



**SISTEMI GEOTERMICI PER IL RETROFIT
DI EDIFICI CIVILI E STORICI EFFICIENTI
E A BASSO COSTO**

2018 - 2023

1

2

3

4

5

6

7

Fabbisogno energetico e soluzioni tecniche per edifici efficienti

Autori: Consorzio GEO4CIVHIC

Coordinatore del progetto: Adriana BERNARDI

Coordinatore del volume: Laura CARNIELETTO

www.geo4civhic.eu

Il progetto GEO4CIVHIC è stato finanziato dal programma di ricerca e innovazione Horizon 2020 dell'Unione Europea con l'accordo di sovvenzione n. 792355.





Qualsiasi divulgazione dei risultati deve indicare che riguarda solo l'opinione dell'autore e che l'Agenzia non è responsabile dell'uso che può essere fatto delle informazioni contenute.

EDITORI:

Adriana Bernardi

Doinița - Iuliana Cucuțeanu

PREMESSA



La geotermia di profondità è una fonte di energia rinnovabile stabile e affidabile, sempre disponibile ovunque. L'energia geotermica a bassa profondità e il suo accoppiamento con altre fonti di energia rinnovabile hanno un potenziale molto ampio, ma rimangono poco sfruttati in alcuni Paesi e richiedono un'ulteriore diffusione. L'obiettivo dei sette volumi creati è l'ulteriore diffusione dell'energia geotermica a bassa profondità.

I sette volumi:

VOLUME 1 - Fabbisogno energetico e soluzioni tecniche per edifici efficienti

VOLUME 2 - Geologia e mappatura

VOLUME 3 - Metodologia di perforazione, macchine e scambiatori di calore

VOLUME 4 - Tecnologia delle pompe di calore geotermiche

VOLUME 5 - Dimensionamento delle tecnologie GSHP e ibride

VOLUME 6 - Ambiente e norme

VOLUME 7 - Edifici storici e patrimonio dell'umanità

Questi volumi descrivono e riassumono le attività di ricerca, dall'innovazione alla loro implementazione, e le lezioni apprese dal 2015 al 2023 nel contesto di 2 progetti europei: "**Most Easy, Efficient and Low Cost Geothermal Systems for Retrofitting Civil and Historical Buildings**" (GEO4CIVHIC) e "**Cheap and Efficient Application of Reliable Ground Source Heat Exchangers and Pumps**" (Cheap-GSHPs).

Si tratta di una preziosa fonte di informazioni destinata a sostenere e rafforzare le competenze di professionisti, studenti e altri importanti soggetti interessati (ad esempio decisori delle politiche pubbliche, utenti finali, investitori, ecc.) nell'applicazione dei sistemi geotermici per il riscaldamento e il raffreddamento degli edifici nel campo del risparmio energetico.

I sette volumi descrivono i principali risultati a partire dai principi di base, le barriere, gli approcci, le metodologie, le innovazioni e la legislazione alla base dell'applicazione della geotermia di superficie a tutti i tipi di edifici. L'applicazione della geotermia a bassa profondità agli edifici storici presenta molte barriere e normative molto severe; questi problemi sono stati risolti con successo durante GEO4CIVHIC. Si tratta di un importante passo avanti nella questione del riscaldamento/raffreddamento e del risparmio energetico in questi particolari edifici.

Questi volumi sono stati creati per supportare la formazione nazionale in Europa. In particolare, le lezioni all'interno dei quattro nuovi "Centri di eccellenza europei per l'applicazione della geotermia a bassa profondità negli edifici civili e storici" creati durante GEO4CIVHIC nelle università di Italia, Germania, Spagna e Romania. È previsto un piano di formazione di alto livello per formare nuovi esperti che garantiranno di conseguenza nuove competenze e posti di lavoro.

Inoltre, questi quattro Centri di eccellenza europei potrebbero diventare uno strumento dinamico non solo per la formazione, ma anche per avviare un miglioramento normativo in tutta Europa, un modo per stimolare la comunicazione tra gli specialisti e, in ultima analisi, migliorare il progresso a lungo termine del settore della geotermia a bassa profondità.

Ogni volume è dedicato a obiettivi specifici, tra cui il fabbisogno energetico e le soluzioni tecniche per edifici efficienti, gli aspetti geologici dei terreni europei, le soluzioni innovative per quanto riguarda gli scambiatori di calore, le macchine di perforazione, le pompe di calore e infine gli aspetti legislativi, ambientali ed economici.

I contenuti dei volumi sono il risultato dell'impegnativa ricerca scientifica, dello sviluppo tecnologico, delle sperimentazioni in loco e delle dimostrazioni effettuate dai partner dei due progetti di ricerca europei H2020 durante otto anni di collaborazione, discussioni e impegni.

Il periodo in cui si è sviluppato il progetto GEO4CIVHIC è stato molto difficile (pandemia, post-pandemia, ecc.). Questo ha ostacolato in modo significativo sia l'attività di ricerca che l'implementazione e la gestione del progetto. In particolare, le attività presso i siti dimostrativi in tutta Europa (Italia, Belgio, Malta, Irlanda) hanno pesato molto sui membri del team, ma alla fine queste sfide sono state superate con successo.

Le difficoltà del progetto hanno riunito un forte gruppo di ricercatori provenienti da tutta Europa. Questi specialisti continueranno ad avere un ruolo importante nella scienza della geotermia per la climatizzazione degli edifici, al di là delle forti amicizie che si sono instaurate durante gli anni dei due progetti.

In qualità di coordinatore di entrambi i progetti, vorrei ringraziare tutti per l'impegno profuso e per aver creduto profondamente nella geotermia a bassa profondità, che sarà di grande aiuto nel campo del risparmio energetico in tutta Europa distaccandosi dall'utilizzo dei combustibili fossili.

Infine, un sentito ringraziamento alla Commissione Europea, che, finanziando questi due progetti ha permesso un grande passo avanti nello studio di tecnologie più efficienti e meno costose nel campo della geotermia a bassa profondità dedicata alla climatizzazione degli edifici.

Adriana Bernardi

**Coordinatore dei progetti europei GEO4CIVHIC e Cheap-GSHPs
Direttore di ricerca presso il CNR-ISAC**

Volume

1

Progetto GEO4CIVHIC

Manuale formativo

Fabbisogno energetico e soluzioni tecniche per edifici efficienti

Autori: Consorzio GEO4CIVHIC

Coordinatore del progetto: Adriana BERNARDI

Coordinatore del volume: Laura CARNIELETTO

CONTENUTI

ABSTRACT	7
AUTORI/PARTNER.....	8
NOMENCLATURA.....	9
1. INTRODUZIONE AGLI EDIFICI AD ALTA EFFICIENZA ENERGETICA.....	10
1.1. Retrofit del patrimonio edilizio esistente	10
1.2. Nuovi edifici (ZEB, nZEB, PEH)	11
1.3. Etichettatura energetica e sostenibile	12
1.4. Prestazioni ambientali e di sostenibilità di un edificio	13
2. POTENZIALI SCENARI DI RETROFIT.....	14
2.1. Possibili strategie di retrofit	15
2.2. Dimensionamento degli scambiatori di calore a terreno	16
2.3. Lunghezza ottimale delle sonde	18
3. Casi STUDIO	19
3.1. Atene	19
3.2. Strasburgo	20
3.3. Helsinki	21
3.4. Lunghezza ottimale delle sonde	22
4. L'INTEGRAZIONE DELLE POMPE DI CALORE geotermiche CON ALTRE RES.....	24
4.1. Pompe di calore ad acqua assistite da energia elettrica rinnovabile	24
4.2. Pompe di calore geotermiche assistite dal solare termico	25
4.3. Pompe di calore ad aria assistite da pompe di calore ad acqua	27
4.4. Pompe di calore geotermiche assistite dal fotovoltaico.....	28
4.5. Casi di studio: indici di autosufficienza e autoconsumo per gli archetipi GEO4CIVHIC	28
5. CONCLUSIONI E ULTERIORI APPLICAZIONI	32
RIFERIMENTI.....	34

FIGURE

Figura 2-1. Schema semplificato delle strategie di retrofit applicate	16
Figura 2-2. Possibili scenari dei casi di studio	18
Figura 3-1. Confronto tra la lunghezza massima disponibile e la lunghezza del foro necessaria per soddisfare la domanda di energia per le tre tipologie di edifici per Atene senza (a) e con (b) isolamento dell'involucro	20
Figura 3-2. Confronto tra la lunghezza massima disponibile e quella necessaria per soddisfare la domanda di energia per le tre tipologie di edifici di Strasburgo senza (a) e con (b) isolamento dell'involucro.....	21
Figura 3-3. Confronto tra la lunghezza massima disponibile e la lunghezza necessaria dei fori di trivellazione per soddisfare le tipologie di domanda energetica per Helsinki senza (a) e con (b) isolamento dell'involucro.....	22
Figura 4-1. Schema del sistema di pompa di calore ad acqua assistito da vento/PV	25
Figura 4-2. Schema del sistema di pompa di calore ad acqua assistita da solare termico	26
Figura 4-3. Schema di collegamento di una torre di raffreddamento o di un dry cooler con una pompa di calore ad acqua.....	27
Figura 4-4. Schema di collegamento Pompa di calore ad aria (HP aria-acqua) accoppiata a GSHP.....	27



TABELLE

Tabella 2-1. Valori di progetto e stagionali della pompa di calore collegata ai diversi sistemi di riscaldamento e raffrescamento	17
Tabella 2-2. Proprietà termiche dei tre tipi di terreno considerati	17
Tabella 2-3. Lunghezza ottimale delle sonde	18
Tabella 3-1. Carichi energetici per il riscaldamento e il raffrescamento nelle tre località [kWh/(m ² y)].	19
Tabella 3-2. Lunghezza finale selezionata per le sonde	23
Tabella 4-1. Energia elettrica media oraria utilizzata [Wh].....	28
Tabella 4-2. Consumo giornaliero di fornelli elettrici [Wh].....	28
Tabella 4-3. Consumo elettrico totale comprensivo di pompa di calore, illuminazione ed elettrodomestici [kWh].	29
Tabella 4-4. Energia annuale prodotta dall'impianto fotovoltaico	29
Tabella 4-5. Parametri di dimensionamento dell'impianto fotovoltaico	30
Tabella 4-6. Sintesi dei risultati di autosufficienza e autoconsumo per la casa a schiera esistente	31
Tabella 4-7. Sintesi dei risultati dell'autosufficienza e dell'autoconsumo per la casa storica a schiera	32

ABSTRACT

In base alle recenti politiche sull'uso dell'energia negli edifici e alla necessità di strategie di retrofit per passare a edifici a energia zero (o quasi zero o più). L'obiettivo del progetto GEO4CIVHIC è quello di favorire il retrofit di edifici civili e storici facilitando l'installazione, riducendo i costi e aumentando l'efficienza dei diversi componenti attraverso sistemi geotermici a bassa entalpia. In particolare, le politiche di riduzione del fabbisogno energetico degli edifici dovrebbero essere supportate proponendo strategie che integrino gli scambiatori di calore a terreno con altre fonti di energia rinnovabile. L'obiettivo principale è quello di aumentare la consapevolezza del potenziale risparmio energetico ottenibile con un dimensionamento ottimale e un impatto limitato sull'ambiente urbano.

La definizione di archetipi edilizi è fondamentale per replicare i casi di studio in altri climi e luoghi, estendendo potenzialmente l'analisi a scala urbana. Gli archetipi sono stati sviluppati distinguendo tra edifici esistenti e storici e concentrandosi sulle case a schiera monofamiliari, che sono gli edifici residenziali tipici dei centri storici europei.

È stato esplorato il potenziale accoppiamento di un sistema a pompe di calore con scambiatori di calore a terreno (GSHP) con altre fonti di energia rinnovabile (ad esempio, collettori solari termici con serbatoi di accumulo, energia eolica, sistemi fotovoltaici (FV), soluzioni ibride fotovoltaico-solare termico e pompe di calore aria-acqua) e sono state definite soluzioni ottimali per i diversi tipi di edifici e climi come esempi di applicazione.

È stata sviluppata una metodologia per il dimensionamento ottimale delle pompe di calore con sonde a terreno, considerando eventualmente sistemi a doppia sorgente o ad aria. Sono stati presentati risultati per edifici archetipo, combinando simulazioni di un sistema fotovoltaico per stimare l'autosufficienza e l'autoconsumo per cinque orientamenti dell'edificio.

Sono stati ottenuti risultati estremi per i climi caldi, con una domanda di energia per il riscaldamento trascurabile e possibilmente sistemi di raffrescamento gratuiti piuttosto che sistemi di raffrescamento tradizionali necessari in inverno. Con un'adeguata inclinazione, gli impianti fotovoltaici potrebbero fornire fino al 40% della quota di autosufficienza anche nei climi settentrionali.

AUTORI/PARTNER

UNIPD – Laura Carnieletto, Michele De Carli, Angelo Zarrella, Giuseppe Emmi, Davide Menegazzo

SUPSI – Marco Belliardi

CRES – Dimitris Mendrinos

NOMENCLATURA

Abbreviazioni

<i>AHP</i>	Pompa di calore aria-acqua
<i>BEM</i>	Modello energetico dell'edificio
<i>BREEAM</i>	Metodo di valutazione ambientale del Building Research Establishment
<i>ACS</i>	Acqua calda sanitaria
<i>EPBD</i>	Direttiva sul rendimento energetico degli edifici
<i>EPC</i>	Attestato di prestazione energetica
<i>ESPC</i>	Contratto di prestazione per il risparmio energetico
<i>UE</i>	Unione Europea
<i>GHE</i>	Scambiatore di calore a terreno
<i>GHG</i>	Gas a effetto serra
<i>GSHP</i>	Pompa di calore con sonde a terreno
<i>HGSHP</i>	GSHP ibrida
<i>HVAC</i>	Riscaldamento, ventilazione e climatizzazione
<i>IAQ</i>	Qualità dell'aria interna
<i>IEQ</i>	Qualità ambientale interna
<i>LEED</i>	Leadership in Energy and Environmental Design
<i>NEEAP</i>	Piano d'azione nazionale per l'efficienza energetica
<i>NEPC</i>	Attestati di prestazione energetica nazionali
<i>ONG</i>	Organizzazione non governativa
<i>NPO</i>	Organizzazione non profit
<i>nZEB</i>	Edificio a energia quasi zero
<i>PCM</i>	Materiale a cambiamento di fase
<i>PEH</i>	Casa a energia positiva
<i>PV</i>	Fotovoltaico
<i>RES</i>	Fonti di energia rinnovabile
<i>SNBS</i>	Standard per l'edilizia sostenibile Svizzera
<i>ZEB</i>	Edificio a energia zero

Pedici

<i>h o H</i>	Riscaldamento
<i>c o C</i>	Raffrescamento
<i>max</i>	Massimo

Simboli

λ	Conduttività termica [W/(m K)]
CO_2	Anidride carbonica [-]
<i>COP</i>	Coefficiente di prestazione [W/W]
<i>EER</i>	Rapporto di efficienza energetica [W/W]
<i>L_c</i>	(Sonda) Lunghezza per raffrescamento ambienti [m]
<i>L_h</i>	(Sonda) Lunghezza per riscaldamento ambienti [m]
<i>L_{max}</i>	Lunghezza massima della sonda [m]
<i>SCOP</i>	Coefficiente di prestazione stagionale [W/W]
<i>SEER</i>	Rapporto di efficienza energetica stagionale [W/W]
<i>PBT</i>	Tempo di rimborso [y]
<i>SC</i>	Autoconsumo [%]
<i>SS</i>	Autosufficienza [%]

1. INTRODUZIONE AGLI EDIFICI AD ALTA EFFICIENZA ENERGETICA

1.1. Retrofit del patrimonio edilizio esistente

Il progetto europeo Horizon 2020 GEO4CIVHIC¹ (Most Easy, Efficient and Low-Cost Geothermal Systems for Retrofitting Civil and Historical Buildings) mira ad accelerare la diffusione di sistemi geotermici a bassa entalpia per il riscaldamento e il raffrescamento attraverso il retrofit di edifici esistenti e storici situati nei centri urbani e il superamento di barriere come la disponibilità di spazio e le limitazioni di legge legate all'importanza architettonica e culturale degli edifici. Si basa su soluzioni innovative per gli scambiatori di calore a terreno (ground heat exchangers, GHE) e le pompe di calore geotermiche (ground source heat pumps, GSHP). La geotermia a bassa entalpia è una soluzione molto promettente, come dimostra l'interesse della Commissione europea che ha sviluppato la direttiva sulle performance energetiche degli edifici (EPBD) e le sue versioni riviste (Parlamento europeo e Consiglio dell'Unione europea 2010 e 2018). Più recentemente, l'Europa ha sviluppato un piano per accelerare la transizione energetica, denominato REPowerEU², che prevede diverse azioni per sostenere le politiche di risparmio energetico e promuovere la diversificazione delle forniture per sostituire i combustibili fossili con le fonti energetiche rinnovabili emergenti. La strategia dell'Unione Europea mira a triplicare la capacità geotermica entro il 2030. La legislazione ha come obiettivo la creazione di un mercato solido per provvedere alla climatizzazione degli edifici utilizzando scambiatori di calore a terreno, per sostenere la decarbonizzazione di edifici residenziali e non. Nell'ambito del pacchetto "Fit for 55" della legislazione europea sul Green Deal³, la Commissione europea ha proposto il potenziamento delle misure di efficienza energetica a lungo termine, compreso un aumento dal 9% al 13% dell'obiettivo obbligatorio di efficienza energetica.

Diversi approcci in letteratura hanno cercato di fornire strategie per aumentare la sostenibilità dell'ambiente urbano, coinvolgendo prospettive ambientali, economiche e sociali (Direttiva 2010/31/UE), nonché aspetti culturali e istituzionali (Direttiva 2012/27/UE, Direttiva 2018/844). Tuttavia, la generazione e l'ottimizzazione dell'energia negli edifici dovrebbe essere uno dei punti focali per l'attuazione del processo di decarbonizzazione delle città. Il riscaldamento e il raffrescamento degli ambienti negli edifici è uno degli usi finali che consumano più energia e che devono essere ridotti per raggiungere gli obiettivi di efficienza energetica e di emissioni di gas serra (GHG) fissati dall'Unione Europea per il 2050. Diversi studi si sono concentrati sulla modellazione energetica dettagliata dei singoli edifici (BEM), ottimizzando i carichi interni, l'isolamento dell'involucro e il funzionamento del sistema di riscaldamento, ventilazione e condizionamento (HVAC). Tuttavia, le strategie di retrofit dovrebbero essere studiate per essere replicabili su larga scala; pertanto, i dataset degli edifici dovrebbero essere rappresentativi del patrimonio edilizio europeo o nazionale per aiutare a gestire un numero così elevato di edifici e supportare gli strumenti di simulazione su scala urbana.

La domanda di energia degli edifici esistenti in Europa varia da 150 kWh/(m² anno) a 300 kWh/(m² anno) secondo studi recenti (Ballarini e Corgnati, 2014). Pertanto, esiste un grande potenziale in Europa, stimato in circa 25.000 km² di superficie. Tuttavia, la maggior parte degli edifici da ristrutturare si trova in aree urbane, dove la disponibilità di spazio per l'installazione del campo di scambiatori a terreno è un problema importante e deve essere superato in accordo con le limitazioni di legge. La disponibilità di spazio dipende sia dallo spazio libero reale disponibile (giardini, parcheggi, ecc.), sia dal livello di ristrutturazione applicato; infatti, un deep retrofit dell'involucro e del sistema può ridurre il fabbisogno energetico e quindi la lunghezza delle sonde e lo spazio necessario. L'applicazione di sistemi GSHP agli edifici storici è stata studiata da Emmi et al. (2017), che hanno mostrato l'impatto di un dimensionamento ottimale nonostante il particolare sviluppo urbano di due casi studio a Venezia e Firenze. Confrontando i risultati con una pompa di calore aria-acqua (AWHP), il sistema GSHP ha ottenuto le migliori prestazioni. Analogamente, Zarrella et al. (2019) hanno mostrato l'accoppiamento tra sistemi GSHP e AWHP quando il carico termico è sbilanciato, definendo una temperatura dell'aria di commutazione per sfruttare la massima efficienza del sistema. Un'altra applicazione di GSHP è stata studiata da Emmi et al. (2020), che hanno fornito raffrescamento e riscaldamento degli ambienti a un edificio residenziale con un sistema GHSP in grado di assistere un campo solare nella produzione di acqua calda sanitaria.

Sebbene molteplici lavori abbiano analizzato l'integrazione efficiente delle pompe di calore come sistemi di generazione per il riscaldamento e il raffrescamento degli ambienti, ogni analisi è stata condotta a livello di singolo edificio. Al contrario, la ricerca si sta orientando verso una prospettiva più ampia, a scala di quartiere o di città, per ottimizzare la condivisione dell'energia e lo sfruttamento delle fonti rinnovabili. Le informazioni disponibili sugli archetipi già sviluppati per il contesto europeo, come TABULA ed EPISCOPE⁴, escludono informazioni relative alla domanda di energia oraria, ai picchi di carico e, quindi, ai dati necessari per simulare la potenziale integrazione con le fonti di energia

¹ Disponibile su: <https://ec.europa.eu/inea/en/horizon-2020/projects>

² Comunicazione su REPowerEU: Azione comune europea per un'energia più accessibile, sicura e sostenibile, COM (2022) 108 definitivo. Disponibile all'indirizzo: <https://eur-lex.europa.eu>

³ Disponibile su: <https://www.consilium.europa.eu>

⁴ Disponibile su: <https://episcopes.eu/welcome/>

rinnovabile. Pertanto, un database completo per i profili termici ed elettrici sarebbe utile per definire la domanda energetica degli stock di edifici, consentendo così agli urbanisti e ai responsabili politici di stilare un elenco prioritario di quartieri o città che necessitano di un sostegno urgente per la riduzione dell'uso di energia. I risultati integrati relativi alla ristrutturazione dell'involucro e degli impianti forniscono una nuova prospettiva di modellazione urbana, compresa la possibilità di condividere l'energia termica ed elettrica attraverso lo sviluppo di comunità energetiche.

1.2. Nuovi edifici (ZEB, nZEB, PEH)

Gli edifici ad alta efficienza energetica sono progettati e costruiti per consumare meno energia per il riscaldamento, il raffrescamento e l'illuminazione rispetto agli edifici convenzionali. I nuovi edifici, in particolare, hanno l'opportunità di integrare caratteristiche di risparmio energetico fin dall'inizio, intervenendo su aspetti che altrimenti sarebbero più difficili da modificare (strutture, impianti, spazi, estetica, ecc.). Esempi di strategie di progettazione ad alta efficienza energetica per i nuovi edifici sono l'ottimizzazione della luce naturale, l'installazione di impianti di ventilazione meccanica controllata, l'utilizzo di pareti, tetti e finestre maggiormente isolati, la scelta di elettrodomestici e illuminazione ad alta efficienza energetica, l'utilizzo di fonti di energia rinnovabili come il sole e il vento e di tecnologie ad alta efficienza come le pompe di calore. Riducendo il consumo energetico, questi edifici possono ridurre economicamente i costi della bolletta energetica e l'impatto ambientale, creando ambienti di vita o di lavoro più sani e confortevoli.

Le direttive dell'Unione Europea stabiliscono la legislazione sull'efficienza energetica degli edifici. La più recente è la Direttiva 2018/844/UE, nota come Energy Performance of Buildings Directive (EPBD), che stabilisce gli obiettivi di efficienza energetica degli edifici esistenti e nuovi nell'UE. La direttiva impone ai Paesi membri di adottare misure per raggiungere un elevato livello di prestazione energetica degli edifici e promuove l'uso di fonti rinnovabili per il riscaldamento e il raffrescamento degli edifici.

Più specificamente, la direttiva afferma che:

- Certificati di prestazione energetica degli edifici (EPC) - Gli Stati membri devono garantire che gli EPC siano rilasciati per tutti gli edifici quando vengono costruiti, venduti o affittati.
- Edifici a energia quasi zero (nZEB) - Gli Stati membri devono garantire che tutti i nuovi edifici occupati e di proprietà delle autorità pubbliche siano nZEB a partire dal 31 dicembre 2018 e tutti i nuovi edifici siano nZEB a partire dal 31 dicembre 2020. Un edificio con questo concetto ha uno standard di efficienza energetica molto elevato e utilizza solo una piccola quantità di energia da fonti rinnovabili.
- La ristrutturazione degli edifici esistenti - Gli Stati membri devono adottare una strategia a lungo termine per aumentare il tasso di ristrutturazione degli edifici esistenti, con l'obiettivo di raggiungere un livello significativo di ristrutturazione energetica entro il 2050.
- Indicatore di smart ready - Gli Stati membri devono garantire che i nuovi edifici e quelli sottoposti a ristrutturazioni importanti siano progettati e costruiti in modo da essere "smart ready".
- Contratti di rendimento per il risparmio energetico (ESPC) - Gli Stati membri devono incoraggiare l'uso degli ESPC, che sono una strategia per il finanziamento e l'adeguamento dell'efficienza energetica degli edifici attraverso i risparmi sulle bollette energetiche.
- Certificati nazionali di prestazione energetica (NEPC) - Gli Stati membri devono garantire che i NEPC siano rilasciati per tutti gli edifici quando vengono costruiti, venduti o affittati.
- Piano d'azione nazionale per l'efficienza energetica (PNAEE) - Gli Stati membri devono stabilire e attuare un PNAEE ogni cinque anni per definire le misure che adotteranno per migliorare la prestazione energetica degli edifici.

I progettisti, i designer e gli sviluppatori di edifici sono tenuti a utilizzare materiali e tecnologie che abbiano un elevato valore di isolamento termico e un minore impatto ambientale. Ciò include l'uso di pareti, tetti e pavimenti isolati, nonché di finestre e porte ad alta efficienza, per ridurre al minimo le perdite di calore. Inoltre, l'uso di sistemi di energia rinnovabile come impianti solari termici e fotovoltaici, pompe di calore e sistemi di accumulo di energia termica deve essere utilizzato per fornire una parte significativa dell'energia necessaria per il riscaldamento e il raffrescamento dell'edificio. La Direttiva EPBD promuove anche l'uso di tecnologie intelligenti per monitorare e controllare il consumo energetico degli edifici e per rendere più facile per gli occupanti degli edifici regolare il loro utilizzo di energia.

La scelta dei materiali e delle tecnologie dipenderà dal contesto, dalla disponibilità, dal costo e da altri fattori specifici di ciascun edificio e paese, ma la direttiva incoraggia l'uso delle soluzioni più efficienti dal punto di vista energetico.

I singoli Paesi membri hanno adottato misure diverse per conformarsi alla legislazione europea sull'efficienza energetica degli edifici. Ogni Paese europeo ha una propria legislazione specifica, ma tutti sono tenuti a seguire la Direttiva UE. In

Germania, ad esempio, esiste una "Legge federale sull'efficienza energetica degli edifici" (2020) che stabilisce i requisiti minimi per l'efficienza energetica degli edifici esistenti e nuovi e promuove l'uso di fonti di energia rinnovabili.

In Italia, il Decreto Legislativo del 26 giugno 2015 "Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici" stabilisce la metodologia di calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici, compreso l'utilizzo di fonti rinnovabili, nonché i requisiti minimi relativi alle prestazioni energetiche degli edifici e delle unità immobiliari, nel rispetto dei criteri generali di cui al Decreto Legislativo 19 agosto 2005, n. 192.

In Francia, la legge "Grenelle 1" del 2007 stabilisce obiettivi di efficienza energetica per gli edifici esistenti e nuovi e promuove l'uso di fonti di energia rinnovabili. La Francia ha adottato un sistema di etichettatura dell'efficienza energetica degli edifici, simile a quelli utilizzati in altri Paesi europei, per fornire ai consumatori informazioni facilmente comprensibili sull'efficienza energetica degli edifici.

In Svizzera, le normative nazionali per l'efficienza energetica degli edifici comprendono la Direttiva sul rendimento energetico degli edifici (EPBD) e l'Ordinanza federale sull'energia (EnO, 2017). La EPBD stabilisce i requisiti minimi per la prestazione energetica degli edifici nuovi ed esistenti e promuove l'uso di fonti di energia rinnovabili. L'EnO stabilisce standard di efficienza energetica per gli edifici e richiede ispezioni regolari per garantirne la conformità. La Svizzera ha inoltre adottato un sistema di etichettatura energetica degli edifici simile a quelli utilizzati in altri Paesi europei.

In Spagna, la normativa nazionale per l'efficienza energetica degli edifici comprende il Documento Básico Ahorro de la Energía (aggiornato nel 2022), parte del Código Técnico de la Edificación (CTE), che fornisce linee guida per la limitazione dei consumi energetici stabilendo i requisiti minimi per il controllo della domanda di energia (HE1), l'installazione di apparecchi (HE2, HE3) e i contributi minimi delle fonti di energia rinnovabili (HE4, HE5). Il Real Decreto 390/2021, che ha sostituito il Real Decreto 47/2007, ha approvato le linee guida per gli standard di efficienza energetica degli edifici, stabilendo le procedure tecniche e amministrative che devono disciplinare l'esecuzione delle certificazioni di efficienza e la metodologia per il calcolo del rating di efficienza energetica, al fine di adottare un sistema di etichettatura energetica degli edifici simile a quelli utilizzati in altri Paesi europei.

Oltre ai precedenti requisiti nazionali, il concetto di PEH (Positive Energy Home) sta diventando sempre più popolare, in quanto sempre più Paesi si sforzano di ridurre la propria impronta di carbonio e di diventare più sostenibili. Una PEH è un edificio che produce più energia di quanta ne consuma, contribuendo così alla rete elettrica. L'obiettivo di un PEH è quello di essere autosufficiente dal punto di vista energetico o addirittura positivo. L'obiettivo è quello di essere autosufficienti dal punto di vista energetico o addirittura positivi dal punto di vista energetico, grazie a un design e a una tecnologia efficienti dal punto di vista energetico, combinati con fonti di energia rinnovabile come i pannelli solari.

1.3. Etichettatura energetica e sostenibile

Un sistema di certificazione dell'efficienza energetica degli edifici è uno strumento utilizzato per valutare ed etichettare gli edifici in base alle loro prestazioni energetiche. L'obiettivo di questi sistemi è fornire informazioni trasparenti e comparabili sulle prestazioni energetiche degli edifici, consentendo ai proprietari e agli occupanti di prendere decisioni informate sull'uso e sui costi dell'energia. I sistemi di certificazione energetica degli edifici valutano in genere l'uso e l'efficienza energetica di un edificio assegnando una valutazione o un'etichetta ai sistemi di riscaldamento, raffrescamento, illuminazione e acqua calda sanitaria. Queste etichette possono essere utilizzate per confrontare tra loro le prestazioni energetiche di diversi edifici.

I diversi Paesi europei utilizzano nomi diversi per i loro attestati di prestazione energetica. Ecco alcuni esempi:

- In Germania, il certificato si chiama "Attestato di prestazione energetica" o "Energieausweis".
- In Francia, il certificato è chiamato "Certificat de Performance Énergétique" o "CPE".
- In Italia, il certificato è chiamato "Attestato di Certificazione Energetica" o "ACE".
- In Spagna, il certificato è chiamato "Certificado de Eficiencia Energética" o "CEE".
- In Svizzera, il certificato si chiama GEAK "Gebäudeenergieausweis der Kantone" o "Certificato energetico dell'edificio dei Cantoni".
- Nel Regno Unito, il certificato è chiamato "Energy Performance Certificate" o "EPC".

Vale la pena notare che il formato del certificato e le informazioni fornite variano leggermente da Paese a Paese.

D'altra parte, esistono sistemi di certificazione volontaria che stabiliscono standard più elevati per l'efficienza energetica e il comfort. Gli edifici che soddisfano questi standard sono solitamente più efficienti dal punto di vista energetico, più sani e più confortevoli da vivere rispetto a quelli che soddisfano solo i requisiti minimi stabiliti da ogni "Attestato di

prestazione energetica". Le certificazioni nazionali volontarie mirano a promuovere l'efficienza energetica e la sostenibilità degli edifici e a fornire ulteriori informazioni ai consumatori e ai proprietari degli edifici.

Alcuni esempi sono "Casa passiva" (o "Passivhaus") in Germania, "Minergie" in Svizzera, "Miljöbyggnad" in Svezia, "CasaClima" in Italia e "Effnergie" in Francia.

All'interno dei Paesi possono esistere vincoli specifici relativi ai certificati volontari, ad esempio in Svizzera le nuove costruzioni o le ristrutturazioni di edifici pubblici devono essere conformi almeno alla certificazione Minergie (ma non è obbligatoria per gli edifici privati).

Tutti questi sistemi, in qualche modo, cercano di raggiungere lo stesso obiettivo: fornire ai consumatori un modo semplice e comprensibile per accedere all'efficienza energetica degli edifici e aiutare i governi e i proprietari degli edifici a monitorare e migliorare le prestazioni energetiche degli edifici.

1.4. Prestazioni ambientali e di sostenibilità di un edificio

I sistemi di certificazione degli edifici sono un insieme di sistemi e strumenti di valutazione utilizzati per determinare le prestazioni di un edificio o di un progetto edilizio sotto il profilo della sostenibilità e dell'ambiente. Queste valutazioni mirano a migliorare le prestazioni complessive di edifici e infrastrutture, a integrare un approccio al ciclo di vita nella loro progettazione e costruzione e a promuovere il raggiungimento degli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile delle Nazioni Unite da parte dell'industria delle costruzioni. Gli edifici valutati e ritenuti in grado di soddisfare un determinato livello di prestazioni e qualità ricevono un certificato che attesta tale risultato.

Questi sistemi sono in genere sviluppati da organizzazioni o gruppi di esperti nel campo dell'edilizia sostenibile e sono destinati a essere utilizzati a livello globale. Sono progettati per fornire un metodo coerente e trasparente per valutare le prestazioni ambientali e di sostenibilità degli edifici, in modo che i proprietari, gli sviluppatori e gli altri soggetti interessati possano prendere decisioni informate sulla progettazione, la costruzione e il funzionamento degli edifici.

Esempi di sistemi internazionali di certificazione degli edifici sostenibili sono LEED⁵ (Leadership in Energy and Environmental Design) e BREEAM⁶ (Building Research Establishment Environmental Assessment Method), entrambi ampiamente riconosciuti e rispettati.

BREEAM è un metodo di valutazione della sostenibilità degli edifici sviluppato dal Building Research Establishment (BRE) nel Regno Unito, mentre LEED è un sistema di valutazione sviluppato dal Green Building Council (USGBC) degli Stati Uniti.

Queste certificazioni prevedono una serie di criteri che un edificio deve soddisfare per essere certificato, come l'efficienza energetica e idrica, la qualità ambientale interna, i materiali e le risorse e altro ancora. Esistono anche diversi livelli di certificazione: Oro, Argento e Bronzo. Gli edifici che soddisfano questi criteri e ottengono una certificazione possono dimostrare al pubblico, agli inquilini e alle autorità di regolamentazione che l'edificio è responsabile dal punto di vista ambientale e ha un minore impatto ambientale.

LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) e BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) sono esempi di sistemi internazionali di certificazione degli edifici sostenibili utilizzati in molti Paesi del mondo, compresa l'Europa.

Sia LEED che BREEAM sono spesso utilizzati in aggiunta ai sistemi nazionali precedentemente menzionati. Queste certificazioni possono essere uno strumento utile per i proprietari e gli sviluppatori di edifici che vogliono dimostrare le prestazioni ambientali e di sostenibilità dei loro edifici.

I sistemi internazionali di certificazione degli edifici sostenibili, come LEED e BREEAM, sono in genere sviluppati da organizzazioni o gruppi di esperti nel campo dell'edilizia sostenibile e sono destinati a essere utilizzati a livello globale. Sono rigorosi e completi e coprono un'ampia gamma di aspetti ambientali e di sostenibilità della progettazione, della costruzione, della messa in funzione e del funzionamento degli edifici.

Questi sistemi sono svincolati da norme e regolamenti nazionali o regionali specifici, ma sono progettati per essere allineati e talvolta persino integrati nelle norme e nei regolamenti edilizi locali.

⁵ Disponibile su: <https://www.usgbc.org/>

⁶ Disponibile su: <https://bregroup.com/>

I sistemi di certificazione internazionale non sostituiscono le normative nazionali o locali, ma possono essere utilizzati come strumento per rispettarle. Possono anche essere utilizzati per dimostrare la conformità alle normative e ai codici locali e per fornire ulteriori informazioni sulle prestazioni ambientali e di sostenibilità dell'edificio.

Inoltre, molti Paesi hanno i propri sistemi di valutazione degli edifici, che a volte sono allineati con i sistemi di valutazione internazionali come LEED o BREEAM. In questo modo gli edifici possono essere certificati sia dal sistema nazionale che da quello internazionale.

I sistemi internazionali di certificazione degli edifici sostenibili, come LEED e BREEAM, presentano alcune analogie con, ad esempio, lo standard nazionale svizzero SNBS (Swiss National Standard for Sustainable Buildings) in termini di valutazione delle prestazioni ambientali e di sostenibilità degli edifici.

Lo Standard Edificio Sostenibile Svizzera (SNBS) 2.1 è lo standard generale per l'edilizia sostenibile in Svizzera. Integra gli strumenti e i mezzi esistenti, come la Raccomandazione SIA 112/1 "Edilizia sostenibile - Lavori edili", gli obiettivi della Società 2000 Watt o i criteri Minergie ed è orientato alle fasi del Modello di prestazione SIA. Secondo l'SNBS possono essere certificati edifici amministrativi, residenziali e scolastici. Questo vale sia per le nuove costruzioni che per le ristrutturazioni di edifici.

Tutti questi sistemi sono stati progettati per aiutare i proprietari e gli sviluppatori di edifici a progettare, costruire e gestire edifici con un minore impatto ambientale. Possono essere utilizzati insieme, anche se il rispetto dei requisiti di uno di essi non garantisce la conformità con l'altro.

2. POTENZIALI SCENARI DI RETROFIT

Esiste un grande dibattito sulla ristrutturazione degli edifici, che può essere di due tipi: parziale o integrale. La ristrutturazione parziale è la più diffusa e si concentra su misure di conservazione dell'energia a basso rischio e con tempi di ritorno dell'investimento (PBT) brevi, come ad esempio la parziale riqualificazione dell'illuminazione, la sostituzione e il retro-commissioning dell'impianto di climatizzazione o l'installazione di fonti di energia rinnovabile grazie a costi favorevoli o incentivi. D'altra parte, una ristrutturazione integrale riduce il consumo energetico rispetto ai livelli precedenti alla ristrutturazione, in genere di oltre il 60%. Questi interventi spesso includono il retrofit dell'involucro dell'edificio (isolamento della facciata e/o del tetto, sostituzione delle finestre e miglioramenti significativi dell'ermeticità dell'edificio) con la sostituzione completa del sistema HVAC.

Oggi gli interventi sono principalmente di natura parziale, a causa dei maggiori costi di investimento iniziali del retrofit profondo: in media un retrofit parziale può costare circa 650 €/m (riferito alla superficie netta del pavimento), mentre un normale retrofit profondo costa circa 830 €/m. Inoltre, la tempistica richiesta per i lavori di retrofit profondo è superiore del 25% rispetto alla ristrutturazione parziale. Esistono altri problemi: difficoltà di accesso a molti edifici, potenziali disagi per gli occupanti e i quartieri, basso livello di consapevolezza, mancanza di esperienza tra gli operatori (architetti, installatori, proprietari di edifici) e poche soluzioni integrate che possano aiutare a risolvere diversi problemi simultaneamente, ad esempio riparazioni strutturali abbinate a misure di efficienza energetica.

Poiché l'UE mira a passare al 100% di energie rinnovabili negli edifici entro il 2050, il retrofit profondo dovrebbe essere applicato quando possibile per raggiungere questo obiettivo. La riduzione dei tempi di realizzazione del deep retrofit e la riduzione dei costi di installazione sono due delle questioni più importanti da affrontare. La prefabbricazione potrebbe essere una soluzione interessante in quanto riduce i tempi di ciclo per la produzione e l'installazione e supporta varie tecnologie di tracciamento che aiutano a rendere visibile il processo.

Le soluzioni modulari interne di dimensioni ridotte possono essere più efficienti e possono essere applicate a diverse tipologie di edifici: edifici storici in cui è impossibile modificare la facciata esterna, edifici a più piani in cui l'isolamento esterno può essere complicato, edifici in centri urbani in cui l'impalcatura esterna può rappresentare un problema ed edifici che sono già stati parzialmente ristrutturati (seconda fase di retrofit), ad esempio con tetti e/o tinteggiature esterne. L'isolamento interno può essere quindi una soluzione molto interessante che potrebbe consentire una maggiore diffusione degli interventi di deep retrofit. Tuttavia, è ancora poco adottata. Di conseguenza, le soluzioni modulari interne sono molto interessanti per la realizzazione di un deep retrofit, tuttavia non sono state studiate così approfonditamente come l'isolamento esterno. Un punto cruciale è come progettare, costruire e gestire le soluzioni modulari e allo stesso tempo come industrializzare il cantiere per aumentare l'efficienza dei lavoratori e accelerare il processo di deep retrofit dell'edificio. Una questione importante da risolvere è, ad esempio, la possibilità di rinforzare le strutture e rendere l'edificio antisismico.

Un altro aspetto importante è la qualità dell'ambiente interno (o IEQ, che include controllo della temperatura e dell'umidità, acustica, IAQ, schermatura solare), che deve essere considerata con attenzione e può essere responsabile

di una parte dei costi elevati e delle tempistiche dei lavori di ristrutturazione. Soluzioni integrate adeguate, con tecnologie di facile utilizzo e manutenzione, aiutano a garantire una buona IEQ e a mantenere le soluzioni di comfort previste in fase di progettazione.

Gran parte degli sforzi devono essere indirizzati agli edifici civili, sia di tipo residenziale che non residenziale. In particolare, particolare interesse dovrebbe essere dimostrato per gli edifici di alto valore storico o con un ruolo sociale, cioè case popolari, edifici pubblici, organizzazioni non profit (NPO), organizzazioni non governative (NGO) e chiese. La riqualificazione di queste tipologie di edificio può creare delle buone pratiche all'avanguardia e la leva può essere ottenuta dalla replicabilità dell'applicazione per aziende/enti pubblici e le chiese, le ONG e le ONP. Infatti, da un lato, possiedono un ampio portafoglio di edifici in stock; dall'altro, hanno una rete consistente. Quindi, grazie all'attività di comunicazione e informazione, i cittadini possono essere più consapevoli delle soluzioni di deep retrofit. Inoltre, sono presenti in vaste aree/regioni che consentono un'ampia replicabilità geografica.

È importante verificare l'analisi costi-benefici per consentire l'uso di sistemi facili da installare (soluzioni plug and play) insieme a diverse fonti di energia rinnovabile locale come il solare fotovoltaico e le pompe di calore ad acqua. Come dimostrato in letteratura, la combinazione di soluzioni fotovoltaiche e pompe di calore geotermiche a bassa entalpia è un buon motore per realizzare soluzioni nZEB con tempi di ritorno ragionevoli (PBT).

Gli edifici target nei quartieri urbani sono edifici residenziali e non residenziali esistenti e storici in cui l'isolamento esterno è facilmente applicabile solo in qualche caso e con particolare attenzione. La definizione di strategie a livello urbano richiede lo sviluppo di archetipi di edifici per ampliare la prospettiva della scala del singolo edificio (Carnieletto e Ferrando, 2021), rappresentando la tipologia di edifici più comune ai fini della modellazione. Questo approccio è importante per definire meglio i potenziali ostacoli nell'applicazione di una specifica strategia di retrofit. Gli archetipi sono generalmente definiti come edifici teorici ottenuti dall'analisi statistica delle caratteristiche degli edifici raggruppati in base alle somiglianze (Carnieletto e Ferrando, 2021). Gli archetipi di edifici possono anche essere definiti come modelli che consentono l'applicazione di strumenti di simulazione per valutare la domanda energetica di un ampio parco di edifici (Ferrando e Causone, 2020). Anche se l'applicazione della modellazione basata sugli archetipi richiede alcune semplificazioni, la letteratura mostra che essa consente di sviluppare strategie e tecnologie innovative per aumentare l'efficienza energetica con risultati accettabili sia a scala di singolo edificio che a scala urbana, come presentato nei lavori di Fracastoro e Ferraino (2011), Dall'O' e Galante (2012), Prativiera e Romano (2021) e Teso e Carnieletto (2022). Pertanto, la potenziale riduzione del consumo energetico può essere confrontata con altri parametri di gestione economica.

2.1. Possibili strategie di retrofit

Come già accennato, il progetto GEO4CIVHIC si occupa del retrofit di edifici esistenti e storici nei centri urbani, applicando le pompe di calore. La struttura tipica degli edifici storici (cioè costruiti prima del 1950) è costituita da pareti esterne in mattoni pieni (50 cm) eventualmente separate da un'intercapedine d'aria di 5 cm in base al clima della località considerata. I tetti tipici degli edifici storici hanno una copertura a capriate in legno che sostiene uno strato di legno con le tegole. Il sottotetto sottostante può essere diviso dalle stanze attraverso un solaio non calpestabile formato da un altro strato di legno sostenuto da travetti.

Considerando gli edifici esistenti, una costruzione di riferimento può essere definita come blocchi forati da 25 cm o blocchi cellulari in mattoni, eventualmente separati da un'intercapedine di 5 cm. I tetti dovrebbero essere definiti in base alla posizione; a Strasburgo e Helsinki, ad esempio, ci sono tetti inclinati in mattoni-calcestruzzo con tegole, mentre ad Atene i tetti orizzontali hanno travi in cemento e blocchi piatti in mattoni forati. Poiché molti edifici storici sono tutelati e non possono essere isolati, è stata presa in considerazione la possibilità di sostituire la caldaia a gas con una pompa di calore ad alta temperatura che mantiene i radiatori. Pertanto, le soluzioni dovrebbero prendere in considerazione sia i terminali ad alta temperatura che i sistemi di riscaldamento ad emissione a media e bassa temperatura (ad esempio, fan-coil e sistemi radianti).

In caso di retrofit dell'involucro, la strategia proposta suggerisce l'isolamento delle pareti opache utilizzando EPS da 12 cm applicato sul lato interno, per tenere conto di potenziali limitazioni legate alla protezione del patrimonio culturale o all'assetto urbano. Questa strategia potrebbe evitare l'uso dell'isolamento esterno nei centri urbani che potrebbe ridurre la zona pedonale come conseguenza della riduzione della superficie dei marciapiedi. Lo spessore dello strato isolante è un valore medio che non riduce eccessivamente la superficie netta interna del pavimento disponibile, e quindi viene considerato positivamente dall'utente. Anche i pavimenti interni dovrebbero essere leggermente isolati per considerare la possibile installazione di sistemi radianti che possono essere meglio accoppiati con le pompe di calore geotermiche grazie alla minore temperatura richiesta (Carnieletto e Kazanci, 2018). La sostituzione delle finestre dovrebbe essere inclusa per ridurre le perdite termiche complessive.

Supponendo che la maggior parte degli edifici sia alimentata da caldaie a gas standard, la prima strategia proposta è la sostituzione con un GSHP più efficiente (Caso 0), combinata con la sostituzione dei sistemi di emissione a media o

bassa temperatura (cioè, fan-coil o sistemi radianti) sia per il riscaldamento che per il raffreddamento (Caso 1), eventualmente accoppiata all'isolamento termico dell'involucro (Casi 2 e 3).

Pertanto, nel complesso, sono state studiate quattro principali soluzioni potenziali di retrofit (Fig. 2-1):

- Caso 0: la caldaia standard viene sostituita con un sistema GSHP ad alta temperatura e vengono mantenuti i radiatori tradizionali.
- Caso 1: la caldaia standard viene sostituita con un sistema GSHP e le unità terminali di riscaldamento e raffreddamento vengono sostituite con ventilconvettori (1a) o con un sistema radiante (1b).
- Caso 2: la caldaia standard viene sostituita con un sistema GSHP, i radiatori vengono mantenuti, ma l'isolamento dell'edificio viene migliorato.
- Caso 3: la caldaia standard viene sostituita con un sistema GSHP, le unità terminali di riscaldamento e raffreddamento vengono sostituite con ventilconvettori (3a) o sistemi radianti (3b) e l'isolamento dell'edificio viene migliorato.

CASO BASE

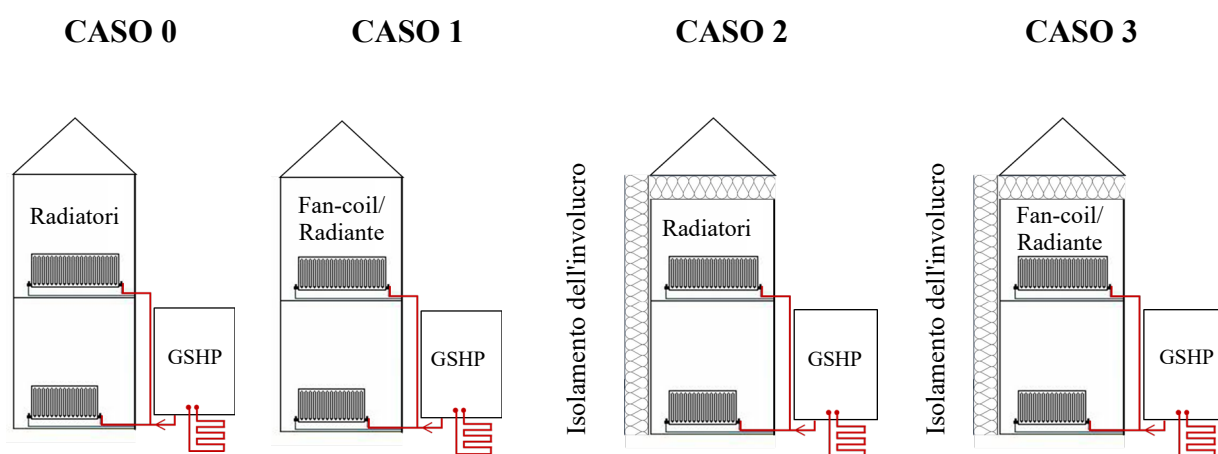
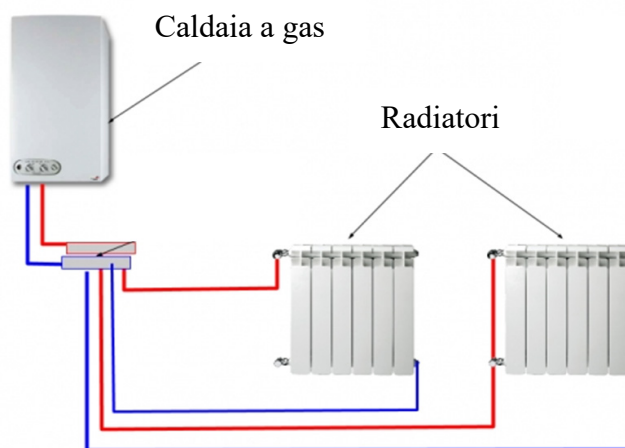


Figura 2-1. Schema semplificato delle strategie di retrofit applicate

2.2. Dimensionamento degli scambiatori di calore a terreno

La lunghezza totale della perforazione necessaria per fornire riscaldamento e raffreddamento agli ambienti e l'estensione del campo di perforazione degli scambiatori di calore a doppia U è stata stimata utilizzando il metodo ASHRAE (ASHRAE, 2011). Gli input richiesti sono la domanda stagionale di energia termica e il carico di picco per il

riscaldamento e il raffrescamento degli ambienti. I risultati possono essere confrontati con progetti precedenti come Cheap GSHPs e con il WebTool TABULA⁷.

Per considerare l'interferenza di sonde adiacenti nel calcolo della lunghezza totale richiesta, il metodo ASHRAE è stato applicato due volte di seguito, applicando lo strumento sviluppato da Capozza et al. (Capozza e Zarrella, 2015). Nel primo calcolo, vengono calcolate le lunghezze di perforazione necessarie per il riscaldamento (Lh) e il raffrescamento (Lc). Una volta calcolata la profondità complessiva ideale in base al modello di sorgente lineare, il valore più alto tra Lc e Lh viene diviso per la profondità delle GHE, che sono considerate di uguale lunghezza. La distanza tra gli scambiatori di calore a terreno è stata impostata a 7 m per limitare l'interferenza termica, in base alle caratteristiche del sito (Lee e Park, 2021). Con la seconda iterazione, Lh e Lc sono valutati più accuratamente considerando la temperatura di penalizzazione (t_p).

Il dimensionamento ottimale della lunghezza del foro per l'installazione dipende dalla domanda di energia dell'edificio; in condizioni dominanti di raffrescamento, ad esempio, è spesso la stagione estiva a imporre la condizione più critica per il dimensionamento del sistema. La riduzione delle perdite di trasmissione ottenuta isolando l'involucro dell'edificio può aumentare la costante di tempo dell'edificio, il che può essere vantaggioso per la domanda di raffrescamento nelle località a prevalenza di raffrescamento.

I valori tipici di COP ed EER considerando la pompa di calore collegata a diverse unità terminali di riscaldamento e raffrescamento (radiatori, fan-coils, pavimento radiante) sono presentati in Tabella 2-1 riferiti a tre condizioni climatiche rappresentative di una località calda (Atene), mite (Strasburgo) e fredda (Helsinki). Questi valori sono stati determinati facendo riferimento alle schede tecniche delle pompe di calore reali, scegliendo i valori stagionali di COP ed EER in base ai criteri di progettazione del sistema. In base alle temperature locali, si può notare che più il clima è freddo, più basso è il COP e più alto l'EER.

Tabella 2-1. Valori di progetto e stagionali della pompa di calore collegata ai diversi sistemi di riscaldamento e raffrescamento

			ATENE		STRASBURGO		HELSINKI	
		Input/output Temperatura [°C]	Design COP/EER	Stagionale COP/EER	Design COP/EER	Stagionale COP/EER	Design COP/EER	Stagionale COP/EER
Riscaldamento	Radiatore	75 - 65	2.4	2.5	2.4	2.5	2.4	2.5
	Fan-coil	45 - 40	3.6	4.1	3	3.3	2.7	3
	Radiante	35 - 30	4.8	5.3	3.8	4.3	3.4	3.8
Raffrescamento	Fan-coil/ Radiante	7 - 12	4	4.4	5	5.5	5.9	6.5

Tre valori di conduttività termica e di capacità termica volumetrica sono specificati in Tabella 2-2 come valori di riferimento per i tipi di terreno più comuni. Questi valori di proprietà termica sono stati selezionati in base ai principali risultati presentati da diversi progetti di ricerca incentrati sulla determinazione delle proprietà termiche del terreno per applicazioni di pompe di calore geotermiche a bassa entalpia, raccogliendo dati su depositi non consolidati, rocce sedimentarie, metamorfiche e ignee (Galgaro e Dalla Santa, 2021). Nell'applicazione presentata in questi capitoli, si considera solo la componente di conduzione dello scambio termico tra sonda e terreno. Il contributo convettivo dovuto al flusso dell'acqua di falda, che potrebbe aumentare la conducibilità termica equivalente del sottosuolo e quindi ridurre la lunghezza complessiva richiesta per gli scambiatori a terreno, viene qui trascurato per semplicità.

Tabella 2-2. Proprietà termiche dei tre tipi di terreno considerati

Conducibilità termica [W/(m K)]	1.5	2.2	3.0
Capacità termica specifica di volume [MJ/(m ³ K)]	2.0	2.5	2.6

⁷ Disponibile su: <https://webtool.building-typology.eu>

L'installazione di sistemi GSHP nelle aree urbane è solitamente complicata soprattutto a causa della limitata superficie disponibile, che di solito corrisponde a piccoli cortili interni o giardini.

2.3. Lunghezza ottimale delle sonde

Riassumendo i risultati presentati nell'ultimo paragrafo, Figura 2-2 e Tabella 2-3 mostrano i possibili scenari, confrontando la lunghezza massima disponibile (L_{max}) con la lunghezza delle sonde necessaria per soddisfare la domanda energetica dell'edificio per il raffrescamento (L_c) e il riscaldamento (L_h). Esistono tre opzioni:

- A: Spazio disponibile sufficiente per le sonde per soddisfare l'energia richiesta
- B: Solo la domanda di energia per il riscaldamento o il raffrescamento può essere soddisfatta rispetto allo spazio disponibile ($L_{max} < L_h$ o $L_{max} < L_c$).
- C: Non c'è spazio sufficiente per soddisfare né la domanda di riscaldamento né quella di raffrescamento dell'edificio ($L_h > L_{max}$ e $L_c > L_{max}$).

Quando la lunghezza delle sonde non è sufficiente a soddisfare la domanda energetica dell'edificio, è stata studiata la combinazione con una pompa di calore aria-acqua (AWHP) per consentire al sistema combinato di soddisfare l'energia termica richiesta.

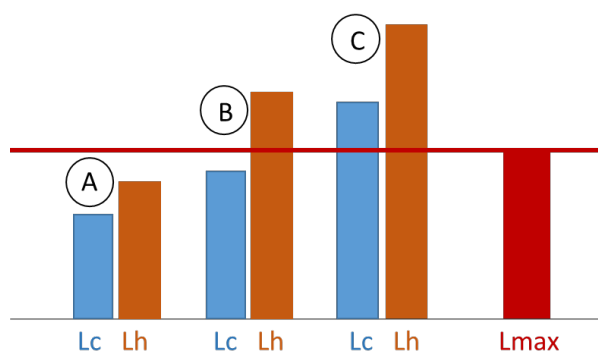


Figura 2-2. Possibili scenari dei casi di studio

A) $L_h, L_c < L_{max}$	
1 - $L_h \approx L_c$ (deviazione 15%)	$L = \max(L_h, L_c)$
2 - $L_h > L_c$	2a) $L = L_h$ 2b) $L = L_c + AWHP$
3 - $L_c > L_h$	3a) $L = L_c$ 3b) $L = L_h + AWHP$
1 L_h o $L_c > L_{max}$	
1- $L_h > L_{max}$	$L = L_c + AWHP$
2- $L_c > L_{max}$	$L = L_h + AWHP$
2 $L_h, L_c > L_{max}$	
$L = L_{max} + AWHP$	

Tabella 2-3. Lunghezza ottimale delle sonde

Considerando la combinazione dei possibili scenari, si possono studiare diversi casi per decidere la lunghezza ottimale della sonda, in particolare:

- Caso A1: la lunghezza delle sonde è quasi la stessa per il riscaldamento e il raffrescamento, si può scegliere la lunghezza massima tra le due (fabbisogno soddisfatto completamente con una pompa di calore reversibile acqua-acqua). È stata considerata accettabile una deviazione di circa il 15%.
- Casi A2 e A3: se la differenza tra L_h e L_c è maggiore del 15%, la scelta può essere fatta considerando la lunghezza maggiore delle sonde (sottocasi 2a e 3a con GSHP integrale) o la lunghezza minore delle sonde (sottocasi 2b e 3b) per alimentare un sistema ibrido che utilizza due sorgenti, acqua e aria (GSHP+AWHP); in questo caso è possibile adottare/considerare una macchina adeguata che implementa due sorgenti contemporaneamente (Zarrella e Zecchin, 2019).
- Casi B1 e B2: se una delle lunghezze di sonda è inferiore alla lunghezza massima disponibile e l'altra è maggiore, la soluzione ottimale è un sistema ibrido, in cui la pompa di calore GSHP si occupa della parte bilanciata del carico di base e la pompa di calore AWHP si occupa del resto dei carichi - vale a dire che la lunghezza totale ottimale delle sonde è la più corta e l'energia non fornita dalla pompa di calore GSHP è fornita dalla fonte di aria (GSHP+AWHP). In questo modo si massimizza il fattore di utilizzo del sistema GSHP.
- Caso C: se entrambe le lunghezze sono superiori alla lunghezza massima disponibile, la lunghezza ottimale della sonda da installare è la massima consentita, integrando l'energia in eccesso in una soluzione ibrida (GSHP+AWHP). In questo modo, analogamente ai casi B1 e B2, il fattore di utilizzo della GSHP viene massimizzato bilanciando il carico di base e il carico rimanente viene fornito dall'AWHP.

3. CASI STUDIO

Nei paragrafi seguenti verranno presentati i risultati ottenuti da tre casi di studio sviluppati per il progetto GEO4CIVHIC. La Tabella 3-1 mostra la domanda di energia sia per gli edifici residenziali esistenti che per quelli storici, per le zone climatiche di Atene, Strasburgo ed Helsinki come base per il dimensionamento del GHE. La riduzione dell'energia è significativa se si considerano gli edifici ristrutturati sia per i casi esistenti che per quelli storici, grazie alle minori perdite di trasmissione attraverso l'involucro. Confrontando i risultati ottenuti per i casi di riferimento (cioè edifici esistenti e storici senza retrofit), come previsto nei climi miti e freddi la domanda di energia per il riscaldamento degli edifici è dominante, mentre i climi caldi presentano una domanda dominante di energia per il raffrescamento. Al contrario, la domanda di energia per il riscaldamento e il raffrescamento è simile per gli edifici riadattati a Strasburgo, un risultato importante per il dimensionamento degli scambiatori di calore a terreno.

Tabella 3-1. Carichi energetici per il riscaldamento e il raffrescamento nelle tre località [kWh/(m² y)].

Fabbisogno energetico [kWh/(m ² y)]		Esistente		Storico	
		Linea di base	Retrofit	Linea di base	Retrofit
Atene	Riscaldamento	13.1	0.4	32.6	1.1
	Raffrescamento	69.5	44.1	78.7	48.8
Strasburgo	Riscaldamento	72.6	21.5	104.2	26.4
	Raffrescamento	30.2	27.3	35.6	31.2
Helsinki	Riscaldamento	122.3	41.9	158.4	50.5
	Raffrescamento	19.1	18.5	23.3	25.4

Come già noto, le prestazioni dei sistemi GSHP sono influenzate dalla conducibilità termica del terreno. La conducibilità termica media di 2,2 W/(m K) e la capacità termica specifica di volume di 2,5 MJ/(m³ K) sono state scelte per l'analisi dettagliata dei risultati mostrati in questa sezione.

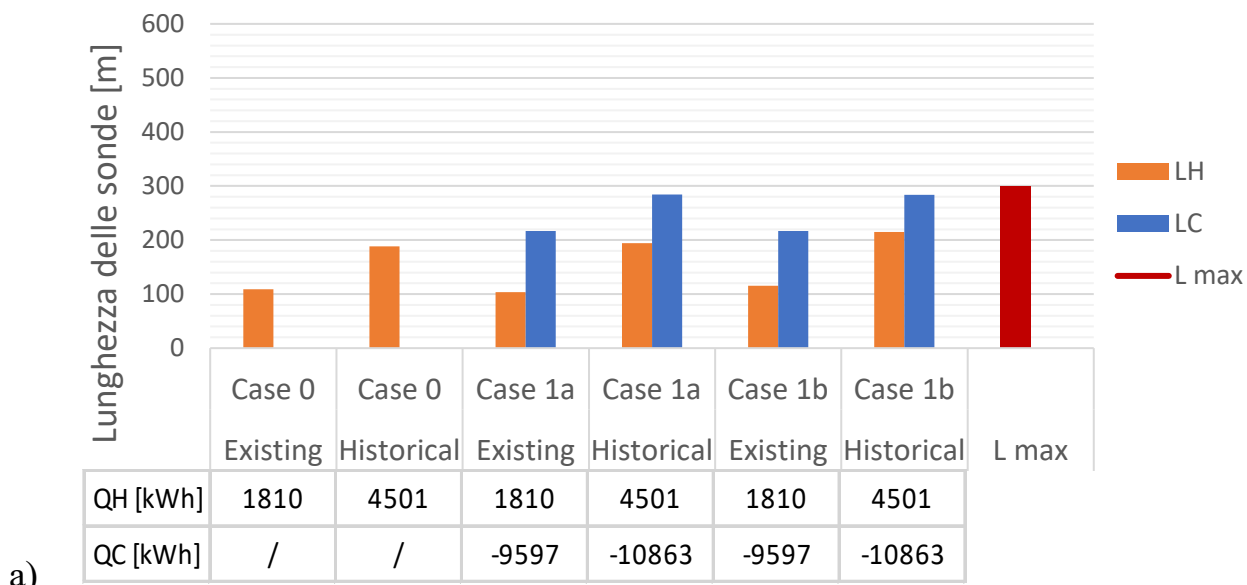
I risultati finali del metodo ASHRAE che verranno presentati per ogni caso di studio corrispondono alle lunghezze di sonda necessarie per il riscaldamento (Lh) e il raffrescamento (Lc), che vengono confrontate con la lunghezza massima possibile. L'archetipo si riferisce a una tipica casa a schiera, dove gli scambiatori possono essere disposti linearmente nel cortile a circa 3,3 m dai vicini e di 7 m tra loro per evitare interferenze termiche. Queste ipotesi portano a un massimo di 3 sonde (BHE) per l'installazione, quindi il limite di lunghezza per LH e LC è di 300 m. L'analisi è stata condotta assumendo che le indagini sul terreno e i permessi necessari siano già stati richiesti e ottenuti dall'autorità locale responsabile, come previsto dalla convenzione per la protezione del patrimonio culturale e naturale mondiale (UNESCO, 1972).

3.1. Atene

Ad Atene, considerando l'installazione di sistemi GSHP senza alcun isolamento dell'involucro dell'edificio (Figura 3-1a) e con retrofit dell'involucro (Figura 3-1b), il carico termico richiesto dall'edificio è sbilanciato. L'energia scambiata con il terreno in estate, e quindi la lunghezza di sonda necessaria per il raffrescamento (Lc), è molto maggiore dell'energia richiesta per il riscaldamento (Lh). Lc è stata definita quando è stato previsto un rifacimento dell'impianto, perché in origine non doveva essere presente alcun sistema di raffrescamento; Lh è diminuito al 6% e al 13% rispettivamente per gli edifici esistenti e storici confrontando la condizione di base con il Caso 3-1b (retrofit dell'involucro combinato con la sostituzione dei sistemi di distribuzione e generazione). Nonostante lo squilibrio del carico termico, il sistema GSHP può essere utilizzato evitando problemi di deriva termica del terreno, poiché la temperatura di penalizzazione, calcolata con il metodo ASHRAE, è inferiore a 1 °C in tutti i casi. Come mostrato nei diagrammi, se si esegue il retrofit dell'involucro, la lunghezza di sonda necessaria per il riscaldamento si riduce notevolmente a causa della minore richiesta di energia da parte dell'edificio dovuta alla riduzione delle perdite di trasmissione. In questo caso, la lunghezza della sonda per il raffrescamento è leggermente diminuita, indicando un aumento dello squilibrio tra il carico termico di riscaldamento e quello di raffrescamento.

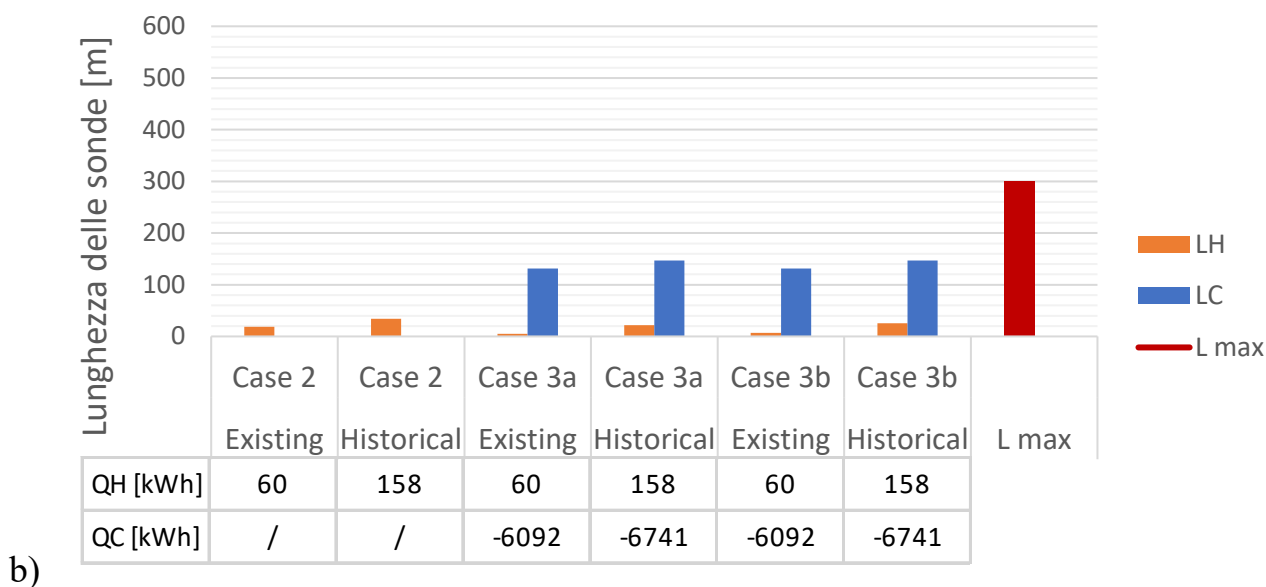
Considerando le caratteristiche prestazionali medie del terreno, le opposte lunghezze dei fori di trivellazione richieste sono inferiori rispetto al caso con conducibilità termica di 1,5 W/(m K) (vedere l'Appendice), quindi Lh e Lc sono inferiori alla lunghezza massima consentita (Lmax). L'effetto è ancora più evidente per $\lambda=3$ W/(m K).

Linea di base + GSHP



a)

Retrofit dell'involucro + GSHP



b)

Figura 3-1. Confronto tra la lunghezza massima disponibile e la lunghezza del foro necessaria per soddisfare la domanda di energia per le tre tipologie di edifici per Atene senza (a) e con (b) isolamento dell'involucro

3.2. Strasburgo

I casi con un involucro riqualificato (Figura 3-2b) mostrano un fabbisogno energetico di riscaldamento e raffrescamento equilibrato grazie alla riduzione del carico termico durante la stagione di riscaldamento, mentre il caso senza isolamento (Figura 3-2a) presenta un carico termico sbilanciato con una maggiore richiesta di energia in modalità di riscaldamento. Pertanto, l'applicazione di una riqualificazione integrale consente di ottimizzare il dimensionamento della sonda ipotizzando una profondità di installazione in grado di fornire ipoteticamente la quasi totalità del fabbisogno energetico per il riscaldamento e il raffrescamento. La lunghezza delle sonde per il riscaldamento degli ambienti è ridotta del 50%

e del 55% rispettivamente per gli edifici esistenti e per quelli storici, mentre per il raffrescamento degli ambienti è stata prevista una lunghezza di progetto delle sonde.

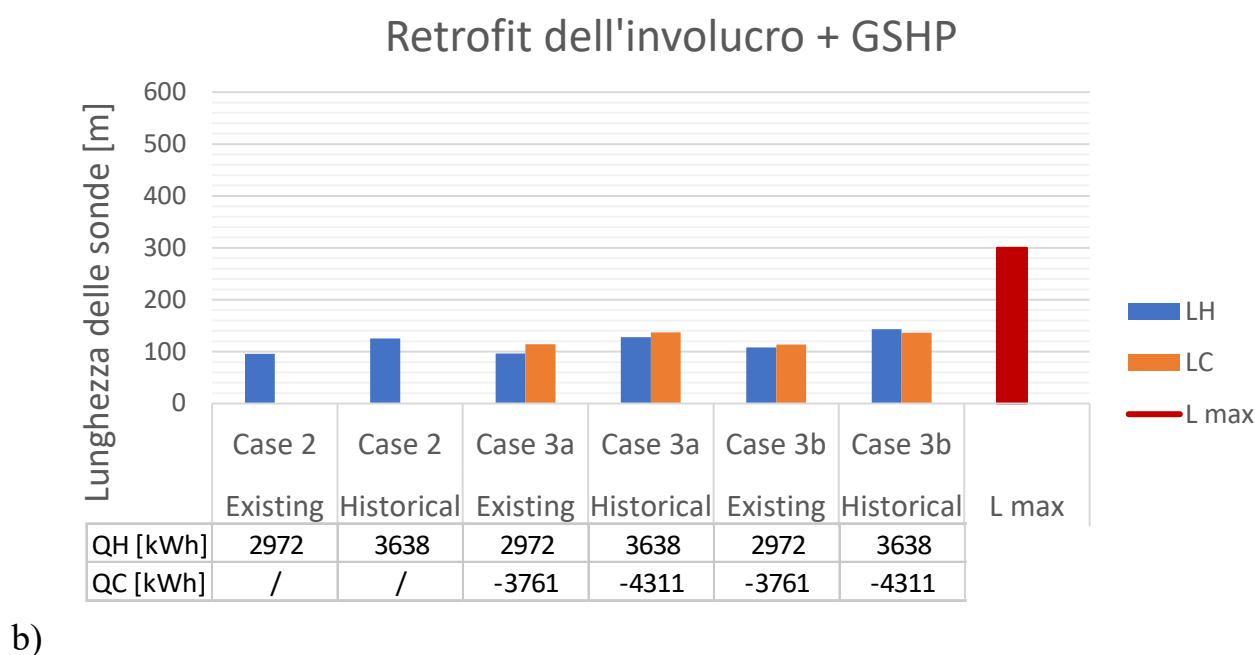
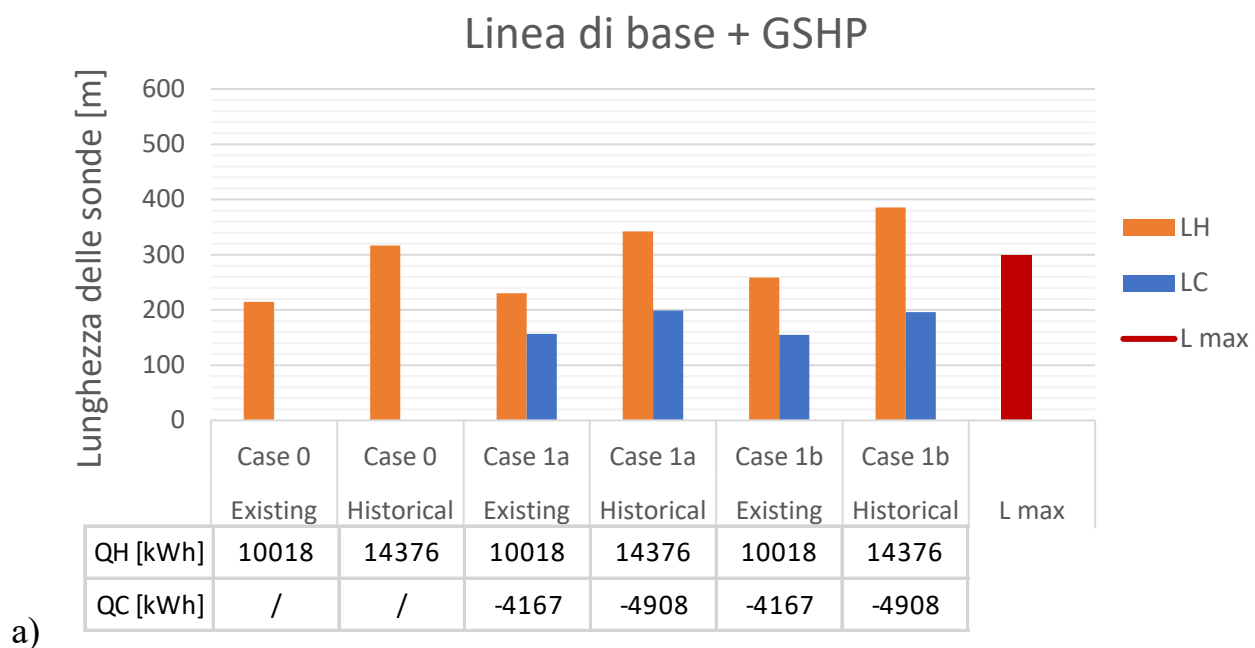


Figura 3-2. Confronto tra la lunghezza massima disponibile e quella necessaria per soddisfare il fabbisogno energetico per le tre tipologie di edifici di Strasburgo senza (a) e con (b) isolamento dell'involucro

3.3. Helsinki

Considerando il clima di Helsinki, il carico termico sbilanciato dell'involucro non isolato (Figura 3-3a), è leggermente più pronunciato rispetto a Strasburgo. Sebbene l'applicazione di una riqualificazione integrale richieda una lunghezza di riscaldamento minore, che si riduce dal 45% al 61% per gli edifici esistenti e storici confrontando il caso base con il

caso 3-3b, il carico di riscaldamento è ancora dominante, complicando il dimensionamento delle sonde per soddisfare in modo efficiente la domanda energetica dell'edificio.

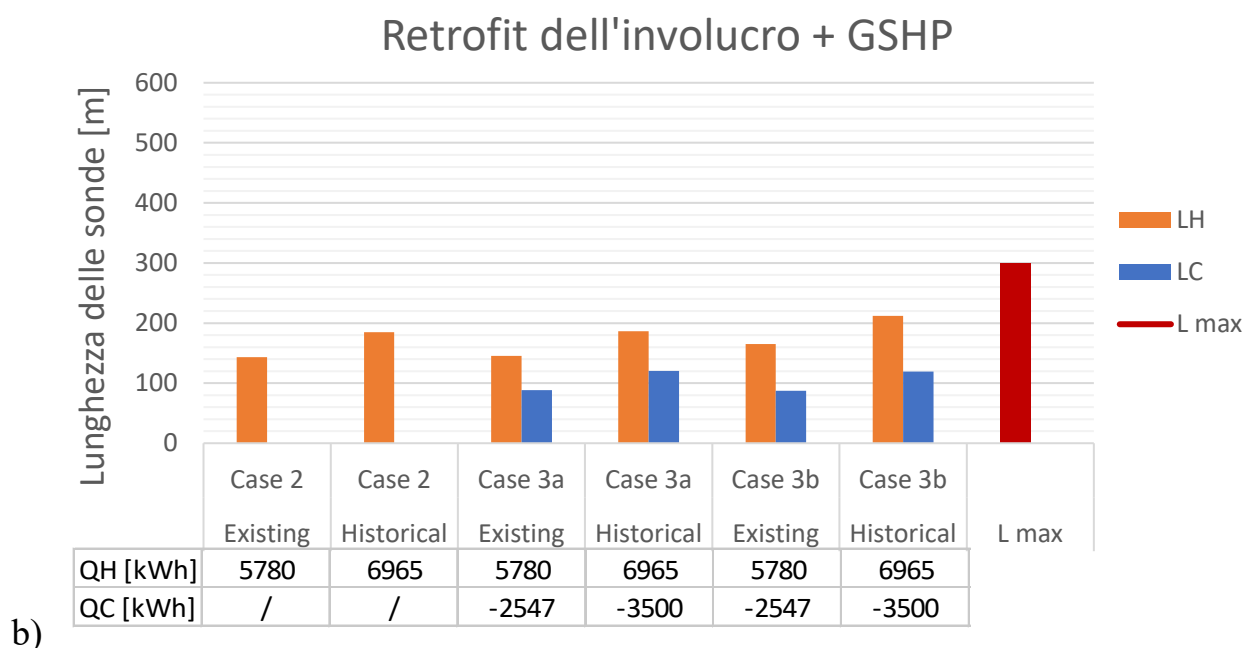
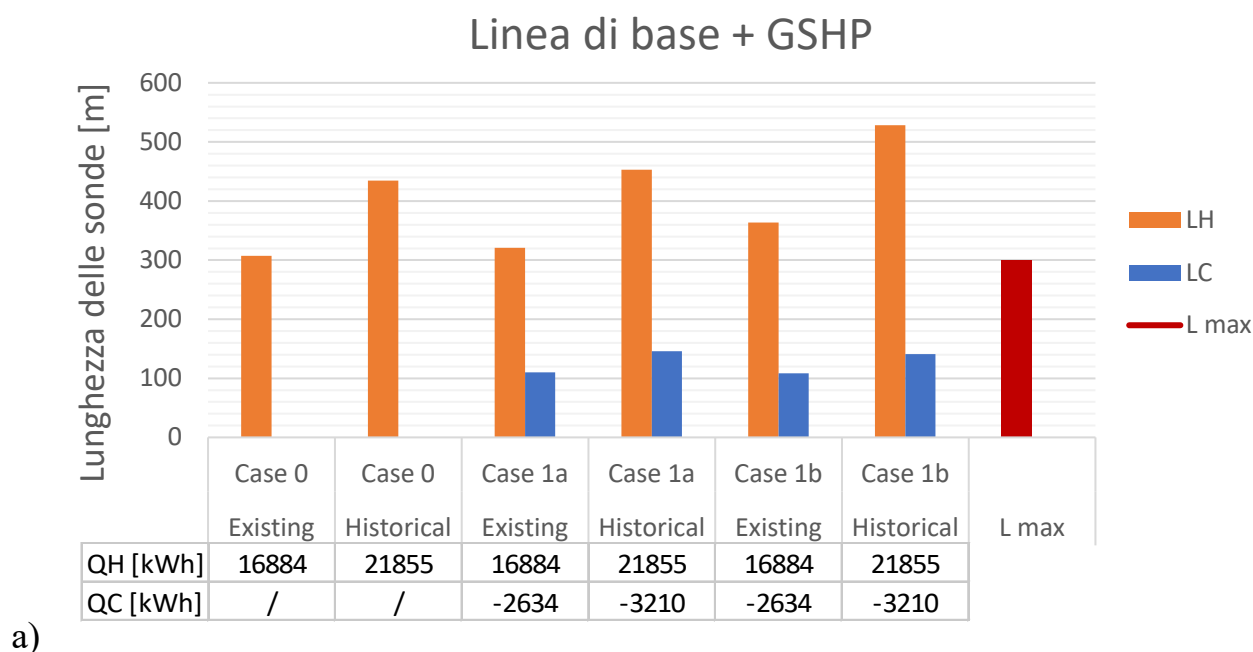


Figura 3-3. Confronto tra la lunghezza massima disponibile e la lunghezza necessaria dei fori di trivellazione per soddisfare le tipologie di domanda energetica per Helsinki senza (a) e con (b) isolamento dell'involucro

3.4. Lunghezza ottimale delle sonde

La metodologia spiegata nella Sezione 2.2.1 e riportata nella Tabella 2-3 è stata utilizzata per definire correttamente la lunghezza ottimale della sonda da installare per evitare problemi quali la deriva termica dovuta al carico termico estremamente sbilanciato degli edifici (cfr. Tabella 3-2 per i casi di riferimento finali).

Quando il calore scambiato nel terreno è quasi bilanciato tra il periodo di riscaldamento (calore estratto dal terreno) e il periodo di raffrescamento (calore rilasciato nel terreno), la scelta ottimale è quella di fissare la stessa lunghezza di sonda in riscaldamento e raffrescamento per evitare il fenomeno della deriva della temperatura del terreno. Lavorare con la sorgente aria quando la sorgente terreno non è sufficiente permette di ottimizzare le fonti energetiche disponibili, aumentando l'efficienza del sistema poiché l'AWHP è più efficiente durante le stagioni intermedie, in particolare quando la temperatura dell'aria è più alta di quella del terreno (Zarella e Zecchin, 2018).

Tra i diversi casi, quando si effettua una riqualificazione integrale, la lunghezza delle sonde si riduce significativamente in inverno (L_h), mentre la lunghezza necessaria per il raffrescamento (L_c) rimane quasi costante. Per questo motivo, il caso B è più frequente quando si considerano i climi caldi, poiché la domanda di energia per il riscaldamento può essere trascurata, ma la domanda di energia per il raffrescamento è significativamente elevata.

Tabella 3-2. Lunghezza finale selezionata per le sonde

			L_h	L_c	Caso*	L installato (a)	L installato (b)
			[m]	[m]		[m]	[m]
Caso 0 radiatori	Atene	Esistente	85	-	2a	85	-
		Storico	150	-	2a	150	-
	Strasburgo	Esistente	190	-	2a	190	-
		Storico	280	-	2a	280	-
	Helsinki	Esistente	265	-	2a	265	-
		Storico	375	-	4	-	300
Caso 1 fan-coil	Atene	Esistente	75	200	3a/3b	200	75
		Storico	140	250	3a/3b	250	140
	Strasburgo	Esistente	180	140	2a/2b	180	140
		Storico	265	170	2a/2b	265	170
	Helsinki	Esistente	250	100	2a/2b	250	100
		Storico	355	135	2a/2b	300	135
Caso 1 sistema radiante	Atene	Esistente	80	200	3a/3b	200	80
		Storico	150	250	3a/3b	250	150
	Strasburgo	Esistente	200	140	2a/2b	200	140
		Storico	295	170	2a/2b	295	170
	Helsinki	Esistente	275	100	2a/2b	275	100
		Storico	400	130	4	300	130
Caso 2 radiatori	Atene	Esistente	15	-	2a	15**	-
		Storico	25	-	2a	25**	-
	Strasburgo	Esistente	85	-	2a	85	-
		Storico	105	-	2a	105	-
	Helsinki	Esistente	115	-	2a	115	-
		Storico	155	-	2a	155	-
Caso 3 fan-coil	Atene	Esistente	5	115	3a	115	-
		Storico	15	135	3a	135	-
	Strasburgo	Esistente	75	105	3a/3b	105	75
		Storico	95	120	3a/3b	120	95
	Helsinki	Esistente	105	80	2a/2b	105	80
		Storico	140	110	2a/2b	140	110
Caso 3 sistema radiante	Atene	Esistente	5	115	3a	115	-
		Storico	15	135	3a	135	-
	Strasburgo	Esistente	80	105	1	105	-
		Storico	105	125	3a/3b	125	-
	Helsinki	Esistente	120	80	2a/2b	120	80
		Storico	155	110	2a/2b	110	155

* Rif. Tabella 2-3
** Quando $\max(L_h, L_c) \ll$ sonda L , la pompa di calore non è necessaria.

4. L'INTEGRAZIONE DELLE POMPE DI CALORE GEOTERMICHE CON ALTRE RES

In un nZEB, gli obiettivi di consumo energetico possono essere raggiunti e l'economia energetica può essere migliorata integrando gli impianti GSHP con l'elettricità proveniente da fonti di energia rinnovabile e/o con altri sistemi di fornitura di energia termica rinnovabile. Questi sistemi sono denominati "Hybrid GSHPs" (HGSHP). Possono anche portare a un bilanciamento dei carichi annuali di riscaldamento e raffreddamento degli edifici, necessario per evitare il degrado della temperatura del terreno. La disponibilità di energia elettrica rinnovabile in loco tramite pannelli fotovoltaici o microturbine eoliche può ridurre efficacemente le emissioni di CO₂ derivanti dall'utilizzo di energia elettrica per il compressore della pompa di calore, le pompe di circolazione dell'acqua del sistema idronico e i ventilatori delle unità terminali interne. L'integrazione con componenti di accumulo di energia, sia termica (ad esempio, serbatoi riempiti con materiali a cambiamento di fase, PCM) che elettrica (ad esempio, batterie) può migliorare ulteriormente l'economia e l'efficienza energetica complessiva.

Per garantire un funzionamento regolare del sistema e un migliore utilizzo dell'energia, è necessario adottare algoritmi di controllo avanzati. L'integrazione con altre fonti di energia rinnovabile, infatti, impone l'introduzione di strategie di controllo ottimizzate. Le strategie di controllo tradizionali, infatti, sono basate su regole semplici, facili da implementare e da trasferire tra sistemi simili. I loro svantaggi sono la limitatezza dei parametri considerati, la mancanza di flessibilità e la tendenza conservativa sul fronte del comfort. Le tecniche di ottimizzazione matematica (basate o meno su modelli, o data-driven), offrono prestazioni migliori, anche se sono più complesse da implementare poiché richiedono modelli fisici o grandi insiemi di dati. Tra questi, gli algoritmi di intelligenza artificiale (AI) consentono di apprendere il funzionamento ottimale considerando un vasto numero di parametri per problemi non lineari, riuscendo a gestire la complessità del sistema GSHP, soprattutto se combinato con altre fonti di energia rinnovabile e a implementare controlli intelligenti autonomi e adattabili. La scelta della tipologia di approccio, in ogni caso, dovrà essere un compromesso tra le prestazioni del sistema e la complessità dell'implementazione.

4.1. Pompe di calore ad acqua assistite da energia elettrica rinnovabile

L'accoppiamento di turbine eoliche o pannelli fotovoltaici (PV) con la pompa di calore GSHP avviene in termini di fornitura di elettricità quando è disponibile elettricità rinnovabile. La pompa di calore utilizza l'elettricità rinnovabile per la produzione di acqua calda sanitaria (ACS), il riscaldamento o il raffreddamento dell'edificio, nonché per l'accumulo di energia termica in acqua e/o materiali PCM da utilizzare successivamente per coprire i picchi di carico di riscaldamento o raffreddamento dell'edificio. Quando non è necessario il carico della GSHP, l'energia rinnovabile viene immagazzinata nelle batterie per essere utilizzata successivamente o fornita alla rete elettrica.

La configurazione di base di un impianto GSHP accoppiato a energia eolica o fotovoltaica è mostrata in Figura 4-1. La turbina eolica o i pannelli fotovoltaici generano elettricità rinnovabile che viene immagazzinata prioritariamente nelle batterie, mentre l'elettricità in eccesso viene deviata alla rete elettrica. La pompa di calore fornisce calore al serbatoio dell'acqua calda sanitaria o al serbatoio di accumulo a diversi livelli di temperatura, con priorità all'acqua calda sanitaria. Il serbatoio di accumulo è collegato al serbatoio PCM caldo o freddo, a seconda della modalità di riscaldamento o raffreddamento. Nei periodi di disponibilità di elettricità eolica/PV (generata o immagazzinata nelle batterie), la pompa di calore geotermica carica il serbatoio PCM facendo corrispondere il punto di regolazione del serbatoio di accumulo al livello di PCM. Quando non è disponibile energia elettrica rinnovabile (generata o immagazzinata nelle batterie), la pompa di calore copre il carico di base dell'edificio e il PCM i carichi di picco.

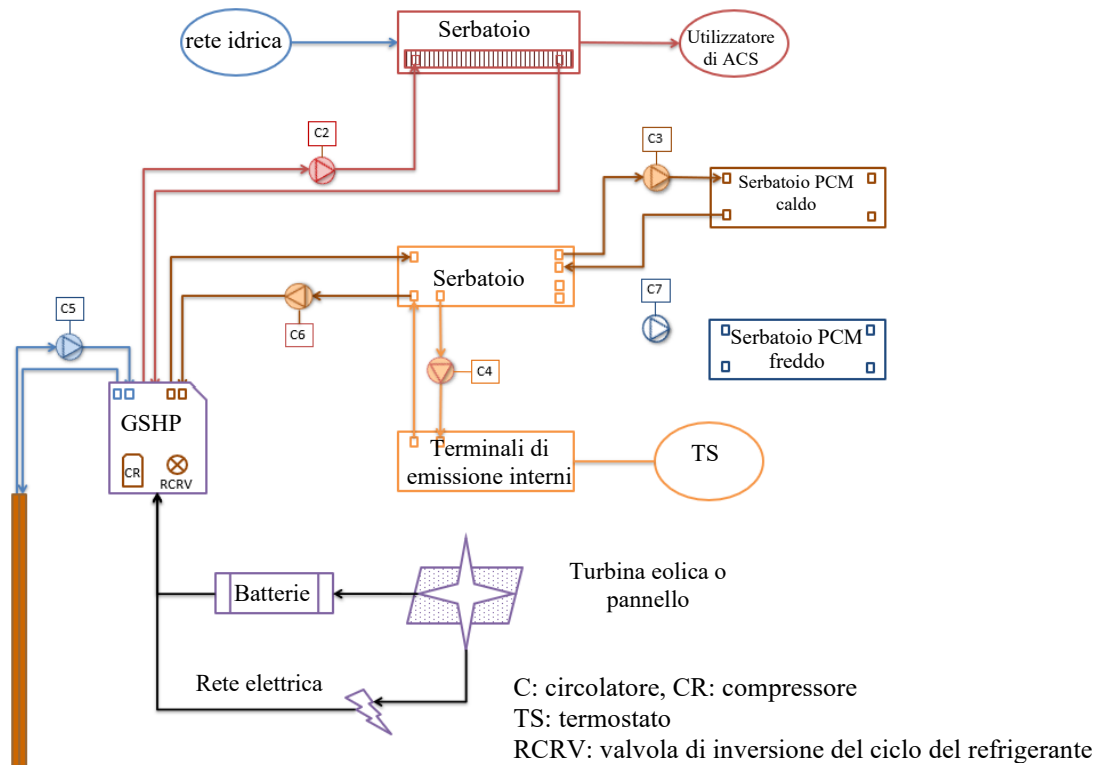


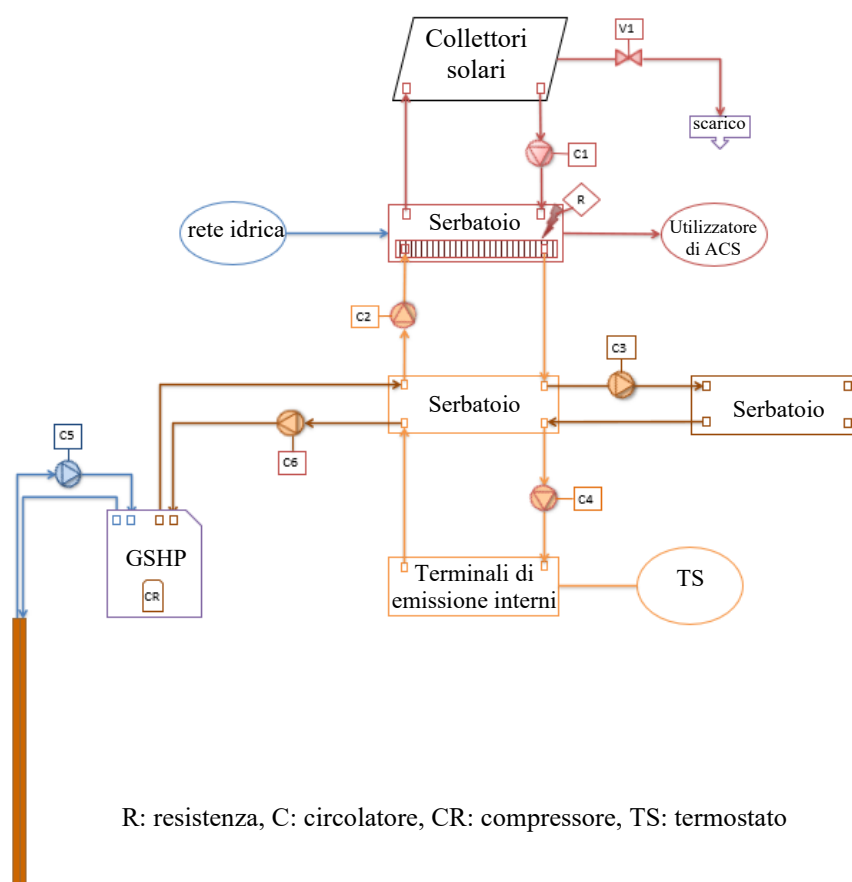
Figura 4-1. Schema di impianto con pompa di calore ad acqua assistita da vento/PV

I principi fondamentali della strategia di controllo sono:

- La valvola di inversione del ciclo del refrigerante è in posizione RISCALDAMENTO o RAFFRESCAMENTO a seconda della modalità di funzionamento, tranne quando il circolatore dell'acqua calda sanitaria è attivo, per cui il serbatoio è sempre commutato automaticamente in posizione RISCALDAMENTO.
- La pompa di calore carica il serbatoio dell'acqua calda sanitaria in modo prioritario
- Il calore viene scambiato tra il serbatoio di accumulo e il PCM in base al carico dell'utente.
- Il sistema GSHP carica il PCM quando è disponibile l'elettricità eolica, in modo che la sua temperatura sia mantenuta al livello desiderato più/meno la larghezza di banda di metà temperatura.
- L'impianto GSHP e il PCM caricano il serbatoio di accumulo, in modo che a) la sua temperatura dell'acqua sia mantenuta al livello desiderato più/meno metà banda di temperatura e b) il sistema GSHP copra il carico di base mentre il PCM coprirà il carico di picco.
- Il sistema interno utilizza l'acqua calda/fredda del serbatoio di accumulo in base alla temperatura interna, in modo da mantenere la temperatura dell'aria interna al livello desiderato più/meno la metà della larghezza di banda.

4.2. Pompe di calore geotermiche assistite dal solare termico

La configurazione di base dell'accoppiamento di collettori solari termici con un sistema GSHP è presentata in Figura 4-2. In questa configurazione, l'impianto GSHP fornisce energia termica a un serbatoio di accumulo, collegato idraulicamente a un serbatoio di PCM e al sistema di riscaldamento/raffrescamento dell'edificio, e collegato termicamente al serbatoio dell'acqua calda sanitaria tramite uno scambiatore di calore. I collettori solari termici forniscono energia termica al serbatoio dell'acqua calda sanitaria. La configurazione prevede che l'energia termica venga scambiata continuamente tra il serbatoio di accumulo, la pompa di calore, il PCM, l'acqua calda sanitaria e l'edificio in base alla disponibilità di energia solare, alle tariffe elettriche e alle esigenze degli utenti in termini di caldo/freddo e acqua calda.



R: resistenza, C: circolatore, CR: compressore, TS: termostato

Figura 4-2. Schema di impianto con pompa di calore geotermica assistita da solare termico

L'accoppiamento tra GSHP e collettori solari termici avviene durante l'inverno in modalità riscaldamento solo attraverso il trasferimento di calore tra l'accumulo principale e il serbatoio dell'acqua calda sanitaria. Durante l'estate, non è previsto alcun accoppiamento tra i due sistemi, in quanto i collettori solari termici dovrebbero essere in grado di coprire tutte le esigenze di acqua calda sanitaria dell'utente.

I principi fondamentali della strategia di controllo sono:

- I collettori solari caricano il serbatoio dell'acqua calda sanitaria nelle ore di maggiore irraggiamento solare; durante l'inverno, la resistenza elettrica del serbatoio dell'acqua calda sanitaria viene accesa per alcuni minuti alla settimana in base alle norme locali sulla protezione dalla legionella (programmazione oraria).
- In modalità riscaldamento, il calore viene scambiato tra il serbatoio dell'acqua calda sanitaria, il serbatoio di accumulo e il PCM in base ai carichi dell'utente.
- In modalità riscaldamento, il sistema GSHP carica il PCM nelle ore a bassa tariffa elettrica, in modo da mantenere la temperatura al set point desiderato più/meno metà banda.
- In modalità di raffrescamento, i collettori solari termici e l'impianto GSHP sono disaccoppiati in modo che l'acqua calda sanitaria sia fornita solo dall'energia solare termica, che dovrebbe essere in grado di coprire il 100% del fabbisogno di acqua calda sanitaria.
- In entrambe le modalità il sistema GSHP carica l'accumulo per mantenere la sua temperatura al set point dell'acqua desiderato più/meno la metà della banda passante.
- Il sistema interno utilizza l'energia termica del serbatoio in base alla temperatura dell'aria interna, in modo da mantenere la temperatura interna al set point desiderato più/meno la metà della temperatura della banda passante.

L'installazione del sistema GSHP studiato all'interno del progetto GEO4CIVHIC accoppiato a un sistema solare termico consente un notevole risparmio di energia primaria a seconda del tipo di edificio e delle condizioni climatiche. Anche i risparmi economici annuali sono importanti, con tempi di ritorno dell'investimento che dipendono dal tipo di edificio, dall'isolamento dell'involucro e dal clima.

4.3. Pompe di calore ad aria assistite da pompe di calore ad acqua

Esistono due opzioni principali per l'integrazione dell'aria come fonte di energia supplementare, a seconda che l'aria sia utilizzata come una delle possibili fonti energetiche principali (pompa di calore aria-acqua) o che supporti l'energia geotermica come pozzo o fonte (torre di raffreddamento/ dry cooler). Nel primo caso, il sistema integra sia una pompa di calore aria-acqua (ASHP) sia una pompa di calore con sonde a terreno (GSHP). Il sistema può fornire riscaldamento o raffreddamento con ASHP o GSHP indipendentemente dal fatto che la sorgente aria sia utilizzata per il riscaldamento o il raffreddamento. Questo approccio di HGSHP consiste nell'includere l'aria come fonte supplementare per l'iniezione o l'estrazione di calore e utilizzare lo scambiatore di calore a terreno (GHE) solo per iniettare o estrarre parte della domanda di energia termica dell'edificio. Esistono diverse possibilità per includere l'aria come fonte supplementare, una delle quali è l'aggiunta di torri di raffreddamento (solo per il raffreddamento) o di raffreddatori a secco (Figura 4-3) come nuovo elemento indipendente dal GHE con diverse configurazioni a seconda delle esigenze e dell'ottimizzazione del sistema HVAC. Un'altra possibilità è una pompa di calore a doppia sorgente (DSHP) (Figura 4-4) progettata con tutti gli elementi all'interno della stessa HP, i ventilatori e gli scambiatori di calore per la sorgente aria e lo scambiatore di calore per le sonde a terreno nello stesso corpo della pompa di calore.

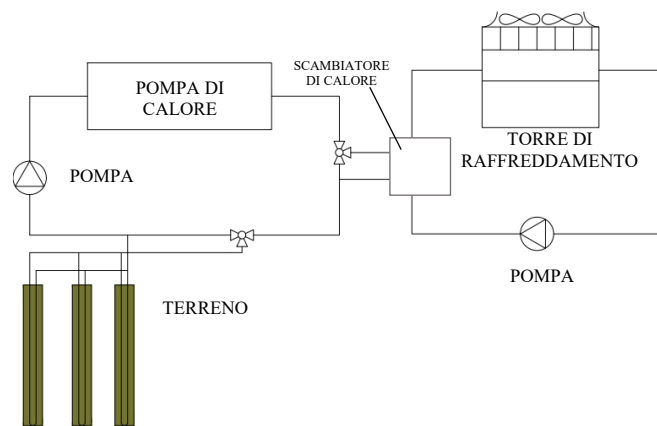


Figura 4-3. Schema di collegamento di una torre di raffreddamento o di un dry cooler con una pompa di calore ad acqua

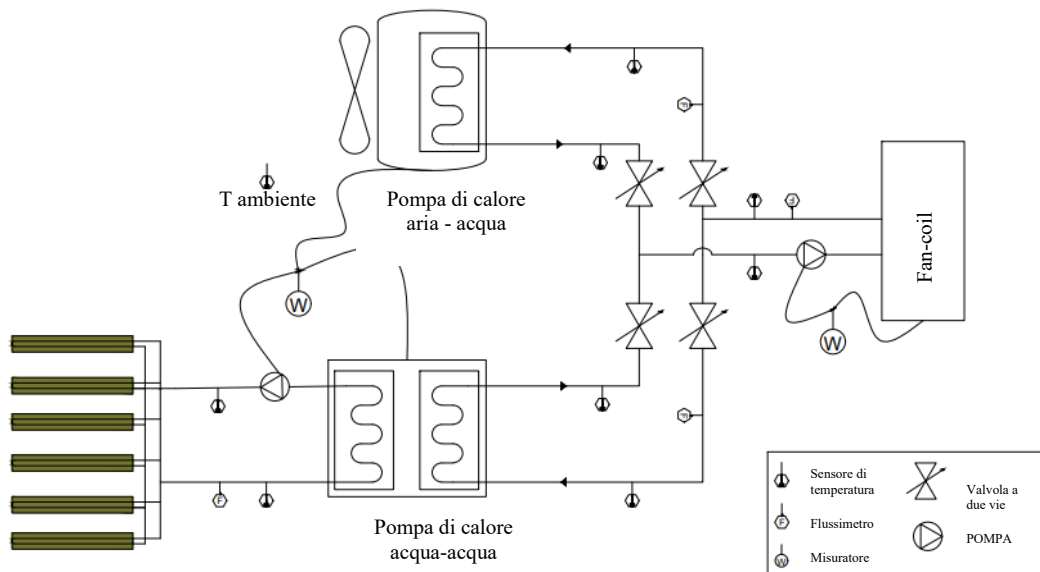


Figura 4-4. Schema di collegamento Pompa di calore ad aria (Air-Water HP) accoppiata a GSHP

La combinazione di sorgente ad aria e sorgente ad acqua aumenta leggermente le prestazioni energetiche e quindi comporta un risparmio economico. Tuttavia, il grande vantaggio economico di questa opzione risiede nel fatto che, utilizzando l'aria come sorgente, l'installazione del campo di scambiatori di calore a terreno può essere ridotta fino al 40%, riducendo drasticamente i costi di perforazione e quindi l'investimento dell'impianto. Per supportare questo scenario è necessario studiare ulteriori strategie di controllo avanzate.

4.4. Pompe di calore geotermiche assistite dal fotovoltaico

L'uso di pannelli termici fotovoltaici (PVT) consente di risparmiare spazio sul tetto, rispetto alla soluzione di collettori solari termici e pannelli fotovoltaici separati, oltre a migliorare l'efficienza complessiva della conversione solare; i collettori PVT sono più efficienti sia per l'energia termica che per la fornitura di elettricità rispetto ai due sistemi convenzionali insieme. Con questa tecnologia, infatti, il campo solare contribuisce a fornire una fonte termica a temperatura più elevata e, allo stesso tempo, a coprire il fabbisogno elettrico della pompa di calore.

Quando si accoppiano il terreno e i campi fotovoltaici come fonti termiche per la pompa di calore, dando la priorità alla produzione di acqua calda sanitaria durante le stagioni di riscaldamento e raffrescamento, il contributo termico diretto degli impianti solari è, come previsto, più elevato per le località con valori maggiori di radiazione solare incidente. In dettaglio, questa quota aumenta dal 27% per il caso studio di Helsinki, al 34% di Strasburgo e Bilbao, fino al 64% di Atene.

4.5. Casi di studio: indici di autosufficienza e autoconsumo per gli archetipi GEO4CIVHIC

Per dimostrare il potenziale dell'integrazione delle fonti di energia rinnovabile nel retrofit di edifici esistenti nei centri urbani, l'integrazione dei sistemi fotovoltaici (PV) sul tetto è stata studiata nell'ambito del progetto GEO4CIVHIC, portando a un'analisi completa che accoppia la ristrutturazione dell'involucro, il sistema GSHP e la produzione di PV. L'utilizzo di sistemi fotovoltaici presenta molti vantaggi, in quanto l'energia solare è pulita e gratuita, la fase di installazione non è complicata e può essere progettata in base alle esigenze dell'utente. Lo svantaggio principale è il funzionamento intermittente, che può essere parzialmente risolto con un sistema di accumulo, se possibile, aumentando tuttavia anche il costo dell'installazione. Per un'analisi completa, le prestazioni energetiche dell'impianto fotovoltaico devono essere valutate correttamente, considerando molti fattori come la posizione, l'inclinazione, l'orientamento e la presenza di elementi di ombreggiamento; per questo motivo, le simulazioni sono state effettuate utilizzando il software di simulazione dinamica TRNSYS.

Il carico elettrico dell'edificio è stato calcolato in base ai valori energetici forniti da Eurostat (Eurostat) e ripartito su base oraria secondo un profilo suggerito da Wilson e Engebrecht (2014).

La Tabella 4-1 mostra il consumo medio orario degli elettrodomestici e dell'illuminazione per stagione e giorno della settimana.

Tabella 4-1. Energia elettrica media oraria utilizzata [Wh]

[Wh]	Estate		Inverno		Primavera/Autunno	
	Lun-Ven	Sab-dom	Lun-Ven	Sab-dom	Lun-Ven	Sab-dom
Lavatrice	28	30	28	30	28	30
Frigorifero + congelatore	130	130	130	130	130	130
PC	14	14	14	14	14	14
TV	14	14	14	14	14	14
Video	8	8	8	8	8	8
Illuminazione	40	40	53	53	51	51

Il fornello elettrico viene comunemente utilizzato tre volte al giorno, come spiegato nella Tabella 4-2 variando l'intensità a seconda dell'ora e del giorno della settimana.

Tabella 4-2. Consumo giornaliero di fornelli elettrici [Wh]

		Giorno feriale [Wh]	Fine settimana [Wh]
Colazione	7:00h	100	200
Pranzo	12:00h	300	600
Cena	19:00h	1000	1500

Partendo dalla domanda di energia calcolata nella Sezione 2.7, considerando i corrispondenti COP ed EER per ogni caso, sono stati calcolati i profili elettrici relativi alla generazione della pompa di calore. Sommando il fabbisogno orario di energia elettrica della pompa di calore al profilo di carico elettrico comune di un'utenza residenziale (Tabella 4-1 e Tabella 4-2), l'energia elettrica totale richiesta dalle unità abitative è mostrata nella Tabella 4-3 per ogni clima e tipo di edificio.

Tabella 4-3. Consumo elettrico totale comprensivo di pompa di calore, illuminazione ed elettrodomestici [kWh].

Esistente	Caso 0	Caso 1 - Fan Coil	Caso 1 - Radiante	Caso 2	Caso 3 - Fan Coil	Caso 3 - Radiante
Atene	7305	7022	6923	5809	5799	5796
Strasburgo	9206	8224	7511	6266	5975	5764
Helsinki	12920	12210	11017	8866	8475	8064
Storico	Caso 0	Caso 1 - Fan Coil	Caso 1 - Radiante	Caso 2	Caso 3 - Fan Coil	Caso 3 - Radiante
Atene	8696	7987	7736	5995	5971	5962
Strasburgo	11085	9680	8660	6647	6290	6030
Helsinki	15422	13957	12415	9481	9012	8519

Il profilo elettrico totale dell'edificio è stato confrontato su base oraria con l'energia prodotta dall'impianto fotovoltaico, valutando due indicatori (Luthander e Widén, 2015): l'autosufficienza (SS) e l'autoconsumo (SC), ognuno dei quali dipende dall'energia autoprodotta e utilizzata direttamente dall'utente (1), ovvero la differenza tra l'energia consumata e quella fornita dalla rete.

$$Energia\ autoprodotta\ consumata = Energia\ consumata - Energia\ fornita\ dalla\ rete\ [kWh]\ [1]$$

L'autosufficienza è definita dall'equazione (2) come il rapporto tra l'energia autoconsumata e l'energia totale consumata, quindi è la percentuale di energia consumata prodotta dall'impianto fotovoltaico installato sull'edificio.

$$SS = \frac{Energia\ prodotta\ autoconsumata}{Energia\ totale\ consumata} \quad [\%] \quad [2]$$

L'equazione (3) definisce l'autoconsumo come l'energia autoconsumata divisa per l'energia totale prodotta dall'impianto fotovoltaico, ovvero la percentuale di energia solare prodotta e consumata nell'edificio rispetto alla quantità totale di energia solare prodotta.

$$SC = \frac{Energia\ prodotta\ autoconsumata}{Energia\ totale\ prodotta} \quad [\%] \quad [3]$$

La valutazione di questi indicatori dipende strettamente dall'analisi oraria del carico, che definisce la quantità di energia utilizzata o fornita alla rete in base all'energia prodotta dal sistema e a quella utilizzata dall'utente. Pertanto, sono state implementate simulazioni dinamiche utilizzando il software TRNSYS per calcolare l'energia oraria prodotta dai pannelli fotovoltaici per diversi orientamenti, al fine di confrontare l'efficienza del sistema considerando i molteplici orientamenti possibili dell'edificio in un contesto urbano. I risultati presentati nella Tabella 4-4 mostrano che l'energia maggiore viene prodotta quando l'edificio è orientato a sud o a sud-ovest, mentre l'orientamento a nord la riduce dal 30 al 50% a seconda della posizione.

Tabella 4-4. Energia annuale prodotta dall'impianto fotovoltaico

Posizione	Energia prodotta dall'impianto FV [kWh/anno]				
	0°	45°	90°	180°	270°
	Sud	Sud-Ovest	Ovest	Nord	Est
Atene	19533	19255	17229	12828	15563
Strasburgo	15930	15767	14250	10997	12880
Helsinki	14118	13577	11385	7292	10311

La superficie del tetto e i parametri di dimensionamento (Tabella 4-5) sono stati calcolati in base alla geometria dell'edificio, considerando la diversa inclinazione del tetto a seconda del clima e riducendola del 5% per consentire uno spazio adeguato alla manutenzione tecnica dei pannelli. Ad Atene, il tetto è stato considerato orizzontale, quindi lo spazio disponibile è ulteriormente ridotto a causa dello spazio necessario per evitare l'ombreggiamento reciproco tra i pannelli inclinati. Questo è il motivo della minore potenza installata (6 kW) rispetto alle altre località (12 kW). Sono stati scelti moduli fotovoltaici policristallini; per i moduli e l'inverter si è fatto riferimento alle schede tecniche disponibili sul mercato.

Tabella 4-5. Parametri di dimensionamento dell'impianto FV

	Atene	Strasburgo	Helsinki
Superficie lorda del tetto [m²]	59	117	121
Inclinazione del tetto	0°	30°	40°
Numero di pannelli	18	35	37
Numero di stringhe	3	9	9
Potenza di picco installata [kWp]	6.0	11.9	12.3

I risultati ottenuti sono stati suddivisi in energia autoprodotta ed energia di rete, in base all'indicatore orario di energia auto-utilizzata (Eq. 1). Quando l'energia generata è maggiore di quella richiesta in quel momento, si è ipotizzato che l'energia in eccesso venga fornita alla rete. Al contrario, quando l'energia richiesta è superiore a quella generata, l'energia mancante viene acquistata dalla rete.

Ogni strategia di retrofit illustrata nella Sezione 3.6 è stata analizzata per cinque diversi orientamenti dei pannelli, per cui sono stati simulati in totale 180 casi per edifici esistenti e storici.

La Tabella 4-6 riassume i risultati ottenuti per una casa a schiera esistente per ogni clima, orientamento e configurazione di retrofit. Per Atene, ogni orientamento dei pannelli può fornire più del 50% dell'energia necessaria all'utente, anche se l'energia utilizzata è solo il 20-30% dell'energia totale prodotta.

L'indicatore di autoconsumo è simile in media a Strasburgo, intorno al 20-30%, ma l'autosufficienza è intorno al 40-50%, perché l'irraggiamento totale è inferiore a quello di Atene, quindi l'energia prodotta è minore. Gli stessi risultati sono stati ottenuti per Helsinki, con percentuali inferiori.

Gli orientamenti Sud, Sud-Ovest e Ovest presentano risultati simili in termini di autosufficienza, determinando una grande percentuale di energia utilizzata rispetto a quella necessaria. L'orientamento Nord presenta risultati significativi in termini di autoconsumo, perché la radiazione solare è più bassa ma l'energia autoconsumata è simile rispetto agli altri orientamenti, quindi il rapporto corrispondente all'indicatore di autoconsumo è più alto.

Tabella 4-6. Sintesi dei risultati di autosufficienza e autoconsumo per la casa a schiera esistente

EDIFICIO ESISTENTE		Autosufficienza (%)					Autoconsumo (%)				
		Orientamento del fotovoltaico					Orientamento del fotovoltaico				
		0°	45°	90°	180°	270°	0°	45°	90°	180°	270°
Caso 0	Atene	57%	59%	58%	57%	54%	21%	22%	25%	32%	26%
	Strasburgo	40%	40%	39%	37%	38%	23%	23%	25%	31%	27%
	Helsinki	26%	25%	24%	21%	23%	23%	24%	27%	38%	28%
Caso 1 Fan-coil	Atene	58%	60%	60%	58%	55%	21%	22%	24%	32%	25%
	Strasburgo	43%	43%	42%	41%	41%	22%	23%	25%	30%	26%
	Helsinki	30%	30%	28%	25%	27%	26%	27%	30%	43%	32%
Caso 1 Radiante	Atene	58%	60%	60%	59%	55%	21%	22%	24%	32%	25%
	Strasburgo	46%	46%	45%	44%	44%	22%	22%	24%	30%	26%
	Helsinki	32%	32%	31%	28%	29%	25%	26%	30%	42%	31%
Caso 2	Atene	57%	59%	59%	58%	55%	17%	18%	20%	26%	21%
	Strasburgo	48%	48%	48%	47%	47%	19%	19%	21%	27%	23%
	Helsinki	36%	36%	35%	34%	34%	23%	24%	28%	41%	29%
Caso 3 Fan-coil	Atene	57%	60%	60%	58%	55%	17%	18%	20%	26%	21%
	Strasburgo	50%	50%	50%	49%	48%	19%	19%	21%	26%	22%
	Helsinki	37%	38%	37%	35%	35%	22%	24%	29%	41%	29%
Caso 3 Radiante	Atene	58%	60%	60%	58%	55%	17%	18%	20%	26%	21%
	Strasburgo	51%	51%	51%	50%	49%	18%	19%	20%	26%	22%
	Helsinki	39%	39%	38%	36%	37%	22%	23%	27%	40%	29%

Allo stesso modo, Tabella 4-7 riassume i risultati ottenuti per una casa storica a schiera. I risultati ottenuti sono più interessanti in termini di utilizzo dell'energia piuttosto che di autosufficienza, grazie alla riduzione dell'energia necessaria dalla rete dovuta all'utilizzo di una fonte di energia rinnovabile.

Tabella 4-7. Sintesi dei risultati dell'autosufficienza e dell'autoconsumo per la casa storica a schiera

EDIFICIO STORICO		Autosufficienza (%)					Autoconsumo (%)				
		Orientamento del fotovoltaico					Orientamento del fotovoltaico				
		0°	45°	90°	180°	270°	0°	45°	90°	180°	270°
Caso 0	Atene	54%	56%	55%	53%	52%	24%	25%	28%	36%	29%
	Strasburgo	36%	36%	35%	32%	34%	25%	25%	27%	33%	29%
	Helsinki	25%	24%	23%	21%	22%	27%	28%	31%	44%	33%
Caso 1 Fan-coil	Atene	57%	59%	58%	57%	54%	23%	24%	27%	35%	28%
	Strasburgo	40%	39%	39%	36%	37%	24%	24%	26%	32%	28%
	Helsinki	27%	27%	25%	23%	24%	26%	27%	31%	44%	32%
Caso 1 Radiante	Atene	58%	60%	59%	58%	55%	23%	24%	27%	35%	27%
	Strasburgo	43%	43%	42%	40%	41%	23%	23%	25%	32%	27%
	Helsinki	29%	29%	28%	26%	27%	26%	27%	30%	43%	32%
Caso 2	Atene	58%	60%	60%	58%	55%	18%	19%	21%	27%	21%
	Strasburgo	47%	47%	47%	46%	46%	20%	20%	22%	28%	24%
	Helsinki	35%	35%	34%	33%	33%	24%	25%	29%	43%	30%
Caso 3 Fan-coil	Atene	58%	60%	60%	58%	56%	18%	19%	21%	27%	56%
	Strasburgo	49%	49%	49%	48%	48%	19%	20%	22%	28%	23%
	Helsinki	37%	37%	36%	34%	34%	23%	25%	29%	42%	30%
Caso 3 Radiante	Atene	58%	60%	60%	58%	56%	18%	19%	21%	27%	21%
	Strasburgo	50%	51%	50%	50%	49%	19%	19%	21%	27%	23%
	Helsinki	38%	39%	38%	36%	36%	23%	24%	28%	42%	30%

L'uso di un accumulatore elettrico aumenterebbe l'energia autoconsumata, quindi entrambi gli indici calcolati; tuttavia, il dimensionamento della batteria e la definizione del funzionamento dipendono da diversi fattori. In particolare, il progettista deve scegliere se dare priorità alla conservazione della batteria, minimizzando i cicli di carica-scarica, oppure alla massimizzazione dell'energia autoconsumata o alla minimizzazione della fornitura dalla rete di distribuzione. Molte ipotesi possono essere fatte per stimare il comportamento dell'accumulo per estendere l'applicazione dei risultati ottenuti per questi archetipi a scala urbana, definendo anche diversi profili di utilizzo dell'energia da parte dei consumatori per pianificare e supportare lo sviluppo di comunità energetiche. A tal fine, ulteriori ricerche saranno approfondite in lavori futuri.

5. CONCLUSIONI E ULTERIORI APPLICAZIONI

Il Manuale 1 del progetto GEO4CIVHIC mira a dimostrare l'importanza della riduzione del fabbisogno energetico per favorire l'accoppiamento con le fonti di energia rinnovabile, sostenendo così lo sviluppo di edifici a energia zero, quasi zero e plus, come richiesto dalle recenti politiche nazionali e internazionali. Per studiare il potenziale del patrimonio edilizio europeo nelle aree urbane, sono stati sviluppati degli archetipi in termini di geometria, proprietà termiche tipologia di involucro, uso finale, tipologia di impianto HVAC installato e successivamente utilizzati come casi di studio per studiare i risultati dell'integrazione delle fonti energetiche rinnovabili. Le caratteristiche dettagliate sono state presentate in (Carnieletto, 2022). Sulla base delle diverse strategie e opzioni possibili, sono stati esaminati retrofit sia parziali sia integrali. La diminuzione del fabbisogno energetico si riferisce soprattutto al bilancio energetico annuale, poiché alti livelli di isolamento riducono le perdite di calore e massimizzano il contributo dei guadagni interni. Al contrario, gli edifici altamente isolati hanno una maggiore richiesta di energia per il raffrescamento, a causa della diminuzione del trasferimento di calore dell'involucro.

Il documento presentato analizza la sinergia della pompa di calore GSHP con altre fonti di energia rinnovabile per definire soluzioni ottimali per i diversi tipi di edifici e climi. Sono state presentate diverse applicazioni di integrazione

ottimale tra GSHP e altre fonti di energia rinnovabile, anche se limitate a una tipica casa a schiera situata in località con climi diversi.

Sono state effettuate simulazioni dinamiche per determinare il fabbisogno energetico di riscaldamento e raffrescamento successivamente utilizzato per dimensionare gli scambiatori di calore a terreno considerando la varietà dei contesti geologici utilizzando tre condizioni termiche tipiche del sottosuolo, pari a 1.5 W/(m K), 2.2 W/(m K) e 3 W/(m K), ampliando così la possibile applicazione dei risultati ottenuti. Il corretto dimensionamento dei sistemi può eventualmente ridurre la lunghezza dello scambiatore di calore da installare, quindi i costi di installazione e il relativo tempo di ammortamento, evitando il degrado delle prestazioni nel tempo. L'integrazione con più sorgenti comporta una maggiore complessità del sistema e l'ulteriore necessità di una strategia di controllo ottimizzata. È stata definita una metodologia per calcolare la lunghezza ottimale delle sonde in base al carico termico dell'edificio e alla disponibilità di spazio, evitando il sovradimensionamento del sistema e migliorando l'efficienza energetica con l'integrazione di una pompa di calore a doppia sorgente o di una pompa di calore ad aria. Questa soluzione aumenterà le prestazioni nelle stagioni intermedie, con un conseguente risparmio per gli utenti finali. Risultati estremi sono stati ottenuti per i climi caldi, dove la richiesta di energia per il riscaldamento diventa trascurabile e sono necessari sistemi di free cooling piuttosto che sistemi di raffrescamento tradizionali anche in inverno. In questo caso la temperatura di penalizzazione era accettabile anche se la domanda di energia era sbilanciata, dimostrando le potenzialità di un sistema GSHP se correttamente dimensionato.

L'installazione di una pompa di calore accoppiata a un sistema solare termico comporta un significativo risparmio di energia primaria a seconda del tipo di edificio e delle condizioni climatiche. Considerando l'energia elettrica prodotta dal campo solare e consumata dalla pompa di calore, il rapporto di autoconsumo è più alto per gli edifici non ristrutturati. La quota più bassa per gli edifici retrofittati è dovuta alla minore probabilità di utilizzare tutta l'energia prodotta nello stesso intervallo di tempo, poiché la domanda di energia è più bassa grazie alle soluzioni di retrofit applicate. I valori più alti corrispondono ai climi più caldi, poiché dipendono dalla possibilità di far coincidere la domanda di energia e l'energia prodotta nello stesso intervallo di tempo.

È stata analizzata l'installazione di un impianto fotovoltaico, studiando l'influenza dell'orientamento sugli indicatori di autosufficienza e autoconsumo, che possono fornire una proiezione realistica per le comunità energetiche. Il rapporto di copertura è generalmente più alto per gli edifici riqualificati, rispetto a quelli non riqualificati. Confrontando le tre condizioni climatiche, il valore di copertura ottenuto dall'impianto fotovoltaico è elevato per i climi caldi e miti (Atene e Strasburgo), tra il 46 e il 67%, mentre Helsinki mostra una quota inferiore a causa della maggiore richiesta di energia e della minore disponibilità di energia dalla radiazione solare. L'installazione di un accumulatore elettrico potrebbe ridurre ulteriormente il consumo di energia primaria; tuttavia, è necessario risolvere alcuni problemi relativi al corretto dimensionamento della batteria per evitare un sovradimensionamento della stessa o una rapida interruzione delle prestazioni di carica.

Come recentemente studiato in letteratura, l'uso estensivo di edifici "archetipi" applicato alla modellazione urbana consente applicazioni più estese della modellazione energetica, riducendo il tempo di simulazione grazie alla complessità del data mining, portando così a una più ampia fruibilità da parte degli esperti senza perdere la qualità dei risultati. I risultati ottenuti possono quindi aiutare l'analisi di un ampio stock di edifici e impianti, compresa la loro ristrutturazione, definendo un elenco prioritario di azioni volte a limitare l'uso di energia. Queste informazioni mirano a influenzare lo sviluppo di politiche energetiche per le comunità energetiche, ottimizzando la ripartizione dell'energia termica ed elettrica tra le diverse utenze, sfruttando una diversa contemporaneità dei carichi, migliorando così l'efficienza dei sistemi. Lavorando, quindi, per la costruzione di edifici a energia zero, quasi zero e plus.

Come dimostrano le diverse soluzioni presentate e studiate, si possono adottare molte strategie in base al clima, all'uso finale e alla domanda energetica dell'edificio, che è legata all'anno di costruzione o alle azioni di retrofit applicate. Anche se la località e l'orientamento influenzano in modo significativo la disponibilità di radiazione solare, i risultati mostrano impatti interessanti sui risparmi energetici e sui relativi costi energetici, confermando così il potenziale dell'installazione di GSHP nei centri urbani.

RIFERIMENTI

1. The European Parliament and the Council of the European Union, “Directive 2010/31/EU of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast),” pp. 13–35, 2010, doi: doi:10.3000/17252555.L_2010.153.eng.
2. The European Parliament and the Council of the European Union, “Directive 2012/27/EU on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC.”
3. The European Parliament and the Council, “Directive 2018/844 of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency,” 2018.
4. L. Carnieletto, M. Ferrando, L. Teso, K. Sun, W. Zhang, F. Causone, P. Romagnoni, A. Zarrella., T. Hong, “Italian prototype building models for urban scale building performance simulation,” *Build. Environ.*, vol. 192, 2021.
5. M. Ferrando, F. Causone, T. Hong, and Y. Chen, “Urban building energy modeling (UBEM) tools: A state-of-the-art review of bottom-up physics-based approaches,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 62, 2020.
6. I. Ballarini, S. P. Corgnati, and V. Corrado, “Use of reference buildings to assess the energy saving potentials of the residential building stock: The experience of TABULA project,” *Energy Policy*, vol. 68, pp. 273–284, 2014, doi: 10.1016/j.enpol.2014.01.027.
7. G. Emmi, A. Zarrella, M. De Carli, S. Moretto, A. Galgaro, M. Cultrera, M. Di Tuccio, A. Bernardi, “Ground source heat pump systems in historical buildings: Two Italian case studies,” *Energy Procedia*, vol. 133, pp. 183–194, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.383.
8. A. Zarrella, R. Zecchin, F. De Rossi, G. Emmi, M. De Carli, and L. Carnieletto, “Analysis of a double source heat pump system in a historical building,” 2019.
9. The German Bundestag, The German buildings energy act (GEBÄUDEENERGIEGESETZ, GEG), Berlin, Germany, 13 August 2020
10. President of the Italian Republic, Legislative Decree 192, Implementation of directive 2002/91/EC on energy efficiency in buildings. Rome, Italy, 19 August 2005
11. Ministry of the Environment, Energy and the Sea, Law n.2009-967 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l’environnement I. Paris, France, 3 August 2009
12. Swiss Federal Council, Ordinance on Energy (EnO), Berne, Switzerland, 1 november 2017.
13. King of Spain, Law 8/2013 de rehabilitación, regeneración y renovación urbanas, Madrid, Spain, 26 June 2013 (BOE-A-2013-6938).
14. Swiss Federal Energy Office, Swiss Sustainable Building Standard (SNBS), Switzerland, 2018.
15. Institut Wohnen und Umwelt, “The joint EPISCOPE and TABULA Website,” 2016. (accessed Feb. 20, 2005).
16. G. V. Fracastoro and M. Serraino, “A methodology for assessing the energy performance of large scale building stocks and possible applications,” *Energy Build.*, vol. 43, 2011.
17. G. Dall’o’, A. Galante, and M. Torri, “A methodology for the energy performance classification of residential building stock on an urban scale,” *Energy Build.*, vol. 48, pp. 211–219, May 2012, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.01.034.
18. E. Prata, P. Romano, L. Carnieletto, F. Pirotti, J. Vivian, and A. Zarrella, “EURECA: An open-source urban building energy modelling tool for the efficient evaluation of cities energy demand,” *Renew. Energy*, vol. 173, 2021.
19. L. Teso *et al.*, “Large scale energy analysis and renovation strategies for social housing in the historic city of Venice,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 52, 2022.
20. L. Carnieletto, O. B. Kazanci, M. De Carli, and B. W. Olesen, “Why couple renewable energy sources with radiant systems: current trends, limitations and potential,” 2018.
21. A. American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, “ASHRAE Handbook—HVAC Applications. Geothermal Energy.,” 2011.
22. A. Capozza, A. Zarrella, and M. De Carli, “Long-term analysis of two GSHP systems using validated numerical models and proposals to optimize the operating parameters,” *Energy Build.*, vol. 93, pp. 50–64, Apr. 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.02.005.
23. S. M. Lee, S. H. Park, Y. S. Jang, E. J. Kim, “Proposition of Design Capacity of Borehole Heat Exchangers for Use in the Schematic-Design Stage,” *Energies*, vol. 14, no. 822, 2021, doi: 10.3390/en14040822.
24. A. Galgaro, G. Dalla Santa, and A. Zarrella, “First Italian TRT database and significance of the geological setting evaluation in borehole heat exchanger sizing,” *Geothermics*, vol. 94, 2021, doi: 10.1016/j.geothermics.2021.102098.
25. UNESCO - United Nations Educational Scientific and Cultural Organization, “Convention concerning the Protection of the World Cultural and Natural Heritage,” 1972. [Online]. Available: <https://whc.unesco.org/en/conventiontext/>.
26. A. Zarrella, R. Zecchin, P. Pasquier, D. Guzzon, M. De Carli, G. Emmi, M. Quaggia, “A comparison of numerical simulation methods analyzing the performance of a ground-coupled heat pump system,” *Sci. Technol. Built Environ.*, vol. 24, 2018, doi: doi: 10.1080/23744731.2018.1438663.
27. E. Wilson, C. M. Engebrecht, S. Horowitz, and R. Hendron, “Building America House Simulation Protocols,”

- 2014.
28. R. Luthander, J. Widén, D. Nilsson, and J. Palm, “Photovoltaic self-consumption in buildings: A review,” *Appl. Energy*, vol. 142, 2015.
 29. L. Carnieletto, A. Di Bella, D. Quaggiotto, G. Emmi, A. Bernardi, M. De Carli, Potential of GSHP coupled with PV systems for retrofitting urban areas in different European climates based on archetypes definition. *Energy and Built Environment* (2022). DOI: 10.1016/j.enbenv.2022.11.005

1. CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE (CNR)

CNR - ISAC

Adriana BERNARDI
Alessandro BORTOLIN
Gianluca CADELANO

CNR - ITC

Sergio BOBBO
Laura FEDELE
Stefano ROSSI
Mauro SCATTOLINI

2. UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA (UNIPD)

Dipartimento di Ingegneria Industriale

Michele DE CARLI
Angelo ZARRELLA
Giuseppe EMMI
Laura CARNIELETTO
Samantha GRACI
Davide QUAGGIOTTO

Dipartimento di Geoscienze Unità DG

Antonio GALGARO
Eloisa DI SIPIO
Giorgia DALLA SANTA
Alberto CARRERA

3 UNIVERSITÀ POLITECNICA DI VALENCIA (UPV)

Javier F. URCHUEGUÍA
Borja BADENES
Hossein JAVADI
Miguel Á. MATEO

4. R.E.D. SRL RICERCA E DISPOSITIVI AMBIENTALI (RED)

Luc POCKELÉ
Giulia MEZZASALMA
Silvia CONTINI
Mattia CHINELLO
Nicola MUTINELLI

5. TERRA GEOSERV LIMITED (GEOSERV)

Riccardo PASQUALI
Aisling CUNNINGHAM

6. GALLETTI BELGIO / HIREF (GALLETTI)

Fabio POLETTI
Andrea TARABOTTI
Enrico PACCHIN

7. FUNDACION TECNALIA RICERCA E INNOVAZIONE (TECNALIA)

Miguel Ángel ANTÓN
Amaia CASTELRUIZ
Sarah NOYÉ
Beatriz SÁNCHEZ
Arantza LÓPEZ

8. TERRA INFRASTRUCTURE (EX THYSSENKRUPP INFRASTRUCTURE)

Arno ROMANOWSKI
Franziska HELBIG

9. UFFICIO REGIONALE DELL'UNESCO PER LA SCIENZA E LA CULTURA IN EUROPA

Jonathan BAKER
Francesca BAMPA
Matteo ROSATI
Iuliia KOZLOVA
Francesco LIPPARINI
Anh Thi Ngoc NGUYEN
Akémi LAMARCHE VADEL

10. FRIEDRICH-ALEXANDERUNIVERSITÄT ERLANGEN NUERNBERG (FAU)

David BERTERMANN
Oliver SUFT
Moritz FAUDE
Johannes MULLER

11. SOCIETATEA ROMANA GEOEXCHANGE / SOCIETÀ ROMENA DI GEOSCAMBIO (SRG - RGS)

Robert GAVRILIUC
Doinița- Iuliana CUCUȚEANU
Tiberiu CATALINA
Marian ALEXANDRU

12. CENTRO PER LE FONTI DI ENERGIA RINNOVABILE E LA FONDAZIONE PER IL RISPARMIO ENERGETICO (CRES)

Dimitrios MENDRINOS
Costantino KARYTSAS
Ioannis CHOROPANITIS
Ioannis CHALDEZOS
Spyridon KARYTSAS

13. HYDRA SRL (HYDRA)

Davide RIGHINI
Elisabetta GARDENGHI

14. UBEG DR ERICH MANDS U MARC SAUER GBR (UBEG)

Burkhard SANNER
Erich MANDS
Marc SAUER

15. GEO-GREEN SPRL (GEO-GREEN)

Jacques VERCRUYSSÉ

16. PIETRE EDIL SRL (PIETRE)

Elena Loredana FODOR
Leonardo ROSSI
Alexandru TĂNASE

17. SOLINTEL M&P SL (SOLINTEL)

Dery TORRES
Hugo GRASSET
Miguel Angel GOMEZ

18. DIN L-ART HELWA (DLH)

Luciano MULE'STAGNO
Daniel MICALLEF
Ingrid GALEA
Davide POLETTI
Daniele SFERRA
Manuel SCARPA

19. SCUOLA UNIVERSITARIA PROFESSIONALE DELLA SVIZZERA ITALIANA (SUPSI)

Marco BELLARDI
Linda SOMA
Sebastian PERA
Rodolfo PEREGO

PARTNER



INSTITUTE OF ATMOSPHERIC SCIENCES AND CLIMATE
NATIONAL RESEARCH COUNCIL (CNR – ISAC)
www.isac.cnr.it



INSTITUTE OF CONSTRUCTION
TECHNOLOGIES NATIONAL
RESEARCH COUNCIL (CNR-ITC)
www.itc.cnr.it



UNIVERSITA' DEGLI
STUDI DI PADOVA (UNIPD)
www.unipd.it



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA (UPV)
www.upv.es



RESEARCH AND
ENVIRONMENTAL
DEVICES SRL (RED)
www.red-srl.com



TERRA INFRASTRUCTURE
(FORMER THYSSENKRUPP
INFRASTRUCTURE)
www.terra-infrastructure.com



TERRA GEOSERV LIMITED
(GEOSERV)
www.geoservsolutions.com



GALLETTI BELGIUM/
HIREF (GALLETTI)
www.galletti.be/hiref.it



MEMBER OF BASQUE RESEARCH
& TECHNOLOGY ALLIANCE
FUNDACION TECNALIA
RESEARCH & INNOVATION
www.tecnalia.com



GEO GREEN SPRL
(GEO-GREEN)
www.geo-green.be



UNESCO REGIONAL BUREAU
FOR SCIENCE AND CULTURE
IN EUROPE
www.unesco.org/venice



Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

FRIEDRICH-ALEXANDER-
UNIVERSITÄT ERLANGEN
NURNBERG (FAU)
www.uni-erlangen.de



SOCIETATEA ROMANA
GEOEXCHANGE /ROMANIAN
GEOEXCHANGE SOCIETY
(SRG - RGS)
www.geoexchange.ro



CENTRE FOR RENEWABLE
ENERGY SOURCES
AND SAVING FUNDATION
(CRES)
www.cres.gr



HYDRA SRL
(HYDRA)
www.hydrahammer.it



UBEG DR ERICH MANDS
U MARC SAUER
GBR (UBEG)
www.ubeg.de

Scuola universitaria professionale
della Svizzera italiana



SCUOLA UNIVERSITARIA
PROFESSIONALE
DELLA SVIZZERA ITALIANA
(SUPSI)
www.supsi.ch



PIETRE EDIL SRL
(PIETRE EDIL)
www.pietre-edil.ro



SOLINTEL M&P SL
(SOLINTEL)
www.solintel.eu



DIN L-ART HELWA (DLH)
www.dinlarthelwa.org