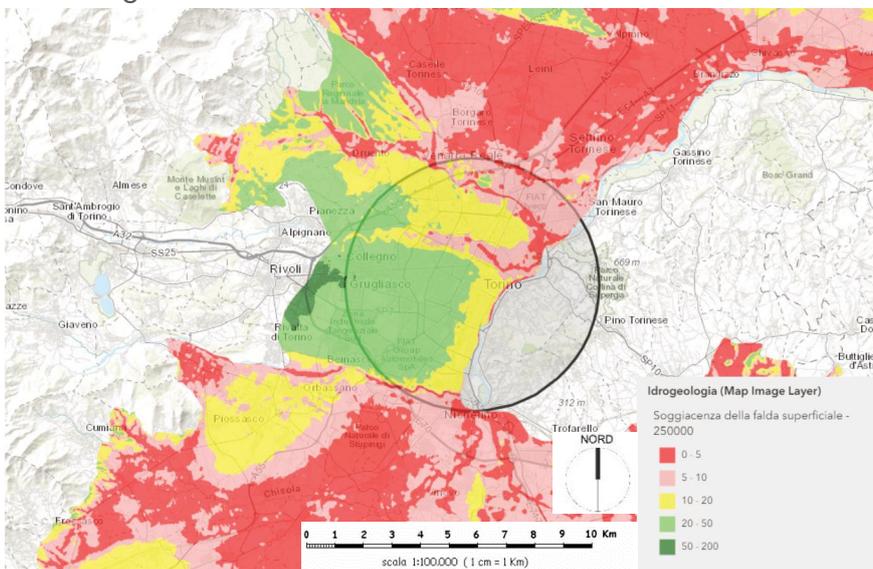
È stata realizzata utilizzando i dati ottenuti dalla Rete di Monitoraggio della Regione Piemonte e dall'Archivio del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Torino; analizzandoli lungo il periodo di giugno-luglio 2002. Inoltre, è stata svolta una campagna piezometrica su 315 punti d'acqua relativi all'acquifero superficiale in modo omogeneo distribuiti sul territorio dell'intera pianura.

Con queste informazioni si ha maggior controllo e correttezza dei dati precedentemente rilevati e di integrazione di quest'ultimi nelle zone in cui le informazioni risultavano insufficienti.

Le isopiezometriche sono state tracciate tenendo in considerazione diversi fattori di controllo:

- Le quote topografiche ricavate dal Modello Digitale di Elevazione vengono create per controllare che la superficie piezometrica sia sempre inferiore alla superficie del piano di campagna;
- La coerenza con i limiti geologici e gli elementi geomorfologici;
- La correlazione con la rete idrica superficiale;
- La coerenza della carta piezometrica finale con i valori di soggiacenza relativi in corrispondenza dei vari punti d'acqua.

La conseguente elaborazione dei dati è stata effettuata attraverso il software GIS.



La "soggiacenza" invece è nota in idrogeologia per descrivere la distanza verticale tra la superficie del terreno e il livello

[Fig.56]. Mappa topografica prodotta da ESRI-Livingatlas (Dettaglio scala: 1:100.000-10 Km) su base cartografica di riferimento annuale, 2022 raster b/n 1:10.000. Studio sulla Soggiacenza della falda superficiale-250.000. Fonte: Geoportale ARPA Piemonte. <https://geoportale.arpa.piemonte.it/app/public/?pg=mappa&ids=39dad8e2f7df43d2a011c13a5fccb8eb,9733847665364bfb8c448e286de6ca17>

piezometrico, ossia il livello dell'acqua in una falda acquifera. Nel contesto della falda superficiale, la soggiacenza rappresenta quindi la distanza tra la superficie del terreno e il livello dell'acqua nella falda che si trova relativamente vicina alla superficie, vista come parte di acqua sotterranea che si trova all'interno dei pori e delle fessure del terreno o della roccia sottostante. Per questo le falde acquifere sono importanti risorse idriche che forniscono acqua potabile e formate principalmente per l'infiltrazione del terreno.

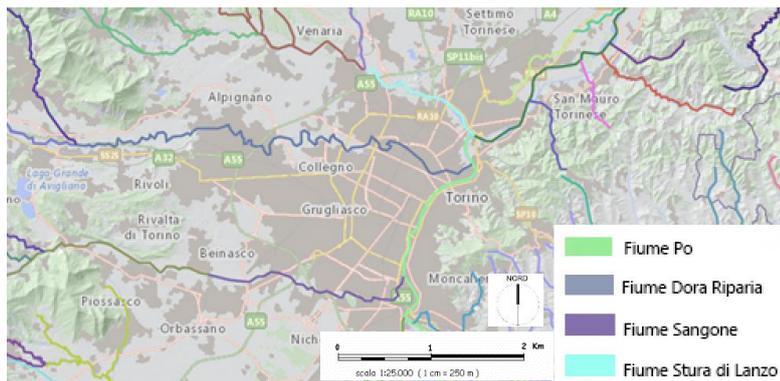
Una soggiacenza ridotta significa che la falda superficiale è vicina alla superficie del terreno, mentre una soggiacenza maggiore indica che la falda è più profonda sotto il suolo. La soggiacenza è un concetto importante per comprendere la disponibilità dell'acqua nel terreno e può influenzare l'agricoltura, la vegetazione e altri aspetti ambientali.

La "soggiacenza della falda idrica superficiale" si riferisce alla parte della falda idrica, la quale è direttamente influenzata sulla superficie del terreno. Come già accennato, la falda idrica superficiale è la parte più vicina alla superficie del suolo e che può essere influenzata direttamente da fattori esterni come condizioni meteorologiche e climatiche.

Questa interazione tra piezometria e soggiacenza è di particolare importanza per comprendere il ciclo dell'acqua sotterranea e come le variazioni climatiche e le attività umane possono influenzare la disponibilità dell'acqua in questa zona della falda.

L'unità di misura per la soggiacenza è il metro, dunque come in fig. 16, la maggior parte del suolo torinese varia da 10 a 50 metri, mentre verso le colline si hanno valori pari a 5-20 metri di profondità.

2. Inquadramento Idrogeologico



[Fig. 57] Inquadramento idrogeologico del territorio piemontese: Focus su Torino, evidenziando i principali fiumi della regione Piemonte. (Dettaglio in scala 1:25.000- 2 Km). Fonte: ARPA, Piemonte. Web: https://webgis.arpa.piemonte.it/monitoraggio_qualita_acque_mapseries/monitoraggio_qualita_acque_webapp/

Come in figura, l'area del torinese è attraversata dai fiumi: Po, Dora, Stura e Sangone [Fig. 57].

Dopo un'attenta analisi del sottosuolo, è emerso un quadro dettagliato della permeabilità nelle diverse stratigrafie, riferendosi a quelle altamente presenti nella città.

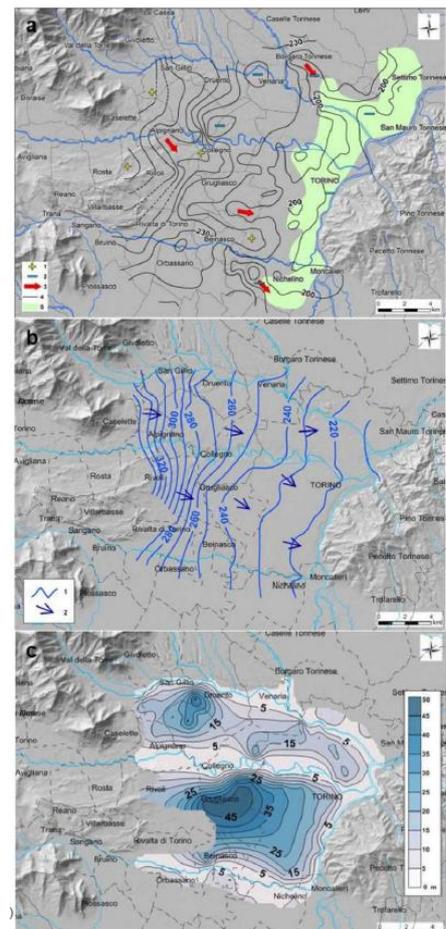
Le stratigrafie del sottosuolo, partendo dai depositi *marini pliocenici*, si suddividono come segue:

- La Formazione delle "Argille Azzurre", caratterizzata da limi e argille che conferiscono *scarsa permeabilità*.
- Le "Sabbie di Asti", dove gli acquiferi sono *mediamente più produttivi*, sebbene la presenza di uno strato più fine possa limitarne la produzione.

Il *substrato villafranchiano* è costituito da un'alternanza di ghiaie sabbiose, argillosi-limosi e limo-torbosi. Questa alternanza tra depositi grossolani permeabili e depositi fini impermeabili o semipermeabili genera un sistema multi-acquifero. Questo sistema è il più sfruttato in termini di risorse idriche sotterranee nell'area torinese, soprattutto per il consumo umano e, in misura minore, per usi industriali.

La base di questo complesso idrogeologico mostra una pendenza maggiore nella parte occidentale dell'area studiata, vicino al margine alpino, mentre la pendenza diminuisce progressivamente verso est. Alcune depressioni, come quelle tra Alpignano, Rivoli e Rivalta-Orbassano, potrebbero essere associate a paleo-canali, influenzando così il flusso delle acque sotterranee [Fig. 58 A].

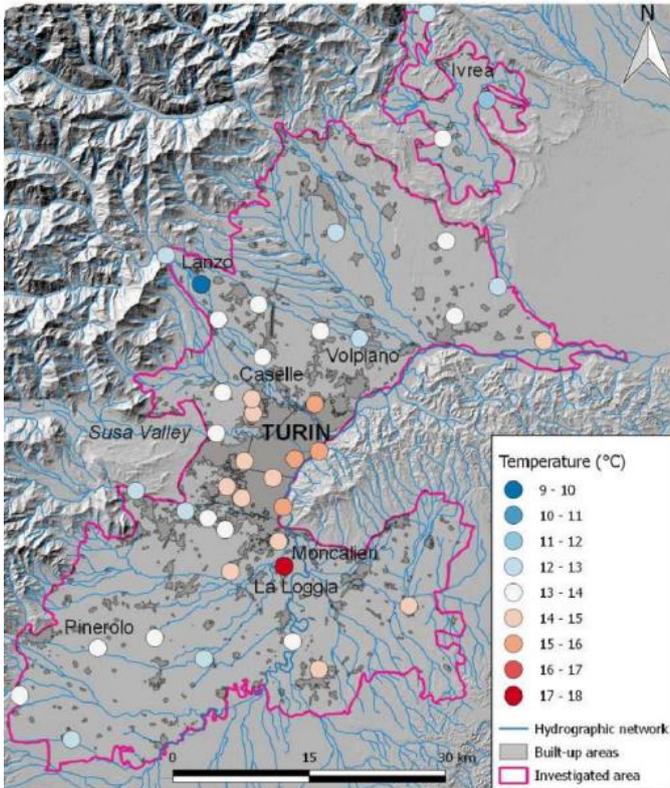
In questo complesso, si trova una falda acquifera superficiale non confinata, caratterizzata da elevata produttività ma scarsa qualità, principalmente a causa dell'inquinamento industriale nelle città e agricolo nelle aree rurali. [79]



[Fig. 58] - a) Mappa della base del Complesso defluviante e fluviale (1-zone altimetriche maggiori; 2-zone altimetriche minori; 3- paleocanali; 4- curve di livello della base del Complesso in slm; 5- superficie erosiva sepolta); b) Carta piezometrica dell'acquifero superficiale non confinato (gennaio 2000) (1-linee isopiezometriche in slm m; 2-linee di flusso); c) Carta delle profondità della falda freatica (gennaio 2000). Fonte: Geologia dell'Ambiente. Periodico trimestrale della SIGEA (Società Italiana di Geologia Ambientale). Supplemento al n.1/2014-Anno XXII-gennaio-marzo 2014. ISSN 1591-5352, *Geologia urbana di Torino* (a cura di Masciocco L.), ProGEO, p. 15.

Il flusso delle acque sotterranee nella falda acquifera superficiale è diretto verso est, cioè verso il fiume Po, che rappresenta il principale elemento di guadagno per l'intera pianura torinese. Le linee piezometriche, come mostrato nella figura 19b, variano da un massimo di 360 metri sul livello del mare a ovest (Rivoli) a un minimo di 205 metri sul livello del mare a nord-est, vicino al fiume Po. La profondità della falda freatica oscilla tra i 50 metri nel settore prealpino e i 5 metri nelle zone più vicine alla collina torinese e alle aree circostanti il fiume principale.

3.Valori e Temperature delle acque sotterranee: Sintesi sulla stratigrafia e idrogeologia del sottosuolo torinese



[Fig. 59]. Valori di temperatura delle acque sotterranee dell'acquifero superficiale nel torinese (primavera, 2014). Fonte: Bucci, A., Barbero, D., Lasagna, M., Forno, M. G., & De Luca, D. A. (2017). *Shallow groundwater temperature in the Turin area (NW Italy): vertical distribution and anthropogenic effects*. *Environmental Earth Sciences*, 76, 1-14.

La [Fig. 59] illustra la mappa delle acque sotterranee dell'acquifero superficiale di Torino e dei comuni limitrofi. Questo modello concettuale è stato elaborato sulla base della ricostruzione stratigrafica del suolo e delle caratteristiche idrogeologiche.

Le caratteristiche termiche della falda acquifera superficiale, combinate all'elevata produttività delle falde più profonde, favoriscono la diffusione su vasta scala, delle pompe di calore, utilizzate per le acque sotterranee (GWHP).

La ricarica degli acquiferi profondi avviene principalmente nel settore pedemontano, dove si registra una percentuale più elevata di depositi grossolani rispetto alle aree circostanti.

Secondo queste informazioni, si osserva che la temperatura media del suolo urbano di Torino si attesta tra i 14 e i 16°C. Man mano che ci si allontana dal centro città, le temperature tendono a diminuire.

Dopo queste analisi è evidente come le temperature delle acque sotterranee della falda acquifera superficiale mantengono una relativa costanza durante tutto l'anno, a

differenza delle significative oscillazioni stagionali dell'aria tipiche di un clima medio temperato dell'Europa continentale.

Lo studio sul regime termico delle acque sotterranee nella pianura torinese assume un'importanza fondamentale nel valutare il potenziale sfruttamento del calore geotermico attraverso pompe di calore, specialmente in un'area dove l'installazione di impianti di riscaldamento e raffrescamento su larga scala è diventata nuovamente di grande interesse.

Ricerche condotte tra il 2014 e il 2016 di Bucci et al., fonte riportata in figura 20, hanno evidenziato che le maggiori variazioni di temperatura delle acque sotterranee si verificano entro i primi 10-20 metri sotto la superficie del suolo. Durante la primavera, le temperature più profonde risultano più

elevate, mentre in autunno si verifica una inversione di questa tendenza, con un abbassamento delle temperature.

Queste variazioni nelle temperature del sottosuolo sono strettamente correlate ai cambiamenti stagionali e alle variazioni di temperatura dell'aria esterna.

Inoltre, studi condotti da Bucci et al., hanno rilevato che le temperature delle acque sotterranee nella pianura torinese durante la primavera e l'autunno si aggirano intorno ai 14,1 °C, mentre nei comuni vicini alle Alpi si registrano temperature intorno agli 8 °C. Questa variazione di temperatura è evidente già osservando la [Fig.59], che mostra il progressivo riscaldamento urbano [81].

Particolarmente nella città di Torino, le temperature della falda acquifera risultano superiori di 0,6-1,6°C rispetto alle aree rurali, a causa delle isole di calore urbano. L'asfalto delle strade può contribuire a questo fenomeno, aumentando le temperature fino a + 3/4°C.

Valori anomali che oscillano tra i 16 e i 20 °C possono essere attribuiti a fonti di calore puntuali documentate, come sistemi GSHP (Ground Source Heat Pump), distretti industriali e discariche. Ad esempio, nelle zone a sud della città (a una profondità compresa tra i 25 e i 30 metri), le acque sotterranee sono surriscaldate dal calore generato da zone inquinate, dove probabilmente si verificano reazioni esotermiche dovute al degrado della materia organica (queste aree spesso dispongono di bruciatori a metano).

Utilizzo geotermico del sottosuolo

Le pompe di calore geotermiche sono una tecnologia promettente che potrebbe giocare un ruolo significativo nella riduzione del consumo energetico per il riscaldamento e il raffreddamento degli edifici. Questo passaggio da sistemi tradizionali come le caldaie a pompe di calore consente di spostare le emissioni di microinquinanti dai centri urbani alle centrali termiche, migliorando così il controllo e il monitoraggio delle emissioni. Nel 2017, Torino ha segnalato livelli pericolosi di emissioni di CO₂, superando i limiti legali, il che sottolinea l'importanza di affrontare la sostenibilità e ridurre le emissioni di CO₂. Questo aspetto può influenzare le scelte riguardanti lo sviluppo dei sistemi geotermici a bassa entalpia e la selezione dei tipi di impianto più appropriati da adottare [82].

Nel contesto delle pompe di calore ad acqua di falda a circuito aperto, che utilizzano la falda acquifera per il riscaldamento e il raffreddamento degli edifici, sorgono preoccupazioni riguardo all'interferenza termica con le acque sotterranee superficiali. Questo può causare impatti ambientali significativi nel breve termine. Il rilascio di acque a temperature diverse rispetto ai valori di riferimento, più calde in estate e più fredde in inverno, solleva problemi riguardo all'utilizzo delle acque sotterranee per usi come l'approvvigionamento di acqua potabile, l'agricoltura e l'industria. Inoltre, possono verificarsi interferenze tra sistemi, soprattutto in aree urbanizzate, con conseguenti alterazioni delle prestazioni degli impianti.

In particolare, rispetto alle aree rurali, le aree urbane presentano diverse sfide, tra cui lo sfruttamento intensivo del sottosuolo, la contaminazione delle acque sotterranee, le interferenze strutturali, le procedure autorizzative e i vincoli legali, nonché la concorrenza con altre fonti energetiche alternative.

Regolamenti locali

Le Linee Guida Regionali trattate dal D.D n. 66 del settore Tutela delle acque della Direzione Ambiente (Regione Piemonte) per l'installazione e la gestione delle sonde geotermiche [83] si pongono come strumento chiave per favorire l'uso responsabile delle risorse geotermiche a bassa entalpia, garantendo al contempo la salvaguardia dell'ambiente e delle risorse idriche sotterranee. Rivolte sia agli enti decisionali che agli operatori del settore, queste linee guida forniscono una serie di indicazioni tecniche mirate a guidare il processo decisionale e le fasi operative relative alla progettazione, all'installazione, al collaudo, alla gestione e alla dismissione delle sonde geotermiche.

Essenzialmente, queste linee guida si concentrano su due categorie di impianti: quelli di piccola scala, con una potenza inferiore o uguale a 30 kW, e quelli di grande scala, con una potenza superiore a 50 kW o che coinvolgono più di 10 sonde verticali, anche se la potenza complessiva è inferiore a 50 kW. Per ciascuna di queste categorie, vengono fornite istruzioni dettagliate su come gestire ogni fase del processo.

Per le sonde geotermiche verticali, ad esempio, vengono delineate le migliori pratiche per:

1. Il tracciamento: si definisce il posizionamento delle sonde prima di avviare le perforazioni (calcolo della distanza tra le sonde, con un interasse di 8-10 m), mantenimento di 4,5-5 m dalle fondazioni dei complessi edilizi, 1 m dai sottoservizi interrati, distanza da mantenere dagli alberi);
2. La perforazione: evitare contaminazioni del suolo e sottosuolo a causa dei carotaggi (esempio per impianti di grande taglia);
3. L'installazione delle tubazioni: create da materiale di qualità ed evitato quello derivante dal riciclo. Sopra quest'ultime sono impresse le certificazioni del costruttore, fornitore, installatore e il tipo di materiali utilizzato (per lo più plastico);
4. La cementazione: questa fase vede la capacità di impermeabilizzare i pori ed evitare le "perdite di assorbimento". Il materiale utilizzato è la sabbia quarzifera per perforazioni inerente l'acquifero superficiale, mentre le aree rimanenti, attraverso malte cementizie premiscelate. I materiali usati devono essere certificati per la loro tossicità.
5. L'uso dei fluidi termovettori: deve garantire la sicurezza per la salute; quindi, non essere nocivo per l'uomo e per l'ambiente circostante e acquatico, inoltre deve essere biodegradabile;
6. Il collaudo: vede la posa corretta delle sonde geotermiche, cioè il loro isolamento idraulico. Vengono effettuate prove di pressione, di flusso, misura della temperatura indisturbata del terreno attraverso l'acqua circolante al suo interno, controllo delle proprietà termofisiche di scambio del sottosuolo (Test di risposta Termica- TRT, in inglese "Ground Response Test (GRT)), così da procedere nel corretto dimensionamento delle sonde e la loro cementazione;

7. Monitoraggio: Dedicato soprattutto ai grandi impianti (con un numero superiore a 100 sonde geotermiche verticali), vi sono quattro piezometri, due a valle e due a monte. Essi sono utili per la misurazione ad alta frequenza della T° dell'acqua di falda. Invece per quelli profondi, le acque nel sottosuolo devono necessariamente essere campionate e analizzate ogni sei mesi. Questa operazione viene stabilita dalla Rete di Monitoraggio regionale delle Acque Sotterranee, specificando ogni corpo idrico presente nel sottosuolo.
8. La dismissione: per attuarla nel migliore dei modi, vengono effettuati delle pulizie e/o lavaggi delle tubazioni utilizzando acqua e conseguente riempimento di malta cementizia.

Per i grandi impianti, le linee guida impongono standard più rigorosi, richiedendo prove di laboratorio per la cementazione e la messa in atto di un piano di monitoraggio idrogeologico. Inoltre, viene sottolineata l'importanza della documentazione progettuale, che deve includere una serie di informazioni dettagliate sugli aspetti appena citati.

Si deduce che, le Linee Guida Regionali per l'installazione e la gestione delle sonde geotermiche costituiscono un fondamentale strumento di riferimento per garantire che l'implementazione di tali impianti avvenga nel rispetto delle normative ambientali e della sostenibilità a lungo termine. La relazione tecnica finale di progetto inerente l'impianto, deve essere esaustiva e fornire una serie di dati fondamentali per garantire una corretta progettazione e realizzazione del sistema geotermico. I punti principali sono dettati da:

- Tipo di impianto: Specificare se si tratta di sonde geotermiche verticali o un'altra tipologia, e fornire dettagli sulla disposizione delle sonde nel luogo;
- Schema logico e funzionale: Illustrare come le varie componenti dell'impianto interagiscono tra loro per garantire il corretto funzionamento;
- Volumetria e superficie: Indicare le dimensioni degli spazi da riscaldare o raffrescare per valutare l'adeguatezza delle prestazioni dell'impianto;
- Periodo di utilizzo: Specificare le ore di funzionamento in modalità riscaldamento o raffrescamento durante il ciclo estivo e invernale;
- Potenza termica e frigorifera: Fornire informazioni sulla potenza termica e frigorifera utile dell'impianto;
- COP delle macchine: Indicare il coefficiente di prestazione delle macchine sia in fase di progettazione che alle condizioni standard;
- Temperature limite del fluido termovettore: Definire le temperature massime di mandata del fluido termovettore per evitare problemi di surriscaldamento o congelamento;
- Perforazioni e tubazioni: Specificare il numero e la profondità delle perforazioni, la loro ubicazione e la lunghezza delle tubazioni;
- Materiali delle sonde: Descrivere i materiali utilizzati per la costruzione delle sonde geotermiche.

- Prodotti di riempimento: Indicare la tipologia e le caratteristiche dei prodotti premiscelati utilizzati per il riempimento delle perforazioni;
- Fluidi termovettori: Specificare il tipo, la concentrazione e il volume del fluido termovettore che circola all'interno delle sonde;
- Test di collaudo: Descrivere i test e la strumentazione utilizzati per verificare la corretta cementazione, tenuta e isolamento idraulico delle sonde;
- Procedure operative in caso di perdite: Definire le procedure da seguire in caso di perdite accidentali del circuito.

Inoltre, la relazione dovrebbe includere informazioni dettagliate sull'ubicazione dell'impianto sulla base cartografica di riferimento della Regione Piemonte, con particolare attenzione alle isolinee della base dell'acquifero superficiale per valutare eventuali rischi di contaminazione tra falde. Una caratterizzazione delle proprietà termiche e idrogeologiche dei terreni attraversati dovrebbe essere basata su fonti bibliografiche attendibili per garantire una pianificazione accurata e rispettosa dell'ambiente circostante.

Si aggiungono per i grandi impianti:

- Analisi delle proprietà termiche;
- Studio litostratigrafico (aspetti geologici, geomorfologici, idrogeologici con accenno a dettagli idrogeochimici per la qualità delle acque);
- Censimento degli impianti geotermici esistenti.

5.5 Caso studio: Distretto a Zero Emissioni "Up Town", Milano 2017

Il quartiere di UpTown a Milano si presenta come un caso studio di eccellenza nel panorama dell'edilizia sostenibile, offrendo un modello di sviluppo urbano avanzato che può ispirare altre città, inclusa Torino, desiderose di promuovere uno stile di vita più sostenibile e orientato al benessere dei cittadini [Fig.60]. [84]

Uno degli aspetti più significativi di UpTown è appunto la sua impronta ambientale distintiva. Preso come riferimento, è noto per essere stato il primo quartiere a Zero Emissioni di Milano nel 2017, ubicato a nord-ovest della città e a sud dell'ex area Expo. UpTown, infatti, si distingue per la sua attenta progettazione, che include edifici in classe energetica A, privi di emissioni di carbonio e gas. Questo risultato è reso possibile grazie all'impiego di tecnologie innovative, come un sistema geotermico integrato a una rete di teleriscaldamento, che riduce in modo significativo l'impatto ambientale complessivo del quartiere.

La prestigiosa certificazione di sostenibilità "GBC Quartieri Gold", conferito al progetto nel 2022, testimonia l'impegno del distretto verso una visione completa della sostenibilità. Questo riconoscimento è il risultato di una valutazione rigorosa dei criteri ambientali, economici e sociali adottati nel progetto, dimostrando l'adempimento dei più elevati standard internazionali. Il protocollo individua progettazioni innovative di quartieri e che portano un valore aggiunto e che rivoluzionano il modo di creare spazi e edifici.

- Il progetto si distingue anche per la sua integrazione con la natura circostante. Il quartiere è immerso in un vasto parco urbano di 30 ettari, denominato UpTown Park, offrendo agli abitanti spazi aperti attrezzati per il relax e il tempo libero. Le numerose piste ciclopedonali, le aree gioco per bambini e le zone dedicate agli animali promuovono uno stile di vita attivo e salutare, favorendo il benessere della comunità nel suo insieme. Tra le caratteristiche innovative vengono citati:
- "The Smart life Book", il manuale della casa fornendo agli utenti una maggior consapevolezza sull'abitare in modo sostenibile in base alle proprie scelte quotidiane;
- Strumenti digitale di gestione tramite l'App UpTown e rete di monitoraggio intelligente dei consumi energetici;

L'attenzione ai dettagli e l'alta efficienza energetica degli edifici, denominate le "Case green", combinati con un design che privilegia il contatto con la natura collegandola con chi abita all'interno degli edifici, rappresentano un nuovo paradigma nell'edilizia residenziale. UpTown si propone così non solo come un luogo di abitazione, ma come uno spazio dove sostenibilità e qualità della vita si fondono armoniosamente.

Tuttavia, l'impegno di UpTown non si limita alla dimensione ambientale. Il quartiere si distingue anche per la sua forte componente sociale, con obiettivi mirati a promuovere la salute e il benessere, garantire una moltitudine di servizi, tra i quali un'educazione inclusiva, di qualità grazie ai poli sanitari, di ricerca, di studio come le università e le aree ludiche, ambienti digitali e concentrandosi sugli obiettivi SDGs dello sviluppo sostenibile.

Il Green Building Council Italia (GBC Italia) svolge un ruolo fondamentale nel supportare e certificare progetti come quest'ultimo, contribuendo così alla diffusione di una cultura dell'edilizia sostenibile, decarbonizzata e climaticamente neutra. Inoltre, il Protocollo GBC Quartieri è riconosciuto a livello globale, è conforme al Global Real Estate Sustainability Benchmark (GRESB), che rappresenta il punto di riferimento per gli investitori nei mercati finanziari. Misura la performance degli investimenti rispetto a metriche ambientali, sociali e di governance (ESG), garantendo rendimenti economici senza impatti negativi sull'ambiente o sulla società. UpTown è il primo sviluppo urbanistico a ottenere questa certificazione per l'intero quartiere, dimostrando un impegno tangibile verso una visione olistica e sistemica della sostenibilità, che integra persone, luoghi e la salvaguardia del pianeta in un'ottica di mercato responsabile.

Parole chiave:

- Quartiere ad emissioni zero (Carbon e gas free);
- Alta efficienza energetica: Classe A e Certificazione GBC Italia Gold. Migliore orientamento solare degli edifici;
- Impianto geotermico come fonte rinnovabile a supporto del teleriscaldamento (per il riscaldamento e raffrescamento indoor) con illuminazione interna a LED e unità edilizie alimentata anche dai pannelli fotovoltaici;
- Comfort, sostenibilità e benessere abitativo per adulti e bambini (ricerca, università, scuola, asili nido, gioco, digitale, sport e tempo libero, polo commerciale);
- Mobilità sostenibile (pista ciclabile di oltre 10 km) in strade alberate e ombreggiate per mitigare le isole di calore urbano;
- Spazi verdi: edifici immersi in un parco di 30 ettari;
- Armonia con la natura circostante e gli edifici;
- Obiettivi: SDGs per agenda 2030 e metriche ESG (un supporto più trasparente e responsabile su cui basare la definizione della strategia, l'implementazione delle politiche sostenibili e il dialogo con gli stakeholders);
- Biodiversità, risparmio idrico ed energetico;
- Riqualificazione di aree densamente antropizzate e attenzione per l'ambiente naturale;
- Conservazione con gli ecosistemi (zone umide, corridoi ecologici ecc.);
- Scoraggiare l'uso dell'auto, privilegiando la mobilità attiva data dalle piste ciclopedonali e trasporti pubblici;



[Fig. 60] Edificio "Casa Green", progetto UpTown. Fonte: <https://www.uptown-milano.it/it/uptown-district#:~:text=UpTown%20C3%A8%20anche%20il%20primo,un%20unicum%20in%20tutta%20Milano.>

CONCLUSIONI

In conclusione dell'analisi svolta, che ha visto Torino come ipotetica protagonista per l'implementazione futura di un impianto geotermico, risulta evidente come questa fonte rinnovabile rappresenti una delle opzioni più auspicabili per la città. La geotermia, infatti, offre numerosi vantaggi: è una risorsa ecologica, pulita, rinnovabile e praticamente inesauribile, con necessità di manutenzione ridotte durante il funzionamento, consumi energetici bassi e zero emissioni. Questi impianti sono ideali per fornire energia termica (raffrescamento e riscaldamento) agli edifici.

I sistemi geotermici, sia Closed Loop che Open Loop, presentano però dei costi iniziali elevati, legati in particolare ai lavori di trivellazione e agli studi di fattibilità in una determinata zona. È necessario effettuare approfondite analisi geologiche, morfologiche, idrogeologiche e climatiche per garantire l'efficacia dell'impianto. Questi studi includono carotaggi in loco per esaminare il sottosuolo, valutazioni morfologiche, idrogeologiche (con particolare attenzione alla qualità delle acque, cruciale per gli impianti Open Loop come punto di prelievo e reiniezione), analisi climatiche (temperatura e precipitazioni), sismiche e normative.

L'impianto geotermico proposto potrebbe essere integrato con l'attuale sistema di teleriscaldamento di Torino, già alimentato principalmente da cogenerazione, sostituendo il gas naturale con energie rinnovabili. Questo miglioramento permetterebbe di ridurre ulteriormente le emissioni di CO₂ e altri inquinanti atmosferici. Tuttavia, l'attuale sistema di teleriscaldamento opera con una temperatura di mandata in rete di 120°C, ancora troppo alta per essere considerata di nuova generazione (4^a o 5^a generazione), che operano con temperature tra i 50 e gli 80°C, fino a meno di 30°C per la 5^a generazione, e includono già fonti rinnovabili a supporto.

Torino è ben posizionata per implementare un sistema di teleriscaldamento geotermico, grazie alle sue caratteristiche geologiche e idrogeologiche. La città è pianeggiante con una zona collinare ad est e le Alpi ad ovest, e si trova in zona climatica E, con un fabbisogno termico significativo (2617 gradi giorno), richiedendo riscaldamento da ottobre ad aprile. La città ha anche un basso rischio sismico (fascia 3), che riduce la probabilità di danni da terremoti.

Gli studi del Politecnico di Torino hanno confermato che il sottosuolo torinese ospita una litologia mista con sedimenti fluviali quaternari e villafranchiani, mentre le aree vicine ai fiumi principali presentano depositi fluviali dell'era quaternaria. A livello idrogeologico, Torino è attraversata dai fiumi Po, Dora Riparia, Stura di Lanzo e Sangone, e la piezometria e le falde idriche superficiali sono ben studiate, con una temperatura delle acque sotterranee di 14-16°C nelle aree urbane, che diminuisce allontanandosi dal centro. Tuttavia, è cruciale monitorare attentamente la qualità dell'acqua per prevenire contaminazioni, dato che la vulnerabilità dell'acquifero profondo è elevata.

La qualità delle acque superficiali a Torino è considerata "Buona", mentre il monitoraggio delle acque sotterranee è meno positivo, con un rischio di contaminazione significativo. Questo richiede un sistema di monitoraggio accurato per proteggere la qualità dell'acqua potabile.

L'implementazione di impianti geotermici a Torino, supportata dalla rete di teleriscaldamento e cogenerazione, rappresenta una soluzione efficace per ridurre le emissioni di CO₂ e aumentare l'efficienza energetica. Torino potrebbe così raggiungere gli obiettivi prestabiliti dal PAESC e dalle direttive EPBD 2023/24, diventando una delle 100 città modello per la decarbonizzazione e la neutralità climatica entro il 2030.

L'integrazione di edifici Zero Emission Building (ZEB), classificati in classe energetica A, con un consumo minimo di energia soddisfatto da fonti rinnovabili locali e sistemi di teleriscaldamento, rappresenta un passo fondamentale verso la creazione di distretti urbani a zero emissioni. L'esempio del distretto "UpTown" a Milano, riconosciuto per la sua alta efficienza energetica, dimostra la fattibilità di questo approccio. Torino, con le sue caratteristiche geologiche, idrogeologiche e climatiche, è ben posizionata per seguire questo modello e diventare una città leader nella transizione verso la neutralità climatica.

BIBLIOGRAFIA e SITOGRAFIA

INTRODUZIONE

- [1] https://www.soc.chim.it/sites/default/files/chimind/pdf/2001_7_83_ca.pdf (consultazione aprile 2023).
- [2] <https://ipccitalia.cmcc.it/budget-di-carbonio/>, IPCC AR6-WGI- *Summary for policy makers* (2021), p.28. (consultazione aprile 2023).
- [3] <https://ipccitalia.cmcc.it/budget-di-carbonio/> (consultazione maggio 2023).

CAPITOLO 1

- [4][TESI] RAZZUOLI L., Il processo di decarbonizzazione in Italia tra minacce e opportunità, Tesi di Laurea triennale in Economia e gestione dei servizi di pubblica utilità, Luiss Guido Carli, relatore Simona D'Amico, A.A. 2019/2020, in Google Scholar [consultazione on-line], <https://tesi.luiss.it/id/eprint/29005> (consultato il 30 aprile 2023);
- [5] VERDOLINI E., IPCC (2022) *Climate Change 2022: Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change, Sixth Assessment Report WORKING GROUP III –MITIGATION OF CLIMATE CHANGE*, Cambridge University Press, Cambridge, Regno Unito e New York, NY, USA., in IPCC [articolo on-line], https://ipccitalia.cmcc.it/wpcontent/uploads/2022/04/Presentazione_italiano_5aprile_EV.pdf, (consultato il 28 aprile 2023);
- [6] COMMISSIONE EUROPEA, Comunicazione della commissione al parlamento europeo, al consiglio, al comitato economico e sociale europeo e al comitato delle regioni. *Un traguardo climatico 2030 più ambizioso per l'Europa. Investire in un futuro a impatto climatico zero nell'interesse dei cittadini, Bruxelles 2020*, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0562>, (consultato il 30 aprile 2023);
- [7] POZZI M., SPIRITO G., FATTORI F., DÉNARIÉ A., FAMIGLIETTI J., MOTTA M., *Synergies between buildings retrofit and district heating. The role of DH in a decarbonized scenario for the city of Milano*, in *Science Direct* [articolo on-line], *Energy Reports* Vol. 7, Supplement 4, (2021), 449-457, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484721006855?via%3Dihub>, (consultato il 27 aprile 2023);
- [8] EUROPEAN COUNCIL, *5 facts about the EU's goal of climate neutrality, 2022*, <https://www.consilium.europa.eu/en/5-facts-eu-climate-neutrality/>, (consultato il 30 aprile 2023);
- [9] MATTHEWS J.B.R., MÖLLER V., VAN DIEMEN R., *et al.*, *IPCC, 2021: Annex VII: Glossary*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2215–2256, 2021, https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_AnnexVII.pdf, (consultato il 30 aprile 2023);
- [10] SHABB K., CARLSSON A., MUJKIC S. *et al.*, *Launching the Mission for 100 Climate Neutral Cities in Europe: Characteristics, Critiques, and Challenges*, International Institute for Industrial Environmental Economics, Lund University, Lund, Sweden, 2 Department of Environmental

Technology and Management, Linköping University, Linköping, Sweden, in *Mendeley* (articolo di giornale *on-line*), *Frontiers in Sustainable Cities* (2022) 3, <https://www.mendeley.com/catalogue/10903b33-00aa-3f81-a180-7732953c2b59>, (consultato il 3 maggio 2023);

[11] https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_it (consultato il 3 maggio 2023);

[12] <https://www.consilium.europa.eu/it/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/> (consultato il 3 maggio 2023);

[13] Camera dei deputati Ufficio Rapporti con L'unione Europea, XIX Legislatura. Documentazione per le Commissioni, Dossier n. 17, 13 febbraio 2023. *“La revisione della direttiva sulla prestazione energetica degli edifici”*, https://documenti.camera.it/leg19/dossier/testi/AT017.htm?_1694765841499. (consultazione maggio 2023);

[14] <https://www.energiaenergetica.enea.it/glossario-efficienza-energetica/lettera-d/direttiva-eed.html> (consultazione maggio 2023);

[15] <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/it/sheet/70/energie-rinnovabili#:~:text=La%20direttiva%20originaria%20sulle%20energie,dovuta%20provenire%20da%20fonti%20rinnovabili;> (consultazione maggio 2023);

[16] https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en, (consultazione maggio 2023);

[17] FREGONARA E., *Valutazione sostenibilità progetto - Life Cycle Thinking e indirizzi internazionali*, FRANCOANGELO, Milano, 2015, pp. 18-19.

[18] <https://www.energiaenergetica.enea.it/servizi-per/pubblica-amministrazione/riqualificazione-energetica-degli-edifici-della-pubblica-amministrazione/edilizia-pubblica-e-scolastica/gli-edifici-a-consumo-energetico-quasi-zero.html> (consultazione giugno 2023);

[19] EU, Directive 2010/31/EU, European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the Energy Performance of Building (recast), Official Journal of the European Union, 2010. (consultazione giugno 2023);

[20] R. BOINTNER, L. KRANZL, A. TOLEIKYTE, *Nearly Zero-energy Building Strategy 2020 D6.2: Strategies For Nzeb Market Transition On National Level*, ZEBRA 2020, Settembre 2016, https://sintef.brage.unit.no/sintef-xmlui/bitstream/handle/11250/2427772/D6.2-Strategies_nZEB_transition_Member_States_v15_small_EN.pdf?sequence=1 (consultato 6 maggio 2023);

[21] M. FILIPPI , E. FABRIZIO, *Il concetto di Zero Energy Building*, Politecnico di Torino, DENERG , Università di Torino, DEIAFA, in *Google Scholar* [articolo *on-line*], 2011, https://www.researchgate.net/profile/EnricoFabrizio/publication/235636968_Il_concetto_di_Ze

ro_Energy_Building/links/00b4951f24a9965516000000/Il-concetto-di-Zero-Energy-Building.pdf (consultato l'8 maggio 2023);

[22] G. DALL'Ò, A. GALANTE, "ABITARE SOSTENIBILE - Come affrontare l'emergenza energetica e ambientale", Editore il Mulino Farsi un'idea, 2° edizione, pp.58,59,60,61, Bologna 2023 (consultato il 10 maggio 2023);

CAPITOLO 2

[23] https://www.regione.piemonte.it/web/sites/default/files/media/documenti/2022-06/piemonte2021_dgr25_5126_2022.pdf, p. 27. (consultazione giugno 2023);

[24] European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, Gronkiewicz-Waltz, H., Larsson, A., Boni, A. et al., *100 climate-neutral cities by 2030 - by and for the citizens - Report of the mission board for climate-neutral and smart cities*, Publications Office, 2020, <https://data.europa.eu/doi/10.2777/46063> (consultazione luglio 2023);

[25] <https://italiadomani.gov.it/it/home.html> (consultazione luglio 2023);

[26] https://research-and-innovation.ec.europa.eu/system/files/2021-11/ec_rtd_eu-mission-climate-neutral-cities-infokit.pdf (consultazione luglio 2023);

[27] http://www.comune.torino.it/ucstampa/comunicati/article_54.shtml (consultazione luglio 2023);

[28] HUOVILA A., SIIKAVIRTA H. et al., "Carbon-neutral cities: Critical review of theory and practice", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 341, 2022, 130912, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622005509?via%3Dihub>, (consultato il 4 maggio 2023);

[29] KOUTRA S., BECUE V., IOAKIMIDIS C.S., "From the 'Smart Ground' to the 'Smart City' An Analysis of Ten European Case-studies", in *Google Scholar* (articolo on-line), ERA Chair 'Net-Zero Energy Efficiency on City Districts' Research Institute for Energy, University of Mons, Belgium - Department of Architecture and Urban Planning, IEEE, April 2016, <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7951340/>, (consultazione 12 maggio 2023).

[30] D'AGOSTINO D., TSEMEKIDI TZEIRANAKI S., ZANGHERI P., BERTOLDI P., "Assessing Nearly Zero Energy Buildings (NZEBS) development in Europe, in *Science Direct*" [articolo on-line], *Energy Strategy Reviews*, Vol. 36, July 2021, 100680, Enea, Ispra (VA), Italia, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X21000663?via%3Dihub> (consultato il 9 maggio 2023);

CAPITOLO 3

- [30] Sodiq A., Baloch A. B., Khan S. A., Sezer N., Mahmoud S., Jama M. e Abdelaal A., "Towards modern sustainable cities: Review of sustainability principles and trends", Journal of Cleaner Production, vol. 227, pp. 972-1001, 2019.
- [31] Collins J. F., jr., "The History of district heating". s.l. : Verner.ch, 1959.
- [32] Werner, S. "International review of district heating and cooling". s.l. : Elsevier, 2017.
- [33] ENEA. *Manuale di Teleriscaldamento*. s.l. : ENEA, 1988.
- [34] <https://www.engie.it/teleriscaldamento>. (consultazione ottobre 2023);
- [35] <https://www.gruppoiren.it/it/chi-siamo/la-nostra-storia.html> (consultazione ottobre 2023);
- [36] IREN Energia, «1982-2012: 30 Anni di Teleriscaldamento a Torino (consultazione ottobre 2023);
- [37] http://www.irenenergia.it/ChiSiamo/Attivita/Teleriscaldamento/Dove_Siamo/Impianti_Torino.html (consultazione novembre 2023);
- [38] IREN <https://www.gruppoiren.it/it/i-nostri-servizi/teleriscaldamento/la-nostra-rete.html#:~:text=Con%20il%20calore%20prodotto%20dagli,d'Italia%20e%20una%20delle>]. (consultazione novembre 2023);
- [39] http://www.cittametropolitana.torino.it/cms/risorse/ambiente/dwd/comitato-locale-di-controllo/Sedute_e_Assemblee/2021/IREN_teleriscaldamento.pdf (consultazione novembre 2023);
- [40] <https://www.gruppoiren.it/it/i-nostri-servizi/teleriscaldamento.html> (consultazione dicembre 2023);
- [41] <https://www.engie.it/cosa-facciamo/produzione-infrastrutture-energy-management/teleriscaldamento/> (consultazione dicembre 2023);
- [42] https://www.irenlucegas.it/content/dam/iren/offerte-e-prodotti/casa/risparmio-energetico/teleriscaldamento-domestico/documenti/CARTA_DEL_SERVIZIO_TLR_2023.pdf (consultazione dicembre 2023);
- [43] Beccari A. "Macchine". s.l. : CLUT, 1993.
- [44] International Energy Agency, "District heating and cooling Handbook", 1999.
- [45] Rubini L., Sangiorgio S., Le Noci C., *Il nuovo edificio green. Soluzioni per il benessere abitativo e l'efficienza energetica*, Green Tech, HOEPLI, Milano, 2020, pp. 144, 145, 146, 147, 148, 149
- [46] Badami M., Portoraro A. "Studio e caratterizzazione di reti termiche distribuite", Report Ricerca di Sistema Elettrico, accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA. Settembre 2013.
- [47] Eudp E., Thorsen J.E., Bennetsen J., Juhl O., Lang S., Rosenberg F. , "CO2 reductions in low energy buildings and communities by implementation of low temperature district heating systems. Demonstration cases in EnergyFlexHouse and Boligforeningen Ringgården." Network 2011:1-97

- [48] https://repository.supsi.ch/12697/1/2726dss_2021-1_6.pdf (consultazione dicembre 2023);
- [49] Lund R., Østergaard D.S., Yang X, Mathiesen B.V. "Comparison of low temperature district heating concepts in a long term energy system perspective." *Int J Sustain Energy Planning Manage* 2017; 12:5–18. <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85129457791&origin=inward&txGid=5b1c11f35e03c8db4a172a0db50f1675> (consultazione dicembre 2023);
- [50] Østergaard, P.A., Werner, S., Dyrelund A., Lund H., Arabkoohsar A., Sorknæs, P., Gudmundsson O., Thorsen J.E., Mathiesen B.V., "The four generations of district cooling - A categorization of the development in district cooling from origin to future prospect"(Article), Department of Planning, Aalborg University, Rendsburggade 14, Aalborg, 9000, Denmark, Volume 253, 15 August 2022, Article number 124098. (consultazione dicembre 2023);
- [51] Von Rheina J., Henzeb, G. P., Long N., Fub Y. "Development of a topology analysis tool for fifth generation district heating and cooling networks ", 2019. (consultazione dicembre 2023);
- [52] Brand M., Svendsen S. "Renewable based low temperature district heating for existing buildings in various stages of refurbishment." *Energy* 2013;62:311–9. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.09.027>. (consultazione dicembre 2023);
- [53] Flexynets, "4th Generation District Heating Systems Webinar." <http://www.flexynets.eu/en/Media>. (consultazione dicembre 2023);
- [54] Østergaard D., Svendsen S. "Space heating with ultra low temperature district heating – a case study of four single family houses from the 1980s." *Energy Proc* 2017;116:226–35. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.070>. (consultazione gennaio 2024);
- [55] Buffa S., Cozzinia M., D'Antonia M., Baratieri M., Fedrizzi R., "5th generation district heating and cooling systems: A review of existing case in Europe ", DOI:10.1016/j.rser.2018.12.059. (consultazione gennaio 2024);
- [56] Boesten S., Ivens W., Dekker S.C., Eijndems, H. 31Department, " 5th generation district heating and cooling systems as a solution for renewable urban thermal energy supply", 2019. (consultazione gennaio 2024);
- [57] Ruesch F., Evins R., "District heating and cooling with low temperature networks sketch of an optimization problem. In: *Proceedings of the COLEB, 2014 workshop on computational optimisation of low energy buildings*", Zürich, 2014. (consultazione gennaio 2024);
- [58] Bilardo M. , Sandrone F. et al., "Modelling a fifth-generation bidirectional low temperature district heating and cooling (5GDHC) network for nearly Zero Energy District (nZED)", in *Science Direct* (articolo on-line), *Energy Reports*, Vol. 7, November 2021, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484721002729?via%3Dihub> (consultazione 11 febbraio 2024);

CAPITOLO 4

[59] <https://geothopica.igg.cnr.it/index.php/it/cose-la-geothermia>. (consultazione febbraio 2024);

[60] Dickson M. H., Fanelli M., *“Cos'è l'Energia Geotermica?”*, IGA- Istituto di Geoscienze e Georisorse, CNR, Pisa, Italy, Febbraio, 2004. <https://www.unionegeotermica.it/cosa-e-energia-geotermica.asp>. (consultazione febbraio 2024);

[61] Verda V., Baccino G., Sciacovelli A., Lo Russo S., *“Impatto del teleriscaldamento e dei sistemi di pompe di calore ad acqua di falda sul fabbisogno energetico primario nelle aree urbane”*, Volume 40, luglio 2012, pagine 18-26, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.01.047>. (consultazione febbraio 2024);

[62] Casasso A., Sethi R., Piga B., Ruffino E., *“Il potenziale geotermico a bassa entalpia nella Regione Piemonte”*, Regione Piemonte-Politecnico di Torino, Attività di studio del potenziale geotermico del sottosuolo regionale. Mappatura e valutazioni tecnico-economiche per lo sfruttamento della risorsa., *RelGeotermia_POLITO_rev02.pdf*, 2021. (consultazione febbraio 2024);

[63] Taddia G., *“SFRUTTAMENTO DEL SOTTERRANEO IN AREE URBANE MEDIANTE SISTEMI GEOTERMICI A POMPE DI CALORE: L'ESEMPIO DEL TEST SITE DEL POLITECNICO DI TORINO (NW ITALIA)”*, 2019. *Quaternario alpino e mediterraneo* 31 (2): 235-44, <https://iris.polito.it/handle/11583/2728354> (consultazione febbraio 2024);

[64] [Tesi] Marchetti E. *“Studio dell'interferenza reciproca tra impianti geotermici a bassa entalpia open-loop”*, Relatore: Ing. Casasso A., Correlatori: Prof. Sethi R., Ing. Della Valentina S., Sessione luglio 2019, Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il territorio, Politecnico di Torino. (consultazione febbraio 2024);

[65] Lo Russo S., Taddia G., Verda V., Gnani L., Rocca E., *“Development of the thermally affected zone (TAZ) around a groundwater heat pump (GWHP) system: A sensitivity analysis”*, *Geothermics*, Vol. 43, pagg. 66-74, lug. 2012. (consultazione febbraio 2024);

[66] Decreto Legislativo italiano 22/2010, Riassetto della normativa in materia di ricerca e coltivazione delle risorse geotermiche, a norma dell'articolo 27, comma 28, della legge 23 luglio 2009, n.99. (10G0037) <https://www.normattiva.it/uri-res/N2Ls?urn:nir:stato:decreto.legislativo:2010-02-11;22-> (consultazione marzo 2024);

[67] <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2022/03/01/22G00026/sg> (consultazione marzo 2024);

[68] <https://www.cti2000.it/utills/downloadfile.php?table=pubblicazioni&id=36136> (consultazione marzo 2024);

[69] https://www.isprambiente.gov.it/it/garante_aia_ilva/normativa/normativa_ambientale/Dlgs_152_06_TestoUnicoAmbientale.pdf (consultazione marzo 2024);

CAPITOLO 5

- [70] Arpa Piemonte, CNR Istituto di Geoscienze e georisorse. Web: <https://webgis.arpa.piemonte.it/agportal/apps/storymaps/stories/1d810af57020440ab1a57ec99d00a3a2> (consultazione marzo 2024);
- [71] FORNO M. G., LUCCHESI S., Dipartimento di Scienze della Terra, UniTO, "La successione pliocenico-quadernaria su cui è edificata la Città di Torino e il suo significato per l'utilizzo del territorio", *Geologia dell'Ambiente*, Supplemento al n. 1/2014, p. 2. (consultazione marzo 2024);
- [72] <https://www.istat.it/it/archivio/293383> (consultazione marzo 2024);
- [73] <http://www.comune.torino.it/decentr/> (consultazione marzo 2024);
- [74] <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/1993/10/14/093G0451/sg> (consultazione marzo 2024);
- [75] <https://www.tuttitalia.it/piemonte/72-torino/classificazione-climatica/> (consultazione marzo 2024);
- [76] <https://www.arpa.piemonte.it/rischinaturali/approfondimenti/terremoti/rete-sismica/rete-sismica.html> (consultazione marzo 2024);
- [77] <https://www.arpa.piemonte.it/rischinaturali/tematismi/clima/confronti-storici/precipitazioni/anno-per-anno.html?delta=5> (consultazione marzo 2024);
- [78] <https://www.meteo.dfg.unito.it/> (consultazione marzo 2024);
- [79] *Geologia dell'Ambiente*. Periodico trimestrale della SIGEA (Società Italiana di Geologia Ambientale). Supplemento al n.1/2014-Anno XXII-gennaio-marzo 2014. ISSN 1591-5352, *Geologia urbana di Torino* (a cura di Masciocco L.), *ProGeo*, p.14. (consultazione aprile 2024);
- [80] <https://geoportale.arpa.piemonte.it/app/public/?pg=mappa&ids=693b35ac795948e09e48448be0f73ed0> (consultazione aprile 2024);
- [81] Bucci A., Barbero D., Lasagna M., Forno M. G., & De Luca D. A. (2017). "Shallow groundwater temperature in the Turin area (NW Italy): vertical distribution and anthropogenic effects". *Environmental Earth Sciences*, 76, 1-14. (consultazione aprile 2024);
- [82] Baccino G., LO RUSSO S., TADDIA G., VERDA V., "Energy and environmental analysis of an Open-Loop ground-water heat pump system in an urban area, Department of Energy Engineering, Politecnico di Torino, Torino, Italy, *Thermal Science*, Anno 2010, Vol.14, N.3, pp.693-706. (consultazione maggio 2024);
- [83] Ordine Geologi del Piemonte, D.D. n. 66 del 3/3/2016 <https://www.geologipiemonte.it/comunicazioni/regione-piemonte/articolo/linee-guida-regionali-per-l-installazione-e-la-gestione-delle-so> (consultazione maggio 2024);
- [84] <https://www.uptown-milano.it/it/uptown-district#:~:text=UpTown%20%C3%A8%20anche%20il%20primo,un%20unicum%20in%20tutta%20Milano.> (consultazione maggio 2024).

Desidero esprimere la mia profonda gratitudine alle Prof.sse e al Collaboratore, per la
pazienza e il tempo che mi hanno dedicato.

Alla mia famiglia, ad Alessio e alla mia amica Alessia per il sostegno e
l'incoraggiamento che mi hanno dato durante questo periodo.