

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

2018 - 2023

1

2

3

4

5

6

7

Dimensionamento delle tecnologie GSHP e ibride

Autori: Consorzio GEO4CIVHIC

Coordinatore del progetto: Adriana BERNARDI

Coordinatore del volume: Javier URCHUEGUIA

www.geo4civhic.eu

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





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

EDITORI:

Adriana Bernardi

Doinița - Iuliana Cucuțeanu

PREMESSA



La geotermia a bassa profondità (sino a 100m) è una fonte di energia rinnovabile stabile e affidabile, sempre e ovunque disponibile. L'energia geotermica a bassa profondità e il suo accoppiamento con altre fonti di energia rinnovabile ha un potenziale molto grande, ma rimane poco sfruttata in alcuni Paesi e richiede un'ulteriore maggiore diffusione. L'obiettivo dei sette volumi creati è un ulteriore sforzo per una maggiore diffusione dell'energia geotermica a bassa profondità in Europa e nel mondo.

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 descrive 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 responsabili 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 raggiunti a partire dai principi di base, dall'identificazione delle barriere, ai diversi approcci, alle metodologie applicate, alle innovazioni raggiunte, nonché altri aspetti quali ad esempio la legislazione che sta alla base dell'applicazione della geotermia di superficie a tutti i tipi di edifici. L'applicazione della geotermia a bassa profondità agli edifici storici in particolare 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 anche in questi particolari edifici.

Questi volumi sono stati creati per supportare la formazione nazionale in Europa e 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 per gli anni futuri 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 affrontare 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 in siti specifici 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 poco profonda, al di là delle forti amicizie che si sono formate durante gli anni di svolgimento dei due progetti.

In qualità di coordinatore di entrambi i progetti, vorrei ringraziare tutti per l'impegno profuso e per aver creduto e credere profondamente nella geotermia a bassa profondità, che sarà di grande aiuto nel campo del risparmio energetico in tutta Europa nell'obiettivo di rendere in futuro i nostri edifici indipendenti dai 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.

Adriana Bernardi

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

Volume

5

Progetto GEO4CIVHIC

Manuale formativo

Dimensionamento delle tecnologie GSHP e ibride

Autori: Consorzio GEO4CIVHIC

Coordinatore del progetto: Adriana BERNARDI

Coordinatore del volume: Javier URCHUEGUIA

CONTENUTI

ABSTRACT	8
NOMENCLATURA.....	9
1. STRUMENTO ANALITICO E RACCOMANDAZIONI PER L'IMPATTO TERMICO DI differenti CAMPI DI sonde geotermiche in un QUARTIERE	10
1.1. Stato dell'arte dei modelli di simulazione e degli standard	10
1.2. Strumento sviluppato e utilizzato nell'ambito del progetto GEO4CIVHIC	11
1.3. Risultati e raccomandazioni del progetto GEO4CIVHIC	11
2. LINEE GUIDA PER UN TEST DI RISPOSTA TERMICA (TRT) PERSONALIZZATO: METODOLOGIA E NUOVI RISULTATI SUL PROTOTIPO COASSIALE IN PLASTICA	12
2.1. Stato attuale dei metodi TRT.....	12
2.2. Approccio innovativo nell'ambito di GEO4CIVHIC	12
2.3. Applicazione del nuovo schema C2RLS TRT alla sonda di prova coassiale GEO4CIVHIC nel sito di prova UPV.....	13
2.3.1. Spiegazione dell'impostazione del test	13
2.3.2. Applicazione del modello C2RLS ai dati sperimentali e conseguente stima dei parametri.....	15
3. STRUMENTI PER LA PROGETTAZIONE E IL MONITORAGGIO DI SISTEMI A POMPA DI CALORE GEOTERMICA.....	16
3.1. Nuovi software e strumenti di progettazione per l'ingegneria dei sistemi geotermici di bassa profondità (DSS)	16
3.1.1. Strumento di pre-progettazione: Sistema di supporto alle decisioni di Cheap-GSHPs.....	16
3.1.2. Strumento di pre-progettazione: Sistema di supporto alle decisioni GEO4CIVHIC	17
3.2. Strumenti di progettazione e monitoraggio per impianti geotermici a bassa profondità in edifici esistenti.....	18
4. DIMENSIONAMENTO DI SISTEMI IBRIDI E INTEGRAZIONE CON ALTRI SISTEMI AD ENERGIE RINNOVABILI (RES).....	20
4.1. Pompe di calore ibride innovative ad alta temperatura per il retrofit di edifici civili e storici per alte e medie temperature.....	22
4.2. Sinergia con altre tecnologie RES e strategie di controllo per sistemi multi-sorgente attraverso l'integrazione dell'energia geotermica con altre RES.....	25
5. VALUTAZIONE AMBIENTALE, ENERGETICA ED ECONOMICA.....	26
5.1. Definizione degli edifici di riferimento mono e multiutenza (geometrie e materiali) come base per le analisi energetiche ed economiche	26
5.1.1. Definizione dei tipi di edificio	26
5.1.2. Definizione degli archetipi	27
5.2. Analisi costi-benefici per le soluzioni ottimizzate utilizzate nei sistemi multi-sorgente.....	28
5.3. Attività di valutazione del mercato e modelli di innovazione aziendale per ogni soluzione e tipologia di edificio	30
5.3.1. Analisi dei costi degli archetipi	31
5.4. Impatto ambientale delle tecnologie GEO4CIVHIC nei siti dei casi studio	32
5.4.1. Introduzione.....	32
5.4.2. Metodologia.....	33
5.4.3. Identificazione dei recettori	34
5.4.4. Impatto residuo e raccomandazioni	35

6. ESERCIZIO / TEST	35
6.1. Caratteristiche termiche degli edifici	35
6.2. Simulazioni energetiche	36
6.3. Risultati	36
7. CONCLUSIONI	37
RIFERIMENTI.....	39



FIGURE

Figura 2-1. I tubi coassiali in plastica (PCHE) preparati per la spedizione	14
Figura 2-2. Posizione delle sonde sul campo.....	14
Figura 2-3. Posizione equivalente dei sensori nella testa della sonda (a titolo di esempio)	15
Figura 2-4. Curva della temperatura misurata rispetto a quella calcolata e aggiustata mediante il modello C2RLS, con i parametri stimati ottenuti dall'adattamento dei dati sperimentali TRT al modello	15
Figura 3-1. Relazione tra le diverse energie utilizzate per il calcolo dello SCOP: l'energia termica fornita all'edificio (Q_s) e proveniente da una fonte rinnovabile (E_{RES}), e l'energia consumata dalla pompa di calore (E_{HP}) e dagli elementi ausiliari come ventilatori e pompe ($E_{1_FAN/PUMP}$ e $E_{2_FAN/PUMP}$).....	18
Figura 3-2. Posizione dei sensori per la misurazione dell'energia in una pompa di calore. Dove $E_{e,1}$ è un misuratore di energia elettrica; F_1 e F_2 sono misuratori di portata; $T_{1,1}$ e $T_{1,2}$ sono le temperature in ingresso e in uscita dal lato dell'edificio; $T_{2,1}$ e $T_{2,2}$ sono le temperature in ingresso e in uscita dal lato dello scambiatore di calore esterno; T_{amb} è la temperatura ambiente esterna e T_{ground} è la temperatura del terreno.	19
Figura 3-3. Esempio di monitoraggio di una pompa di calore geotermica reale. La barra verde rappresenta l'energia estratta dal campo geotermico e le barre gialle il consumo di energia elettrica del compressore della pompa di calore; i punti rossi mostrano il COP giornaliero della pompa di calore geotermica (SCOP1 in Figura 3-1).....	20
Figura 4-1. Riscaldamento degli edifici: soluzione tradizionale.....	21
Figura 4-2. Riscaldamento degli edifici: soluzione a pompa di calore	21
Figura 4-3. Emissioni di CO ₂ per kWh termico nelle pompe di calore	22
Figura 4-4. Schema del ciclo in “semi-cascata”	25
Figure 5-1. Planimetria generale per il condominio multiutente	28
Figura 5-2. Planimetria della casa unifamiliare a schiera.....	28
Figura 5-3. Casi analizzati: condizione esistente di base (A), soluzione standard per il deep retrofit (B), soluzione GSHP o ibrida per il deep retrofit (C).	31
Figura 5-4. L'analisi dei costi dei diversi casi numerici per i vari tempi del NPV	32
Figura 5-5. Matrice di valutazione del rischio utilizzata per l'implementazione della metodologia di massima per la EIA	34
Figura 5-6. Esempio di elenco dei rischi in tempo reale per valutare il livello di rischio e l'implementazione di misure di mitigazione adeguate nell'ambito dello sviluppo del sistema GHSP presso il sito di studio di Greystones (Irlanda). Rischi generali per la salute e la sicurezza (giallo), operazioni di perforazione e installazione di GHE (verde), installazione meccanica ed elettrica (viola), fase operativa del sistema (arancione).....	34
Figura 5-7. Flusso di lavoro della valutazione d'impatto della EIA che mostra la determinazione delle condizioni di base locali, l'esecuzione di misurazioni sul campo per definire gli impatti e la determinazione di eventuali impatti residui	35
Figura 6-1. Domanda di energia per riscaldamento e raffreddamento ad Atene	36
Figura 6-2. Domanda di energia per riscaldamento e raffreddamento ad Strasburgo.....	37
Figura 6-3. Domanda di energia per riscaldamento e raffreddamento ad Helsinki	37

TABELLE

Tabella 2-1. Risultati della stima dei parametri con il modello C2RLS	16
Tabella 4-1. Confronto tra pompe di calore plug & play - inverter e tecnologia on-off: NWW006HL - Padova	23
Tabella 4-2. Pompa di calore a doppia temperatura di utenza con CO ₂ come refrigerante e circuito di rigenerazione: CDH012HS - Belgio.....	23
Tabella 4-3. Pompa di calore con refrigerante a basso GWP e doppia sorgente: ETH010HL - Malta.....	24
Tabella 4-4. Pompa di calore a CO ₂ refrigerante a doppia sorgente: CDM035HS - Ferrara.....	24
Tabella 4-5. Pompa di calore ad alta temperatura con piccolo ΔT - ciclo a "semicascata": CDH015KL - Irlanda.....	24
Table 5-1. Caratteristiche principali della geometria dell'edificio	28
Table 5-2. Tempo di ritorno dell'investimento in anni per le quattro simulazioni, considerando le soluzioni PV e PV + batteria, rispetto all'opzione tradizionale, senza installazione di PV	29
Tabella 5-3. Fattori di conversione dell'energia primaria in energia elettrica (PEF) e prezzi dell'energia elettrica nei casi considerati	29
Tabella 5-4. Schema della metodologia di EIA per un sito di studio che mostra gli argomenti chiave considerati come parte della valutazione e il livello di valutazione richiesto per implementare una EIA per progetti GSHP	33
Tabella 6-1. Valori U medi basati sull'analisi statistica del database TABULA	35



ABSTRACT

Le pompe di calore sono una tecnologia matura che può essere abbinata alle energie rinnovabili per fornire riscaldamento e raffreddamento a basse emissioni di carbonio. Pertanto, sono state identificate come una tecnologia chiave per decarbonizzare la climatizzazione degli edifici verso il raggiungimento degli obiettivi NetZero. In questo volume si è cercato di illustrare brevemente alcune delle attività svolte durante il progetto GEO4CIVHIC, riguardanti i metodi analitici per la valutazione dell'interferenza termica tra sistemi geotermici installati in prossimità l'uno dell'altro, le linee guida per un test di risposta termica (TRT), gli strumenti per la pre-progettazione, il dimensionamento e il monitoraggio dei sistemi geotermici a bassa profondità, la sinergia con altre tecnologie ibride e a fonti di energia rinnovabile (FER) e le strategie di controllo, nonché lo studio di vari tipi di casi studio sviluppati nell'ambito del progetto in termini energetici, economici e ambientali. Infine, è presente un esercizio pratico per mettere alla prova i lettori. Infine, il documento si chiude con delle principali conclusioni.

NOMENCLATURA

Abbreviazioni

<i>BHE</i>	sonde geotermiche verticali (SGV in italiano)
<i>EED</i>	earth energy designer (nome di un software di progettazione)
<i>GWHP</i>	pompa di calore ad acqua di falda
<i>ETHICAL</i>	easy thermal interference evaluation (nome di un software di progettazione)
<i>TRT</i>	test di risposta termica
<i>ILS</i>	sorgente lineare infinita
<i>C2RLS</i>	sorgente di linea composta a due regioni
<i>FLS</i>	sorgente lineare finita
<i>MLS</i>	sorgente lineare mobile
<i>PCHE</i>	scambiatore di calore coassiale in plastica
<i>RES</i>	fonte di energia rinnovabile
<i>GSHP</i>	pompa di calore geotermica
<i>MCDA</i>	analisi decisionale a criteri multipli
<i>GSHE</i>	scambiatore di calore geotermico
<i>AWHPs</i>	pompe di calore aria-acqua
<i>KPIs</i>	indicatori chiave di prestazione
<i>SEER</i>	efficienza energetica stagionale
<i>GWP</i>	potenziale di riscaldamento globale
<i>RH</i>	umidità relativa
<i>DHW</i>	acqua calda sanitaria (ACS in italiano)
<i>nZEB</i>	edifici a energia quasi zero
<i>PV</i>	fotovoltaico (FV in italiano)
<i>HVAC</i>	riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria
<i>PCM</i>	materiale a cambiamento di fase
<i>PEF</i>	fattore di energia primaria
<i>NPV</i>	valore attuale netto (VAN in italiano)
<i>CBA</i>	analisi costi-benefici
<i>EIA</i>	valutazione dell'impatto ambientale (VIA in italiano)
<i>SCOP</i>	coefficiente di prestazione stagionale

1. STRUMENTO ANALITICO E RACCOMANDAZIONI PER L'IMPATTO TERMICO DI DIFFERENTI CAMPI DI SONDE GEOTERMICHE IN UN QUARTIERE

1.1. Stato dell'arte dei modelli di simulazione e degli standard

La tecnologia geotermica di bassa profondità più diffusa è il sistema a circuito chiuso con sonde geotermiche verticali (BHE), per i quali esistono numerosi strumenti e modelli per la simulazione del sistema. Il comportamento termico di questi sistemi deve infatti essere studiato a lungo termine (cioè su orizzonti temporali pluriennali) e solo strumenti dedicati possono calcolare le modalità di funzionamento di questi sistemi considerando la moltitudine e la complessità dei parametri nel corso degli anni. Questo aspetto è cruciale nella prospettiva di un funzionamento longevo ed efficiente degli impianti. Se la lunghezza totale delle sonde geotermiche è sottostimata, la pompa di calore rischierebbe di danneggiare il sistema; se invece è sovrastimata, il costo iniziale del sistema aumenterebbe inutilmente.

Anche per questo motivo, è importante considerare e prevedere la possibilità di avere interferenze termiche tra sistemi geotermici vicini che, se non adeguatamente considerati, rischierebbero di penalizzare tutti quanti i sistemi. Infatti, nel caso di sistemi geotermici significativamente vicini, si verifica un'interferenza termica tra di essi. La conseguenza diretta è la variazione eccessiva della temperatura del terreno nelle zone circostanti ai campi di sonde geotermiche. Il trasferimento di calore tra le sonde e il terreno circostante è penalizzato rispetto a una situazione senza interferenze termiche. In assenza di precauzioni, la temperatura del fluido all'interno delle sonde viene sottoraffreddata o surriscaldata. La differenza di temperatura tra il fluido e il terreno deve quindi rimanere il più possibile invariata rispetto alla condizione senza interferenza termica.

I modelli con sorgente lineare infinita e finita rappresentano la sonda geotermica con una linea che inietta o estrae un flusso di calore uniforme e costante. Un altro approccio comunemente adottato è la sorgente di calore cilindrica, che viene solitamente utilizzata per analizzare le prestazioni termiche dei pali energetici. L'ambiente di simulazione TRNSYS per le sonde geotermiche adotta l'approccio proposto da Hellström. Il software EnergyPlus simula sonde geotermiche utilizzando "funzioni-g" sul lungo termine, le quali possono essere inserite direttamente dagli utenti. Altri pacchetti software come EED (earth energy designer), EWS, GLHEPRO e PILESIM si basano sui lavori di Eskilson e Hellström.

La maggior parte degli strumenti di progettazione trascurano l'effetto del movimento di un acquifero nel trasferimento di calore, poiché il suo contributo è generalmente considerato per mezzo di una conducibilità termica equivalente del terreno. Tuttavia, questa assunzione può essere accettabile solo per basse velocità dell'acqua di falda. Alcuni modelli sono in grado di analizzare il comportamento termico delle installazioni di sonde geotermiche considerando singoli sistemi con flusso di acqua di falda. Nella letteratura sono stati quindi proposti contributi di ricerca teorica su questo specifico argomento, che si sono concentrati su approcci analitici e numerici. I metodi analitici più diffusi derivano dal modello della sorgente mobile infinita, che descrive il campo termico di un mezzo uniforme che si muove attraverso una sorgente di calore fissa. I metodi numerici considerano modelli meno semplificati e perseguono la soluzione mediante una varietà di approcci basati sulla soluzione di un sistema di equazioni discretizzate. La letteratura è ricca di esempi in cui questi metodi sono stati usati con successo.

Anche i singoli sistemi con pompe di calore ad acqua di falda (GWHP) possono essere simulati con modelli analitici, ma quando l'attenzione si concentra sull'interferenza tra sistemi vicini e più grandi, i modelli numerici sono normalmente preferibili.

Uno dei criteri principali per la progettazione di sonde geotermiche verticali è il limite fissato per la temperatura operativa minima o massima del fluido che circola nelle sonde geotermiche. Le temperature di esercizio possono essere calcolate sia mediante simulazioni numeriche, altamente flessibili ma comportano un'elevata richiesta computazionale e di competenze, sia mediante modelli (semi)analitici. Questi ultimi forniscono soluzioni compatte, valide solo per particolari condizioni e spesso rappresentano semplificazioni concettuali delle reali condizioni. In fase di progettazione, è normalmente molto difficile calcolare le interferenze di vicinato con i software di progettazione e le norme, in parte perché le informazioni disponibili sui sistemi vicini sono molto limitate, ma anche perché gli strumenti standard non sono progettati per trattare diversi tipi di sistemi (e gli strumenti non standard vengono utilizzati e applicati con difficoltà).

I sistemi termici possono infatti avere diversi profili energetici, diverse profondità di perforazione, o configurazioni spaziali e distanze; queste specifiche particolarità possono generare molte difficoltà nel dimensionamento standardizzato.

Normalmente, le principali norme o manuali nazionali e internazionali che trattano il dimensionamento di sonde geotermiche (ad esempio VDI 4640-2, SN 546 384/6, UNE 100715-1, EN 15450, nonché quelli di ASHRAE e IGSHPA) considerano sistemi isolati senza l'installazione di altri sistemi vicini. La norma SN 546 384/6 del 2021 richiede di considerare gli impianti geotermici attuali e futuri, stabilendo un approccio di densità energetica e imponendo vincoli

di rigenerazione e sovradimensionamento. È però lasciato al progettista il compito di valutare gli eventuali effetti termici dovuti ad altri impianti nelle vicinanze.

Tuttavia, le norme concordano sul fatto che il dimensionamento dell'impianto deve assolutamente evitare il congelamento del terreno circostante, imponendo valori di temperatura che devono rimanere entro certi limiti (tipicamente non meno di -1.5°C per la temperatura media andata-ritorno del fluido nelle sonde geotermiche). Questo limite deve essere considerato durante la fase di dimensionamento per poterlo valutare durante i successivi anni di funzionamento dell'impianto (ad esempio, la norma svizzera SN 546 384/6 richiede che questo limite non venga superato durante i primi 50 anni di funzionamento).

Come descritto nel manuale volume 6, un metodo comune e semplice consiste nel confrontare i casi con e senza interferenza termica. Lo scopo è valutare la diminuzione della temperatura del fluido nelle sonde geotermiche, e quindi per evitare il congelamento del terreno circostante ($-1.5^{\circ}\text{C} + |\Delta T_{\text{penalizzazione}}|$), dove $\Delta T_{\text{penalizzazione}}$ è la differenza di temperatura del fluido del campo di sonde geotermiche dovuta alla presenza di un impianto vicino.

1.2. Strumento sviluppato e utilizzato nell'ambito del progetto GEO4CIVHIC

Pochi programmi sono attualmente in grado di valutare i sistemi per prevenire o limitare gli effetti termici dovuti all'interferenza reciproca tra loop vicini. Questi strumenti sono spesso costosi e non semplici da usare. Nell'ambito del progetto GEO4CIVHIC è stato sviluppato e proposto uno strumento utile e semplice per il dimensionamento preliminare della geotermia. Lo strumento sviluppato in questo contesto si chiama ETHICAL (acronimo di "Easy THERmal InterferenCe evALuation"). Utilizzando una soluzione analitica (modelli di sorgenti lineari mobili e infinite) implementata in Visual Basic in un file Excel, è previsto che sia facile da usare, con una procedura chiara e senza un codice informatico o calcoli di impostazione complessi. Lo strumento è utile per affrontare il problema e può aiutare a valutare e limitare eventuali problemi tecnici a scala urbana tra impianti geotermici vicini. Per la facilità e la velocità di calcolo, questo strumento è consigliato sia per le autorità pubbliche che ai consulenti provati, anche se si raccomanda una formazione di base.

ETHICAL consente di calcolare l'effetto termico tra differenti e vicini sistemi geotermici che differiscono per numero e profondità di sonde geotermiche, parametri tecnici, profilo della domanda energetica e distanze tra i diversi sistemi.

In dettaglio, sono stati sviluppati due strumenti, uno senza la presenza di una falda acquifera in movimento (nessun effetto convettivo), l'altro con la possibilità di impostare alcuni semplici parametri che prevedono la presenza di acqua sotterranea in movimento.

È possibile aprire e scaricare questi strumenti dai seguenti link (cliccandoci sopra o facendo copia-incolla nel browser):

- geo4civhic.eu/files/ETHICAL_WithoutMovingAquifer.xlsm
- geo4civhic.eu/files/ETHICAL_ActiveMovingAquifer.xlsm

Nel "Deliverable 6.3" è spiegato anche come calcolare la "sorgente lineare infinita", con alcuni esempi di calcolo. Il calcolo dell'interferenza termica, e di conseguenza l'effetto sul fluido termovettore delle BHE, è stato là applicato a un caso pilota. I risultati hanno mostrato l'effetto dell'interferenza termica al variare di diversi parametri (distanza tra gli impianti, conduttività termica del terreno, dimensioni dei sistemi geotermici vicini, diversi tassi di estrazione del calore). I risultati sono descritti nel paragrafo 3.1.1 del "Deliverable 6.3". Le simulazioni sono state eseguite utilizzando il modulo TRNSBM, che è la versione TRNSYS del programma SBM (Superposition Borehole Model). Alcuni di questi risultati sono stati confrontati anche con lo strumento ETHICAL, mostrando una buona concordanza tra i due.

1.3. Risultati e raccomandazioni del progetto GEO4CIVHIC

La regola spesso usata "chi prima arriva, meglio alloggia" non funziona perché, se le nuove installazioni possono considerare l'effetto di quelle esistenti, l'inverso non è generalmente possibile o è difficile da prevedere. Ogni sistema geotermico deve sempre rispettare i vincoli sulle temperature minime (e massime) del fluido all'interno delle BHE. Pertanto, è importante dimensionare e pianificare le installazioni tenendo conto di possibili impianti futuri nelle vicinanze, oppure tenere conto di eventuali misure per adattare il sistema e non penalizzare quelli esistenti. Come dimostrato nel Deliverable 6.3, è possibile ridurre gli effetti utilizzando sorgenti lineari più piccole. Inoltre, il Deliverable 6.3 mostra che maggiore è la densità delle sonde e il numero di impianti, minore è la risorsa geotermica che può essere sfruttata da ciascun impianto.

Un modo per limitare questo effetto, senza penalizzare le richieste di riscaldamento dell'utente, è quello di fornire una ricarica termica del terreno. Un altro modo è quello di aumentare la lunghezza totale della perforazione, al fine di aumentare la temperatura minima del fluido. Entrambi questi effetti sono spiegati nel Deliverable 6.3 (pagine 42 e 54) e contribuiscono a diminuire la sorgente lineare di estrazione dal terreno.

Queste considerazioni possono essere estese anche ai climi caldi, che hanno una prevalenza di iniezione di calore rispetto all'estrazione. Tuttavia, il sotto-raffreddamento del suolo è il problema più critico a causa del rischio di congelamento del terreno. Le nuove pompe di calore possono essere dotate di sistemi di blocco che non permettono al terreno di congelare, evitando così il rischio di gelo, ma riducendo o interrompendo il riscaldamento dell'edificio.

Considerando il surriscaldamento del terreno, è importante prestare attenzione alla temperatura massima ammissibile, che dipende dalla tenuta dei materiali e dall'evaporatore della macchina di raffreddamento (temperature superiori a 40°C sono solitamente sconsigliate). Lo stesso concetto di $\Delta T_{\text{penalizzazione}}$ può essere definito e applicato per la condizione di surriscaldamento.

In seguito a queste considerazioni, i tre criteri in grado di ridurre l'interferenza termica tra sistemi geotermici vicini sono i seguenti:

1. Se i sistemi sono più vicini di meno del 50% della lunghezza della perforazione (distanza calcolata come il punto più vicino tra le sonde, vedi ad esempio le Figure 6 e 7 nel Deliverable 6.3), è ancora possibile ottenere un effetto termico negativo tra i sistemi geotermici. Si raccomanda di fissare delle distanze minime tra i sistemi geotermici oltre le quali valutare le interferenze termiche.
2. Durante la fase di dimensionamento, aumentare correttamente la temperatura minima del fluido per anticipare gli effetti a lungo termine dei sistemi vicini. Questo può essere fatto aumentando la lunghezza totale della perforazione, se è possibile apportare modifiche all'estrazione di calore annuale.
3. Limitare l'estrazione annuale della risorsa geotermica per ogni impianto. Questo può essere fatto ricaricando annualmente il terreno, in modo da rigenerare termicamente il terreno riducendo l'estrazione annuale di calore.

Naturalmente, entrambe le possibilità possono essere implementate contemporaneamente e in modo combinato, facendo attenzione a mantenere lo stesso risultato desiderato e ottimale.

2. LINEE GUIDA PER UN TEST DI RISPOSTA TERMICA (TRT) PERSONALIZZATO: METODOLOGIA E NUOVI RISULTATI SUL PROTOTIPO COASSIALE IN PLASTICA

2.1. Stato attuale dei metodi TRT

La teoria delle sorgenti lineari di Kelvin, comunemente nota come modello delle sorgenti lineari infinite (ILS) (Gehlin 1998, Sanner et al. 2013), è uno dei modelli più vecchi e più spesso utilizzati (grazie alla sua semplicità e velocità (Witte et al. 2002)). Le due norme esistenti sul TRT, la EN ISO 17628 e la VDI 4640-5, suggeriscono entrambe questo metodo, mentre la VDI 4640-5 ne cita altri. Altri modelli più sofisticati che considerano la convezione (Molina-Giraldo 2011, Magraner et al. 2021), o analogie elettriche semi-numeriche (De Carli et al. 2010, Cazorla-Marín et al. 2021), sono presenti sul mercato, ma l'assenza di dati limita solitamente la loro applicabilità pratica.

Tuttavia, quando si utilizzano alcuni di questi modelli, si incontrano serie difficoltà. Ad esempio, nell'ILS, i valori stimati per i parametri delle BHE e le proprietà del terreno tendono a divergere e a dipendere dalla finestra di dati scelta, aggiungendo arbitrarietà alle stime. Inoltre, vi è un'elevata correlazione tra i parametri che porta a un'identificazione ambigua degli stessi. Il fatto che i modelli funzionino solo durante intervalli limitati da tempi specifici, spesso nell'intervallo tra 6 e 20 ore, rappresenta un'altra sfida perché richiede di scartare i dati precedenti non utilizzabili.

Altri approcci basati sull'assunzione di un campo omogeneo, come i modelli FLS (finite line source) e MLS (moving line source), sono anch'essi condizionati da intervalli di validità limitati. Mentre altri concetti, come l'uso di approcci semi-numerici più sofisticati, tendono normalmente a richiedere l'aggiustamento di molti parametri interni del modello (sotto forma di resistenze) e producono un buon adattamento ai dati degli esperimenti, ma non una visione particolarmente chiara dei processi fisici all'interno delle sonde geotermiche.

2.2. Approccio innovativo nell'ambito di GEO4CIVHIC

Una strategia diversa è stata studiata da alcuni autori nel contesto dell'analisi di TRT (Beier e Smith 2003, Li e Lai 2013, Li e Lai 2015). Questa è derivata da una soluzione classica del problema del trasferimento di conduzione termica di due zone cilindriche composte da una sorgente lineare infinita decentrata, che si trova nel libro di testo classico di (Carslaw e Jaeger 1986). Questo approccio si basa sul fatto che ciascuna delle due zone (all'interno e all'esterno del raggio di perforazione) ha risolto il suo problema di conduzione termica e il quadro risultante dell'evoluzione della temperatura nel breve e nel lungo periodo è quasi completo. Dipende da quattro variabili (la conduttività e la diffusività del terreno e della malta) invece dei soliti due parametri dell'ILS, e fornisce informazioni sulle caratteristiche della malta. Questa composizione con due regioni con sorgente lineare (C2RLS) rappresenta quindi una soluzione promettente al problema dei brevi periodi di esecuzione di TRT standard, e alla sfida di ottenere parametri significativi relativi alla malta, come

la conduttività e la diffusività. Come svantaggio, la formulazione iniziale è più complessa rispetto alle tecniche ILS, FLS e MLS, il che potrebbe rappresentare un ostacolo significativo al suo utilizzo e, nonostante la sua solidità teorica, C2RLS non ha ancora visto un uso diffuso nelle applicazioni pratiche.

Lo studio è stato sollecitato dalla necessità di valutare i potenziali cambiamenti derivanti dall'uso di vari materiali plastici, disposizioni geometriche e composizioni di malta all'interno di diverse sonde geotermiche. Questi nuovi materiali e configurazioni sono il risultato del progetto europeo H2020 GEOCOND e sono stati installati nel campo di prova presso l'UPV (Badenes et al. 2017, Urchueguía et al. 2018, Badenes et al. 2020), così come in altre sedi di progetto in Europa.

Per raggiungere questo obiettivo, è stata adattata la formulazione C2RLS per consentire di estrarre informazioni utili sul terreno e sulla malta da una combinazione di impulsi di iniezione termica stabili e instabili. I parametri ottenuti sono direttamente correlati con le quantità fisiche reali; questo metodo consente di formulare criteri di plausibilità per identificare soluzioni che non solo consentono di prevedere adeguatamente le risposte termiche, ma rappresentano anche soluzioni significative.

Il quadro risultante è stato realizzato e applicato al contesto attuale, dimostrando che l'uso pratico del modello C2RLS, adattato nell'ambito della ricerca GEO4CIVHIC, offre notevoli vantaggi rispetto agli attuali modelli all'avanguardia ed è ampiamente applicabile alla pratica dei TRT.

Questi vantaggi possono essere riassunti come segue:

1. Si stimano parametri altrimenti difficili da ottenere, come la diffusività, le capacità termiche e le conduttività del terreno e della malta e la resistenza termica della sonda, offrendo informazioni aggiuntive per ulteriori ottimizzazioni, la caratterizzazione e la verifica.
2. Tutti questi parametri sono correlati alle effettive proprietà fisiche e misurabili del terreno, il che consente una ispezione critica indipendente e un controllo rispetto a metodi di stima alternativi. La diffusività e la temperatura del suolo indisturbato sono tra i parametri stimati. Non è necessario affidarsi a precedenti stime dei loro valori.
3. I parametri stimati forniscono un modello che consente di prevedere con precisione l'evoluzione non stazionaria della temperatura di una BHE, soggetto a qualsiasi profilo di iniezione di calore non stazionaria.

Pertanto, l'applicazione di questa metodologia alla sonda di prova GEO4CIVHIC, offre ulteriori informazioni e approfondimenti sulle caratteristiche dei materiali sviluppati nell'ambito del progetto e nuove linee di pensiero sui futuri miglioramenti dei metodi di valutazione TRT standard.

2.3. Applicazione del nuovo schema C2RLS TRT alla sonda di prova coassiale GEO4CIVHIC nel sito di prova UPV

2.3.1. Spiegazione dell'impostazione del test

Uno scambiatore di calore coassiale in plastica (PCHE) di 12 metri di profondità (cfr. Figura 2-1) è stato installato in un foro di 0.14 metri diametro, nel sito di prova UPV con le seguenti specifiche:

- Tubo esterno: diametro esterno: 63 mm spessore della parete: 5.8 mm conduttività termica: 1.0 W/(m.K)
- Tubo interno: diametro esterno: 32 mm spessore della parete: 2.9 mm conduttività termica: 0.1 W/(m.K)

Il tubo interno è costituito da un composto doppio-strato, uno con PE100 standard e l'altro con una schiuma di PE 100 per garantire una conducibilità termica molto bassa.



Figura 2-1. I tubi coassiali in plastica (PCHE) preparati per la spedizione

La Figura 2-2 mostra la distribuzione delle sonde geotermiche nel campo di prova, compresa la distanza tra le diverse sonde espressa in metri. La parte superiore dell'immagine corrisponde alle 7 sonde installate per il progetto GEOCOND, vicino al foro corrispondente allo scambiatore coassiale del progetto GEO4CIVHIC (etichettato come BHE G4C nella figura). Nella parte inferiore dello schema, è possibile vedere la posizione di tre sonde che sono state testate nell'ambito di un precedente progetto europeo, Cheap-GSHPs, realizzato tra il 2015 e il 2018.

La Figura 2-3 mostra la parte di collegamento della sonda geotermica a singolo tubo a U, simile a quella coassiale (monitorabile con le apparecchiature del laboratorio termico). È dotata di uno spurgo dell'aria, di una valvola di non ritorno e di due sensori di temperatura installati sui tubi di ingresso e di uscita per misurare le differenze di temperatura tra le sonde, una parte importante durante l'esecuzione di un test termico.

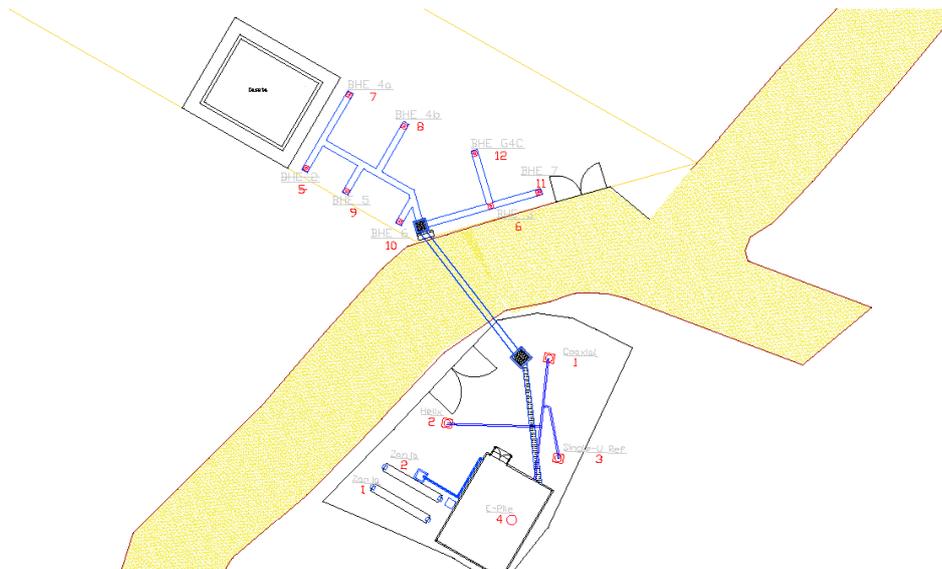


Figura 2-2. Posizione delle sonde sul campo

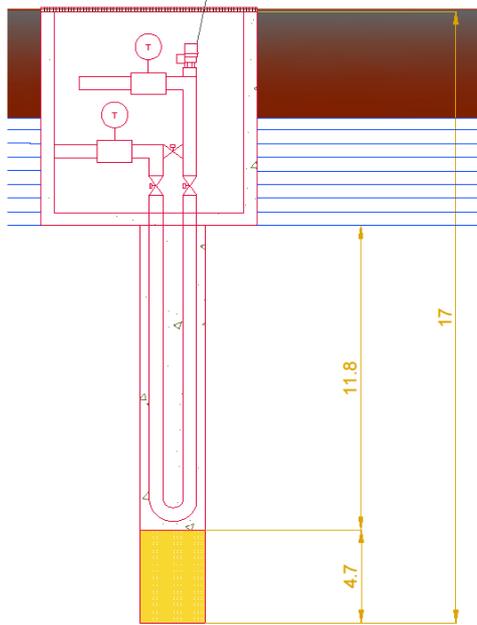


Figura 2-3. Posizione equivalente dei sensori nella testa della sonda (a titolo di esempio)

2.3.2. Applicazione del modello C2RLS ai dati sperimentali e conseguente stima dei parametri

I risultati del TRT e la successiva analisi dei risultati sperimentali ottenuti con la metodologia sviluppata sono mostrati in Figura 2-4. La stima dei parametri corrispondenti è mostrata in Tabella 2-1. I valori dei parametri sono in accordo con i precedenti risultati di una serie di esperimenti su BHE standard e BHE con riempimento migliorato dello stesso tipo utilizzato nell'attuale scambiatore di calore coassiale (Urcheguía et al. (Under Review)). I valori di diffusività concordano con questi risultati, dimostrando che i valori dei parametri del terreno e della malta ottenuti dai test sono insensibili alla geometria della sonda e realmente caratteristici del terreno e della malta utilizzati.

L'elevato valore della conducibilità del terreno è stato notato anche in precedenti test condotti utilizzando algoritmi di valutazione convenzionali (ILS) e strumenti di simulazione (EED). Attualmente si sta cercando di capire se il flusso di acqua sotterranea, presente a causa della specifica idrogeologia del sito, produca valori di conducibilità così elevati, effettivi o apparenti.

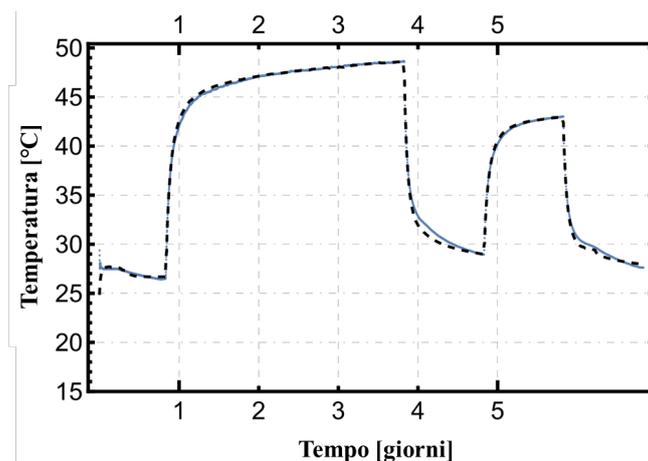


Figura 2-4. Curva della temperatura misurata rispetto a quella calcolata e aggiustata mediante il modello C2RLS, con i parametri stimati ottenuti dall'adattamento dei dati sperimentali TRT al modello

Tabella 2-1. Risultati della stima dei parametri con il modello C2RLS

Parametro	Valore	Unità
Conducibilità termica del terreno	4.47	W/(m.K)
Conducibilità termica della malta	1.47	W/(m.K)
Diffusività del terreno	9.95×10^{-7}	m /s ²
Diffusività della malta	2.63×10^{-7}	m /s ²

3. STRUMENTI PER LA PROGETTAZIONE E IL MONITORAGGIO DI SISTEMI A POMPA DI CALORE GEOTERMICA

3.1. Nuovi software e strumenti di progettazione per l'ingegneria dei sistemi geotermici di bassa profondità (DSS)

Questa sezione fornisce una panoramica di diversi strumenti di pre-progettazione per studi preliminari di sistemi geotermici a bassa profondità. Lo scopo di questi strumenti è quello di avere una stima del dimensionamento e delle prestazioni di questi sistemi geotermici per determinati impianti.

Gli strumenti presentati, sviluppati rispettivamente nei progetti Cheap-GSHPs e GEO4CIVIC, e offerti gratuitamente online, sono destinati a essere utilizzati in una fase preliminare. Per questo motivo, è stata prestata particolare attenzione all'utilizzo degli strumenti e al tipo di informazioni che potrebbero essere richieste agli utenti. In generale, questi calcoli si basano su input semplici, integrati da stime basate su conoscenze specialistiche. Ciò significa, naturalmente, che i risultati dei calcoli saranno stimati e che i risultati ottenuti devono essere considerati come un'analisi preliminare.

L'installazione finale di un sistema geotermico richiede un'analisi approfondita del sito (comprese conoscenze specifiche, test TRT, ecc.) e l'uso di uno strumento di progettazione professionale per il dimensionamento del sistema. In questa sezione viene fornito un breve stato dell'arte sugli strumenti di progettazione disponibili.

3.1.1. Strumento di pre-progettazione: Sistema di supporto alle decisioni di Cheap-GSHPs

Questo sistema di supporto alle decisioni è uno strumento basato sul web sviluppato nell'ambito del progetto Cheap-GSHPs. Il suo scopo è quello di fornire agli utenti non esperti un confronto tra le diverse tecnologie geotermiche che possono essere installate negli impianti.

Partendo da informazioni molto semplici, lo strumento Cheap-GSHPs esegue alcuni calcoli iniziali per stimare la domanda termica dell'edificio. Quindi, stima il dimensionamento di diverse soluzioni geotermiche che consistono nella combinazione di diverse tecnologie geotermiche e di sistemi aggiuntivi di energia rinnovabile (RES). Ogni soluzione viene valutata in base a un elenco di criteri (costo, RoI, LCA, superficie), sia qualitativamente che quantitativamente, e gli utenti hanno la possibilità di classificare le soluzioni in base alle loro preferenze.

Per i calcoli vengono seguite le seguenti fasi:

1. Innanzitutto, le proprietà termiche del terreno sono determinate, in base alla posizione fornita dall'utente, utilizzando il database geologico paneuropeo per gli impianti geotermici a bassa profondità realizzati nel progetto (Müller et al., 2018).
2. In seguito, vengono stimate le informazioni climatiche e il fabbisogno energetico annuo dell'edificio, in base alla località e al tipo di edificio (selezionato da un elenco predefinito). Per ogni tipo di edificio e per 20 località europee, viene definito un fabbisogno energetico annuo di riferimento. Per tutte le altre località, una correlazione - basata sulla classificazione climatica Köppen-Geiger (Kottek et al., 2006) – viene applicata per meglio definire i calcoli climatici e del fabbisogno energetico (De Carli et al., 2006, De Carli et al., 2018). Anche il fabbisogno di acqua calda sanitaria viene stimato in base al tipo di edificio e al tipo di impianto installati.
3. Successivamente, lo strumento caratterizza i sistemi fattibili con pompe di calore geotermiche (GSHP), in base ai carichi di picco per il riscaldamento e il raffreddamento e alle temperature dell'acqua nei circuiti in inverno e in estate.
4. Una volta definiti i sistemi GSHP, lo strumento ottiene le dimensioni e la caratterizzazione di diverse tecnologie di sonde geotermiche (GSHE), in base alla domanda di energia, alle proprietà e alla temperatura del terreno e alla caratterizzazione del GSHP. In primo luogo, la lunghezza totale di raffreddamento e riscaldamento dello

scambiatore di calore viene calcolata utilizzando la metodologia ASHRAE (Kavanaugh e Rafferty 1997). In secondo luogo, le lunghezze di riscaldamento e raffreddamento vengono confrontate per valutare la necessità di raffreddamento o riscaldamento ausiliari. Se necessario, le lunghezze vengono modificate e vengono determinati il numero e la geometria delle sonde. In terzo luogo, si eseguono nuovamente i calcoli ASHRAE, ottimizzando le dimensioni del GSHE, tenendo conto della geometria delle sonde.

5. Per quelle combinazioni di tecnologie geotermiche in cui è necessario includere sistemi ausiliari e RES aggiuntive, anche queste sono calcolate e caratterizzate.
6. Infine, la combinazione di GSHP fattibili, dei GSHE considerati e dei diversi sistemi rinnovabili e ausiliari, forma un insieme di soluzioni che vengono valutate, qualitativamente o quantitativamente, rispetto a un elenco di criteri (costi, RoI, LCA, superficie).

Lo strumento mostra questa valutazione delle diverse soluzioni e consente agli utenti di assegnare la priorità relativa dei suddetti criteri. In risposta, il sistema classifica le diverse soluzioni, mostrando al primo posto la soluzione che meglio soddisfa le preferenze degli utenti.

3.1.2. Strumento di pre-progettazione: Sistema di supporto alle decisioni GEO4CIVHIC

Lo strumento GEO4CIVHIC è uno strumento online che mira ad accelerare l'adozione di misure di ammodernamento geotermico negli ambienti urbani. L'obiettivo è quello di effettuare un'analisi dei costi e dell'impatto pre-progettuale per convincere i proprietari degli edifici a installare sistemi GSHP e per facilitare la discussione pre-progettuale sull'installazione di una GSHP in un progetto di riqualificazione. Serve, da un lato, a far comprendere agli utenti i vantaggi di un investimento in GSHP e, dall'altro, agli esperti di GSHP di appaltare progetti con questa tecnologia.

I destinatari sono professionisti non esperti o esperti di GSHP che cercano di convincere utenti non esperti. Il target sono utenti che hanno almeno una conoscenza di base dell'ingegneria e dell'edilizia. Per questo motivo, durante le fasi iniziali dei calcoli (caratterizzazione del terreno, clima e fabbisogno energetico), vengono proposti all'utente valori stimati predefiniti che possono essere modificati, e includere informazioni più accurate. In modo analogo, viene presentata agli utenti una semplice caratterizzazione delle tecnologie geotermiche che verranno utilizzate nei calcoli, che potranno modificare se desiderano includere tecnologie personalizzate nell'analisi.

Lo strumento esegue i seguenti calcoli:

1. In primo luogo, quando l'utente inserisce i primi input, gli viene richiesto di scegliere la litologia principale e il sottosuolo geologico della località selezionata, con l'assistenza di alcune immagini e descrizioni. In base a queste scelte, viene poi presentata la caratterizzazione stimata del terreno (conduttività termica, densità e calore specifico) della località.
2. Quindi, viene presentato il clima della località selezionata (temperatura esterna media per ogni mese dell'anno, temperatura del suolo), sulla base dei dati di 26 località di riferimento per i diversi climi d'Europa. Per le altre località, viene selezionata l'opzione più simile, in base alla località e alla sua classificazione Köppen-Geiger (Kottek et al., 2006).
3. Una volta impostato il clima, si stima il fabbisogno energetico dell'edificio, compresi riscaldamento, raffreddamento e acqua calda sanitaria. Lo strumento stima i fabbisogni annuali di riscaldamento e raffreddamento, nonché le potenze di picco. Il calcolo si basa sulla posizione, sul tipo di edificio, sul periodo di costruzione e sullo scenario di ammodernamento selezionato dall'utente, nonché sulle simulazioni energetiche completate per gli archetipi di progetto (De Carli et al., 2019). Queste stime vengono ulteriormente affinate attraverso una correlazione che tiene conto delle informazioni climatiche del luogo.
4. Successivamente, vengono generate diverse possibili soluzioni geotermiche, ognuna delle quali consiste in una combinazione di tecnologie GSHP, GSHE e di perforazione. La selezione della tecnologia di perforazione viene effettuata sulla base dell'analisi decisionale a criteri multipli (MCDA) sviluppata nel progetto (Pasquali et al., progetto GEO4CIVHIC). Il GSHP che meglio si adatta al progetto viene deciso in base al tipo di unità terminale, al livello di isolamento e al clima della località considerata, e la sua caratterizzazione di default viene corretta, per un migliore adattamento al progetto. Infine, viene proposta una soluzione per ciascuna delle quattro tecnologie di BHE considerate: singola U, doppia U, coassiale senza riempimento e coassiale con riempimento. Le soluzioni vengono presentate agli utenti, che possono sceglierne fino a tre per effettuare l'analisi.
5. Una volta selezionate le soluzioni, lo strumento esegue i calcoli geotermici, che determinano il dimensionamento del GSHE (lunghezza totale installata e numero di sonde) e la migliore strategia per bilanciare il carico (necessità di sistemi ausiliari), considerando lo spazio disponibile per il campo di trivellazione. I calcoli seguono la metodologia ASHRAE (Kavanaugh e Rafferty 1997) e si basano sulla pompa di calore selezionata e sulla caratterizzazione del terreno. Questo metodo consente di calcolare le lunghezze

delle sonde geotermiche necessarie per coprire le richieste di riscaldamento e raffreddamento, tenendo conto anche delle interferenze tra le sonde. Dato lo spazio disponibile, a volte non è possibile installare tutti gli elementi necessari, e allora lo strumento determina quali sistemi ausiliari (sistemi ibridi o pompe di calore aria-acqua (AWHP)) devono essere installati.

- Infine, le soluzioni calcolate sono valutate sulla base di indicatori di prestazione chiave (KPI) tecnici, ambientali ed economici che facilitano il confronto tra le tecnologie e il processo decisionale. Sono incluse anche informazioni sulle misure di mitigazione dei rischi e sui potenziali ostacoli.

Lo strumento presenta questi risultati numericamente e graficamente, e consente di scaricare un report con un riepilogo delle tecnologie analizzate e dei risultati ottenuti.

3.2. Strumenti di progettazione e monitoraggio per impianti geotermici a bassa profondità in edifici esistenti

Il monitoraggio è un processo che implica la raccolta di dati da un sistema (misurazione) e l'utilizzo di tali dati per ottenere informazioni sulle prestazioni del sistema. Ciò avviene con due obiettivi principali: i) valutare l'efficienza del sistema; e ii) rilevare eventuali malfunzionamenti per risolverli il prima possibile.

Il risultato della valutazione in un sistema GSHP porta alla definizione di SCOP (coefficiente di prestazione stagionale) e SEER (rapporto di efficienza energetica stagionale), che forniscono le prestazioni di una pompa di calore reversibile durante il funzionamento invernale (misurato con SCOP) ed estivo (misurato con SEER). Le equazioni [1] e [2] sono utilizzate per misurare l'efficienza energetica della pompa di calore rispettivamente in riscaldamento (equazione 1) e in raffreddamento (equazione 2).

$$SCOP = \frac{\text{calore fornito all'edificio [kWh]}}{\text{consumo elettrico della pompa di calore [kWh]}} \quad [1]$$

$$SEER = \frac{\text{calore estratto all'edificio [kWh]}}{\text{consumo elettrico della pompa di calore [kWh]}} \quad [2]$$

Ci sono più condizioni di sistema per calcolare i diversi livelli di coefficiente stagionale, come presentato in Figura 3-1 (solo nel caso di SCOP). Considerare il consumo energetico di più elementi del sistema porta a efficienze più basse, ma migliora la conoscenza dell'efficienza dell'intero impianto. I valori istantanei di COP ed EER che misurano l'efficienza di una pompa di calore possono essere calcolati con le equazioni [3] e [4].

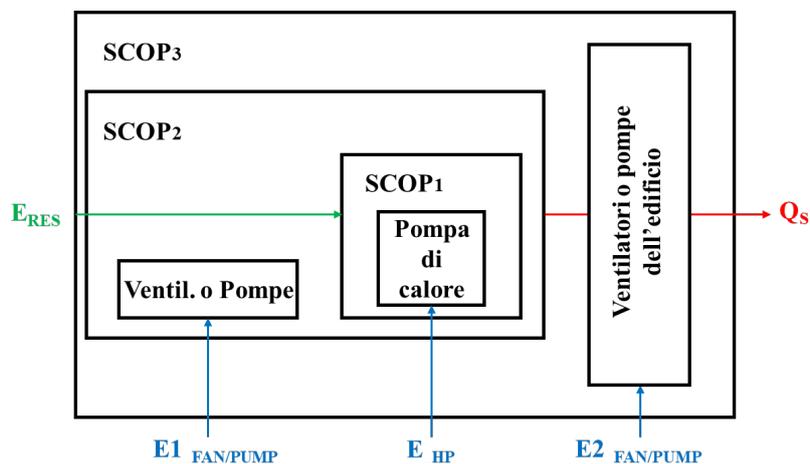


Figura 3-1. Relazione tra le diverse energie utilizzate per il calcolo dello SCOP: l'energia termica fornita all'edificio (Q_s) e proveniente da una fonte rinnovabile (E_{RES}), e l'energia consumata dalla pompa di calore (E_{HP}) e dagli elementi ausiliari come ventilatori e pompe ($E1_{FAN/PUMP}$ e $E2_{FAN/PUMP}$).

$$COP = \frac{\text{potenza termica scambiata al condensatore [kW]}}{\text{potenza elettrica del compressore [kW]}} \quad [3]$$

$$EER = \frac{\text{potenza termica scambiata all'evaporatore [kW]}}{\text{potenza elettrica del compressore [kW]}} \quad [4]$$

Per valutare l'efficienza delle pompe di calore, è necessario definire e misurare le energie nel sistema, prendendo come riferimento gli elementi in Figura 3-1. L'efficienza (si vedano le equazioni [3] e [4]) si misura come rapporto tra la potenza termica necessaria all'edificio e la potenza del compressore, solitamente generata con energia elettrica.

L'energia elettrica utilizzata nel compressore della pompa di calore può essere autoprodotta o importata. Quest'ultima viene prodotta all'esterno dell'impianto da diverse fonti in base al mix elettrico nazionale, mentre la prima deriva solitamente da un impianto fotovoltaico. L'utilizzo dell'una rispetto all'altra è importante per i costi operativi dell'impianto, poiché l'energia elettrica prodotta diminuisce quella importata (e il relativo costo).

L'energia elettrica viene misurata posizionando un contatore di energia prima della connessione elettrica del sistema da monitorare, raccogliendo continuamente i dati di tensione e corrente e ottenendo la potenza; integrandola durante un determinato intervallo di tempo si ottiene l'energia corrispondente. La presenza di più contatori di energia aiuta a ottenere una migliore conoscenza dell'intero sistema.

Ci sono due diverse energie termiche da misurare: i) quella estratta/iniettata nell'edificio; e ii) quella scambiata con l'ambiente circostante (vedi Figura 3-2). La pompa di calore è collocata tra il dissipatore e la sorgente di calore, mentre l'edificio è il dissipatore in modalità di riscaldamento e la sorgente in modalità di raffreddamento.

In ogni caso, la misurazione dell'energia termica è più complicata di quella elettrica, poiché sono necessarie una serie di temperature e una portata di massa. Il loro prodotto, oltre alle costanti necessarie (ad esempio, la densità e il calore specifico del flusso), determina la potenza e, se integrata per un certo tempo, la relativa energia. Questa procedura di integrazione riduce l'accuratezza della misura dell'energia, poiché vengono integrati anche gli errori. Per ridurre questo fenomeno, i misuratori di portata e i sensori di temperatura devono presentare caratteristiche di elevata accuratezza e devono essere ben calibrati.

Per quanto riguarda la misura della portata massica, i due valori tipici che troviamo nei misuratori sono la velocità e il contatore di impulsi. Nel primo caso, esiste un valore direttamente correlato alla velocità istantanea del flusso; integrando questo valore si ottiene la portata massica. Nel secondo, il contatore a impulsi, viene generato un impulso ogni volta che una quantità di flusso è passata attraverso l'elemento sensibile; contando questi impulsi si ottiene il volume totale del fluido che è passato attraverso il misuratore.

È importante sottolineare, come già visto, che l'energia ottenuta è il risultato di misure precedenti; quindi un buon o un cattivo sistema di misura potrebbe portare a risultati energetici migliori o peggiori. Infatti, secondo il teorema del campionamento, il periodo di campionamento impone un limite alla dinamica del sistema che può essere riprodotta dai dati misurati. Ad esempio, se la pompa di calore funziona a cicli di 1 minuto, cioè può passare da spenta ad accesa e di nuovo ad accesa in meno di un minuto, dobbiamo monitorare il sistema con un tempo di campionamento inferiore a 30 secondi, per non perdere nessuna attivazione della pompa.

Altri parametri essenziali, per avere una migliore visione d'insieme del sistema valutato, sono le condizioni climatiche (ad esempio, la temperatura ambiente e del terreno) e le condizioni di funzionamento della pompa di calore, come i controlli e gli allarmi, che possono modificare il significato delle informazioni raccolte dai contatori di energia, dai sensori di temperatura e dai misuratori di portata.

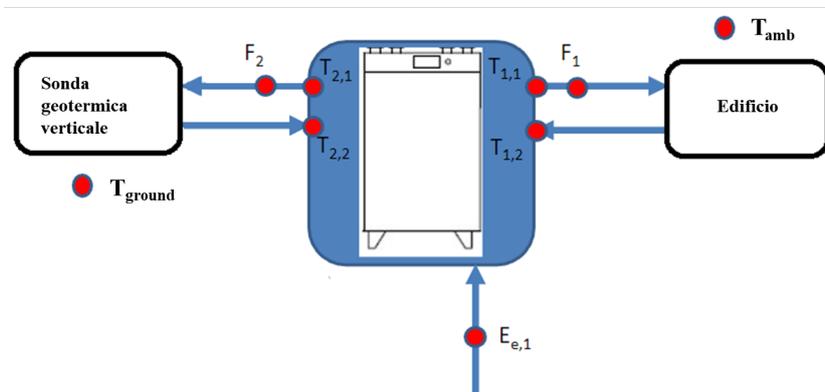


Figura 3-2. Posizione dei sensori per la misurazione dell'energia in una pompa di calore. Dove $E_{e,1}$ è un misuratore di energia elettrica; F_1 e F_2 sono misuratori di portata; $T_{1,1}$ e $T_{1,2}$ sono le temperature in ingresso e in uscita dal lato dell'edificio; $T_{2,1}$ e $T_{2,2}$ sono le temperature in ingresso e in uscita dallo scambiatore di calore esterno; T_{amb} è la temperatura ambiente esterna e T_{ground} è la temperatura del terreno.

La Figura 3-3 mostra, a titolo di esempio, le misure e i risultati per la valutazione dello SCOP₁ (cfr. Figura 3-1) ottenuti dal sistema di monitoraggio installato all'interno dell'impianto di climatizzazione e acqua calda sanitaria di un sito residenziale a Battel (Belgio). Le energie termiche sono calcolate dai sensori di temperatura e dai misuratori di portata; i valori di energia elettrica provengono dai contatori di energia elettrica (in relazione alla Figura 3-2, per il compressore viene utilizzato Ecompr); i valori di COP sono calcolati per mostrare le efficienze dell'edificio su base giornaliera.

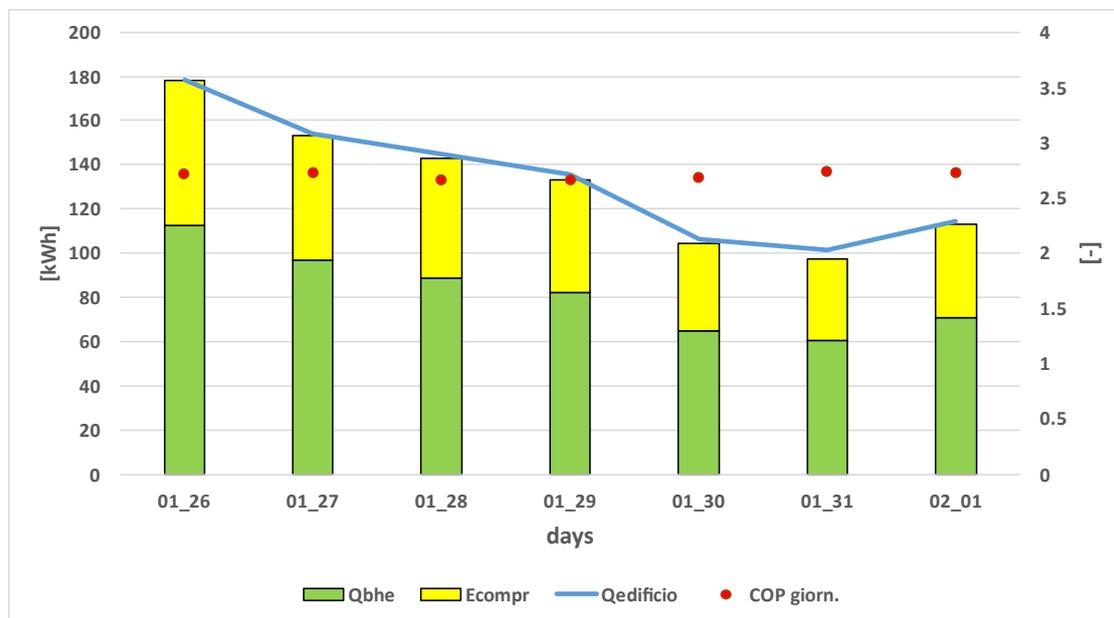


Figura 3-3. Esempio di monitoraggio di una pompa di calore geotermica reale. La barra verde rappresenta l'energia estratta dal campo geotermico e le barre gialle il consumo di energia elettrica del compressore della pompa di calore; i punti rossi mostrano il COP giornaliero della pompa di calore geotermica (SCOP₁ in Figura 3-1)

I dati riportati da Figura 3-3 possono essere spiegati come segue:

- In inverno, il calore fornito all'edificio dalla pompa di calore è pari al calore estratto dal terreno (o dall'aria) più il lavoro del compressore. Come presentato nelle equazioni:

$$Q_{building} = E_{compressor} + Q_{bhe} \quad [5]$$

$$Q_{bhe} = Q_{building} * \frac{SCOP_1 - 1}{SCOP_1} \quad [6]$$

- In estate, il calore estratto dall'edificio più il lavoro del compressore sono pari al calore iniettato nel terreno (o nell'aria) che è il seguente:

$$Q_{bhe} = E_{compressor} + Q_{building} \quad [7]$$

$$Q_{bhe} = Q_{building} * \frac{SCOP_1 + 1}{SCOP_1} \quad [8]$$

4. DIMENSIONAMENTO DI SISTEMI IBRIDI E INTEGRAZIONE CON ALTRI SISTEMI AD ENERGIE RINNOVABILI (RES)

Nel secolo scorso, il sistema più comune per il riscaldamento di case ed edifici commerciali è stato quello delle caldaie a combustibili fossili. Oggi possiamo dire che questo tipo di tecnologia di riscaldamento sta diventando sempre meno conveniente dal punto di vista economico e ambientale.

Riscaldamento degli edifici: soluzione tradizionale

Il principio di funzionamento delle caldaie tradizionali è semplice: il metano (o in generale un combustibile fossile) viene inviato nel bruciatore dove viene bruciato generando riscaldamento per riscaldare dell'acqua. I fumi di scarico della combustione vengono espulsi nell'atmosfera.

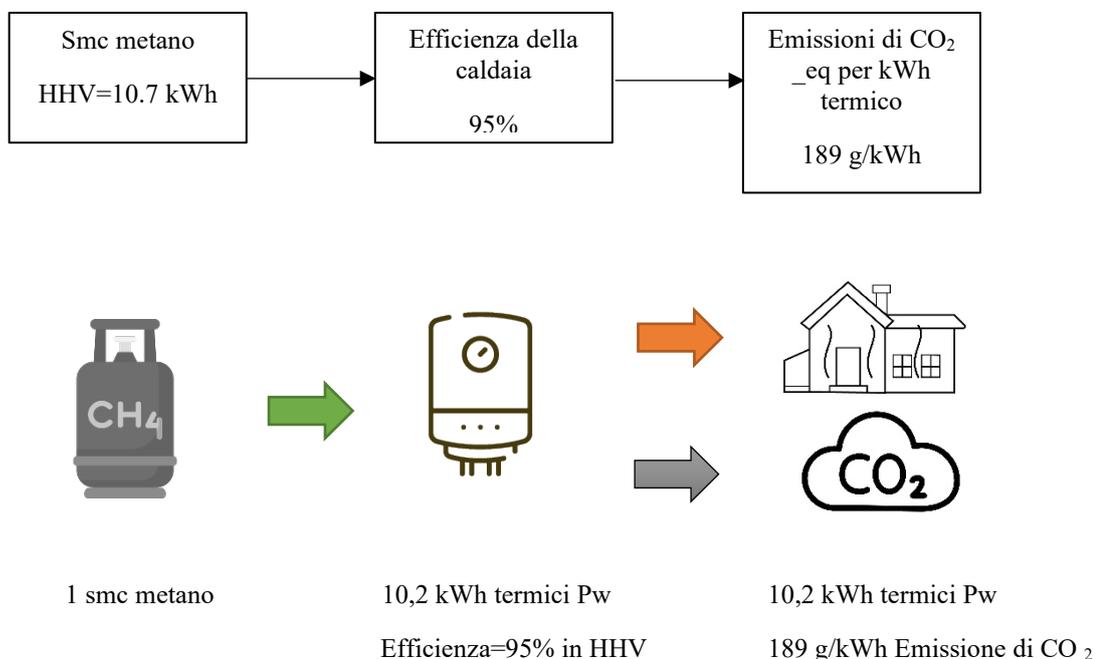


Figura 4-1. Riscaldamento degli edifici: soluzione tradizionale

Con le pompe di calore, il flusso di energia è diverso: la stessa quantità di metano viene inviata alle centrali a ciclo combinato dove viene utilizzata per generare energia elettrica con un'efficienza che può arrivare fino al 40% circa. L'energia elettrica viene utilizzata per alimentare la pompa di calore che può generare riscaldamento estraendo energia da una fonte rinnovabile (aria o terra) con COP di circa 3 (3 parti di energia di riscaldamento per 1 parte di energia elettrica). Le emissioni di CO₂ sono ridotte del 17%.

Oggi esistono molti modi per generare energia elettrica che può essere utilizzata dalle pompe di calore.

Soluzione a pompa di calore

L'energia elettrica può essere prodotta con diversi tipi di tecnologie. Alcune di esse sono prive di emissioni di CO₂. Il diagramma dei flussi di energia è:

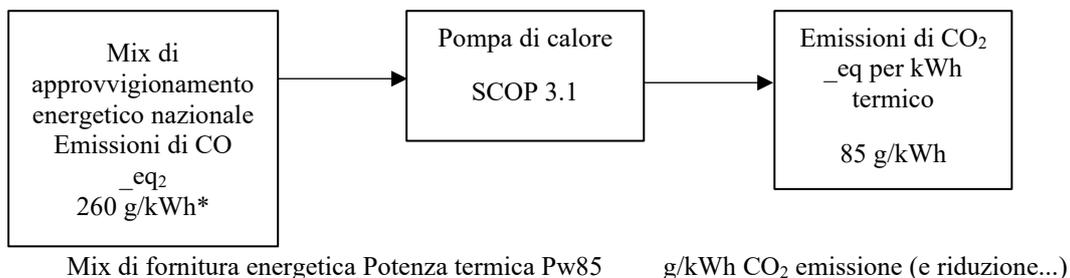


Figura 4-2. Riscaldamento degli edifici: soluzione a pompa di calore

Con questi diversi tipi di generazione di energia, le emissioni di CO₂ sono significativamente inferiori al precedente valore di 189 g/kWh termico (in Italia nel 2021 questo valore era di 85 g/kWh termico, nel 2017 in Germania di 133 g/kWh termico¹, nel 2017 in Francia di 17 g/kWh termico¹) e, cosa più importante, possono azzerarsi quando la produzione di energia elettrica è al 100% rinnovabile nel suo ciclo di vita.

I pannelli fotovoltaici possono essere efficacemente accoppiati a una pompa di calore: ogni volta che la disponibilità di energia solare è limitata durante il giorno, l'energia può essere immagazzinata direttamente in un accumulo caldo invece che in batterie elettriche. Questo concetto potrebbe essere esteso a tutte le "produzioni energetiche non dispacciabili" per ridurre il numero di batterie, i costi di investimento e l'impatto della generazione di energia con le rinnovabili.

Di seguito la tabella delle emissioni di CO₂ per 1 kWh termico, il COP stagionale per il mercato deciso dal regolamento UE 811/2013 rispetto alla riduzione di CO₂ nella produzione di energia elettrica. L'esempio è realizzato in Italia con unità aria/acqua in classe A secondo il regolamento UE 811/2013².

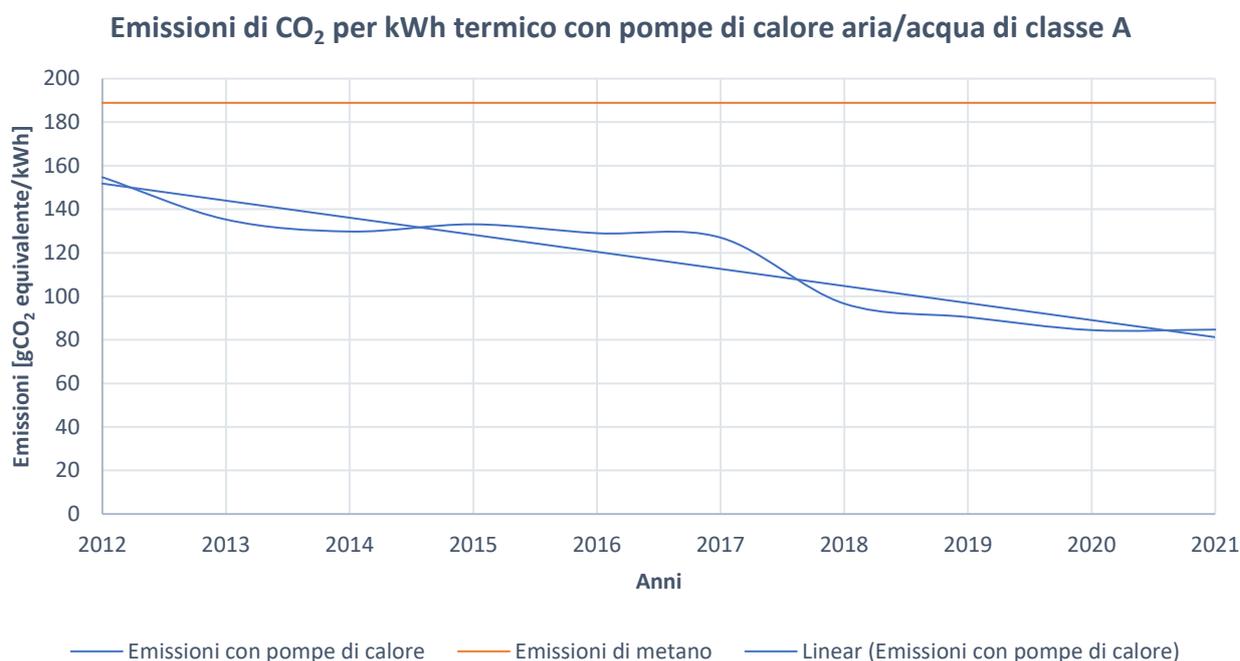


Figura 4-3. Emissioni di CO₂ per kWh termico nelle pompe di calore

4.1. Pompe di calore ibride innovative ad alta temperatura per il retrofit di edifici civili e storici per alte e medie temperature

Uno dei punti più impegnativi nell'efficientamento degli impianti di riscaldamento degli edifici esistenti, con la sostituzione delle caldaie in favore delle pompe di calore, è rappresentato dalla difficoltà di modificare il sistema di distribuzione a radiatori: il vincolo della bassa superficie dei radiatori tradizionali richiede una temperatura medio-alta dell'acqua di mandata. Il COP di una pompa di calore è inversamente proporzionale alla differenza tra la temperatura del fluido di lavoro (lato utenza) e la temperatura della sorgente. Per questo motivo è necessario progettare le pompe di calore in modo da poter lavorare con alte temperature, alto COP e refrigerante a basso GWP.

L'energia geotermica estratta dalle sonde geotermiche rappresenta una grande opportunità per i sistemi di raffreddamento e riscaldamento: il terreno, a partire da una profondità di circa 2 m, ha una temperatura quasi costante durante l'anno (che tende alla media delle temperature dell'aria esterna), per questo motivo è possibile utilizzare questo

¹ Dati sulle emissioni di CO₂ per kWh elettrico in Europa: ISPRA 2019.

² Dati sulle emissioni di CO₂ per kWh elettrico in Italia: ISPRA 2022. Dati sulle prestazioni delle pompe di calore aria/acqua: Regolamento UE 811/2013. Il calcolo considera l'efficienza delle pompe di calore di classe A a partire dal 2018.

"dissipatore di calore" come una comoda fonte per il raffreddamento e il riscaldamento degli edifici accoppiata a pompe di calore.

Legenda:

- **g.w.:** acqua glicolata (15% glicole propilenico 85% acqua)
- **GWP:** potenziale di riscaldamento globale (100 anni)
- **RH:** umidità relativa [%]
- **Sorgente / Sorgenti:** temperature e umidità dei fluidi del lato dissipativo del circuito. In caso di unità a doppia sorgente, è presente la denominazione: "Sorgenti".
- **Utente:** temperature dell'acqua del circuito lato utente
- **w.:** acqua
- Se non ci sono numeri in "Temperatura sorgente estate" significa che il sistema funziona solo in modalità riscaldamento.

Tabella 4-1. Confronto tra pompe di calore plug & play - inverter e tecnologia on-off: NWW006HL - Padova

Fluido - GWP	Temperature invernali	Temperature in estate	Tipo di compressori	Acqua calda sanitaria
R454B (GWP=466)	Sorgente: 8-5°C g. w. Utente: 40-45°C w	Sorgente: 20-25°C g. w. Utente: 12-7°C w	Scroll	No

L'idea alla base della pompa di calore geotermica plug & play è quella di equipaggiare la pompa di calore in modo da ridurre i costi di installazione. Per questo motivo, l'unità è progettata integrandone tutti gli accessori idraulici come: serbatoio tampone, bollitore dell'acqua calda sanitaria (DHW), vasi di espansione, valvole di sicurezza, scambiatore di calore per l'integrazione dei pannelli solari termici.

In questo caso le unità sono dotate di R454B come nuovo refrigerante a basso GWP: questo refrigerante è di classe A2L (leggermente infiammabile) e per questo motivo la progettazione dell'unità ha tenuto conto anche del rischio di installazione all'interno dell'edificio.

- UNITÀ 1: compressore azionato da inverter. Il sistema ha una conseguente capacità di modulare a carico parziale, ma ha un valore inferiore al punto nominale a causa dell'efficienza dell'inverter.
- UNITÀ 2. Compressore on-off, in cui la velocità è determinata dalla frequenza fissa della rete.

Tabella 4-2. Pompa di calore a doppia temperatura di utenza con CO₂ come refrigerante e circuito di rigenerazione: CDH012HS - Belgio

Fluido - GWP	Temperature in inverno	Temperature in estate	Tipo di compressori	Acqua calda sanitaria
R744 (GWP=1)	Sorgente: 3-0°C g. w. Utente: 30-60°C w.	Fonte: 15-20°C g.w. Utente: 12-7°C w.	Pistone rotante	Sì

La necessità di efficientare edifici esistenti con parte del sistema di distribuzione realizzato con radiatori (nella parte più vecchia) e parte con riscaldamento a pavimento (nella parte più nuova) rivela la necessità della pompa di calore di fornire acqua calda a due livelli di temperatura.

Il progetto può raggiungere l'obiettivo di sfruttare i vantaggi del CO₂ come refrigerante che funziona ad alta efficienza quando il sistema è in grado di lavorare con un grande ΔT. In questo caso, l'alta temperatura va ai radiatori, mentre la bassa temperatura al sistema di riscaldamento a pavimento.

Il circuito del refrigerante è dotato di uno scambiatore di calore specifico per raffreddare il gas dopo lo scambiatore di calore per la dissipazione, utilizzando il surriscaldamento del gas in uscita dall'evaporatore per ottenere migliori prestazioni, soprattutto in modalità invernale.

Tabella 4-3. Pompa di calore con refrigerante a basso GWP e doppia sorgente: ETH010HL - Malta

Fluido - GWP	Temperature in inverno	Temperature in estate	Tipo di compressori	Acqua calda sanitaria
R454B (GWP=466)	Sorgenti: 8-5°C g.w. 7°C-87 RH aria Utente: 40-45°C w.	Sorgenti: 20-25°C g.w. 35°C-50 RH aria Utente: 12-7°C w.	Scroll	No

Questo prototipo ha due diversi scambiatori di calore: a piastre per la sorgente geotermica e a batterie alettate per l'aria. Ciò consente di ottimizzare le prestazioni e di preservare la sorgente geotermica.

Questa unità è dotata di un software per la modalità OR. Il software ottimizza le prestazioni passando alla sorgente migliore, considerando quella più conveniente, sia in modalità estiva che invernale.

Tabella 4-4. Pompa di calore a CO₂ refrigerante a doppia sorgente: CDM035HS - Ferrara

Fluido - GWP	Temperature in inverno	Temperature in estate	Tipo di compressori	Acqua calda sanitaria
R744 (GWP=1)	Sorgenti: 8-5°C g.w. 7°C-87 RH aria Utente: 30-60°C w.	Sorgenti: 20-25°C g.w. 35°C-50 RH aria Utente: 12-7°C w.	Alternativo	No

Questa unità ha due scambiatori di calore con i vantaggi della precedente macchina. La particolarità del CDM035HS è che ha la modalità AND in estate (le sorgenti ad aria e a terra sono utilizzate in serie). In inverno ha la modalità OR (le sorgenti aria e geotermia sono utilizzate come alternativa): in questo caso il software ottimizza le prestazioni passando alla sorgente migliore, considerando quella più conveniente. Questa unità è dotata di serbatoio di accumulo incorporato.

Tabella 4-5. Pompa di calore ad alta temperatura con piccolo ΔT - ciclo a "semicascata": CDH015KL - Irlanda

Fluido - GWP	Temperature in inverno	Fonte Temperatura estiva	Tipo di compressori	Acqua calda sanitaria
R744 (GWP=1)	Sorgente: 6-3°C g.w. Utente: 50-70°C w.	-	Scroll + pistone rotante	Sì

Questo ciclo, che permette di raggiungere una temperatura dell'acqua di lavoro di 50-70°C, è un ciclo in "semi-cascata": il refrigerante del ciclo inferiore è la CO₂, quello del ciclo superiore è l'R513A. Nei cicli supercritici a CO₂ la temperatura del gas in uscita dal compressore è elevata (superiore a 120°C) e quindi l'unità sfrutta questa temperatura elevata per riscaldare l'acqua, prima dello scambiatore di calore a cascata (qui chiamato gas-cooler a cascata, in realtà il suo ruolo è quello di migliorare il raffreddamento del gas supercritico CO₂). In questo modo si ottiene un significativo raffreddamento della CO₂, migliorandone il COP. Questo è uno schema concettuale di questo ciclo:

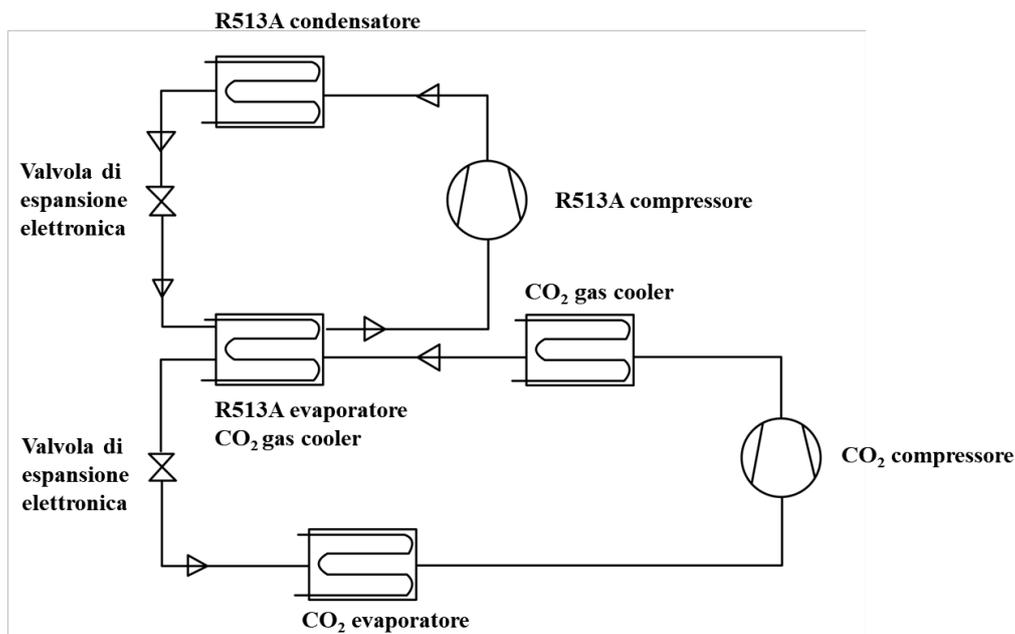


Figura 4-4. Schema del ciclo in “semi-cascata”

Il miglioramento dell'efficienza raggiunto con il ciclo a semi-cascata invece che con il semplice ciclo transcritico a CO₂ è del +14%.

4.2. Sinergia con altre tecnologie RES e strategie di controllo per sistemi multi-sorgente attraverso l'integrazione dell'energia geotermica con altre RES

Gli edifici a energia quasi zero (nZEB) sono necessari per raggiungere gli obiettivi di riduzione delle emissioni di CO₂ nel 2050. Gli nZEB devono avere elevate prestazioni energetiche e procurarsi l'energia necessaria principalmente da energie rinnovabili. In Europa, dal 2020 tutti i nuovi edifici dovranno essere a energia quasi zero e sono state implementate delle roadmap per convertire gli edifici esistenti in nZEB. La tendenza è verso edifici a energia positiva (Magrini et al., 2020).

Sia per raggiungere gli obiettivi nZEB che per ridurre il tempo di ammortamento, le pompe di calore possono essere abbinate ad altre fonti di energie rinnovabili. Questi sistemi combinati sono chiamati GSHP ibride (HGSHP). Richiedono di andare oltre il controllo tradizionale per gestire correttamente i diversi elementi e ottenere un risparmio energetico ottimale. Sono anche utili per bilanciare i carichi di riscaldamento e raffreddamento per evitare variazioni a lungo termine della temperatura del terreno (Hackel e Pertzborn 2011; Yang e Wang 2012). Per ottenere l'elettricità per la pompa di calore, questa può essere accoppiata con una fonte di energia rinnovabile locale, come un pannello fotovoltaico (PV) o una generazione micro-eolica, entrambi per ridurre le emissioni di CO₂ durante il funzionamento. Altri elementi, come l'accumulo termico o elettrico, possono migliorare ulteriormente il sistema.

Nel progetto GEO4CIVHIC è stata condotta un'analisi della sinergia tra GSHP e altre fonti di energia rinnovabili (eolico, solare termico, pompe di calore aria-acqua e soluzioni ibride fotovoltaico-termiche), al fine di definire soluzioni ottimali per i diversi tipi di edifici e climi considerati nel progetto. Il risultato di tale analisi è presentato di seguito.

L'analisi è stata condotta utilizzando risultati comparativi per una tipica casa a schiera situata in climi diversi (Strasburgo, Bilbao, Atene e Helsinki), sia riqualificata che non, evidenziando così i benefici in termini di risparmio energetico e di costi ottenibili con una GSHP adeguatamente progettata e abbinata ad altre fonti di energia rinnovabile.

Quando PV e GSHP sono accoppiati senza batteria di accumulo, si possono trarre conclusioni simili sia per i casi di Strasburgo, Bilbao e Atene. L'energia solare non è disponibile quando è richiesta dall'utente, quindi la curva di carico è totalmente coperta grazie all'energia elettrica acquistata dalla rete, mentre l'energia solare prodotta viene venduta alla rete. La minore irradiazione solare dei climi più freddi è più evidente in estate, quando anche l'installazione della batteria non è sufficiente a coprire la domanda di energia e parte dell'energia elettrica viene prelevata dalla rete. La simulazione di Helsinki conferma che l'impianto fotovoltaico senza accumulo di energia non è mai una buona soluzione per l'autoconsumo, poiché l'installazione della batteria permette di sfruttare tutta l'energia solare prodotta dal fotovoltaico in inverno, mentre in estate l'eccesso di energia venduta alla rete è minore rispetto alle altre due città. L'installazione dei

pannelli fotovoltaici ha un grande impatto dove l'irraggiamento solare è maggiore. L'utilizzo della batteria permette di sfruttare l'energia solare anche in assenza di sole e i benefici sono più visibili per quei Paesi in cui l'irraggiamento solare è sufficiente a ricaricare completamente la batteria durante le ore diurne.

Quando si accoppiano il terreno e i collettori PVT come sorgenti termiche per la pompa di calore, dando la priorità alla produzione di acqua calda sanitaria sia durante la stagione di riscaldamento che di raffreddamento, il contributo termico diretto degli impianti solari è, come previsto, maggiore 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.

La domanda di riscaldamento più elevata corrisponde alla casa terrazzata storica situata nel clima più freddo (Helsinki), mentre per il clima mite (Strasburgo) si osserva un valore più elevato della quota della pompa di calore per il riscaldamento degli ambienti e l'utilizzo del serbatoio solare come fonte termica. I climi più caldi, come Bilbao e Atene, consentono di utilizzare il campo fotovoltaico come fonte termica principale per la pompa di calore, anche durante i mesi più freddi, sebbene con quote diverse.

Le prestazioni energetiche stagionali della pompa di calore sono state stimate, mostrando che il SCOP della pompa di calore, quando produce acqua calda sanitaria, è sempre inferiore al SCOP della pompa di calore che fornisce riscaldamento degli ambienti, a causa della diversa temperatura del set point (più alta per la produzione di acqua calda sanitaria). Se si considera la produzione di acqua calda sanitaria a Helsinki, lo SCOP è fino al 20% più alto (nell'edificio storico) se si utilizza il campo solare come fonte termica rispetto all'uso del campo di sonde geotermiche. Questo valore è del 19% per il riscaldamento degli ambienti, considerando l'edificio esistente riadattato. Per i climi più caldi, si raggiungono valori di SCOP più elevati quando si utilizza il terreno come fonte termica principale per il riscaldamento degli ambienti per tutte le tipologie di edifici, con un valore fino al 6% superiore per l'edificio storico.

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 efficientati. La quota più bassa per gli edifici rinnovati 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 riqualifica 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.

Il rapporto di copertura è generalmente più alto per gli edifici efficientati rispetto a quelli che non lo sono. Confrontando le tre condizioni climatiche, il valore di copertura è elevato per i climi caldi e miti (Atene, Bilbao 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 dall'irraggiamento solare.

Un equivalente stagionale $SCOP_{equivalent}$ è stato calcolato per il riscaldamento e il raffrescamento, considerando l'energia elettrica prodotta dal campo fotovoltaico e istantaneamente utilizzata dalla pompa di calore, evidenziando l'efficienza del sistema che aumenta significativamente quando si considera l'energia autoprodotta.

Come dimostrano le diverse soluzioni (si veda la Sezione 5.2 per ulteriori dettagli) 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 riqualifica applicate. Anche se l'ubicazione influenza in modo significativo la disponibilità di radiazione solare, i risultati mostrano impatti interessanti sul risparmio energetico e sui relativi costi energetici, confermando così il potenziale dell'installazione di GSHP nei centri urbani.

5. VALUTAZIONE AMBIENTALE, ENERGETICA ED ECONOMICA

5.1. Definizione degli edifici di riferimento mono e multiutenza (geometrie e materiali) come base per le analisi energetiche ed economiche

5.1.1. Definizione dei tipi di edificio

Poiché il progetto GEO4CIVHIC mira a rimuovere le barriere e ad aumentare il mercato delle pompe di calore nell'efficientamento di edifici in ambienti urbani³, è stata avviata un'analisi degli spazi tipici dei centri urbani, per definire le dimensioni standard di cortili o giardini. Per ampliare il potenziale applicativo di questo progetto, è importante definire archetipi all'interno degli ambienti urbani, consentendo una migliore valutazione delle barriere e proponendo soluzioni per l'ambiente costruito. L'obiettivo principale degli archetipi di edifici è quello di rappresentare le tipologie

³ <http://geo4civhic.eu/>

più comuni di edifici nelle aree urbane d'Europa per stimare il livello di ammodernamento che può essere applicato (superficiale e profondo) relativo all'involucro e/o ai sistemi di riscaldamento, ventilazione e condizionamento (HVAC).

Il primo passo è stato l'analisi della letteratura esistente sul settore edilizio per stimare la domanda media di energia degli edifici esistenti in Europa, che varia da 20 kWh/(m² anno) a 200 kWh/(m² anno) a seconda del clima. Poiché il 40% degli edifici esistenti risale al periodo precedente al 1960, il patrimonio edilizio europeo rappresenta un grande potenziale di risparmio energetico e, considerando il periodo tipico di costruzione, è necessario fornire una definizione adeguata di storico e non storico. Esistono due norme che cercano di definire gli edifici storici: La EN 16883 (2016), che sottolinea la differenza tra edificio storico e edificio di importanza patrimoniale, e la EN 15898 (2019), che afferma che un edificio storico non deve necessariamente essere designato come patrimonio culturale perché è una forma specifica di oggetto. In generale, un edificio con più di 50-70 anni di vita è considerato storico anche se non è particolarmente o significativamente importante dal punto di vista architettonico. Al contrario, gli edifici esistenti non sono né storici né edifici di rilevanza patrimoniale. Pertanto, il criterio utilizzato farà riferimento agli edifici *storici* per quelli costruiti prima del 1960 e agli edifici *esistenti* se costruiti dopo il 1960 (per ulteriori informazioni sugli edifici storici, consultare il volume 7 del presente Manuale di formazione).

Una seconda suddivisione è legata all'uso degli edifici, che negli ambienti urbani sono principalmente residenziali o commerciali. Inoltre, è stato preso in considerazione anche il numero di utenti, per cui si è deciso di considerare due possibili casi: un edificio multiutente (ad esempio, un condominio) e un edificio monoutente (ad esempio, una casa monofamiliare o una casa indipendente).

Infine, gli emettitori devono essere considerati in maniera adeguata, poiché il progetto propone soluzioni GSHP eventualmente combinate con pompe di calore reversibili aria-acqua; quindi i livelli di temperatura a cui opera l'acqua nell'edificio devono essere efficienti.

In conclusione, le condizioni climatiche devono essere scelte in modo da coprire la maggior parte delle condizioni climatiche in Europa. Per fare ciò, i risultati del progetto precedente (De Carli, Bernardi et al., 2018) sono stati considerati come punto di partenza per i vari climi. È stata impostata un'analisi statistica tra le condizioni climatiche, identificando come climi rappresentativi quelli utilizzati nell'efficienza stagionale standardizzata delle pompe di calore della norma EN 14825 (2019), ossia Atene (clima caldo), Strasburgo (clima mite), Helsinki (clima freddo).

5.1.2. Definizione degli archetipi

Le tipologie di edifici sono diverse a causa dell'età di costruzione e del possibile utilizzo nel contesto urbano, e la maggior parte di essi è stata costruita prima di qualsiasi regolamentazione o restrizione sul consumo energetico degli edifici.

Sono stati presi in considerazione due database di edifici di riferimento per l'analisi dello stato dell'arte degli edifici europei. Il primo si basa sull'azione COST TU0901 (Rasmussen e Machimbarrena, 2014), mentre il secondo progetto che raccoglie le tipologie di edifici esistenti in tutta Europa è il progetto europeo TABULA - EPISCOPE⁴ dove è stato creato un database dei consumi tipici degli edifici (Ballarini e Corgnati 2014).

Sono stati considerati diversi parametri, come i valori U dell'involucro opaco e delle finestre, il rapporto S/V, il rapporto superficie vetrata/superficie calpestabile. L'obiettivo principale dell'analisi è stato la definizione e la valutazione di archetipi di edifici aggiornati, in base al patrimonio edilizio europeo in un contesto urbano per utilizzare e dimensionare correttamente le sonde geotermiche. Considerando l'ambiente urbano, l'analisi ha mostrato che i principali rappresentanti sono gli edifici lineari, che possono essere suddivisi in due archetipi principali in tutte le località rappresentative considerate per i climi: il condominio e la casa a schiera.

È stata effettuata un'analisi statistica, tenendo conto delle principali caratteristiche degli edifici (geometria e proprietà termiche dell'involucro), raggruppando i dati di TABULA nelle macroaree climatiche, ovvero clima caldo (Cfa e Csa come scala Köppen-Geiger), mite (Cfb) e freddo (Dfb). In questo modo, sono stati stimati i valori medi delle principali caratteristiche geometriche, come mostrato in Table 5-1. Le geometrie degli edifici sono presentate anche in Figure 5-1 e Figura 5-2.

⁴ Institut Wohnen und Umwelt, Sito web congiunto di EPISCOPE e TABULA, 2016 (<https://episcopes.eu/>).

Table 5-1. Caratteristiche principali della geometria dell'edificio

	Condominio		Casa terrazzata	
	Storico	Esistente	Storico	Esistente
Numero di piani	5	5	3	3
Altezza [m]	3.15	2.5	3.15	2.5
Rapporto finestra/parete	22%	19%	22%	19%
S/V [m]⁻¹	0.56	0.56	0.9	0.97



Figure 5-1. Planimetria generale per il condominio multiutente



Figura 5-2. Planimetria della casa unifamiliare a schiera

5.2. Analisi costi-benefici per le soluzioni ottimizzate utilizzate nei sistemi multi-sorgente

L'installazione di un impianto fotovoltaico richiede un investimento iniziale di 5500 €⁵ (senza IVA inclusa nel prezzo) in media, considerando le quattro città. Questo valore considera l'installazione dei pannelli fotovoltaici, l'inverter, i cavi, il sistema di ancoraggio al tetto e tutti i costi di supporto e installazione. L'analisi dei costi si basa sul tempo di ritorno dell'investimento, ovvero il numero di anni dopo i quali il beneficio economico della nuova soluzione rispetto a quella tradizionale raggiunge il costo dell'investimento iniziale. Più lungo è il tempo di ammortamento, meno interessante è la soluzione fotovoltaica.

Prima di passare a ulteriori considerazioni dettagliate, è importante notare che i calcoli del tempo di ritorno considerano solo i carichi elettrici della GSHP. Pertanto, i risultati saranno molto più bassi se si considera l'intero consumo di

⁵ Questa somma proviene da un preventivo di un'azienda italiana, che prevede i costi dei pannelli fotovoltaici, dell'inverter, della batteria e tutti i costi relativi alla fase di assistenza e installazione.

elettricità. Il costo medio dell'energia prelevata dalla rete per questi Paesi è di 0.189 €/kWh⁶. Il risparmio ottenuto utilizzando l'impianto fotovoltaico è descritto dall'indice di autoconsumo che impedisce all'utente di acquistare energia elettrica. Il tempo di ritorno dell'investimento per Helsinki è il più alto (25.7 anni senza batteria e 23.4 anni con una batteria). Ciò è dovuto al livello più basso di autoconsumo di energia. Una volta installata la batteria, a fronte di un investimento iniziale di 2000€⁵, il tempo di ritorno diminuisce in tutte le città. Ciò significa che, nel migliore dei casi, dopo 15 anni dall'installazione, tutti i costi vengono recuperati. Il tempo di ritorno dell'investimento in anni per le quattro simulazioni è presentato in Table 5-2.

Table 5-2. Tempo di ritorno dell'investimento in anni per le quattro simulazioni, considerando le soluzioni PV e PV + batteria, rispetto all'opzione tradizionale, senza installazione di PV

	Nessun PV vs PV (anni)	Nessun PV vs PV + batteria (anni)
Atene	19.9	14.9
Strasburgo	20.9	18.1
Bilbao	19.8	16.1
Helsinki	25.7	23.4

Le norme sulla compensazione dell'energia elettrica immessa o prelevata dalla rete variano da un Paese all'altro dell'UE. In alcuni Paesi, le norme sull'uso della rete elettrica consentono di utilizzare la rete come batteria a un determinato costo (ad esempio, nei Paesi Bassi e, fino al 2020, anche in Belgio). In altri Paesi, come l'Italia, le norme sullo "scambio sul posto" sono per certi aspetti maggiormente interessanti considerando l'energia elettrica immessa in rete. Queste regole saranno ignorate nell'analisi che segue. Tuttavia, prima di installare impianti fotovoltaici con o senza batterie, è necessario valutare il ritorno economico dell'investimento tenendo conto delle normative locali. Pertanto, il tempo di ritorno dell'investimento potrebbe essere ancora più basso se nel calcolo si considera la remunerazione dell'energia venduta alla rete.

Per quanto riguarda le tecnologie solari termiche, l'analisi costi-benefici è stata effettuata in termini di benefici derivanti dalla riduzione del consumo di elettricità dei sistemi GEO4CIVHIC valutati:

- GSHP + collettori solari termici con serbatoio tampone standard
- GSHP + collettori solari termici con serbatoio d'accumulo da 500 litri
- GSHP + collettori solari termici con accumulo di energia termica in materiale a cambiamento di fase (PCM)

Rispetto a un sistema standard composto da pompe di calore aria-aria accoppiate a un sistema di riscaldamento ad acqua con resistenza elettrica. I benefici sono quantificati sia in termini di vantaggio economico, con tempi di ritorno dell'investimento, sia in termini di risparmio di energia primaria. Per l'analisi sono stati utilizzati i prezzi dell'elettricità e i fattori di conversione dell'energia primaria in elettricità (PEF) forniti da Eurostat, come indicato nella tabella seguente.

Tabella 5-3. Fattori di conversione dell'energia primaria in energia elettrica (PEF) e prezzi dell'energia elettrica nei casi considerati

	Atene	Bilbao	Strasburgo	Helsinki
PEF, kWh-th/kWh-e	2.18	2.24	2.83	2.02
prezzo dell'elettricità, €/kWh	0.1681	0.2239	0.1899	0.174

L'installazione di GSHP in GEO4CIVHIC accoppiato al 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

⁶ Server Eurostat:

https://ec.europa.eu/eurostat/cache/infographs/energy_prices/enprices.html?geos=&product=6000&consumer=HOUS_EHOLD&consoms=4161903&unit=KWH&taxs=I_TAX,X_TAX,X_VAT&nrg_prc=NETC,NRG_SUP,OTH,TAX_C AP,TAX_ENV,TAX_NUC,TAX_RNW,VAT¤cy=EUR&language=EN&detail=0&component=0&order=DESC&dataset=nrg_pc_204&time=2020S1&modalOption=0&chartOption=0&precision=1&modalOpen=0&modal=0

importanti, con tempi di ritorno dell'investimento che variano tra i 17 e i 30 anni a seconda del tipo di edificio, dell'isolamento dell'involucro e del clima.

Nei sistemi considerati, in cui non vi è alcun fabbisogno di riscaldamento, raffreddamento o acqua calda sanitaria durante le ore notturne e si ipotizza una tariffa elettrica unica, i benefici derivanti dall'aggiunta di un accumulo di energia termica, sia sotto forma di serbatoio d'acqua da 500 litri che di PCM, sono molto limitati.

Nel caso delle pompe di calore aria-acqua, dai risultati ottenuti dalle simulazioni sull'accoppiamento della pompa di calore a terra con la pompa di calore aria-acqua, si sono ottenuti i seguenti risultati:

- L'utilizzo del suolo come sorgente termica migliora i risparmi energetici (e quindi economici) dal 5% al 15%, a seconda dello scenario. Nei climi più rigidi (Helsinki, Strasburgo) i benefici sono maggiori rispetto ai climi più moderati (Bilbao).
- L'utilizzo di una strategia ibrida (sorgente ad aria e sorgente geotermica) produce un piccolo miglioramento delle prestazioni energetiche (e quindi un risparmio economico), ma va tenuto presente che il grande vantaggio economico di questa opzione risiede nel fatto che, utilizzando l'aria come sorgente, il campo di sonde geotermiche può essere ridotto fino al 40%, riducendo drasticamente i costi di perforazione e quindi l'investimento dell'impianto.

Tuttavia, è necessario esplorare ulteriori strategie avanzate di controllo.

Nel caso dei sistemi solari termici, l'analisi dei costi effettuata si è basata sull'energia risparmiata confrontando l'impianto con e senza l'applicazione dei sistemi PVT (integrazione di termico e elettrico). Il costo medio dell'energia prelevata dalla rete è lo stesso utilizzato per i calcoli del fotovoltaico (fonte: Eurostat), poiché il contributo energetico del PVT è stato convertito in energia elettrica.

La frazione di energia coperta dal sistema PVT corrisponde anche al risparmio economico rispetto alla soluzione senza sistema PVT. Atene ha la copertura più elevata. Infatti, su base temporale, l'energia prodotta dal PVT corrisponde all'energia richiesta dalla pompa di calore per un numero maggiore di intervalli.

Le soluzioni di riqualifica in generale hanno risparmi energetici inferiori a causa della minore domanda di energia legata agli interventi di riqualifica applicati all'involucro, quindi la minore probabilità di eguagliare l'energia prodotta nello stesso intervallo di tempo.

L'energia elettrica richiesta dalle apparecchiature interne non è stata considerata in prima approssimazione; pertanto, è possibile effettuare ulteriori analisi per stimare la potenziale maggiore frazione di energia che deve essere coperta.

5.3. Attività di valutazione del mercato e modelli di innovazione aziendale per ogni soluzione e tipologia di edificio

Nel presente rapporto è stato effettuato uno studio dei costi dei diversi archetipi per i livelli di efficientamento, i climi e i sottosuoli. I diversi partner tecnici hanno fornito i costi nazionali relativi a ciascuna voce, come i materiali e l'installazione, nonché i costi operativi e di manutenzione. Il costo dell'energia considera il consumo energetico dell'edificio (gas e/o elettricità) e i relativi prezzi sono tratti da Eurostat 2018.

Il costo di esercizio rappresenta il funzionamento e la manutenzione dei sistemi. D'altro canto, il costo una tantum comprende i costi di implementazione della tecnologia in ogni diverso edificio studiato (ad esempio, perforazione, materiali, pompe di calore, ecc.).

Per questo studio sui costi, abbiamo incluso considerazioni iniziali sull'analisi costi-benefici sotto forma di formule di valore attuale netto (NPV in inglese) utilizzando i dati sui costi e sui risparmi ottenuti dai partner e la formula e l'approccio teorico seguenti:

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{\Delta E_t}{(1+r)^t} - (I_0 + \sum_j \frac{C_m}{(1+r)^j} + \sum_j \frac{C_r}{(1+r)^j}) \quad [9]$$

All'interno di questa formula, i seguenti KPI e indicatori possono influenzare il NPV e aiutarci a comprendere le dinamiche in gioco tra i risultati dell'analisi costi-benefici (CBA) e le soluzioni utilizzate, le tipologie di edifici e le tendenze macroeconomiche specifiche del Paese, come i prezzi dell'energia.

- KPI relativi ai benefici:

$\Delta E_t =$ Guadagno energetico annuo in termini monetari (a seconda dei prezzi dell'energia,

prestazioni energetiche di soluzioni e tipologie di edifici)

$r =$ tassi di sconto (costo opportunità)

▪ KPI relativi ai costi:

$I_0 =$ Costo di investimento (CAPEX)

$C_m =$ Costo annuale di manutenzione (OPEX)

$C_r =$ costo di sostituzione (OPEX)

Poiché i costi annuali dell'energia risparmiata sono di gran lunga il parametro di costo annuale dominante, possiamo trascurare i costi annuali di manutenzione e sostituzione, pertanto la formula del NPV può essere ridotta alla seguente:

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{\Delta E_t}{(1+r)^t} - I_0 \quad [10]$$

I tassi di sconto saranno riflessi a diversi livelli attraverso i profili NPV o fissati a livelli specifici che riflettono almeno 2.5 volte il livello dei più alti tassi privi di rischio.

5.3.1. Analisi dei costi degli archetipi

I costi inclusi nell'analisi riguardano la riqualifica dell'involucro, dei sistemi di emissione e del sistema di generazione. Sono state considerate diverse soluzioni con la combinazione di possibili livelli di retrofit. Sono stati considerati i valori stimati dei costi operativi e di investimento.

Per quanto riguarda il sistema di generazione, la condizione esistente era una caldaia (con un'efficienza di generazione stagionale dell'85%) con soluzione di sistema a split. Sono state prese in considerazione due diverse opzioni di riqualifica: la soluzione tradizionale con caldaia a gas a condensazione e chiller aria-acqua, e una soluzione con GSHP o pompa di calore ibrida o bivalente, cioè una pompa di calore che può utilizzare l'acqua dei circuiti geotermici o l'aria come sorgente (in inverno) o come fonte (in estate). La soluzione ibrida può essere applicata sia quando lo spazio disponibile per la trivellazione non è sufficiente sia quando il carico termico stagionale nel terreno non è bilanciato. Figura 5-3 mostra i concetti dei tre casi per un edificio multiutente. L'analisi è stata condotta per l'edificio residenziale multiutente (AB, condominio), per l'edificio multiutente ad uso ufficio (OB, edificio ad uso ufficio) e per l'edificio ad uso singolo (TH, casa a schiera). L'analisi è stata effettuata sia per gli edifici esistenti (EX) che per quelli storici (hi). Come già detto, sono stati considerati tre climi di riferimento: Atene (C1), Strasburgo (C2) e Helsinki (C3).

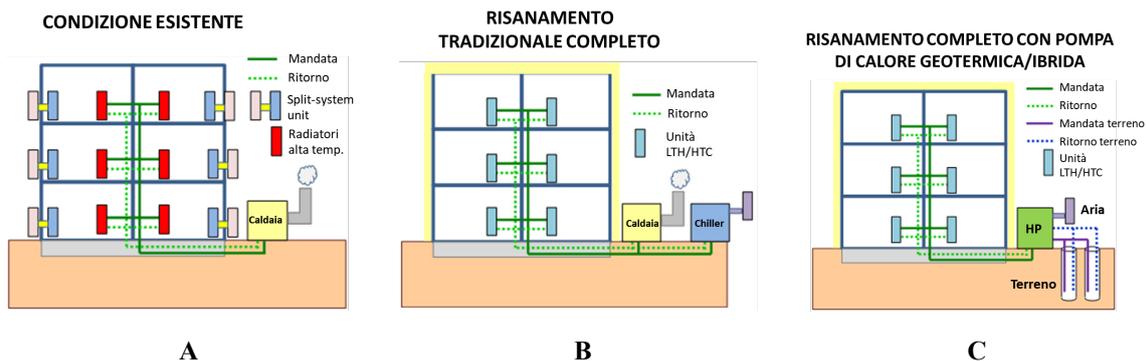


Figura 5-3. Casi analizzati: condizione esistente di base (A), soluzione standard per il deep retrofit (B), soluzione GSHP o ibrida per il deep retrofit (C).

I costi operativi dell'energia si riferiscono al mercato nazionale e ai costi relativi all'energia utilizzata per il riscaldamento e il raffreddamento degli edifici. Per l'energia termica i costi unitari per la Grecia sono 0.062 €/kWh_{th}, per la Germania 0.068 €/kWh_{th}, per la Finlandia 0.08 €/kWh_{th}. Per l'elettricità i costi unitari sono stati considerati pari a 0.16 €/kWh_e per la Grecia, 0.30 €/kWh_e per la Germania e 0.16 €/kWh_e per la Finlandia.

Il risultato di questa analisi è presentato nel seguente grafico (cfr. Figura 5-4) ("Trad" si riferisce al sistema tradizionale e "GSHP" al sistema GSHP):

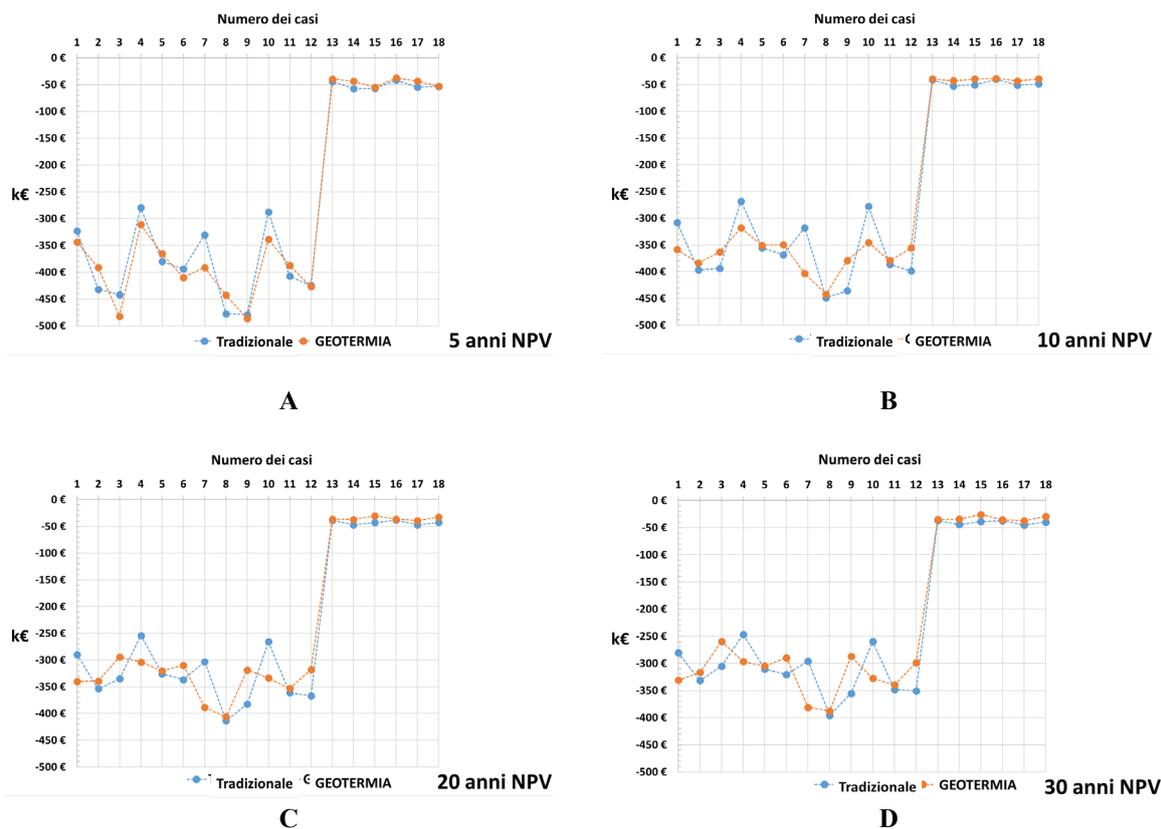


Figura 5-4. L'analisi dei costi dei diversi casi numerici per i vari tempi del NPV

Se esaminiamo i casi seguenti:

- Caso 2: Condominio, Edificio storico, Clima **medio**
- Caso 5: Condominio, Edificio esistente, Clima **medio**
- Caso 8: Condominio, edificio storico, clima **medio**
- Caso 11: Condominio, edificio esistente, clima **medio**

Si può notare che le implementazioni GSHP coinvolte hanno quasi la stessa redditività dei sistemi tradizionali per tutti i tempi del NPV e per tutti i casi.

Se ci concentriamo sui seguenti casi:

- Caso 3: Condominio, edificio storico, clima **freddo**
- Caso 6: Condominio, edificio esistente, clima **freddo**
- Caso 9: Condominio, edificio storico, clima **freddo**
- Caso 12: Condominio, edificio esistente, clima **freddo**

Si può notare che le soluzioni tradizionali considerate sono più redditizie dell'installazione di GSHP per un orizzonte temporale del NPV a 5 anni. Tuttavia, i NPV della pompa di calore GSHP sono sempre più vantaggiosi nell'arco temporale del NPV a 10 anni e oltre, risultando una soluzione più redditizia rispetto a quelle tradizionali coinvolte. Ciò può essere spiegato dal fatto che il minore investimento iniziale della soluzione tradizionale è compensato dai maggiori risparmi energetici/guadagni monetari della pompa di calore GSHP su orizzonti temporali di investimento più lunghi.

5.4. Impatto ambientale delle tecnologie GEO4CIVHIC nei siti dei casi studio

5.4.1. Introduzione

La valutazione dell'impatto ambientale (EIA) fornisce una valutazione sistematica degli impatti positivi e negativi di un progetto sull'ambiente naturale e umano. Gli obiettivi principali di una EIA sono:

- Identificare e/o prevedere gli impatti significativi di uno sviluppo;

- Identificare le misure di mitigazione da incorporare per eliminare o ridurre gli impatti;
- Interpretare e comunicare le informazioni di cui sopra sugli impatti dello sviluppo proposto, sia in termini tecnici che non tecnici;
- Assistere i responsabili e gli esperti tecnici coinvolti nello sviluppo e nell'autorizzazione dei progetti ad attuare misure di mitigazione adeguate per ridurre al minimo gli impatti potenziali identificati.

Nell'ambito dei progetti Cheap-GSHPs (Di Tuccio, 2018) e GEO4CIVHIC (Pasquali, 2022) è stata sviluppata e implementata una metodologia di EIA a schema ridotto per valutare gli impatti dell'installazione (fase di costruzione) e dell'esercizio (fase operativa) delle tecnologie utilizzate per l'installazione di sistemi GSHP negli edifici, sia nel contesto del retrofit di edifici che in quello di edifici storici in siti reali di studio. Il contesto della metodologia comune applicata è presentato nelle sezioni di questo volume e i risultati sono illustrati nel volume 6 (Pasquali, 2022).

5.4.2. Metodologia

L'ambito di applicazione della metodologia per la EIA per la valutazione degli impatti della progettazione, dell'installazione e del funzionamento dei sistemi GHSP si basa sulle forti somiglianze tra i metodi di installazione utilizzati nei siti reali dei casi studio in cui sono state implementate le tecnologie del progetto. La metodologia è stata sviluppata come modello per la valutazione dei potenziali impatti derivanti dalle opere associate all'installazione dei sistemi GSHP e si concentra sui seguenti aspetti:

- L'uso e la somiglianza dei metodi di perforazione per la costruzione e il completamento del campo di sonde geotermiche;
- L'entità e la portata delle misure di ristrutturazione dell'edificio e di efficientamento implementate nell'ambito dell'efficientamento dell'edificio;
- Il profilo operativo a lungo termine delle tecnologie a pompa di calore impiegate per soddisfare la domanda di energia dei progetti realizzati.

L'obiettivo della metodologia è quello di affrontare gli argomenti chiave definiti dalla direttiva EIA (2014/52/UE), che comprendono una sintesi e una descrizione del progetto, l'ambiente geologico e idrogeologico, la qualità dell'aria e gli aspetti climatici, il traffico e i trasporti, il rumore e le vibrazioni, nonché l'impatto paesaggistico e visivo. Nel contesto dei progetti GHSP attuati nell'ambito di entrambi i progetti e delle analogie relative all'applicazione dei metodi di perforazione e delle tecnologie a pompa di calore implementate, è stato sviluppato un approccio comune al processo di EIA, alla valutazione degli impatti per ciascun argomento e alla definizione di eventuali misure di mitigazione applicabili necessarie per ridurre al minimo tali impatti. La Tabella 5-4 mostra l'approccio adottato nell'ambito dei progetti in relazione a questi temi.

Tabella 5-4. Schema della metodologia di EIA per un sito di studio che mostra gli argomenti chiave considerati come parte della valutazione e il livello di valutazione richiesto per implementare una EIA per progetti GSHP

Titolo del capitolo	Capitolo Tipo	Schema del metodo di valutazione EIA
Sintesi del sito di studio	Sito specifico	Desktop
Descrizione del progetto	Sito specifico	Desktop
Suoli e geologia	Sito specifico	Desktop
Idrologia e idrogeologia	Sito specifico	Desktop
Qualità dell'aria e clima	Comune	Desktop
Traffico e trasporti	Comune	Desktop
Rumore e vibrazioni	Comune	Misurazione
Paesaggio e vista	Comune	Desktop

Il processo di analisi iniziale per la EIA dei progetti GSHP è incentrato sullo sviluppo di un elenco dei rischi specifico per il progetto che consideri i rischi associati alla progettazione, alla costruzione e al funzionamento a lungo termine del sistema. L'elenco dei rischi ha lo scopo di consentire agli stakeholder tecnici e non tecnici del progetto di implementare un documento di lavoro in tempo reale per identificare e tenere traccia dei rischi del progetto, definire misure di mitigazione adeguate da attuare durante le fasi di sviluppo e di funzionamento dei sistemi GSHP. L'elenco dei rischi consente inoltre di valutare l'efficacia delle misure di controllo per ridurre al minimo i rischi da implementare e ridurre al minimo quelli complessivi del progetto. La Figura 5-5 mostra la matrice di valutazione dei rischi che può essere applicata quando si effettua la valutazione. Un esempio di elenco specifico per il progetto è illustrato in Figura 5-6.

Matrice di valutazione		Conseguenza					
		Trascurabile (1)	Minore (2)	Moderato (3)	Maggiore (4)	Catastrofico (5)	
	Persone	Trattamento locale con breve recupero - lievi effetti sulla salute a breve termine.	Necessario trattamento medico o effetti acuti a breve termine sulla salute.	Infortuni per perdita di tempo (con necessità di recupero dal lavoro) o problemi di salute a breve/medio termine.	Lesioni gravi o problemi di salute cronici.	Singolo decesso o invalidità permanente.	
	Ambiente	Rilascio in loco, contenibile con danni minimi. Solo impatto localizzato.	Rilascio importante in loco con alcuni danni, nessun danno al di fuori del sito. Impatti numerosi e/o diffusi ma su scala ridotta su energia e rifiuti. Bonifica in termini di giorni...	Rilascio fuori sito, nessun danno ambientale significativo. Risanamento in termini di settimane.	Rilascio importante fuori sito, danno ambientale a breve e medio termine. Risanamento in termini di mesi.	Rilascio importante fuori dal sito, danno ambientale a lungo termine. Risanamento in termini di anni.	
	Altri	Preoccupazione per la forza lavoro	Interesse della comunità locale	Preoccupazione regionale	Perdita di reputazione diffusa per una singola unità aziendale, proteste diffuse da parte della comunità.	Perdita di reputazione diffusa per più di un'unità aziendale, estrema protesta della comunità a livello nazionale.	
Determinare la probabilità	5	Quasi certo	Medio	Alto	Molto alto	Molto alto	Molto alto
	4	Probabile	Medio	Medio	Alto	Molto alto	Molto alto
	3	Possibile	Basso	Medio	Medio	Alto	Molto alto
	2	Improbabile	Basso	Basso	Medio	Medio	Alto
	1	Raro	Basso	Basso	Basso	Medio	Medio

Figura 5-5. Matrice di valutazione del rischio utilizzata per l'implementazione della metodologia di massima per la EIA

Risk Assessment		Project				Risk Assessment Title				Date:		Page:											
		GEO4CIVHIC				Greystones Real Case Study Site RAMS				29/09/2019		1 of 1											
		Greystones, Co. Wicklow				Prepared By: RP				Date of Works: TBC													
		GS 0070				Checked By: RP				Revision: C													
Detail of Works		First Name		Surname		Company		Contractor		Subcontractor		Contact No.		Initials		Role							
Drilling of 2 No. GHEs using Hydra-TKI								<input type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/> No		<input type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/> No													
Method								<input type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/> No		<input type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/> No													
Installation of Collector Probes Testing								<input type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/> No		<input type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/> No													
Trenching and surface Groundworks								<input type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/> No		<input type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/> No													
Heat Pump - Monitoring System & Operation								<input type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/> No		<input type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/> No													
Hazard		Risk Targets		Severity of harm		Likelihood		Initial Risk Level		Proposed Mitigation Measure		Severity of harm		Likelihood		Residual Risk Level		Responsible		Comments / References		Briefing Required	
Project Phase		Pers		Envir		Others		VH		H		M		L		VH		H		M		L	
Slips, Trips & Falls		x		x		x		3		4		x		x		x		Project Manager					
Infection /dermatitis from direct contact with waste		x		x		x		4		3		x		x		x		Project Manager					
Airborne Drilling Material in Contact With Eyes		x		x		x		3		3		x		x		x		Project Manager					
Hearing Damage from Proximity of Operating Machinery		x		x		x		3		4		x		x		x		Project Manager					
Borehole Location & Obstructions		x		x		x		2		3		x		x		x		Project Manager					
Compressed Air		x		x		x		3		4		x		x		x		Project Manager					
Vibration resulting in damage		x		x		x		3		3		x		x		x		Project Manager					
Working in Trenches		x		x		x		3		4		x		x		x		Project Manager					
Oil/Fuel Spill		x		x		x		2		3		x		x		x		Project Manager					
Electrocution - outdoor monitoring system		x		x		x		5		3		x		x		x		Project Manager					
Reduced HP performance from ground collector		x		x		x		4		3		x		x		x		Project Manager					
Waste disposal and Groundwater		x		x		x		4		2		x		x		x		Project Manager					

Figura 5-6. Esempio di elenco dei rischi in tempo reale per valutare il livello di rischio e l'implementazione di misure di mitigazione adeguate nell'ambito dello sviluppo del sistema GHSP presso il sito di studio di Greystones (Irlanda). Rischi generali per la salute e la sicurezza (giallo), operazioni di perforazione e installazione di GHE (verde), installazione meccanica ed elettrica (viola), fase operativa del sistema (arancione)

5.4.3. Identificazione dei recettori

Il processo prevede considerazioni specifiche sul sito nella fase di screening e di valutazione della EIA. Nelle fasi iniziali, i lavori e l'implementazione del progetto proposto vengono utilizzati per identificare i recettori locali dell'area in cui viene realizzata l'installazione della pompa di calore. I recettori includono tipicamente gli ecosistemi vicini, i singoli recettori negli edifici e le comunità adiacenti ai siti di installazione del progetto.

Metodologia di valutazione

Dopo l'identificazione della fase di screening iniziale in un sito di progetto, le condizioni di base dell'ambiente ricevente sono valutate nel contesto dei temi della EIA (cfr. Tabella 5-4).

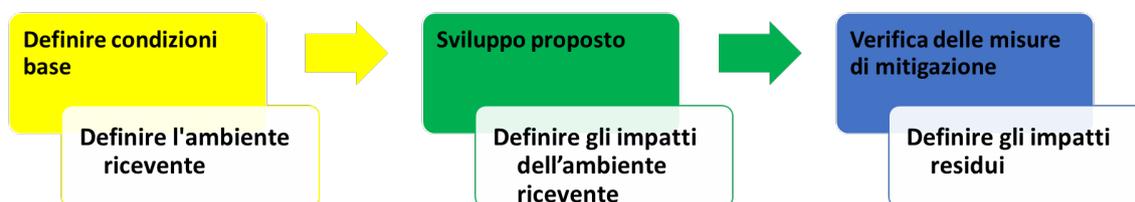


Figura 5-7. Flusso di lavoro della valutazione d'impatto della EIA che mostra la determinazione delle condizioni di base locali, l'esecuzione di misurazioni sul campo per definire gli impatti e la determinazione di eventuali impatti residui

Le fasi di sviluppo e di attuazione proposte vengono quindi valutate dopo l'introduzione delle misure di controllo. Gli impatti effettivi del progetto vengono quindi misurati attraverso misure sul campo per gli aspetti critici identificati come potenzialmente impattanti (vedi Figura 5-7). Ad esempio, per la fase di costruzione, sono state effettuate misurazioni del rumore e delle vibrazioni associate alle operazioni di perforazione e costruzione, lo sviluppo di modelli grafici che mostrano la posizione delle attrezzature dell'impianto finale nella fase operativa del progetto e l'impatto che queste possono avere sul paesaggio visivo locale e sulle percezioni visive dei recettori vicini.

5.4.4. Impatto residuo e raccomandazioni

La parte finale della valutazione si concentra sulla determinazione degli impatti residui che probabilmente saranno presenti in seguito all'implementazione di un progetto. Ad esempio, i dati di monitoraggio a lungo termine della fase operativa dei sistemi GSHP dimostrano lo scambio di energia con il terreno dal campo di BHE e la valutazione del probabile (eventuale) impatto che questo può avere sulle temperature del sottosuolo sulle condizioni geologiche e idrogeologiche di base. Un altro esempio è la dimostrazione dell'impatto positivo sulla qualità dell'aria derivante dal funzionamento del sistema GSHP, che in genere si traduce in una riduzione delle emissioni di CO₂ grazie alla sostituzione delle precedenti tecnologie a combustibile fossile.

6. ESERCIZIO / TEST

6.1. Caratteristiche termiche degli edifici

È stata effettuata un'analisi degli involucri tra le diverse tipologie di edifici e l'età in funzione del clima. I dati delle costruzioni e le relative caratteristiche termiche sono stati considerati tenendo conto del clima e di tecniche costruttive simili. Di conseguenza, i valori di riferimento per gli edifici esistenti e per quelli storici sono riportati nella Tabella 6-1 verificando che, allo stato attuale, più il clima è freddo più la trasmittanza è bassa.

Poiché l'obiettivo del progetto è quello di esaminare le possibilità di riqualifica degli edifici, è stata condotta un'analisi basata sugli attuali valori limite locali per i valori U dell'involucro (superfici opache e vetrate) nei diversi Paesi.

Tabella 6-1. Valori U medi basati sull'analisi statistica del database TABULA

Tipo edificio	di	Età	Clima	Tetto			Muri		Piano	Finestre
				[W/(m ² K)]						
Casa a schiera	esistente		caldo	1.65	0.89	1.36			3.55	
			mite	0.70	1.05	1.01			2.85	
			freddo	0.29	0.35	0.41			2.35	
	storico		caldo	2.30	1.75	1.29			4.97	
			mite	1.19	1.75	1.38			3.69	
			freddo	0.54	1.11	0.79			2.72	
Condominio	esistente		caldo	0.79	0.79	1.15			3.90	
			mite	0.82	1.01	0.68			2.93	
			freddo	0.13	0.22	0.16			1.43	
	storico		caldo	1.76	1.35	1.07			5.19	
			mite	1.80	1.81	0.95			3.41	
			freddo	0.32	0.59	0.66			2.50	

6.2. Simulazioni energetiche

I due archetipi sono stati quindi considerati come edifici esistenti e come edifici storici. L'edificio multiutente (condominio) è stato considerato sia come edificio residenziale che come edificio per uffici, mentre la casa a schiera solo come edificio residenziale. Nel caso dell'edificio residenziale il riscaldamento è stato considerato acceso per 13 ore al giorno per tutti i giorni, mentre il funzionamento degli uffici è stato considerato per 10 ore, senza funzionamento nei fine settimana.

I guadagni termici sensibili sono stati ipotizzati secondo la norma EN ISO 13790 (2008) considerando un'occupazione media di 3 persone nelle abitazioni e una combinazione di elettrodomestici che differisce dal caso residenziale a quello degli uffici. I carichi latenti sono stati definiti secondo la norma ASHRAE 90.1 (2019) che definisce come contributo al guadagno interno la presenza di persone negli uffici, mentre negli edifici residenziali è la combinazione di persone e attività tipiche della casa.

Il valore per i tassi di infiltrazione è stato fissato pari a 0.4 ACH in tutti i modelli di edifici esistenti e storici, mentre nei casi di ristrutturazione il tasso di infiltrazione è stato fissato a 0.1 ACH per via della migliore tenuta dell'involucro degli edifici dovuta all'installazione di nuove finestre. Nel caso di soluzioni di riqualifica, le portate di ventilazione meccanica sono state definite in base alla norma EN 16798 (2019).

Quindi per i condomini sono stati considerati due casi (residenziale e non) per quattro tipi di involucri edilizi, cioè 8 casi. Per la casa a schiera, è stato considerato solo l'edificio residenziale con quattro tipi di involucri edilizi, cioè 4 casi. Complessivamente sono stati esaminati 12 casi per le 3 località, per un totale di 36 casi. Per determinare la potenza di picco per il riscaldamento è stato applicato il metodo di calcolo allo stato stazionario EN12831 (2018), mentre per ottenere il carico di picco per il raffrescamento e il fabbisogno energetico per il riscaldamento e il raffrescamento sono state effettuate simulazioni dinamiche con il software TRNSYS⁷.

6.3. Risultati

I risultati sono mostrati per i tre climi di Atene (Figura 6-1) Strasburgo (Figura 6-2) e Helsinki (Figura 6-3). In tutti i casi, l'energia di raffreddamento è stata calcolata considerando sia il carico sensibile che quello latente.

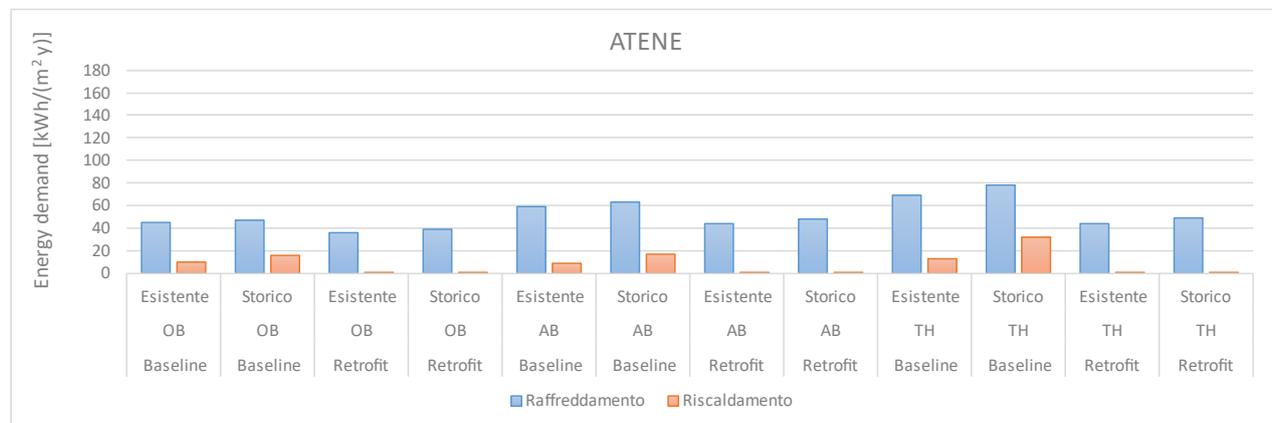


Figura 6-1. Domanda di energia per riscaldamento e raffreddamento ad Atene

⁷ <https://www.trnsys.com/>

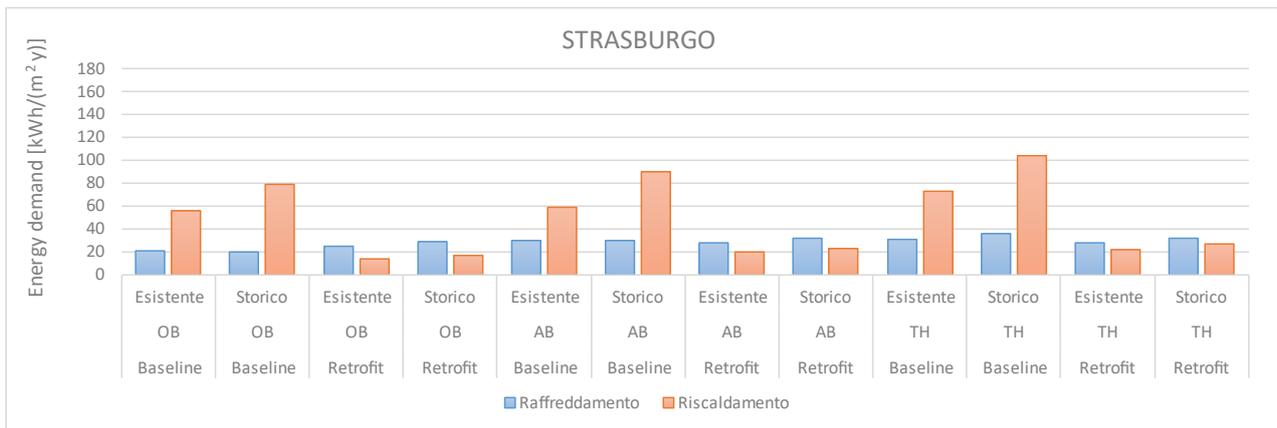


Figura 6-2. Domanda di energia per riscaldamento e raffreddamento ad Strasburgo



Figura 6-3. Domanda di energia per riscaldamento e raffreddamento ad Helsinki

Come prevedibile, il fabbisogno energetico degli edifici adibiti a uffici è inferiore a quello degli edifici residenziali, a causa del maggior numero di ore di funzionamento del sistema di riscaldamento/raffreddamento.

Nei casi di riferimento (cioè nel caso in cui la trasmittanza degli edifici sia quella riportata nella (Tabella 6-1)), ad eccezione di Atene, nei climi miti e freddi, la domanda di energia per il riscaldamento degli edifici è dominante. Al contrario, quando gli edifici vengono risanati a Strasburgo, la domanda di energia per il riscaldamento e il raffreddamento sono simili. Questo è importante perché la condizione più critica per il dimensionamento delle sonde geotermiche potrebbe essere l'estate, poiché nel periodo di raffreddamento l'energia che deve essere fornita al terreno deve considerare l'energia del compressore. Al contrario, in condizioni di riscaldamento, l'energia estratta dal terreno è l'energia dell'edificio meno l'energia del compressore. Per mantenere costante l'efficienza complessiva del sistema, il calore immesso nel terreno durante la stagione di raffreddamento deve bilanciare il calore estratto dal terreno durante la stagione di riscaldamento, evitando la deriva termica.

Il fabbisogno energetico specifico delle case a schiera è superiore a quello dei condomini a causa delle elevate perdite degli edifici; infatti, il rapporto superficie/volume (S/V) è di 0.97 m^{-1} nel caso delle case a schiera e di 0.56 m^{-1} nel caso dei condomini. Confrontando il fabbisogno energetico degli edifici allo stato attuale con quello degli edifici ristrutturati, i grafici ottenuti mostrano il grande potenziale di risparmio energetico in Europa, scalando i risultati a città con climi simili.

7. CONCLUSIONI

I principali risultati del volume 5 del manuale di formazione del progetto GEO4CIVHIC sono riportati di seguito:

I tre criteri in grado di ridurre l'interferenza termica tra impianti geotermici vicini con sonde geotermiche sono i seguenti:

- Se i campi di sonde sono più vicini di meno del 50% della lunghezza della perforazione (distanza calcolata come il punto più vicino tra le sonde), è ancora possibile ottenere qualche effetto termico negativo tra gli stessi. Si raccomanda di fissare delle distanze minime tra i sistemi geotermici oltre le quali valutare le interferenze termiche.
- Durante la fase di dimensionamento, aumentare correttamente la temperatura minima del fluido per anticipare gli effetti a lungo termine dei sistemi vicini. Questo può essere fatto aumentando la lunghezza totale della perforazione.
- Limitare l'estrazione annuale della risorsa geotermica per ogni impianto. Questo può essere fatto ricaricando annualmente il terreno, riducendo così l'estrazione annuale di calore.

Naturalmente, tutte le possibilità possono essere implementate contemporaneamente e combinate, facendo attenzione a mantenere lo stesso risultato desiderato e ottimale.

L'applicazione della metodologia C2RLS al pozzo di prova GEO4CIVHIC offre ulteriori informazioni e approfondimenti sulle caratteristiche dei materiali sviluppati nell'ambito del progetto e nuove linee di pensiero sui futuri miglioramenti dei metodi di valutazione TRT standard.

Lo strumento DSS di GEO4CIVHIC, che è uno strumento basato on-line volto ad accelerare l'adozione di misure di riqualifica geotermica in ambienti urbani, è stato applicato per un'analisi dei costi e dell'impatto pre-ingegneristico per convincere i proprietari di edifici a installare sistemi GSHP e per facilitare la discussione pre-progettuale sull'installazione di una GSHP in un progetto di riqualifica. Inoltre, i responsabili delle decisioni possono comprendere i vantaggi di un investimento in impianti di riscaldamento a pavimento e, d'altro lato, gli esperti di impianti di riscaldamento a pavimento possono proporre progetti con questa tecnologia.

Grazie ai risultati della valutazione di un sistema GSHP, sono stati definiti due fattori, SCOP e SEER, che forniscono le prestazioni di una pompa di calore reversibile durante il funzionamento invernale (misurato con SCOP) ed estivo (misurato con SEER).

L'utilizzo di una tecnologia ibrida (sorgente ad aria e sorgente geotermica) aumenta leggermente il rendimento energetico (e quindi il risparmio economico). Tuttavia, il grande vantaggio economico di questa opzione risiede nel fatto che, utilizzando l'aria come sorgente, l'installazione del campo di sonde geotermiche può essere ridotta fino al 40%, riducendo drasticamente i costi di perforazione e quindi l'investimento dell'impianto. Molte strategie possono essere adottate in base al clima, all'uso finale e alla domanda energetica dell'edificio, che è legata all'anno di costruzione o alle azioni di riqualifica applicate. Inoltre, l'utilizzo del terreno come fonte migliora il risparmio energetico (e quindi economico) dal 5% al 15%, a seconda dello scenario.

Si è concluso che le soluzioni tradizionali coinvolte sono più redditizie dell'installazione della pompa di calore GSHP su un orizzonte temporale per il NPV di 5 anni. Tuttavia, il NPV per la pompa di calore geotermica sono sempre più vantaggiosi sull'arco temporale per il NPV da 10 anni e oltre, risultando una soluzione più redditizia rispetto a quelle tradizionali coinvolte. Ciò può essere spiegato dal fatto che il minore investimento iniziale della soluzione tradizionale è compensato dai maggiori risparmi energetici/guadagni monetari della pompa di calore GSHP su orizzonti temporali di investimento più lunghi.

I dati di monitoraggio a lungo termine della fase operativa dei sistemi GSHP hanno dimostrato l'impatto che può avere lo scambio di energia con il terreno dal campo di sonde geotermiche, e la valutazione del probabile (eventuale) sulle temperature del sottosuolo e sulle condizioni geologiche e idrogeologiche di base. Al contrario, è stato riscontrato un impatto positivo sulla qualità dell'aria derivante dal funzionamento del sistema GSHP, che in genere si traduce in una riduzione delle emissioni di CO₂ grazie alla sostituzione delle precedenti tecnologie a combustibile fossile.

RIFERIMENTI

1. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1: Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings, 2019.
2. Ballarini, Ilaria, Stefano Paolo Corgnati, and Vincenzo Corrado. "Use of reference buildings to assess the energy saving potentials of the residential building stock: The experience of TABULA project." *Energy policy* 68 (2014): 273-284.
3. Badenes, Borja, Miguel Ángel Mateo Pla, Lenin G. Lemus-Zúñiga, Begoña Sáiz Mauleón, and Javier F. Urchueguía. "On the influence of operational and control parameters in thermal response testing of borehole heat exchangers." *Energies* 10 (2017): 1328.
4. Badenes, Borja, Miguel Ángel Mateo Pla, Teresa Magraner, Javier Soriano, and Javier F. Urchueguía. "Theoretical and experimental cost-benefit assessment of borehole heat exchangers (BHEs) according to working fluid flow rate." *Energies* 13 (2020): 4925.
5. Beier, Richard A., and Marvin D. Smith. "Minimum duration of in-situ tests on vertical boreholes." *ASHRAE Transactions* 109 (2003): 475.
6. Cazorla-Marín, Antonio, Carla Montagud-Montalvá, José Miguel Corberán, Álvaro Montero, and Teresa Magraner. "A TRNSYS assisting tool for the estimation of ground thermal properties applied to TRT (thermal response test) data: B2G model." *Applied Thermal Engineering* 185 (2021): 116370.
7. Carslaw, H. S., and J. C. Jaeger. "Conduction of heat in solids. Aufl." (1986).
8. Di Tuccio, M. C., Alessandrini, D. Pasquali, R. O'Neill, N. 2018. Environmental Risk Assessment Study for each of the case study locations. Deliverable D7.4, Cheap and Efficient Application of reliable Ground Source Heat Exchangers and Pumps (Cheap-GHSPs).
9. De Carli M, Carnietto L, Di Bella A, Graci S, Emmi G, Zarrella A, et al. Archetype definition for analysing retrofit solutions in urban areas in Europe. Tanabe SI, Zhang H, Kurnitski J, Gameiro da Silva MC, Nastase I, Wargocki P, et al., editores. E3S Web Conf. 2019;111:03027.
10. De Carli M, Massimo Tonon, Angelo Zarrella, and Roberto Zecchin. "A computational capacity resistance model (CaRM) for vertical ground-coupled heat exchangers." *Renewable Energy* 35 (2010): 1537-1550.
11. De Carli M, A. Bernardi, M. Cultrera, G. Dalla Santa, A. Di Bella, G. Emmi, A. Galgaro, S. Graci, D. Mendrinós, G. Mezzasalma, R. Pasquali, S. Pera, R. Perego, A. Zarrella, A Database for Climatic Conditions around Europe for Promoting GSHP Solutions, Geosciences (Switzerland) 8 (2), February 2018.
12. EN 12831: Energy performance of buildings. Method for calculation of the design heat load - Part 1: Space heating load, 2017.
13. EN 14825: Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps, with electrically driven compressors, for space heating and cooling - Testing and rating at part load conditions and calculation of seasonal performance, 2019.
14. EN 15450: Heating systems in buildings – Design of heat pump heating systems, 2007.
15. EN 15898: Conservation of cultural property - Main general terms and definitions, 2019.
16. EN 16798: Energy performance of buildings - Ventilation for buildings - Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustic, 2019.
17. EN 16883: Conservation of cultural heritage - Guidelines for improving the energy performance of historic buildings, 2016.
18. EN ISO 17628: Geotechnical investigation and testing – Geothermal testing – Determination of thermal conductivity of soil and rock using a borehole heat exchanger, 2015.
19. European Commission, 2014. Directive 2014/52/EU of The European Parliament And Of The Council.
20. Gehlin, Signhild. "Thermal response test: in situ measurements of thermal properties in hard rock." PhD diss., Luleå tekniska universitet, 1998.
21. Hackel, Scott, and Amanda Pertzborn. "Effective design and operation of hybrid ground-source heat pumps: three case studies." *Energy and Buildings* 43 (2011): 3497-3504.
22. International Organization for Standardization, EN ISO 13790: Energy performance of buildings – Calculation of energy use for space heating and cooling, Geneva, Switzerland, 2008.
23. Kavanaugh SP, Rafferty K. Ground-source Heat Pumps-Design of Geothermal System for Commercial and Institutional Buildings, ASHRAE Applications Handbook. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers; 1997.
24. Kottek M, Grieser J, Beck C, Rudolf B, Rubel F. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *metz.* 10 de julio de 2006;15(3):259-63.
25. Li, Min, and Alvin CK Lai. "Analytical model for short-time responses of ground heat exchangers with U-shaped tubes: Model development and validation." *Applied Energy* 104 (2013): 510-516.
26. Li, Min, and Alvin CK Lai. "Review of analytical models for heat transfer by vertical ground heat exchangers (GHEs): A perspective of time and space scales." *Applied Energy* 151 (2015): 178-191.
27. Magraner, Teresa, Álvaro Montero, Antonio Cazorla-Marín, Carla Montagud-Montalvá, and Julio Martos.

- "Thermal response test analysis for U-pipe vertical borehole heat exchangers under groundwater flow conditions." *Renewable Energy* 165 (2021): 391-404.
28. Müller, Johannes, Antonio Galgaro, Giorgia Dalla Santa, Matteo Cultrera, Constantine Karytsas, Dimitrios Mendrinou, Sebastian Pera et al. "Generalized pan-european geological database for shallow geothermal installations." *Geosciences* 8 (2018): 32.
 29. Magrini, Anna, Giorgia Lentini, Sara Cuman, Alberto Bodrato, and Ludovica Marengo. "From nearly zero energy buildings (NZEB) to positive energy buildings (PEB): The next challenge-The most recent European trends with some notes on the energy analysis of a forerunner PEB example." *Developments in the Built Environment* 3 (2020): 100019.
 30. N. Molina-Giraldo, Heat transport modeling in shallow aquifers, Ph.D. thesis, Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Eberhard Karls Universität Tübingen (2011).
 31. Pasquali R, Harlin K, Badenes B, Urchueguía J, Ballardí M, Soma L, et al. Deliverable 6.4 Common MCDA Methodology & Risk Assessment of individual case study sites. GEO4CIVHIC Project;
 32. Pasquali, R. Dalla Santa, G. Micaleff, D. Vercruyssen, J. Mezzasalma, G. Pockelé, L. 2022. Deliverable 6.2, Report on outline Environmental Impact of GEO4CIVHIC technologies at case study sites. Most Easy, Efficient and Low Cost Geothermal Systems for Retrofitting Civil and Historical Buildings (GEO4CIVHIC).
 33. Rasmussen B., Machimbarrena M., COST Action TU0901 – Building acoustics throughout Europe - Volume 1: Towards a common framework in building acoustics throughout Europe (2014) <http://www.costtu0901.eu/tu0901-e-books.html> (last seen 15/01/2019).
 34. Sanner, Burkhard, Göran Hellström, Jeffrey D. Spitler, and Signhild Gehlin. "More than 15 years of mobile Thermal Response Test—a summary of experiences and prospects." In *Proceedings of the European Geothermal Congress*, vol. 9. Italy Pisa, 2013.
 35. SN 546 384/6: Borehole heat exchangers, 2021
 36. UNE 100715-1, Design, installation and maintenance of shallow geothermal installations - closed vertical systems, 2014
 37. Usman, Muhammad, Daniel Balsalobre-Lorente, Atif Jahanger, and Paiman Ahmad. "Pollution concern during globalization mode in financially resource-rich countries: do financial development, natural resources, and renewable energy consumption matter?." *Renewable Energy* 183 (2022): 90-102.
 38. Urchueguía, Javier F., Lenin-Guillermo Lemus-Zúñiga, Jose-Vicente Oliver-Villanueva, Borja Badenes, Miguel A. Mateo Pla, and José Manuel Cuevas. "How reliable are standard thermal response tests? An assessment based on long-term thermal response tests under different operational conditions." *Energies* 11 (2018): 3347.
 39. Urchueguía, Javier F., Borja Badenes, Hossein Javadi, Miguel A. Mateo Pla, and Bruno Armengot Carbó. "Adapted composite two-region line source methods for the evaluation of borehole heat exchangers with advanced plastic pipe materials and enhanced backfill products." *Applied Thermal Engineering* (Under Review).
 40. VDI 4640-2: Thermal use of the underground - Ground source heat pump systems, 2019.
 41. VDI 4640-5: Thermal use of the underground - Thermal response test, 2020.
 42. Witte, Henk JL, Guus J. Van Gelder, and Jeffrey D. Spitler. "In situ measurement of ground thermal conductivity: A Dutch perspective." *Ashrae Transactions* 108 (2002): 263-272.
 43. Yang, Rui, and Lingfeng Wang. 2012. 'Efficient Control of a Solar Assisted Ground-Source Heat Pump System Based on Evaluation of Building Thermal Load Demand'. In *2012 North American Power Symposium (NAPS)*, 1–6. IEEE.

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 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA (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 POLETTO
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 ENERGETICHE RINNOVABILI 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 POLETTO
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



ROMANIAN GEOEXCHANGE SOCIETY
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 I-ART HELWA
(DLH)
www.dinlarthelwa.org