



**Politecnico
di Torino**

**Corso di Laurea Magistrale in
Ingegneria Energetica e Nucleare**

Collegio di Ingegneria Energetica
A.A. 2024/2025

Tesi di Laurea Magistrale

**APPLICAZIONE E STUDIO IN CAMPO
SPERIMENTALE E PRATICO DI UNA POMPA DI
CALORE GEOTERMICA**

Relatore:

Ing. Davide Papurello

Candidato:

Simone Filippi

Novembre 2024

*Alla mia famiglia,
a tutti coloro che mi sono stati vicini in questi anni,
e a te, Zia.*

Sommario

Indice delle figure	5
Indice delle tabelle.....	7
1. Introduzione	9
1.1 Contesto storico.....	9
1.2 Consumi energetici	12
1.3 Emissioni di CO ₂	14
1.4 Efficienza negli edifici.....	16
2. Geotermia.....	21
2.1 L'energia geotermica	21
2.2 Temperatura e scambio termico nel terreno.....	25
2.3 Sistemi a bassa entalpia: le pompe di calore	28
2.4 Open loop systems	30
2.5 Closed loop systems.....	32
3. Campo sperimentale.....	40
3.1 Pompa di calore dell'Energy Center.....	40
3.2 Prove sperimentali e modellazione.....	51
3.3 Risultati	56
3.4 Analisi di sensitività.....	67
4. Campo applicativo	78
4.1 Stato di fatto	78
4.2 Progetto.....	89
4.3 Analisi economica	108
5. Conclusioni.....	122
Nomenclatura.....	124
Bibliografia e Sitografia	126
Appendice.....	130

Indice delle figure

Figura 1 - Economia della ciambella [2]	9
Figura 2 - Missioni PNRR [5].....	10
Figura 3 - TPES Italia 1990-2021, fonte dati IEA [10]	12
Figura 4 - Consumi totali finali, fonte dati IEA [10]	13
Figura 5 - Emissioni di CO ₂ , fonte dati IEA [14].....	16
Figura 6 - Italia suddivisa in Zone Climatiche [20].....	18
Figura 7 - Classi energetiche degli edifici secondo gli APE emessi nel 2021, fonte dei dati ENEA [21] ..	19
Figura 8 – Struttura della Terra [24]	22
Figura 9 - Andamento del gradiente geotermico [29]	25
Figura 10 - Profilo di temperatura nei diversi mesi dell'anno [30].....	26
Figura 11 - Circuito pompa di calore [24]	28
Figura 12 - Ciclo frigorifero sul diagramma di Mollier (p-h) [32].....	29
Figura 13 - Schema semplificato impianto geotermico a circuito aperto [34].....	30
Figura 14 - Schema semplificato impianto geotermico a circuito chiuso [34]	33
Figura 15 - Configurazione circuiti, sezioni [24]	36
Figura 16 - Configurazione sonde geotermiche orizzontali [35]	38
Figura 17 - Configurazioni sonde geotermiche ad anello [35]	38
Figura 18 - Configurazione sonde geotermiche a spirale [35]	38
Figura 19 - Configurazione sonde geotermiche a canestri [35]	38
Figura 20 - Pali energetici [35]	39
Figura 21 - Sonde verticali [35]	39
Figura 22 - Operazioni di costruzione del muro energetico: scavo e realizzazione armatura [32]	41
Figura 23 – Operazioni di costruzione del muro energetico: posizionamento delle sonde [32].....	42
Figura 24 - Operazioni di costruzione del muro energetico: rinterro [32]	43
Figura 25 - Localizzazione in profondità dei sensori installati [38].....	43
Figura 26 - Sensori posizionati sul piano B [38]	44
Figura 27 - Sensori posizionati sul piano D [38]	44
Figura 28 - Sensori posizionati sul piano A [38]	44
Figura 29 - Sensori posizionati sul piano C [38]	44
Figura 30 - Planimetria piano seminterrato: Isola 1 (pompa di calore e utenza), Isola 2 (muro energetico) [32]	45
Figura 31 - Schema di progetto dell'impianto [32]	46
Figura 32 - Pompa di calore (a destra), serbatoio di accumulo (a sinistra), ventilconvettore (dietro)...	47
Figura 33 - Componenti pompa di calore NIBE F1155-6 [39].....	48
Figura 34 - Andamento della frequenza del compressore rispetto ai DM tra il 7 e l'8 giugno 2022, modalità raffrescamento	50
Figura 35 - Andamento della temperatura nel circuito primario e nel circuito secondario, modalità raffrescamento	51
Figura 36 - Andamento della temperatura in mandata al ventilconvettore rispetto all'azionamento del compressore in modalità raffrescamento.....	51
Figura 37 - Ciclo termodinamico stagione estiva [32].....	53
Figura 38 - Schema semplificato del condensatore	55
Figura 39 - Ciclo termodinamico nel diagramma log(p)-h per il fluido R407C	57
Figura 40 - Confronto tra l'EER ottenuta rimuovendo i valori che non rispecchiano la (3.2) e quella ottenuta dalla media di tutti i valori registrati dai sensori	58
Figura 41 - Dati in input per il calcolo dell'EER con CoolPack.....	60
Figura 42 - Ciclo termodinamico ed EER ottenuti con CoolPack.....	60

Figura 43 - Confronto tra i valori calcoli e quelli ottenuti tramite CoolPack della potenza termica scambiata all'evaporatore	62
Figura 44 - Confronto tra i valori calcoli e quelli ottenuti tramite CoolPack della potenza termica scambiata al condensatore.....	62
Figura 45 - Confronto tra i valori calcoli e quelli ottenuti tramite CoolPack dell'efficienza della pompa di calore.....	62
Figura 46 - Confronto tra l'efficienza e la temperatura esterna	63
Figura 47 - Confronto tra le potenze scambiate e l'evoluzione della temperatura esterna.....	63
Figura 48 - Andamento della temperatura nel terreno	64
Figura 49 - Andamento dell'umidità nel terreno	65
Figura 50 - Andamento della temperatura e dell'umidità del terreno sui piani A e B.....	66
Figura 51 - Ciclo termodinamico nel diagramma log(p)-h per il fluido R407C al variare della pressione massima.....	70
Figura 52 - EER in funzione dell'alta pressione AP	70
Figura 53 - Ciclo termodinamico nel diagramma log(p)-h per il fluido R407C al variare della pressione minima.....	72
Figura 54 - EER in funzione dell'alta pressione BP	72
Figura 55 - Confronto tra i lavori scambiati e le variazioni di pressione sul ramo BP e AP.....	73
Figura 56 - Ciclo termodinamico nel diagramma log(p)-h per il fluido R407C con presenza di surriscaldamento del fluido in ingresso al compressore.....	75
Figura 57 - EER con presenza di surriscaldamento del fluido in ingresso al compressore	75
Figura 58 - Ciclo termodinamico nel diagramma log(p)-h per il fluido R407C con presenza di sottoraffreddamento del fluido	77
Figura 59 - EER con presenza di sottoraffreddamento del fluido	77
Figura 60 - Localizzazione dell'edificio, estratto da Google Maps [42]	78
Figura 61 - Foto del fabbricato oggetto di analisi	78
Figura 62 - Localizzazione dell'edificio, estratto dal PRGC del Comune di Pianfei [43].....	80
Figura 63 - Estratto Carta di sintesi della pericolosità geomorfologica e dell'idoneità all'utilizzazione urbanistica [44].....	80
Figura 64 - Rappresentazione dell'Input grafico all'interno del software di calcolo EC700	87
Figura 65 - Estrapolazione dati dalla simulazione APE Ante Intervento, EC700.....	88
Figura 66 – Modello dell'edificio eseguito su REVIT [52]	96
Figura 67 - Sezione dell'edificio tramite il software REVIT [52].....	96
Figura 68 - Pompa di calore HPG 12 CS PREMIUM della STIEBEL ELTRON [54]	98
Figura 69 - Curva di funzionamento della pompa di circolazione ALPHA2 25-60 180 della Grundfos [56]	100
Figura 70 - Dati in input e condizioni di esercizio per la modellazione delle sonde su EC714 [58]	102
Figura 71 - Disposizione impianto a progetto	104
Figura 72 - Estrapolazione dati dalla simulazione APE Post Intervento, EC700	107
Figura 73 - Confronto dei fabbisogni richiesti [kW] tra le configurazioni ex-ante ed ex-post.....	108
Figura 74 - VAN differenziale per PDC Geotermica vs Caldaia a Condensazione e split.....	114
Figura 75 - VAN differenziale per PDC Geotermica vs PDC Aria-Acqua.....	116
Figura 76 - VAN differenziale scenario 1: PDC Geotermica vs Caldaia a condensazione e split con contributo GSE.....	118
Figura 77 - VAN differenziale scenario 2: PDC Geotermica vs PDC Aria-Acqua con contributo GSE....	119
Figura 78 - Confronto emissioni di CO ₂ e PM10 per i tre scenari analizzati	120

Indice delle tabelle

Tabella 1 - Limiti di trasmittanza in caso di interventi sull'involucro per le diverse zone climatiche	18
Tabella 2 - Limiti di accensione impianti di condizionamento invernale per le diverse zone climatiche	19
Tabella 3 - Proprietà miscela acqua glicolata al 25% [32]	46
Tabella 4 - Prestazioni pompa di calore NIBE F1155-6 1x230V [39]	47
Tabella 5 - Capisaldi	56
Tabella 6 - Confronto tra potenze ed efficienza calcolate ed i valori ottenuti tramite CoolPack.....	61
Tabella 7 - Calcolo della temperatura media in ingresso al compressore.....	68
Tabella 8 - Capisaldi ed EER del ciclo con alta pressione pari a 16 bar	68
Tabella 9 - Capisaldi ed EER del ciclo con alta pressione pari a 17 bar	69
Tabella 10 - Capisaldi ed EER del ciclo con alta pressione pari a 18 bar	69
Tabella 11 - Capisaldi ed EER del ciclo con alta pressione pari a 19 bar	69
Tabella 12 - Capisaldi ed EER del ciclo con alta pressione pari a 20 bar	69
Tabella 13 - Capisaldi ed EER del ciclo con bassa pressione pari a 6 bar	71
Tabella 14 - Capisaldi ed EER del ciclo con bassa pressione pari a 6,5 bar	71
Tabella 15 - Capisaldi ed EER del ciclo con bassa pressione pari a 7 bar	71
Tabella 16 - Capisaldi ed EER del ciclo con bassa pressione pari a 7,5 bar	71
Tabella 17 - Capisaldi ed EER del ciclo con bassa pressione pari a 8 bar	71
Tabella 18 - Capisaldi ed EER del ciclo con surriscaldamento pari a +5°C.....	74
Tabella 19 - Capisaldi ed EER del ciclo con surriscaldamento pari a +10°C.....	74
Tabella 20 - Capisaldi ed EER del ciclo con surriscaldamento pari a +15°C.....	74
Tabella 21 - Capisaldi ed EER del ciclo con surriscaldamento pari a +20°C.....	74
Tabella 22 - Capisaldi ed EER del ciclo con sottoraffreddamento pari a -5°C	76
Tabella 23 - Capisaldi ed EER del ciclo con sottoraffreddamento pari a -10°C	76
Tabella 24 - Capisaldi ed EER del ciclo con sottoraffreddamento pari a -15°C	76
Tabella 25 - Capisaldi ed EER del ciclo con sottoraffreddamento pari a -20°C	76
Tabella 26 - Risultati fabbricato, stato ex-ante, software di calcolo EC700 di EDILCLIMA	87
Tabella 27 - Confronto tra i ponti termici nella situazione ex-ante e quelli corretti previsti a progetto	95
Tabella 28 - Risultati fabbricato, stato ex-post, software di calcolo EC700 di EDILCLIMA	97
Tabella 29 - COP pompa di calore HPG 12 CS PREMIUM della STIEBEL ELTRON	99
Tabella 30 - Potenza utile pompa di calore HPG 12 CS PREMIUM della STIEBEL ELTRON	99
Tabella 31 - Prestazioni bollitore in pompa di calore AQUA SWAN 190 della CLIVET [57].....	100
Tabella 32 - Fabbisogni di energia per l'impianto in progetto	101
Tabella 33 - Consumi annui di elettricità per il condizionamento invernale ed estivo.....	103
Tabella 34 - Rispetto dei requisiti di legge secondo il DM.26.06.2015 per l'edificio a progetto sottoposto a ristrutturazione importante di primo livello	106
Tabella 35 - Rispetto dei requisiti di legge secondo il D.lgs. 199 del 08.11.2021 per la copertura da fonte rinnovabile	106
Tabella 36 - Costi intervento "base"	109
Tabella 37 - Costi intervento "Scenario A: pompa di calore geotermica"	109
Tabella 38 - Costi intervento "Scenario B: caldaia a condensazione e split"	110
Tabella 39 - Costi intervento "Scenario C: pompa di calore aria-acqua"	110
Tabella 40 - Consumi energetici per servizio "Scenario A: pompa di calore geotermica"	111
Tabella 41 - Consumi energetici per servizio "Scenario B: caldaia a condensazione e split"	111
Tabella 42 - Consumi energetici per servizio "Scenario C: pompa di calore aria-acqua"	111
Tabella 43 - Costi di esercizio per i diversi scenari	112
Tabella 44 - Confronto 1: PDC Geotermica vs Caldaia a condensazione e Split.....	113

Tabella 45 – Flusso di Cassa e VAN differenziale scenario 1: PDC Geotermica vs Caldaia a condensazione e split	114
Tabella 46 - Confronto 2: PDC Geotermica vs PDC Aria-Acqua.....	114
Tabella 47 - Flusso di Cassa e VAN differenziale scenario 2: PDC Geotermica vs PDC Aria-Acqua	115
Tabella 48 - Incentivi erogabili dal GSE per le pompe di calore a progetto	117
Tabella 49 - Flusso di Cassa e VAN differenziale scenario 1: PDC Geotermica vs Caldaia a condensazione e split con contributo GSE.....	118
Tabella 50 - Flusso di Cassa e VAN differenziale scenario 2: PDC Geotermica vs PDC Aria-Acqua con contributo GSE.....	119
Tabella 51 - Indicatori di emissione per metano ed energia elettrica [68]	120
Tabella 52 - Emissioni di CO2 e PM10 per gli scenari analizzati	120

1. Introduzione

1.1 Contesto storico

Le società moderne sono fondate sull'utilizzo di energia. La fornitura di servizi essenziali, quali ad esempio l'acqua potabile, l'alimentazione, l'istruzione, il settore dei trasporti e non per ultimo il settore residenziale, richiedono energia. A partire dall'Antropocene – epoca geologica che va dal XVIII secolo ad oggi – l'uomo ha iniziato a sfruttare le risorse energetiche in maniera sempre più crescente, provocando modifiche territoriali e climatiche sull'intero pianeta. Secondo gli studi del NOAA [1] (National Oceanic and Atmospheric Administration), agenzia scientifica che si occupa del monitoraggio delle condizioni atmosferiche ed oceaniche negli Stati Uniti, il 2022 è stato il quarto anno più caldo al mondo dopo il 2016. L'incremento di temperatura è risultato essere pari a +1,2°C rispetto al periodo preindustriale sulla media mondiale (+2,2°C nella sola Italia). Tale incremento è sicuramente correlato agli elevati consumi di fonti fossili – e quindi delle emissioni di CO₂ in atmosfera – dei decenni scorsi.

Oggi, anche grazie ad una maggiore consapevolezza del mondo che ci circonda, appare chiaro come ambiente, economia e società appartengano allo stesso ecosistema e dove il cambiamento sull'uno ha effetti – positivi o negativi – sugli altri due. Solo uno sviluppo sostenibile¹ è in

grado di garantire la sopravvivenza di questo ecosistema. Un buon esempio di sviluppo sostenibile è rappresentato dall'Economia della Ciambella (Figura 1), teoria sviluppata dall'economista inglese Kate Raworth [2]: il cerchio interno rappresenta lo spazio sicuro ed equo per tutti, ovvero il benessere sociale al quale nessun individuo deve essere costretto a rinunciare; il cerchio esterno rappresenta invece un limite da non superare, oltre il quale si agisce con effetti negativi sull'ambiente. Tale limite è detto "tetto ambientale". La ciambella è lo spazio tra i due cerchi ed è il luogo dove ognuno può soddisfare i propri bisogni rispettando i limiti del pianeta e dove è possibile raggiungere lo sviluppo senza arrecare danni all'ecosistema.

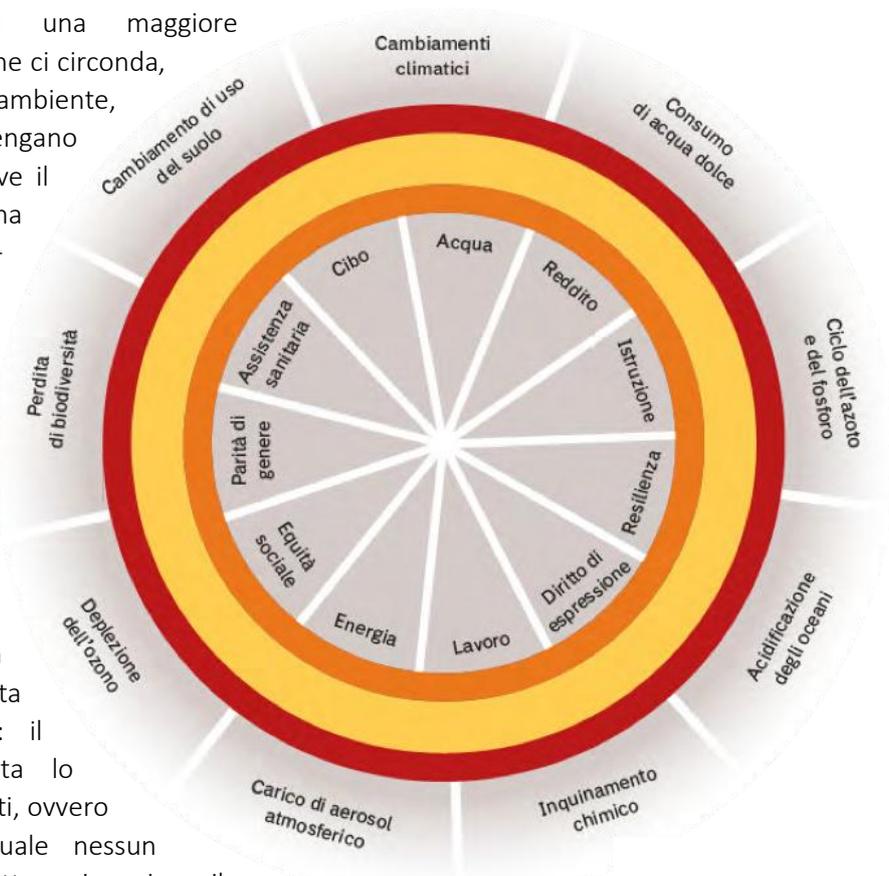


Figura 1 - Economia della ciambella [2]

La grande accelerazione dei consumi dalla II Guerra Mondiale ad oggi ha portato a superare il tetto ambientale per buona parte dei fattori caratterizzanti, fattori che sono tuttavia rientrati all'interno della

¹ Sviluppo sostenibile: soddisfare i fabbisogni del presente senza compromettere la capacità delle generazioni future di soddisfare le proprie necessità.

ciambella a causa della pandemia da Covid-19. Tale variazione in senso positivo sull'ambiente (riduzione delle emissioni), è stata però accompagnata da una riduzione delle attività economiche, con conseguente aumento della disoccupazione nelle classi sociali più basse che sono quindi "scivolate" verso il centro della ciambella, oltre l'anello interno che la costituisce. La contrazione dei consumi legati alla pandemia è stimata, secondo l'ARERA, pari al 3,1% a livello mondiale e pari al 5,9% in Europa [3].

Per combattere gli effetti negativi dovuti alla pandemia, l'Unione Europea ha introdotto un piano di ripresa denominato *NextGenerationEU* [4], che si pone come obiettivo non solo il superamento delle difficoltà economiche e sociali, ma anche la transizione verso un'Europa più green, più digitale, più resiliente e pronta ad affrontare le sfide future cui si troverà dinnanzi.

Lo strumento adottato dall'Italia per il *NextGenerationEU* è il Piano Nazionale per la Ripresa e la Resilienza (PNRR). Le risorse stanziare sono pari a 235,1 miliardi di euro, di cui 191,5 stanziati dal piano europeo (il 36% circa come contributo a fondo perduto, mentre la quota restante sotto forma di prestito), 30,6 miliardi stanziati attraverso un fondo complementare legato allo scostamento pluriennale di bilancio e 13 miliardi stanziati con il REACT-EU (un ulteriore strumento per la ripresa). Le risorse del PNRR sono state destinate al raggiungimento di sedici obiettivi, raggruppati in sei missioni da attuare entro il 2027 (*Figura 2*) [5].



Figura 2 - Missioni PNRR [5]

Tutti gli obiettivi del PNRR sono orientati a migliorare l'equità sociale e ad aumentare la competitività e l'efficienza del Paese, con conseguente maggiore fiducia di cittadini, imprese ed investitori. Per tale motivo parte delle risorse sono anche state destinate a riforme per la riduzione della burocrazia.

La ripresa garantita a livello europeo dal *NextGenerationEU* nel post pandemia è stata però frenata dall'aumento dei prezzi dell'energia tra il II ed il III trimestre del 2021. In particolare, l'aumento della richiesta di gas finalizzata allo stoccaggio per il periodo invernale e l'incremento della domanda dovuto alla lieve ripresa economica hanno avuto come conseguenza una riduzione delle forniture ed un aumento del prezzo del gas. Secondo il *Rapporto Annuale Efficienza Energetica 2022* dell'ENEA [6], l'incremento del prezzo del gas nel 2021 è stato del 429% rispetto al 2019 e, per via della grande quota di gas utilizzata nel mix energetico per la produzione di energia elettrica, tale aumento ha avuto come conseguenza un incremento del 230% del prezzo dell'elettricità. Tutto ciò ha portato i governi europei a dover intervenire per proteggere dall'aumento dei prezzi le famiglie più vulnerabili e le piccole e medie imprese operanti nel settore energetico, riducendo ad esempio le aliquote fiscali e dando la possibilità di rateizzare le bollette. Sono stati inoltre vagliati provvedimenti tramite aiuti di stato per ridurre i combustibili fossili ed aumentare la quota di fonti rinnovabili, oltre ad una maggiore vigilanza sulla

trasparenza del mercato. Tuttavia, quella che sembrava essere una situazione transitoria è stata completamente stravolta nel febbraio 2022 con l'aggressione all'Ucraina da parte della Russia. L'incertezza geopolitica e le condizioni imposte dalla Russia (come la richiesta del pagamento in rubli e l'interruzione delle forniture a Polonia e Bulgaria) hanno portato ad un continuo incremento dei prezzi, con un picco durante l'estate superiore a 220 euro/MWh [6].

La profonda volontà dell'Unione Europea di favorire politiche che garantissero la sostenibilità sociale, economica ed ambientale ha portato all'adozione nel maggio del 2022 del *Piano REPowerEU* [7]: investimenti per oltre 300 milioni di euro con lo scopo non solo di accelerare sui target energetici e climatici del 2050 circa la riduzione delle emissioni di gas serra, ma anche di ridurre la dipendenza energetica da paesi come la Russia. I principali capisaldi del *REPowerEU* sono infatti il risparmio energetico, la produzione di energia rinnovabile e la diversificazione delle fonti di approvvigionamento. In particolar modo si stabilisce che la riduzione della dipendenza dal gas russo deve essere fatta, seppur gradualmente, in maniera celere, ad esempio diversificando il più possibile il mix energetico e invogliando i cittadini a comportamenti più virtuosi e meno energivori, come l'abbassamento della temperatura interna negli edifici nel periodo invernale e la riduzione nell'utilizzo dei condizionatori nel periodo estivo, l'adozione di elettrodomestici più efficienti, l'utilizzo di mezzi pubblici rispetto a quelli privati ed eliminando il consumo di elettricità quando non necessario. Si vuole inoltre favorire l'elettificazione volta all'abbandono dei combustibili fossili nel campo industriale, nell'edilizia e nei trasporti. Nel *REPowerEU* si prevede di innalzare l'obiettivo di capacità delle fonti rinnovabili passando da un 40% ad un 45% entro il 2030, raddoppiando inoltre la capacità del fotovoltaico in rete da 320 GW nel 2025 a 600 GW nel 2030, in modo da ridurre notevolmente i consumi di gas.

A livello italiano è presente il Piano Nazionale per la Transizione Ecologica (PTE) [8], che si pone come obiettivi principali quelli di garantire una crescita che tenga conto della salute, del benessere e della sostenibilità del pianeta, e di attuare misure in accordo con gli obiettivi comunitari in termini di neutralità climatica, azzeramento delle emissioni inquinanti, ripristino e tutela della biodiversità e transizione verso un'economia circolare. Tale piano viene periodicamente aggiornato e attualmente si sviluppa attraverso otto tematiche:

1. *Decarbonizzazione*: azzeramento delle emissioni di gas serra entro il 2050;
2. *Mobilità sostenibile*: aumento dell'utilizzo del trasporto pubblico e conversione dei veicoli privati in mezzi ad emissioni zero;
3. *Inquinamento dell'aria*: azzeramento dell'inquinamento, che dovrà essere ridotto del 55% entro il 2030;
4. *Contrasto al consumo del suolo e al dissesto idrogeologico*: tutela del patrimonio edilizio esistente e arresto dell'utilizzo di nuovo suolo per nuove costruzioni entro il 2030;
5. *Miglior gestione delle risorse idriche*: potenziamento delle infrastrutture idriche entro il 2040 ed ottimizzazione dell'uso delle risorse a scopo civile, industriale e agricolo;
6. *Ripristino e rafforzamento della biodiversità*: incremento delle superfici delle aree protette;
7. *Tutela del mare*: incremento delle superfici delle aree protette e adozione di misure più drastiche per la pesca illegale;
8. *Promozione dell'economia circolare, dell'agricoltura sostenibile e della bioeconomia*: adozione di politiche di riciclo e riutilizzo dei materiali, aumento delle efficienze e riduzione degli sprechi.

Tutte le misure sopra elencate sono compatibili con il PNRR. Inoltre, in seguito all'invasione Russa in Ucraina, l'Italia ha deciso di adottare un Piano Nazionale per il contenimento dei consumi del gas [6]. Nel breve periodo tale piano era rivolto ad assicurare il riempimento degli stoccaggi per il periodo invernale 2022-2023 e a massimizzare la capacità di rigassificazione del GNL. Sul lungo periodo

l'obiettivo è quello di ridurre la dipendenza del gas russo – il cui utilizzo nel 2021 è stato pari al 40% del totale – aumentando e diversificando gli approvvigionamenti. Le strategie adottate sono state:

- Utilizzo di combustibili diversi dal gas nel settore termoelettrico per la produzione di elettricità, nonché la massimizzazione degli impianti a fonti rinnovabili;
- Riduzione dei consumi per il riscaldamento nelle abitazioni private e negli edifici pubblici;
- Realizzazione di campagne informative istituzionali per aiutare i cittadini ad essere più virtuosi nei loro consumi;
- Contenimento volontario dei consumi nel settore industriale salvaguardando i settori strategici.

1.2 Consumi energetici

I consumi energetici rappresentano, per definizione, l'energia utilizzata nell'economia di un dato paese e corrispondono alla somma della produzione nazionale e delle importazioni a cui vengono sottratte le esportazioni, tenendo inoltre conto delle variazioni, positive o negative, delle scorte.

In accordo con quanto descritto nel paragrafo "Contesto Storico", il Rapporto Annuale per l'Efficienza Energetica 2022 dell'ENEA [6] conferma una diminuzione dei consumi di energia primaria nel 2020 pari a quasi il 9% rispetto all'anno precedente. La riduzione è presente anche nei consumi finali ed è dovuta principalmente alla ridotta mobilità imposta dalla pandemia, basti pensare che i consumi di energia riferiti ai trasporti nel 2020 sono diminuiti del 19,2%. Guardando nel lungo periodo si può notare come i consumi di energia primaria abbiano subito un incremento fino al 2005 per poi iniziare una leggera decrescita. Secondo il GSE – Gestore dei Servizi Energetici - la riduzione è legata sia alla migliore efficienza energetica degli edifici, sia a causa di dinamiche economiche. Dal 2005 al 2021 i consumi di energia primaria sono diminuiti del 21,6% [9].

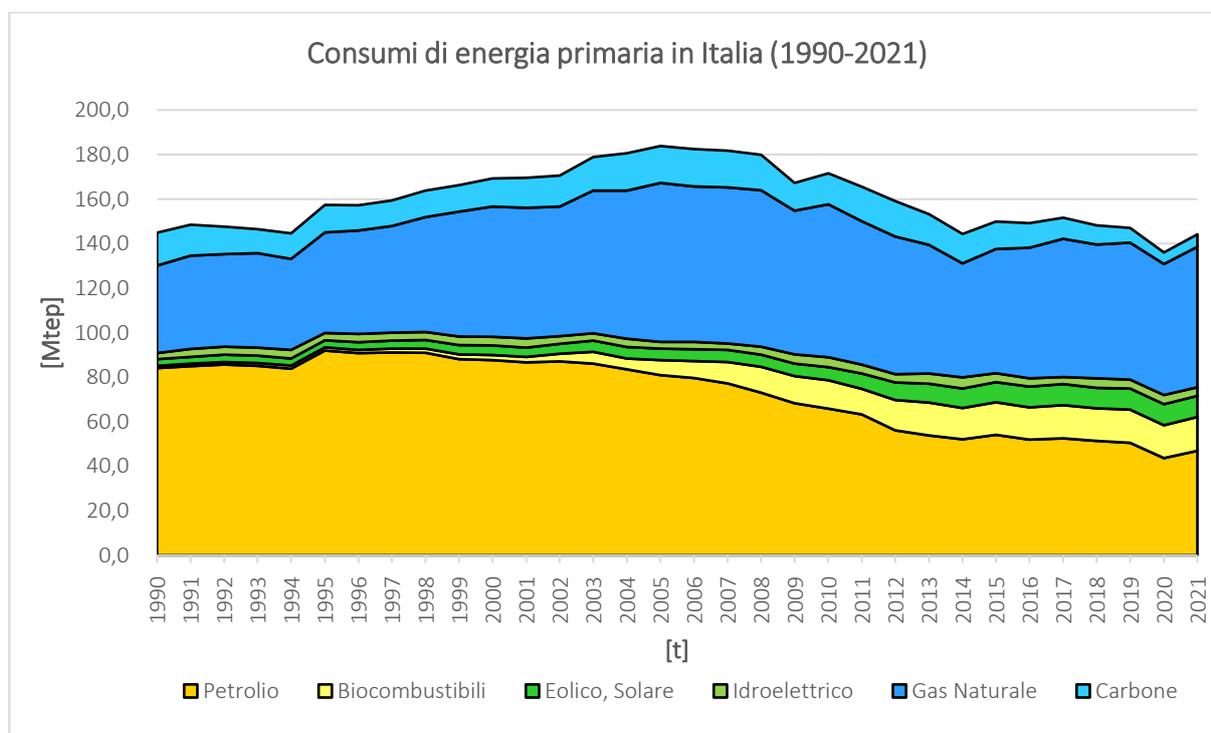


Figura 3 - TPES Italia 1990-2021, fonte dati IEA [10]

Nel periodo considerato tutte le fonti non rinnovabili sono risultate in diminuzione, ad eccezione del gas naturale il cui incremento tra il 1990 ed il 2021 è stato pari a circa il 50%. Quest'ultimo è stato infatti la fonte di energia più utilizzata in Italia per un consumo pari a 63 Mtep nel solo 2021 (circa il 44% del

totale). L'andamento è coerente con l'evoluzione del sistema produttivo italiano, come la riduzione delle raffinerie e degli altiforni a carbone e l'incremento delle attività alimentate dal gas naturale. Sempre in questo periodo le fonti rinnovabili hanno subito un'importante crescita, passando da appena il 4,6% del 1990 fino al 19,8% del 2021, con un picco nel 2020 pari al 20,8% ed un tasso di incremento medio annuo del 4,8%. Nel 2020 quasi il 30% delle fonti rinnovabili sono da attribuire ai biocombustibili. Seguono il geotermico (20%), energia idrica (15%), eolico con solare termico e fotovoltaico (14,6%), pompe di calore per il riscaldamento degli ambienti (9,1%) e biogas (7,2%).

Secondo l'ENEA [6][5] il consumo di energia primaria è valutato in aumento del 2% nel primo semestre del 2022 rispetto allo stesso periodo del 2021, ma ancora al di sotto dei consumi rilevati nel 2019. L'incremento del fabbisogno è stimato a circa 2Mtep, ed è imputabile principalmente all'aumento dei consumi di petrolio osservabili nel grafico soprastate (**Figura 3**) già nel 2021. La stima è stata effettuata basandosi sulle elaborazioni dei dati raccolti trimestralmente dall'ENEA che mettono in relazione i consumi energetici con:

- variabili economiche (PIL e produzione industriale);
- indicatori climatici (Gradi giorno, necessità di raffrescamento e riscaldamento);
- prezzi.

Al fine di ridurre i consumi e le emissioni, in linea con le politiche europee, risulta fondamentale comprendere quali sono i settori più energivori. I consumi finali sono riportati nel grafico seguente:

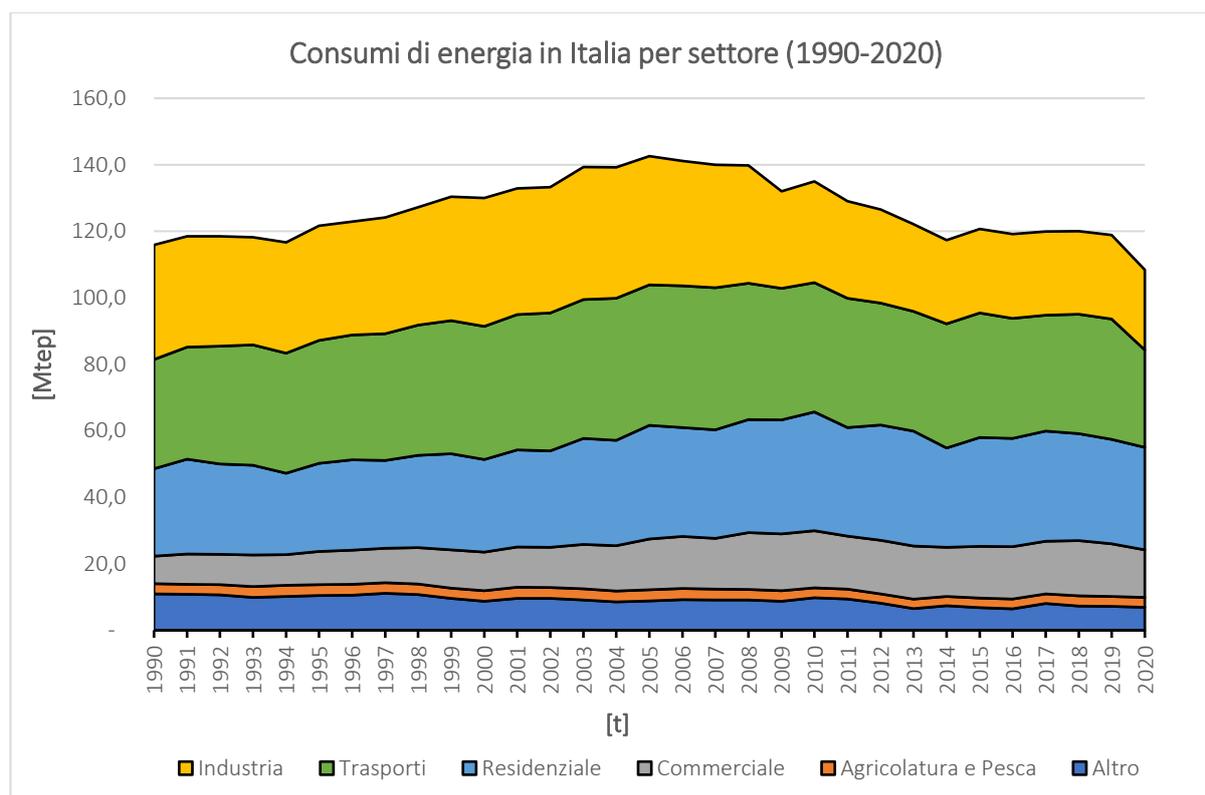


Figura 4 - Consumi totali finali, fonte dati IEA [10]

Osservando i dati settore per settore si nota come l'andamento dei consumi sia in leggera diminuzione per le categorie considerate: confrontando il 1990 con il 2020 si nota come l'industria sia passata da 34,4 Mtep a 24,2 Mtep, con una riduzione del 29,8%, mentre il settore dei trasporti ha subito un calo dell'11% passando da 32,9 Mtep a 29,2 Mtep. Le uniche eccezioni sono date dal settore residenziale, che ha subito un incremento medio annuo dello 0,5%, passando da 26,3 Mtep a 30,8 Mtep (+17,3% in 30 anni), e dal settore commerciale, in cui l'incremento medio annuo è stato quasi del 2%. Se

inizialmente i tre settori principali (industria, trasporto e residenziale) concorrevano ognuno per circa il 30%, negli ultimi anni il settore dei trasporti ed il settore residenziale si spartiscono la fetta più grande dei consumi.

Prima della pandemia, nel 2019, i trasporti rappresentavano il 30,5% dei consumi, seguiti dagli usi civili con il 26,4% e l'industria con solamente il 21,3%. Tuttavia, a seguito della crisi i consumi si sono sbilanciati verso il settore residenziale, portando la classifica ad essere:

- 1°) Residenziale (28,4 %)
- 2°) Trasporti (27,0 %)
- 3°) Industria (22,3 %)
- 4°) Commercio (13,2 %)
- 5°) Altro (6,3 %)
- 6°) Agricoltura e pesca (2,8 %)

Nell'ottica di perseguire gli obiettivi Comunitari, risulta quindi importante non solo favorire interventi volti all'efficientamento energetico degli edifici per ridurre le emissioni di anidride carbonica, ma anche condurre campagne di sensibilizzazione verso i cittadini, in modo che trasformino le loro abitudini in comportamenti virtuosi e rispettosi dell'ambiente e della società.

1.3 Emissioni di CO₂

Le emissioni di CO₂ sono una delle principali cause del cambiamento climatico [11]. Il biossido di carbonio è un gas inerte, inodore e incolore normalmente presente in atmosfera e che può essere ottenuto tramite la combustione, la decomposizione delle molecole organiche o la respirazione cellulare. Questo gas non è né tossico né nocivo, ma l'aumento della sua concentrazione in atmosfera contribuisce al cosiddetto "effetto serra".

L'effetto serra è un normale fenomeno di regolazione della temperatura che avviene sui pianeti provvisti di atmosfera e consiste nell'accumulo di una parte dell'energia termica proveniente dall'esterno. Questo fenomeno è causato dalla presenza di alcuni gas in atmosfera, detti appunto "gas serra", che permettono l'ingresso della radiazione solare ma ostacolano l'uscita della radiazione infrarossa riemessa dalla superficie del pianeta. Tale fenomeno è fondamentale per garantire lo sviluppo della vita su un pianeta (basti pensare che senza i gas serra la temperatura della Terra sarebbe inferiore di circa 30°C), tuttavia il loro incremento è direttamente proporzionale alla variazione di temperatura sul Pianeta che a sua volta ha causa squilibri sugli ecosistemi locali e sulla vita dell'uomo.

Ogni gas serra è caratterizzato da un tempo di residenza in atmosfera [12], ovvero l'ammontare di tempo che ci vorrebbe affinché l'incremento della sua concentrazione dovuto all'attività umana scompaia e si ritorni ad un livello naturale. Se paragonata ad altri gas (come il biossido di azoto che risiede per circa 120 anni, o il tetra-fluoro-metano la cui vita in atmosfera è di circa 50 mila anni), la CO₂ con i suoi 100 anni di permanenza non è fra i "peggiori", tuttavia il fatto che sia il gas maggiormente prodotto dalle attività umane lo rende il maggiore responsabile dell'incremento dell'effetto serra e quindi il gas la cui produzione deve essere limitata al fine di ridurre il già avviato incremento di temperatura media globale. Attualmente circa il 55% del contributo all'effetto serra è dovuto all'anidride carbonica prodotta dall'uomo mediante la combustione.

A partire dalla seconda rivoluzione industriale, infatti, le emissioni di CO₂ sono state in continuo aumento a causa dell'utilizzo sempre più frequente dei combustibili fossili per il settore industriale e residenziale, oltre che quello dei trasporti. Fino al 2019 queste emissioni sono state in costante aumento

e, stando ai dati del Global Carbon Project² [13], hanno raggiunto il 36,5 miliardi di tonnellate (di cui quasi 4 in Europa), per poi diminuire del 10% nel 2020 a causa della pandemia da COVID-19, raggiungendo il livello più basso dal 1990.

Secondo il rapporto dell'IEA [14], nel 2022 le emissioni di anidride carbonica legate alla produzione di energia sono cresciute di oltre 320 milioni di tonnellate, pari ad un incremento dello 0,9% rispetto all'anno precedente, portando tale parametro a circa 36,8 miliardi di tonnellate in un anno. L'incremento è dovuto principalmente ai maggiori consumi di fonti fossili come petrolio e carbone dovuti sia ad eventi climatici estremi (come siccità e ondate di calore, che hanno portato ad un aumento della domanda di raffrescamento e di riscaldamento) sia alla chiusura di diverse centrali nucleari le cui dismissioni non sono state compensate totalmente da fonti rinnovabili.

L'instabilità economica e soprattutto la volatilità dei prezzi del gas ha spinto paesi energivori come quelli asiatici in via di sviluppo al ritorno al carbone, con un conseguente aumento delle emissioni di CO₂ [14]. Solamente la Cina ha mantenuto stabili le emissioni nel 2022 rispetto all'anno precedente, ma questo è sicuramente subordinato alle severe restrizioni introdotte dal Governo per contrastare la pandemia. D'altro canto, anche gli Stati Uniti hanno aumentato le loro emissioni, specialmente in ambito residenziale per far fronte a temperature estreme (+0,8%), mentre l'Unione Europea è stata più virtuosa grazie alla diffusione delle rinnovabili (-2,5% pari 70 milioni di tonnellate di CO₂ evitata). Stando a quanto dichiarato dal direttore esecutivo dell'IEA, Fatih Birol, le emissioni di CO₂ sarebbero state 3 volte maggiori se non ci fosse stato l'incremento delle fonti rinnovabili accompagnato da una maggiore diffusione di veicoli elettrici, di pompe di calore e di tecnologie per l'efficienza energetica, oltre che da una contrazione dell'economia legata alla pandemia. Nella sola Europa la riduzione delle emissioni è stata possibile grazie non solo ad un inverno mite che, stando ai dati è stato il secondo inverno più caldo degli ultimi 30 anni, ma anche grazie alla promozione di politiche collettive per il risparmio energetico nel settore residenziale.

Globalmente sono state evitate 550 milioni di tonnellate di CO₂ grazie alle fonti rinnovabili, di cui 230 milioni da imputare al fotovoltaico e 235 milioni all'energia eolica.

Secondo l'Agenzia Europea per l'Ambiente³ l'Italia è tra i paesi europei con le emissioni di gas serra pro capite più elevate. Risulta il quarto in Europa per emissioni di CO₂ (dopo Germania, Regno Unito e Polonia) e sesto al mondo [15].

Le emissioni di anidride carbonica, divise per settore, sono rappresentate nella **Figura 5**. Le emissioni maggiori sono dovute alla generazione di elettricità e calore, seguita dal settore dei trasporti, dall'industria e del settore residenziale, che nel 2020 hanno rappresentato rispettivamente il 32%, il 29%, il 15% ed il 16%.

L'obiettivo del governo italiano è quello di azzerare le emissioni nette di CO₂ entro il 2050 e, guardando al grafico e alla visibile tendenza al declino delle emissioni in quasi tutti i settori, si può dire che negli ultimi anni c'è stato un progresso significativo ma bisognerà proseguire con gli impegni, partendo dalla riduzione dei settori attualmente più energivori e di conseguenza più inquinanti.

² *Global Carbon Project*: progetto fondato nel 2001 che coinvolge istituti di ricerca e organizzazioni a livello mondiale con lo scopo di monitorare e analizzare le emissioni di gas serra, in particolar modo concentrandosi sulle emissioni di CO₂ derivanti dalle attività umane.

³ L'Agenzia Europea per l'Ambiente è un'agenzia dell'U.E. istituita nel 1990 con il compito di raccogliere, elaborare e diffondere informazioni sull'ambiente in Europa al fine di sostenerne la protezione e promuoverne lo sviluppo.

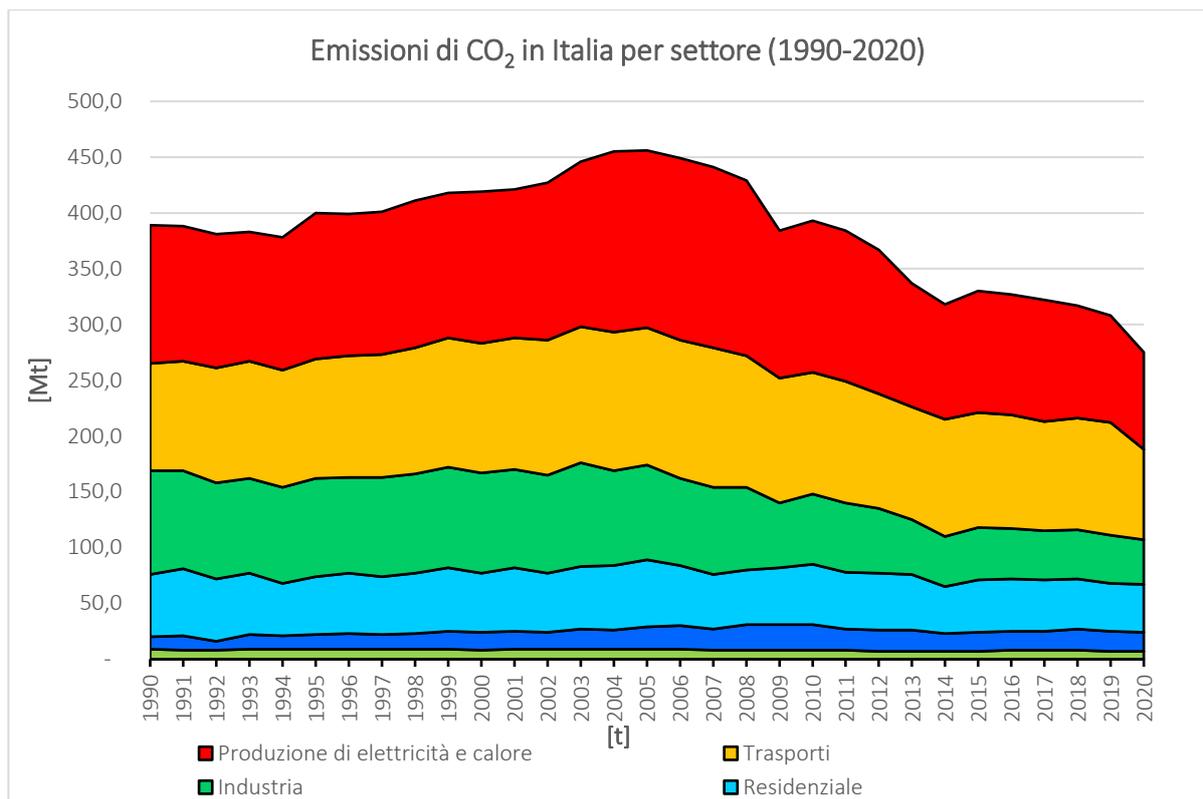


Figura 5 - Emissioni di CO₂, fonte dati IEA [14]

1.4 Efficienza negli edifici

Sul tema dell'efficienza energetica vi sono stati importanti cambiamenti negli ultimi anni. In particolare, è aumentata la consapevolezza, sia da parte del governo che del settore privato, dell'importanza di ridurre i consumi energetici e di utilizzare fonti energetiche rinnovabili al fine di limitare l'impatto ambientale e di contenere i costi di gestione degli immobili. Secondo quanto descritto nel rapporto "Global Status Report 2022" [16] redatto dal "Programma per l'Ambiente" delle Nazioni Unite, la percentuale delle emissioni di gas serra imputabile agli edifici è stato pari a circa il 27% nel 2021 a livello globale. Inoltre, considerando tutte le fasi di costruzione a partire dai materiali impiegati, tale percentuale sale di circa dieci punti percentuali, raggiungendo il 37% di emissioni di CO₂. Il che significa che per raggiungere le emissioni zero nel 2050 queste emissioni dovrebbero subire una riduzione del 98% rispetto al 2020.

In Italia, data la diversificazione del patrimonio edilizio, con edifici che vanno dalle antiche costruzioni in pietra e mattoni alle più moderne strutture in acciaio e vetro, e poiché la maggior parte di essi è stata costruita prima che fossero introdotte le normative sul risparmio energetico, il tema dell'efficientamento energetico sostenibile è sicuramente una delle sfide più ardue per il Paese.

A livello europeo la maggiore attenzione verso le prestazioni energetiche degli edifici è giunta nel 2002 con l'entrata in vigore della prima EPBD [17], ovvero l'*Energy Performance of Buildings Directive* (Direttiva sull'Efficienza Energetica degli Edifici) a cui sono state effettuate modifiche nel 2010, nel 2018 e nel 2023. Tale normativa si concentra principalmente sulla riduzione delle emissioni di CO₂ e sull'adozione di tecnologie avanzate a servizio degli impianti tecnologici negli edifici. In particolare, le misure previste per la promozione dell'efficienza energetica negli edifici sono:

- Definizione di requisiti minimi di efficienza energetica per i nuovi edifici e per quelli esistenti che subiscono ristrutturazioni importanti, in particolare l'isolamento termico delle pareti e dei

serramenti, nonché l'efficienza degli impianti di riscaldamento, raffrescamento, produzione di acqua calda sanitaria, illuminazione e ventilazione meccanica;

- Promozione dell'uso di fonti da energia rinnovabile, come il solare termico e fotovoltaico, il geotermico, l'idroelettrico, l'eolico e la biomassa che permettono di generare energia pulita e sostenibile riducendo l'impatto ambientale e limitando l'utilizzo di fonti di energia non rinnovabili come i combustibili fossili;
- Adozione di sistemi di monitoraggio e di controllo dei consumi energetici (come contatori di energia o sensori di temperatura) con l'obiettivo di monitorare i consumi, identificare le inefficienze e quindi promuoverne il miglioramento;
- Obbligo per gli Stati membri di definire un certificato di efficienza energetica che informi i proprietari (o a potenziali acquirenti e inquilini) sullo stato dell'edificio e suggerire i possibili interventi di miglioramento.

Fra le leggi che recepiscono la direttiva europea EPBD e quindi regolamentano l'efficienza energetica nell'edilizia italiana vi è il D.lgs. 192/2005 [18], che ha introdotto l'obbligo di certificare l'efficienza energetica degli edifici e di riqualificare quelli esistenti per renderli più efficienti. L'APE (Attestato di Prestazione Energetica) è il documento che stabilisce quanto un immobile è efficiente e si basa sul calcolo di diversi parametri [19], fra cui:

- IPE (Indice di Prestazione Energetica), espresso in kWh/m²anno rappresenta il consumo di energia primaria per unità di superficie necessario per riscaldare, raffrescare, produrre acqua calda ad uso sanitario ed illuminare un edificio. In base a questo parametro l'immobile viene classificato su una scala che va dalla classe G (edifici meno efficienti) alla classe A4 (edifici più efficienti). Tale parametro è inoltre distinto in IPE rinnovabile (riguardante i consumi energetici provenienti da fonti rinnovabili installate sull'edificio come ad esempio solare termico, fotovoltaico, geotermico, ecc.) e in IPE non rinnovabile (riguardante i consumi energetici provenienti da fonti fossili).
- Emissioni di CO₂, espresse in kg/m²anno rappresentano una stima delle emissioni di gas serra emessi in atmosfera a causa degli impianti tecnologici presenti nell'edificio.
- IDF (Indice di Dispersione Termica), espresso in W/m²K rappresenta la quantità di energia termica dispersa attraverso i componenti opachi (pareti, pavimenti e solai) e trasparenti (finestre) che lo costituiscono. Maggiore è l'IDF e peggiori sono le prestazioni termiche dell'involucro edilizio.

Questi parametri, a loro volta, dipendono dalle caratteristiche dell'involucro (edificio isolato o non isolato), dalla tipologia degli impianti di riscaldamento e di raffrescamento installati (caldaia tradizionale o a condensazione, generatore a biomassa o pompa di calore), dall'utilizzo di fonti di energia rinnovabile (solare termico e fotovoltaico), dalla posizione geografica dell'immobile e dal suo orientamento. Proprio per questi ultimi motivi l'Italia è stata suddivisa in zone in base alla rigidità del clima. Si tratta di sei fasce climatiche (**Figura 6**) definite mediante il D.P.R. n.412/1993 [20], ciascuna appartenente ad un range di gradi giorno. I gradi giorno (GG) corrispondono alla somma, su tutti i giorni dell'anno, della differenza positiva tra la temperatura dell'ambiente interno, fissata per convenzione a 20°C, e la temperatura media esterna giornaliera. In questo modo più è alto il numero di gradi giorno e maggiore sarà la rigidità del clima e di conseguenza anche il fabbisogno per il riscaldamento degli ambienti. A primo impatto si nota come la maggior parte dei comuni, e quindi degli edifici, si trovino nelle fasce climatiche più fredde.

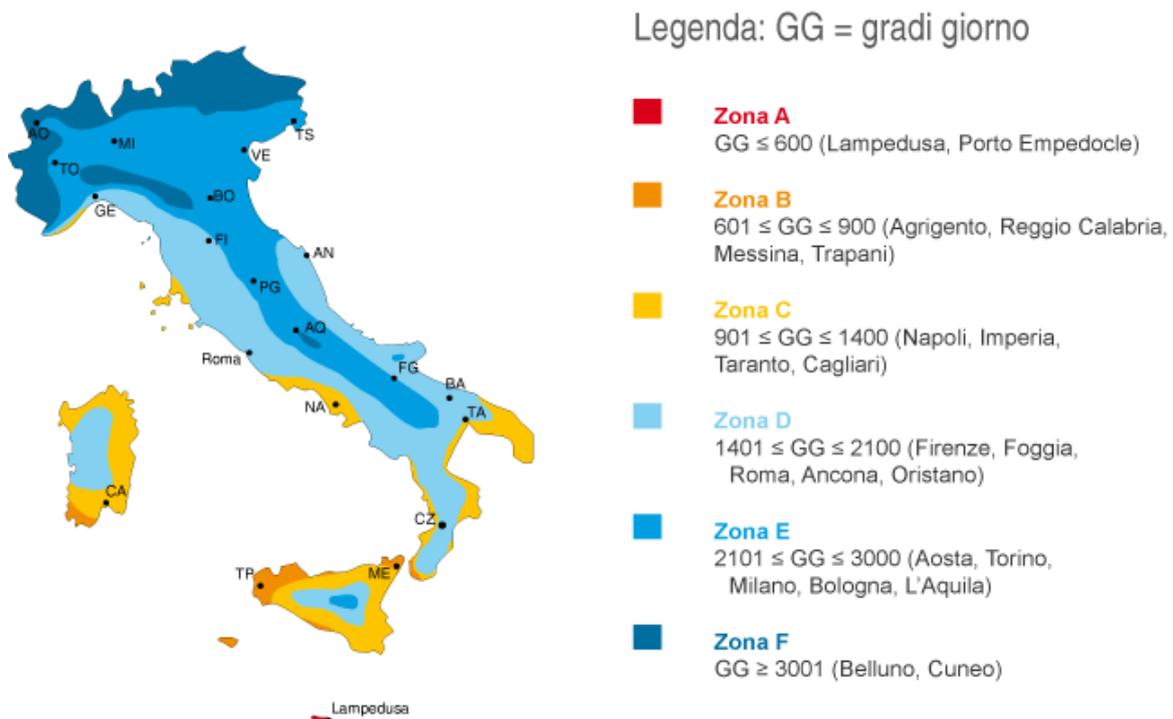


Figura 6 - Italia suddivisa in Zone Climatiche [20]

La suddivisione in zone permette di definire regole e norme specifiche per ciascuna di esse, in modo da adottare soluzioni adeguate alle condizioni climatiche locali. Ad esempio, nelle zone climatiche più fredde potrebbe essere necessario utilizzare materiali isolanti più performanti per diminuire il fabbisogno energetico di riscaldamento, oppure nelle zone più calde dover prevedere schermature solari per mitigare la necessità di raffrescamento estivo. Grazie alle zone climatiche e ai parametri standardizzati nel calcolo del fabbisogno energetico è possibile valutare l'efficienza degli edifici e definire le strategie per ridurre i consumi. Nella **Tabella 1** sono riportati i valori limite di trasmittanza da rispettare nel caso di interventi sull'involucro per le diverse zone climatiche. Nella **Tabella 2** invece sono riportati i periodi di tempo entro i quali è possibile accendere gli impianti di condizionamento.

	λ con isolamento Coperture	λ con isolamento Pavimenti	λ con isolamento Pareti	λ con sostituzione Serramenti
Zona climatica A	≤ 0,27 [W/m ² K]	≤ 0,40 [W/m ² K]	≤ 0,38 [W/m ² K]	≤ 2,60 [W/m ² K]
Zona climatica B	≤ 0,27 [W/m ² K]	≤ 0,40 [W/m ² K]	≤ 0,38 [W/m ² K]	≤ 2,60 [W/m ² K]
Zona climatica C	≤ 0,27 [W/m ² K]	≤ 0,30 [W/m ² K]	≤ 0,30 [W/m ² K]	≤ 1,75 [W/m ² K]
Zona climatica D	≤ 0,22 [W/m ² K]	≤ 0,28 [W/m ² K]	≤ 0,26 [W/m ² K]	≤ 1,67 [W/m ² K]
Zona climatica E	≤ 0,20 [W/m ² K]	≤ 0,25 [W/m ² K]	≤ 0,23 [W/m ² K]	≤ 1,30 [W/m ² K]
Zona climatica F	≤ 0,19 [W/m ² K]	≤ 0,23 [W/m ² K]	≤ 0,22 [W/m ² K]	≤ 1,00 [W/m ² K]

Tabella 1 - Limiti di trasmittanza in caso di interventi sull'involucro per le diverse zone climatiche

	Periodo di accensione	Orario consentito
Zona climatica A	1° dicembre – 15 marzo	6 ore giornaliere
Zona climatica B	1° dicembre – 31 marzo	8 ore giornaliere
Zona climatica C	15 novembre – 31 marzo	10 ore giornaliere
Zona climatica D	1° novembre – 15 aprile	12 ore giornaliere
Zona climatica E	15 ottobre – 15 aprile	14 ore giornaliere
Zona climatica F	Nessuna limitazione	Nessuna limitazione

Tabella 2 - Limiti di accensione impianti di condizionamento invernale per le diverse zone climatiche

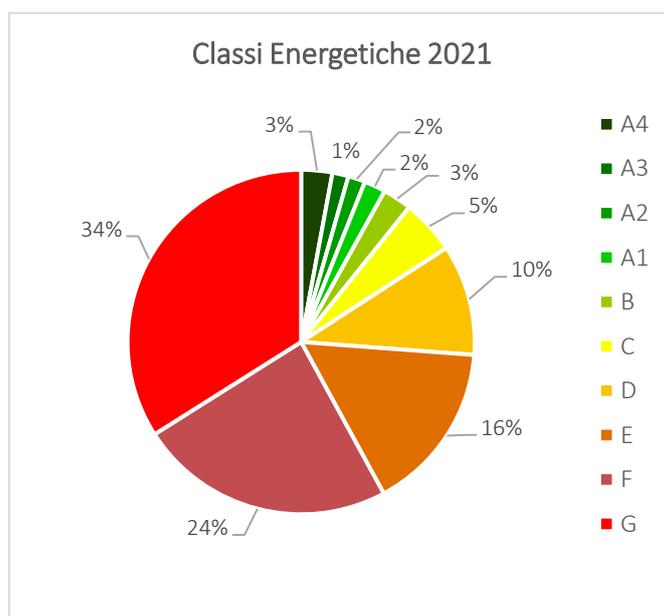


Figura 7 - Classi energetiche degli edifici secondo gli APE emessi nel 2021, fonte dei dati ENEA [21]

Nonostante l'introduzione di queste normative e la maggiore attenzione rivolta all'efficienza energetica, il parco edilizio italiano è ancora caratterizzato da numerosi edifici poco efficienti e con un alto consumo di energia. Stando all'ultimo *Rapporto Annuale sulla Certificazione Energetica degli Edifici* [21] redatto dall'ENEA sulla base dei dati elaborati tramite gli APE emessi dalle regioni italiane, risulta evidente come la maggior parte degli edifici si trovi fra le classi energetiche più basse, sottolineando quindi la scarsità dell'efficienza energetica e l'importanza di incentivarne gli interventi di riqualificazione.

Per superare tutte queste criticità, negli ultimi anni sono state introdotte alcune misure. Fra le ultime il Superbonus 110% [22], che prevedeva una detrazione fiscale del 110% per gli interventi di riqualificazione energetica e miglioramento sismico, a patto che vi fosse un salto, tra la situazione ante e post-intervento, pari ad almeno due classi energetiche. Questo incentivo ha rappresentato un'importante spinta per la riqualificazione del patrimonio edilizio italiano, favorendo la diffusione di tecnologie avanzate e sostenibili e la riduzione dei consumi energetici, seppur i beneficiari siano stati un gruppo ristretto di persone. Altre forme di incentivo attualmente disponibili prevedono la detrazione

della spesa al 65% e al 50% in dieci anni in base all'intervento effettuato (Ecobonus e Sisma bonus), o l'accesso agli incentivi del GSE⁴, come ad esempio il Conto Termico [23].

Come detto, la riduzione dei combustibili fossili e la transizione verso un utilizzo di fonti rinnovabili e sostenibili è una delle sfide più serie per l'umanità e fra le molteplici soluzioni legate ai consumi negli edifici, una riguarda l'installazione di impianti geotermici per il riscaldamento ed il raffrescamento degli ambienti, di cui si provvederà a parlare nei capitoli successivi.

⁴ Gestore dei Servizi Energetici [23]: si tratta di una società per azioni controllata interamente dal Ministero dell'Economia e delle Finanze, il cui compito è quello di gestire, promuovere e incentivare lo sviluppo delle fonti di energia rinnovabile e dell'efficienza energetica.

2. Geotermia

2.1 L'energia geotermica

La geotermia è la scienza che studia il calore contenuto nella Terra ed il suo sfruttamento sotto forma di energia termica o elettrica. Il termine deriva dal greco *geo*, che significa Terra, e *thermos*, che significa calore. Letteralmente “calore della Terra”. I fenomeni dai quali deriva l'energia geotermica sono principalmente due [24]:

1. Decadimento radioattivo

Alcuni elementi chimici normalmente presenti nelle rocce del sottosuolo, come ad esempio alcuni isotopi dell'uranio (U235-U238), del torio (Th232) e del potassio (K40) emettono continuamente particelle radioattive che si disintegrano e producono energia sotto forma di calore. Tale fenomeno avviene in quanto questi elementi sono altamente instabili poiché formati da un numero diverso di protoni e neutroni rispetto alla loro forma stabile più comune, e quindi suscettibili di emettere particelle subatomiche (alfa, beta e gamma) per raggiungere uno stato più stabile. Il decadimento comporta l'emissione di particelle (nel caso si tratti di decadimento alfa e beta) o di raggi (nel caso di decadimento di tipo gamma), con conseguenti emissioni di calore e interazione con gli atomi degli altri elementi presenti nel sottosuolo stesso.

2. Calore residuo

Durante il processo di formazione della Terra oltre 4,5 miliardi di anni fa, la materia è stata soggetta ad una grande compressione causata dalla gravità che ha comportato la formazione di calore. Inoltre, anche le collisioni e gli impatti con altri corpi celesti hanno rilasciato una energia cinetica che si è poi trasformata in calore. Una piccola parte di questa energia è ancora contenuta all'interno del Pianeta.

Per poter comprendere i meccanismi di trasmissione del calore dal nucleo terrestre fino alla crosta terrestre è necessario assumere come valida la teoria geodinamica [25], ovvero quella teoria che descrive l'aumento di temperatura, pressione e densità al crescere della profondità della Terra. Secondo questa teoria il Pianeta è costituito da una serie di strati concentrici di materiale che differiscono tra loro per composizione, densità e temperatura. Partendo dalla superficie esterna e andando in profondità, la suddivisione in base ai composti chimici permette la suddivisione in crosta, mantello e nucleo.

La **crosta terrestre** rappresenta il layer più esterno, uno strato molto sottile e di spessore quasi trascurabile rispetto al raggio della Terra, caratterizzato da rocce rigide e silicati, con una densità relativamente bassa compresa tra i 2,2 e i 3,0 g/cm³. A sua volta la crosta terrestre si distingue in “continentale” (40% del totale) e “oceanica” (60%). La crosta oceanica è relativamente giovane, ha uno spessore che varia tra i 3 e i 15 km ed è composta per lo più da rocce basaltiche; la crosta terrestre può raggiungere invece i 70 km di profondità ed è costituita da rocce granitiche e sedimentarie. Quest'ultima è inoltre caratterizzata da strutture geologiche, come pianure, colline e montagne, a loro volta interessate dai processi geologici come l'erosione e la deposizione, nonché da faglie e vulcani soggetti a subduzione e collisione di placche tettoniche. Tutti questi fattori rappresentano il risultato delle forze interne ed esterne che agiscono sul Pianeta e di conseguenza ne influenzano la morfologia e l'evoluzione [24].

Il **mantello** è invece il layer intermedio, compreso tra la crosta terrestre più esterna ed il nucleo più interno. Si estende per circa 2'900 km rappresentando l'82% del volume del Pianeta ed è costituito principalmente da silicati di magnesio e ferro, ma contiene anche quantità minori di altri elementi come alluminio, calcio e sodio che, a causa delle alte temperature e pressioni, si trova per lo più allo stato fuso

o parzialmente fuso. La densità è più elevata rispetto alla crosta e varia tra i 3,3 e i 5,5 g/cm³. In realtà, non vi è un confine netto fra il mantello e gli strati confinanti, ma ogni transazione è caratterizzata da una variazione nella composizione delle rocce e delle proprietà fisiche quali pressione e temperatura che cambiano con la profondità. A dividere, ma non separare fisicamente, la crosta dal mantello è la discontinuità di Moho⁵, un limite geologico caratterizzato da una brusca discontinuità nella velocità delle onde sismiche che dovrebbe rappresentare il confine tra la crosta terrestre più rigida ed il mantello più flessibile. È inoltre importante sottolineare che il mantello rappresenta una regione dinamica e attiva della Terra, dove si verificano molti dei processi geologici che influenzano l'evoluzione del Pianeta, fra cui la convezione mantellica: il materiale caldo e meno denso risale verso la superficie mentre il materiale più freddo e più denso scende verso il nucleo. Questo processo, insieme alla forza di gravità, è responsabile della formazione dei moti convettivi, che possono causare ad esempio l'attività vulcanica e la deriva dei continenti [24].

Il **nucleo** rappresenta infine lo strato più interno al Pianeta, ed è composto principalmente da ferro e nichel, con tracce di altri elementi come zolfo e ossigeno. Così come nel passaggio da crosta a mantello, anche il passaggio da mantello a nucleo non è improvviso ma graduale, ed è rappresentato dalla discontinuità di Gutenberg⁶, al di sopra della quale le onde sismiche viaggiano in un materiale plastico e al di sotto in uno liquido. A causa delle profondità a cui si trova il nucleo, pur comprendendone le importanti funzioni svolte, la sua struttura e le dinamiche interne sono ancora poco comprese dagli scienziati [24].

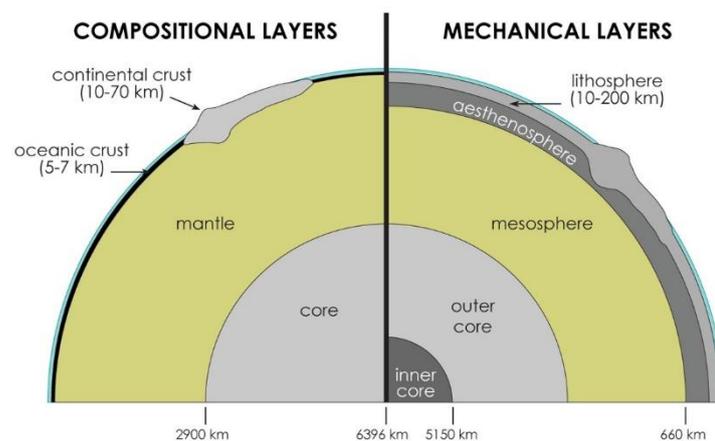


Figura 8 – Struttura della Terra [24]

Oltre alla suddivisione in base alla composizione chimica in crosta, mantello e nucleo, è possibile raggruppare il pianeta in cinque strati in base alle proprietà fisiche. In questo caso si hanno: litosfera, astenosfera, mesosfera, nucleo esterno e nucleo interno.

La litosfera rappresenta lo strato rigido esterno, composto dalla crosta terrestre e dalla parte superficiale del mantello. Ha uno spessore variabile tra i 10 e i 200 km e si divide in poche grandi placche tettoniche che si muovono sulla superficie della Terra provocando, nel caso in cui si allontanano tra loro, la fuoriuscita di materiale dalla profondità.

⁵ La discontinuità di Moho prende il nome dal geofisico croato Andrija Mohorovičić che la individuò nel 1909 osservando la differenza nella velocità delle onde sismiche tra la crosta terrestre ed il mantello [24][24].

⁶ La discontinuità di Gutenberg prende il nome dal geofisico tedesco Beno Gutenberg che la individuò nel 1913 osservando la differenza nella velocità delle onde sismiche tra il mantello superiore ed il nucleo [24][24].

L'astenosfera è lo stato sottostante la litosfera e si estende all'incirca dai 200 ai 700 km di profondità. È principalmente composta da rocce parzialmente fuse caratterizzate dalla possibilità di deformarsi plasticamente. In questa regione il decadimento radioattivo di cui si è parlato in precedenza provoca il riscaldamento della Terra e fornisce quindi energia per la movimentazione delle placche litosferiche, nonché la trasmissione del calore verso la superficie esterna grazie alla circolazione convettiva.

La mesosfera, o mantello inferiore, è lo strato sottostante l'astenosfera che si estende fino a circa 2'890 km in corrispondenza con l'inizio del nucleo.

Vi è infine il nucleo che si divide in due parti: esterno e interno. Il nucleo esterno inizia a circa 2'890 km di profondità e si estende per 2'260 km fino a raggiungere il nucleo interno ad una profondità di 5'150 km, quest'ultimo si estende per 1'220 km fino al centro della Terra che si trova ad una profondità di circa 6'370 km. Il nucleo esterno è liquido ed è caratterizzato da un forte flusso convettivo che genera il campo magnetico terrestre. La sua temperatura è variabile, compresa tra i 4'000 e i 5'000 °C. Nel nucleo interno invece le temperature possono raggiungere i 5'500 °C e per questo motivo, insieme alle maggiori pressioni a cui è sottoposto, si presume che il nucleo interno sia solido [24].

Definita la struttura della Terra risulta importante comprendere come avviene la trasmissione del calore al suo interno. Nel terreno lo scambio termico, ovvero la trasmissione del calore, avviene principalmente per via della conduzione termica, ma in alcune zone partecipano anche la convezione e la radiazione.

La conduzione termica si verifica quando due corpi che si trovano a temperature differenti vengono messi a contatto. Le molecole adiacenti trasferiscono l'energia termica tramite collisioni, conducendo il calore da un materiale all'altro con una velocità che dipende dalla conducibilità termica e dalla loro densità, a loro volta dipendenti dai materiali stessi. Nel caso del terreno, poiché le rocce presenti nel sottosuolo hanno una conducibilità termica molto bassa la propagazione mediante conduzione avviene lentamente. Nella litosfera (crosta terrestre e parte superiore del mantello) la presenza di rocce solide rende la conduzione il meccanismo predominante nella trasmissione del calore. C'è da ricordare che la conduzione non riguarda solamente lo scambio di calore tra due corpi solidi, ma anche tra un corpo solido ed uno liquido a contatto tra loro. È il caso del trasferimento di calore tra il terreno e le acque meteoriche o superficiali che, infiltrandosi, raggiungono le rocce più calde e aumentano la loro temperatura, formando i cosiddetti serbatoi geotermici (reservoir). Il fenomeno della conduzione è descritto mediante la legge di Fourier [26], la quale afferma che il flusso di calore Q attraverso un materiale è proporzionale al gradiente di temperatura ∇T lungo la direzione di trasferimento del calore e all'area trasversale A attraverso cui avviene il flusso:

$$Q = -k \cdot A \cdot \nabla T = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dz} \quad (2.1)$$

Il secondo meccanismo di trasmissione del calore geotermico è la convezione e riguarda sia lo scambio fra le rocce allo stato fluido situate in profondità, sia lo scambio con l'acqua che, dopo essere stata riscaldata, si espande e, diventando meno densa, raggiunge la superficie portando con sé il calore.

Il terzo ed ultimo meccanismo di trasmissione del calore che avviene all'interno della Terra è la radiazione e riguarda tutti gli strati del terreno poiché coinvolge l'emissione e l'assorbimento di radiazione elettromagnetica da parte delle particelle componenti il terreno stesso che si trovano a temperature differenti.

È importante sottolineare come questi meccanismi di trasmissione del calore non siano separati fra di loro, ma spesso interagiscono e sono co-presenti nella stessa regione di scambio termico.

In base alla temperatura delle risorse sfruttate è possibile suddividere i sistemi geotermici in sistemi ad alta, media o bassa entalpia [24].

1. Sistemi ad alta entalpia

Si parla di sistemi ad alta entalpia quando le risorse geotermiche presentano da una temperatura maggiore di 140°C [27]. Il loro utilizzo è legato principalmente alla produzione di energia elettrica su larga scala in quanto il vapore prodotto ad alta temperatura può facilmente alimentare turbine a vapore producendo elettricità in modo efficiente, tuttavia tali risorse possono essere utilizzate anche per la produzione di energia termica finalizzata al riscaldamento urbano (per riscaldare quartieri o edifici), all'uso industriale (nell'industria alimentare, nella produzione della carta, nella distillazione dell'alcol o nell'essiccazione dei prodotti agricoli), o ancora a processi termici che richiedono la presenza di vapore ad alta temperatura (come i processi di desalinizzazione o i trattamenti termici dei materiali).

Le risorse geotermiche ad alta entalpia si trovano solitamente in zone caratterizzate da attività vulcanica o tettonica, dove il calore interno della terra viene trasferito in profondità attraverso le rocce raggiungendo i pozzi geotermici in cui è presente l'acqua che, scaldandosi, evapora e tende ad andare verso l'alto fino a raggiungere la superficie, ma non solo. Infatti, in base alle modalità di trasferimento del calore ed alla struttura del sottosuolo è possibile riconoscere:

- Sistemi a vapore dominante, quando sono presenti un serbatoio termico con superfici impermeabili verso il terreno circostante con all'interno rocce molto porose in grado di far circolare il fluido termovettore, e la contemporanea presenza di risalite di magma ad alcuni chilometri dalla superficie che, scaldando l'acqua contenuta nel serbatoio geotermico, forma vapore;
- Sistemi ad acqua calda con caratteristiche analoghe ai sistemi a vapore dominante, ma in cui l'acqua non supera i 100°C;
- Sistemi geo-pessurizzati, in cui l'acqua calda si trova a profondità elevate – e quindi con alte pressioni – in strati di rocce porose allo stato liquido
- Sistemi hot-dry rock (HDR), in cui non è presente un fluido termovettore ed il calore viene accumulato all'interno della roccia porosa;
- Sistemi magmatici, in cui il calore è dovuto al magma che, risalendo in superficie, rimane intrappolato nelle rocce formando i serbatoi termici.

Il principale svantaggio dei sistemi ad alta entalpia è che non sono presenti in tutte le regioni del pianeta e perciò la loro applicabilità è limitata, senza considerare gli elevati costi di investimento nel caso in cui la risorsa non sia disponibile in superficie e si debba procedere mediante la realizzazione di pozzi profondi.

2. Sistemi a media entalpia

I sistemi a media entalpia sono caratterizzati da una risorsa geotermica la cui temperatura è compresa tra i 90°C e i 140°C [28]. Anche in questo caso il loro utilizzo può essere destinato sia alla produzione di calore che di elettricità. Nel primo caso grazie all'uso di pompe di calore geotermiche è possibile condizionare gli edifici sia nel riscaldamento invernale, sia nel raffrescamento estivo. Nel secondo caso, a differenza dei sistemi ad alta entalpia in cui la presenza di vapore surriscaldato permette l'espansione direttamente in turbina, nei sistemi a media entalpia si può utilizzare il calore geotermico in un ciclo Rankine per far evaporare un fluido con un più basso punto di ebollizione per poi produrre elettricità mediante una turbina. Un ulteriore utilizzo è legato a quelle applicazioni industriali che necessitano di calore a temperature moderate come i processi di sterilizzazione o di essiccazione mediante vapore o nelle applicazioni agricole dove può essere necessaria acqua calda (ad esempio per irrigare serre e controllare umidità e temperatura al loro interno).

3. Sistemi a bassa entalpia

Quando la temperatura della risorsa geotermica è inferiore a 90°C si parla di sistemi geotermici a bassa entalpia [24]. In questo caso la temperatura non è sufficientemente elevata per permettere la produzione di elettricità, ma è possibile sfruttare il calore terrestre per il condizionamento degli ambienti, per i processi produttivi e per le attività termali. Ulteriori caratteristiche saranno definite nel paragrafo “2.3 Sistemi a bassa entalpia”.

2.2 Temperatura e scambio termico nel terreno

Date tutte le premesse pocanzi descritte risulta chiaro come la temperatura aumenti all'aumentare della profondità. Tale variazione positiva di temperatura è definita dal gradiente geotermico [29], termine che compare anche nell'equazione (2.1):

$$\nabla T = \frac{dT}{dz} = \frac{Q}{k \cdot A} = \frac{q}{k} \quad (2.2)$$

Il valore del gradiente geotermico non è costante e varia molto in base ai materiali presenti nel terreno (alcuni, infatti, conducono più di altri). In media il valore di questo parametro è dell'ordine dei 25-30 °C per ogni km, ovvero circa 0,03 °C/m. Si rimanda alla **Figura 9** per osservare l'evoluzione del gradiente geotermico in funzione della profondità.

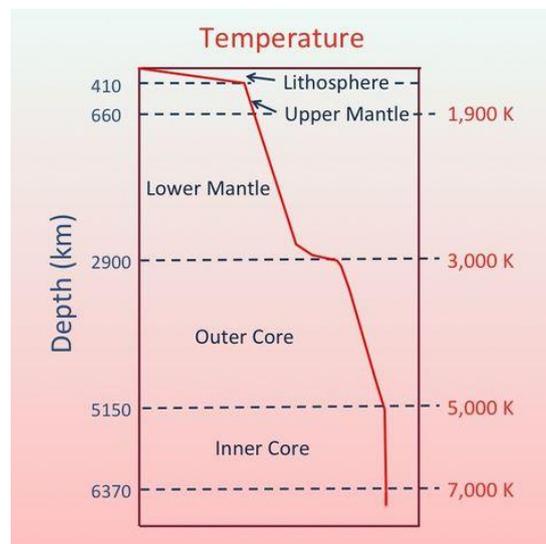


Figura 9 - Andamento del gradiente geotermico [29]

Poiché la tecnologia attuale non consente di raggiungere profondità elevate, specialmente per quanto riguarda le applicazioni geotermiche, risulta particolarmente interessante valutare come varia la temperatura nello strato superficiale del sottosuolo. Per fare questo è sufficiente scrivere l'equazione della conduzione del calore facendo alcune ipotesi semplificative [29].

$$k \cdot \nabla^2 T + Q = \rho \cdot c \cdot \frac{dT}{dt} \quad (2.3)$$

Ipotesi:

1. Conduzione monodimensionale

Si ipotizza che il flusso del calore avvenga in un'unica direzione. Questa ipotesi semplifica l'equazione di diffusione, considerando solo la variazione della temperatura nel tempo e lungo una dimensione spaziale (asse z, ovvero la profondità).

2. Terreno omogeneo e isotropo

Si suppone che le proprietà termiche del terreno (come, ad esempio, la conducibilità termica e la capacità termica) siano uniformi e costanti in tutte le direzioni di sviluppo. Questa ipotesi permette di semplificare l'equazione di diffusione considerando un solo valore per le proprietà del terreno.

3. Assenza di sorgenti interne e di perdite di calore

Si ignorano le eventuali sorgenti di calore interne (come, ad esempio, i processi di decomposizione) o l'assorbimento di calore dalla superficie del terreno. Questa ipotesi limita l'equazione della conduzione alla sola diffusione.

Assumendo come condizioni al contorno:

$$\begin{cases} T(z, t = 0) = T_0(z) \\ T(z = 0, t) = T_m + A_s \cdot \sin(\omega \cdot t) \\ T(z \rightarrow \infty; t) = cost \end{cases}$$

Ovvero:

- Che la temperatura ad ogni profondità sia pari ad un valore funzione della profondità stessa;
- Che la temperatura superficiale del terreno sia pari alla temperatura media esterna in funzione del giorno dell'anno considerato, e quindi approssimata ad una sinusoide di ampiezza A_s e pulsazione ω ;
- Che la temperatura all'aumentare della profondità tenda asintoticamente ad una costante;

Risolvendo l'equazione (2.3) si ottiene il profilo di temperatura in funzione del tempo t e della profondità z ovvero:

$$T(z, t) = T_m + A_s \cdot e^{-\beta_s \cdot z} \cdot \sin(\omega \cdot t - \beta_s \cdot z) \quad (2.4)$$

Dove il nuovo parametro β_s rappresenta il fattore di smorzamento ed è il risultato del termine $\sqrt{\frac{\rho \cdot c}{2 \cdot k}} \cdot \omega$

Tale evoluzione è rappresentata graficamente, per i diversi mesi dell'anno, nella **Figura 10**.

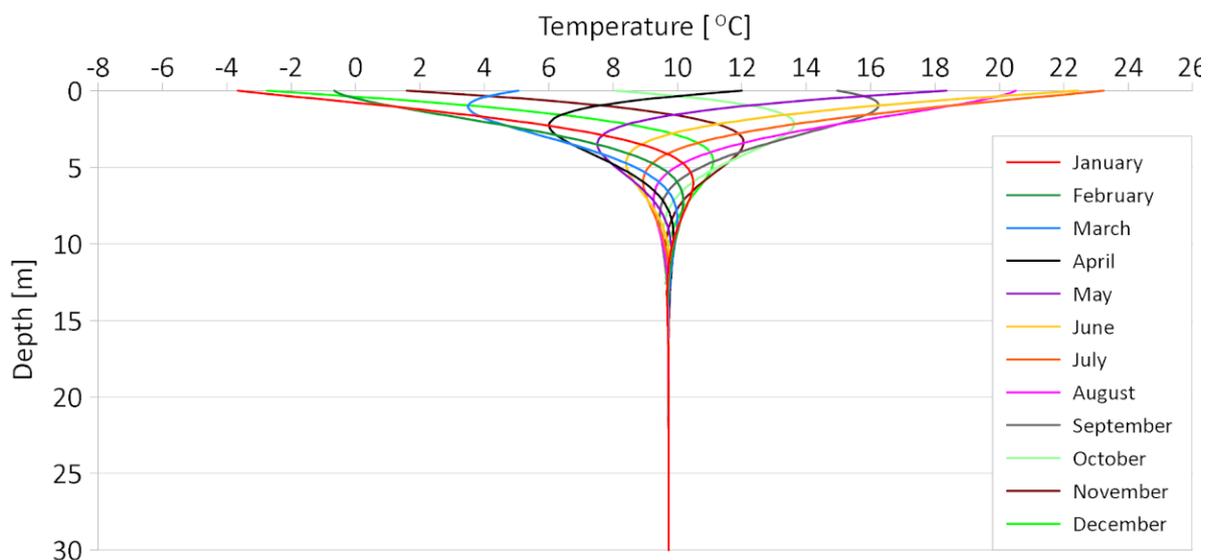


Figura 10 - Profilo di temperatura nei diversi mesi dell'anno [30]

Risulta tuttavia evidente come queste variazioni si attenuino man mano che ci si sposta in profondità, fino a diventare nulle oltre i 15-20 metri.

Osservando la **Figura 10** si possono distinguere tre zone.

- **Zona superficiale:**
Nelle prime decine di centimetri il terreno risente delle variazioni stagionali e giornaliere della temperatura atmosferica; pertanto, la sera si avranno delle temperature più alte rispetto al mattino.
- **Zona di transizione:**
Al di sotto della zona superficiale vi è un tratto in cui la temperatura varia più gradualmente, risentendo solamente delle variazioni stagionali e non più di quelle giornaliere; si avranno quindi delle temperature più alte in estate rispetto all'inverno.
- **Zona stabile:**
Più in profondità la temperatura è indipendente delle condizioni climatiche esterne. In questa zona l'aumento di temperatura dipende solamente dal gradiente geotermico del terreno.

Poiché nella zona superficiale e in quella di transizione la temperatura del terreno rispetto a quella dell'aria esterna è più alta in inverno e più bassa in estate, è possibile sfruttare il terreno come un pozzo geotermico da cui prelevare calore in inverno e in cui cederne in estate. A causa di queste variazioni nella temperatura risulta chiaro come l'andamento di tale parametro sia fondamentale per progettare ed utilizzare in modo efficace i sistemi geotermici. Una conoscenza accurata delle variazioni di temperatura permette di determinare la profondità ottimale di installazione dei sistemi geotermici in modo da massimizzare l'efficienza del sistema, anche in relazione ai costi di realizzazione dell'impianto stesso, nonché di prevenire problemi come il surriscaldamento o il sottoraffreddamento del fluido termovettore che potrebbero influire negativamente sull'efficienza del sistema geotermico.

Per quanto concerne lo scambio termico, dati per buoni i meccanismi descritti pocanzi di conduzione, convezione e radiazione, è opportuno definire il terreno come un mezzo poroso, quindi con calore che viene ceduto sia alla fase solida (roccia), sia alla fase liquida (acqua). Poiché quest'ultima è spesso presente all'interno delle rocce, è necessario introdurre il concetto di porosità (j) di una roccia, ovvero il rapporto tra il volume degli spazi vuoti al suo interno e il volume totale [24]:

$$j = \frac{V_{void}}{V_{tot}} \quad (2.5)$$

Applicando l'equazione del calore per la fase solida rocciosa (pedice r) si otterrà:

$$\rho_r \cdot c_r \cdot (1 - j) \cdot \left(\frac{dT_r}{dt} \right) = (1 - j) \cdot \nabla(k_r \cdot \nabla T_r) + (1 - j) \cdot q_r''' \quad (2.6)$$

Allo stesso modo per la fase liquida (pedice w):

$$\rho_w \cdot c_w \cdot j \cdot \frac{dT_r}{dt} + \rho_w \cdot c_w \cdot v_w \cdot \nabla T_w = j \cdot \nabla(k_w \cdot \nabla T_w) + j \cdot q_w''' \quad (2.7)$$

In entrambe le equazioni il primo membro rappresenta la variazione temporale della temperatura per ogni mezzo analizzato (roccia e acqua), mentre alla destra dell'uguale sono riportati i termini che tengono conto del calore trasmesso in funzione della conducibilità del materiale (k) e la generazione interna volumetrica di potenza.

Considerando il mezzo poroso nella sua totalità è possibile scrivere la densità, il calore specifico e la conducibilità termica pesando ogni materiale, ovvero:

$$\rho = \rho_r \cdot (1 - j) + \rho_w \cdot j \quad (2.8)$$

$$c = c_r \cdot (1 - j) + c_w \cdot j \quad (2.9)$$

$$k = k_r \cdot (1 - j) + k_w \cdot j \quad (2.10)$$

Ipotizzando inoltre nulla la generazione interna volumetrica di potenza e assumendo che i due mezzi si trovino alla stessa temperatura T è possibile riscrivere un'unica equazione facente riferimento al mezzo poroso:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{dT}{dt} + \rho_w \cdot c_w \cdot v_w \cdot \nabla T = \nabla(k \cdot \nabla T) \quad (2.11)$$

2.3 Sistemi a bassa entalpia: le pompe di calore

Come visto in precedenza le risorse geotermiche a bassa entalpia sono per lo più utilizzate per il riscaldamento ed il raffrescamento degli ambienti. Il loro sfruttamento può avvenire mediante il ciclo aperto o il ciclo chiuso. Nel primo si sfrutta l'acqua presente nel sottosuolo per estrarre (o cedere) calore, prelevando il fluido e reimmettendolo ad una temperatura differente, il cui ΔT è proporzionale all'energia termica trasferita; nel ciclo chiuso invece, poiché si utilizza il terreno come un grande scambiatore di calore, non è necessario prelevare acqua dal sottosuolo, ma è presente un fluido termovettore che, passando all'interno di una serpentina, scambia calore con l'ambiente circostante.

Entrambi i circuiti funzionano con una pompa di calore [31], ovvero un dispositivo che consente, tramite una serie di compressioni ed espansioni, di trasmettere energia termica da un lato all'altro del sistema a scapito di una spesa esterna (lavoro meccanico) che nella maggior parte dei casi corrisponde ad energia elettrica. Il circuito rappresentante il funzionamento della pompa di calore è riportato nella **Figura 11**.

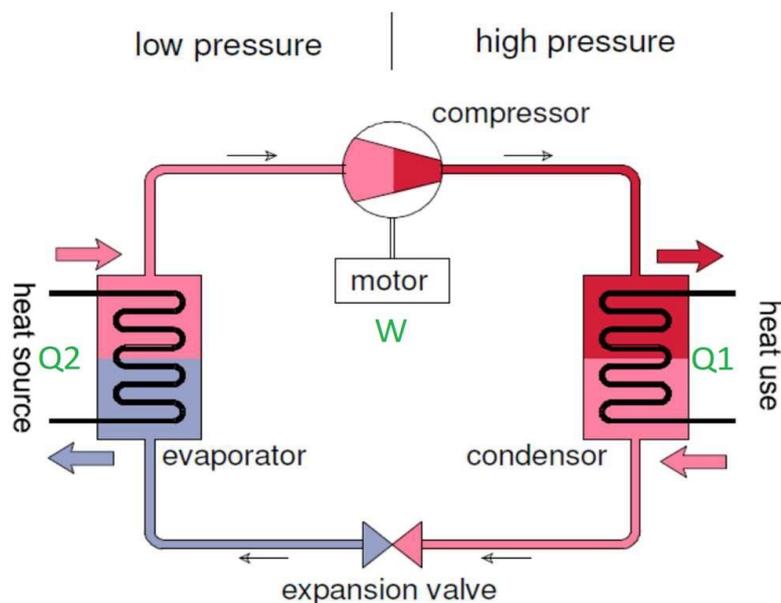


Figura 11 - Circuito pompa di calore [24]

Si possono distinguere quattro elementi:

1. **EVAPORATORE:** è uno scambiatore di calore in grado di assorbire il calore presente nel terreno (o nell'acqua di falda) e cederlo al fluido termovettore utilizzato nella pompa di calore. Tale fluido deve avere la proprietà di evaporare a temperature molto basse a pressione atmosferica, in quanto il passaggio di stato permette l'assorbimento di una quantità maggiore di calore. In questo componente avviene la *trasformazione isoterma* rappresentata sul diagramma pressione entalpia (**Figura 12**) dal tratto 2-3.

2. **COMPRESSORE:** all'interno di questo componente il fluido termovettore, allo stato di bifase, aumenta la sua pressione e quindi la sua entalpia a scapito di un lavoro meccanico raggiungendo la fase di vapore saturo. Si parla di *compressione isoentropica* (tratto 3-4).
3. **CONDENSATORE:** si tratta di un secondo scambiatore di calore in cui il calore presente nel fluido termovettore viene ceduto all'utenza e, abbassando la sua temperatura, condensa tornando allo stato liquido. La cessione del calore avviene in condizioni isoterme ed isobare alla massima pressione del ciclo; pertanto, si ha una nuova *trasformazione isoterma* (tratto 4-1).
4. **VALVOLA DI ESPANSIONE:** questo componente permette di abbassare la pressione del fluido termovettore per farlo tornare alla pressione iniziale, raggiungendo nuovamente la fase liquida. Si tratta di una *espansione isoentropica* (tratto 1-2).

L'efficienza di una macchina termica che lavora come pompa di calore è data dal rapporto tra l'effetto utile (calore ceduto all'ambiente Q_1) e la spesa (energia elettrica assorbita W). Questo rapporto prende il nome di Coefficiente di prestazione, ovvero il COP:

$$COP = \frac{Q_1}{W} = \frac{Q_1}{Q_1 - Q_2} \quad (2.12)$$

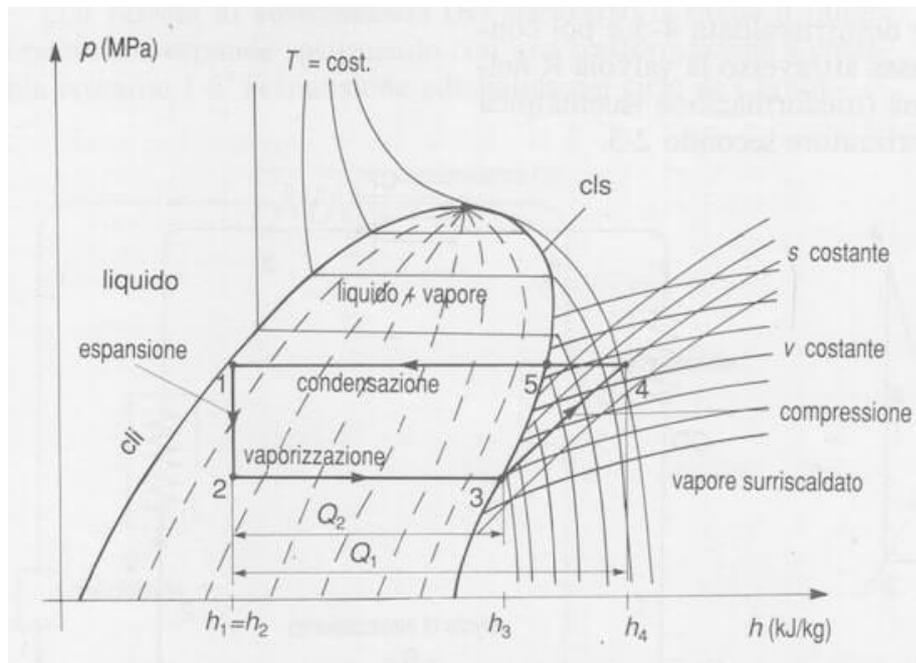


Figura 12 - Ciclo frigorifero sul diagramma di Mollier (p-h) [32]

Se invece il sistema opera come macchina frigorifera il beneficio è rappresentato dal calore sottratto all'ambiente (Q_2), mentre l'energia spesa è sempre l'energia immessa nel sistema (W). In questo caso l'efficienza prende il nome di Energy Efficiency Ratio, ovvero l'EER:

$$EER = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} \quad (2.13)$$

Nel ciclo di Carnot il rapporto tra le quantità di calore è proporzionale al rapporto tra le temperature delle due fasi, è possibile riscrivere la (2.12) come:

$$COP = \frac{T_1}{T_1 - T_2} \quad (2.14)$$

E la (2.13) come:

$$EER = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \quad (2.15)$$

Poiché il Ciclo di Carnot inverso possiede delle difficoltà tecniche, vi sono alcuni accorgimenti che vengono messi in atto. Il primo è il proseguimento del tratto 2-3 oltre la curva limite superiore, ovvero il fluido viene leggermente surriscaldato affinché sia presente solo la fase di vapore e durante la compressione non siano presenti goccioline di liquido che potrebbero andare a danneggiare il compressore. Inoltre, la condensazione (tratto 4-1) viene prolungato oltre la curva limite superiore per garantire la completa condensazione del refrigerante (sotto-raffreddamento). Avvengono infine delle piccole variazioni di pressione durante le fasi di trasferimento del calore; quindi, non si avranno delle trasformazioni perfettamente isobare, e la compressione e l'espansione, limitate dall'efficienza dei componenti, non saranno esattamente isoentropiche e isoentalpiche.

Poiché le prestazioni delle pompe di calore variano in base alla temperatura operativa, in caso di confronto tra due macchine differenti, è importante assicurarsi che il COP sia valutato alla stessa temperatura di riferimento. In Europa, il Regolamento UE 517/2014 – recepito in Italia con il D.Lgs. 141/2016 – stabilisce che le pompe di calore siano classificate in diverse fasce in base al COP valutato in condizioni di riferimento [33], ovvero:

- Temperatura esterna pari a 7°C;
- Umidità relativa esterna dell'80%;
- Temperatura interna pari a 20°C;
- Umidità relativa interna del 50%.

Definito quindi il ruolo della pompa di calore è possibile parlare delle due tipologie di sistemi in cui essa viene utilizzata per lo scambio di calore con il terreno: sistemi a circuito aperto (*open loop systems*) e sistemi a circuito chiuso (*closed loop systems*).

2.4 Open loop systems

I **sistemi a circuito aperto** sono impianti che sfruttano l'energia termica presente nelle acque sotterranee per il riscaldamento ed il raffreddamento negli edifici [34]. Più in particolare, in questi tipi di impianti, l'acqua prelevata viene utilizzata direttamente con la pompa di calore, per poi essere scaricata tramite un pozzo di re-immissione (o in un fiume ad esempio) a valle del luogo di prelievo.

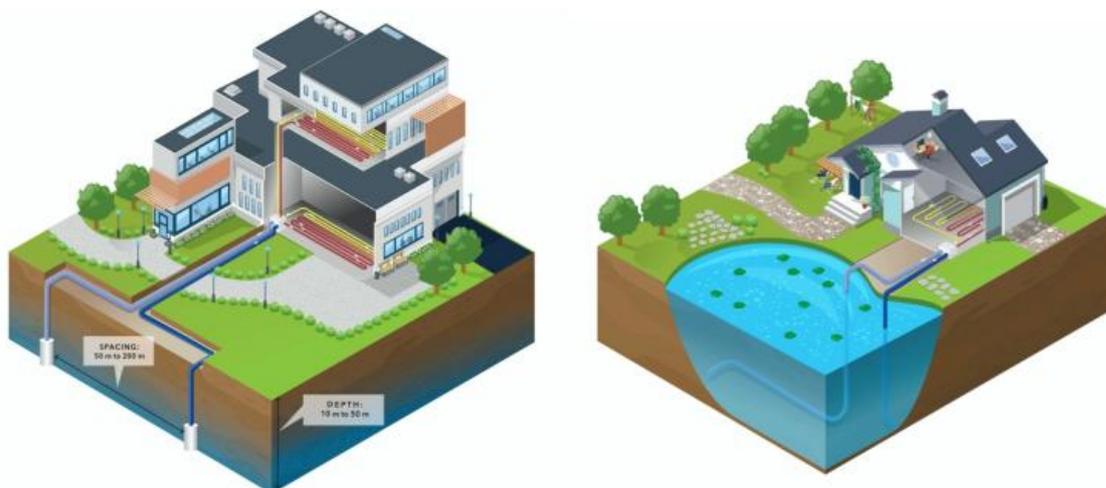


Figura 13 - Schema semplificato impianto geotermico a circuito aperto [34]

Il primo aspetto da tenere in considerazione nel caso di progettazione di un sistema a circuito aperto è la presenza della risorsa idrica e la sua capacità di soddisfare il fabbisogno termico (in riscaldamento o raffreddamento) dell'edificio. In particolare, la potenza che può idealmente essere estratta dipende dalla

portata di acqua disponibile e dalla differenza di temperatura che si vuole imporre, secondo l'equazione [31]:

$$Q = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta T \quad (2.16)$$

Inoltre, è importante monitorare la qualità dell'acqua in quanto la presenza di ferro, manganese o altri componenti ferrosi può causare incrostazioni, corrosioni ed occlusioni all'impianto [24].

In secondo luogo, bisogna capire come trattare l'acqua utilizzata da cui è stato assorbito (o a cui è stato ceduto) il calore. Di per sé l'acqua è pulita in quanto ha solamente subito una variazione della sua temperatura e pertanto può essere reimessa in ambiente senza particolari precauzioni. Le opzioni sono:

1. **Scarico in un corpo superficiale:** è una soluzione semplice e che non richiede particolari costi se il corso d'acqua si trova in prossimità dell'impianto; tuttavia, bisogna valutare attentamente le modifiche nella temperatura del fiume che possono avere effetti sull'ecosistema locale. Inoltre, bisogna assicurarsi che il fiume sia in grado di trasportare la portata d'acqua aggiunta senza straripare lungo tutto il suo percorso;
2. **Re-immissione nello stesso acquifero:** è una soluzione più costosa in quanto si necessita di un ulteriore pozzo che trasporti l'acqua prelevata fino all'acquifero sotterraneo. In questo caso bisogna assicurarsi che la re-immissione non avvenga in prossimità del punto di prelievo per non contaminare l'acqua da estrarre con acqua ad una temperatura diversa. Per evitare questo fenomeno bisogna che la distanza tra i due pozzi rispetti la relazione di Clyde e Madabhushi (1983) [24]:

$$L > \frac{2 \cdot Z}{T \cdot \pi \cdot i} \quad (2.17)$$

Con:

- L [m] distanza tra i due pozzi;
 - Z [m^3/day] portata della falda;
 - T [m^2/day] trasmissività dell'acquifero;
 - i [-] gradiente idraulico naturale.
3. **Immissione in un altro acquifero:** questa soluzione garantisce che l'acqua di prelievo abbia una temperatura costante e non sia contaminata dall'acqua di scarico ma è limitata dalla presenza di un secondo acquifero in prossimità del punto di prelievo;
 4. **Immissione nel pozzo di estrazione:** questa soluzione è sicuramente più economica perché si utilizza lo stesso pozzo di estrazione per scaricare l'acqua. Per evitare contaminazioni sulla temperatura dell'acqua estratta quello che viene fatto è prelevare l'acqua nella parte bassa del pozzo e reimmetterla nella parte alta. In questo modo si crea una stratificazione della temperatura che non influenza l'acqua estratta;
 5. **Scarico in fogna:** questa soluzione, benché semplice, può essere molto costosa in quanto il gestore della fognatura potrebbe farsi pagare per il trattamento dell'acqua; inoltre, poiché l'acqua scaricata è tendenzialmente pulita, è uno spreco mandarla in fognatura dove subirebbe un trattamento di pulizia non necessario.

Nell'ultima fase, ma non meno importante rispetto alle due precedenti, è necessario analizzare il terreno per comprendere quali sono le tecniche di trivellazione ed i materiali migliori da utilizzare in fase di costruzione.

Fatte queste premesse è possibile procedere con la realizzazione del pozzo di estrazione [24]. In fase di trivellazione viene inserita un'intelaiatura temporanea che prende il nome di *temporary case* in grado di mantenere il pozzo aperto evitando che le pareti crollino. Dopodiché si procede con l'inserimento della struttura definitiva, solitamente in acciaio e della pompa per l'estrazione. Il pozzo deve inoltre essere provvisto di un filtro in grado di far entrare solamente l'acqua proveniente dall'acquifero e non il materiale sabbioso/roccioso eventualmente presente. L'intercapedine tra il pozzo e le pareti viene poi riempita di cemento in grado di fornire alla struttura stabilità e resistenza.

Oltre che dalla formazione geologica, la massima quantità di acqua che può essere estratta in un certo lasso di tempo (*well yield*), dipende dalle caratteristiche del pozzo di estrazione e dalla portata prevista dai limiti imposti dalla normativa: l'estrazione comporta un abbassamento del battente d'acqua in corrispondenza del punto di estrazione (formato il cosiddetto "cono di depressione") che, oltre a ridurre la portata disponibile, modifica il livello statico della falda. Bisogna quindi ridurre il più possibile la formazione del cono di depressione e garantire il deflusso minimo vitale dell'acquifero.

Per quanto concerne i vantaggi [35] dei sistemi di tipo "open loop", poiché in ingresso al sistema vi è un fluido (acqua) che possiede un'elevata capacità termica specifica e che si trova solitamente ad una temperatura costante, il rendimento è maggiore rispetto agli impianti a circuito chiuso dove, come detto, vi è una variazione della temperatura del terreno a causa delle fluttuazioni esterne stagionali. Il meccanismo di scambio termico prevalente è la convezione forzata, e questo aumenta il rendimento rispetto al solo scambio per conduzione. Un ulteriore punto a favore è che gli impianti a circuito aperto occupano poco spazio e sono quindi meno dispendiosi nella fase di costruzione (escludendo i costi eventualmente necessari per la realizzazione di più pozzi di ispezione in fase di studio di fattibilità). Inoltre, seppure l'acqua in ingresso non debba avere particolari caratteristiche e possa essere utilizzata così come disponibile in natura (ad esempio anche nelle zone costiere dove può essere presente una salinità maggiore), possono verificarsi incrostazioni o corrosioni nelle tubazioni e nello scambiatore della pompa di calore. Per questo motivo è comunque importante effettuare un'analisi chimica delle acque prima di procedere con la costruzione dell'impianto. La progettazione è complessa ed è necessario effettuare un'analisi che garantisca la compatibilità geologica del terreno con il tipo di impianto, nonché richiedere molte autorizzazioni e certificazioni che spesso provocano lunghi tempi di attesa e molte spese da sostenere. Non trascurabili sono i costi di pompaggio, presenti in tutto il ciclo vita dell'impianto, che abbassano la competitività rispetto ad altri sistemi di riscaldamento comunemente utilizzati (come il teleriscaldamento nei centri urbani). Ultimo ma non meno importante è il problema legato alla contaminazione delle acque sotterranee. Seppure gli impianti siano di per sé puliti e non vengano dispersi componenti nocivi in ambiente, attingendo a falde acquifere isolate, si permette l'ingresso di sostanze provenienti dall'esterno e dal terreno, favorendo la contaminazione dell'acqua presente.

2.5 Closed loop systems

Negli impianti a circuito chiuso l'estrazione del calore dal terreno avviene senza il prelievo e la conseguente reiniezione di acqua dal terreno grazie alla presenza di un fluido termovettore che, uscendo dalla pompa di calore e passando in condotte situate nel terreno, assorbe il calore presente nel sottosuolo e lo ritrasmette alla pompa di calore, dove viene estratto e mandato all'utenza [24]. In questo modo il fluido vettore viene raffreddato ed è pronto per iniziare un nuovo ciclo. Quanto detto vale se il sistema lavora in "modalità riscaldamento". In estate, invece, quando l'obiettivo è quello di raffrescare gli ambienti interni, il ciclo funziona al contrario, ed il calore estratto dall'ambiente caldo viene ceduto al terreno più freddo.

I sistemi di tipo chiuso sono più flessibili rispetto ai sistemi aperti e possono essere installati praticamente ovunque, senza la necessità che vi sia disponibilità della risorsa idrica sotterranea e senza la necessità di particolari autorizzazioni. Inoltre, a seconda dello spazio a disposizione, è possibile adottare una configurazione mediante sonde verticali oppure tramite serpentine disposte orizzontalmente nel terreno [35].

La configurazione con sonde verticali è sempre preferibile in quanto lavorando in profondità è possibile scambiare calore con quella porzione di terreno a temperatura costante, non risentendo quindi degli sbalzi termici superficiali. Tuttavia, spesso, la necessità di effettuare molteplici trivellazioni per l'installazione di più sonde è più onerosa rispetto alla semplice posa di serpentine orizzontali, specialmente in fase di costruzione dell'immobile.

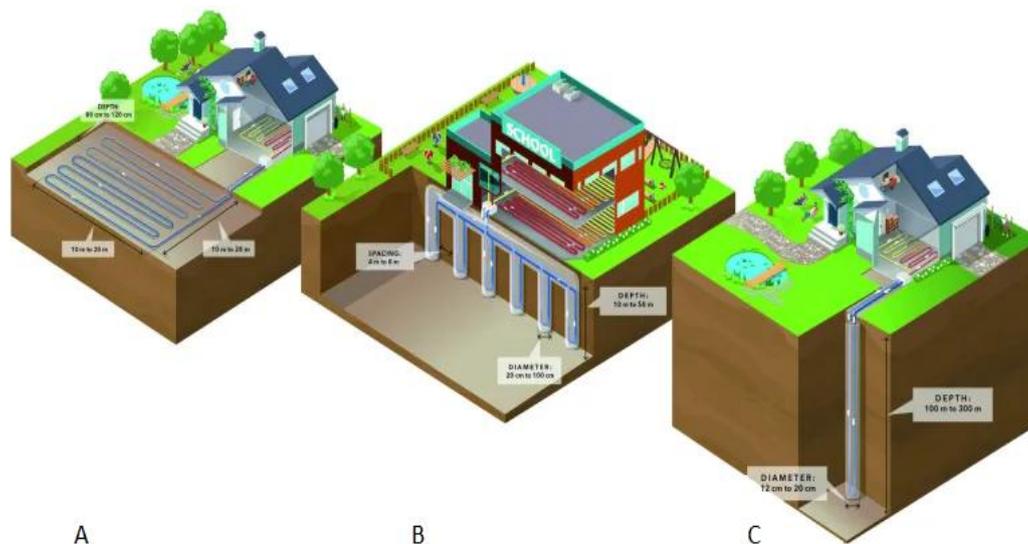


Figura 14 - Schema semplificato impianto geotermico a circuito chiuso [34]

Negli anni la tecnologia degli impianti di tipo “open-loop” si è evoluta passando dagli impianti a circolazione diretta a quelli a circolazione indiretta [35]. I primi utilizzavano lo stesso refrigerante della pompa di calore per estrarre calore dal terreno. Erano quindi utilizzate tubazioni in rame, caratterizzate da un'elevata conducibilità, e solventi organici come refrigeranti (ad esempio gli idrocarburi fluorurati) in grado di funzionare a temperature piuttosto basse. Essendo presente un'unica fase di scambio termico questi sistemi erano caratterizzati da un'elevata efficienza nel trasferimento del calore, con costi di pompaggio del fluido nel terreno azzerati (era infatti presente un'unica pompa di circolazione, la medesima presente nella pompa di calore). Tuttavia, poiché le tubazioni in rame sono suscettibili alla corrosione provocata dagli agenti chimici del sottosuolo, la presenza di solventi organici rappresentava un possibile fattore di contaminazione del terreno. Per questo motivo nel mercato di oggi sono molto più diffusi i sistemi a circolazione indiretta, caratterizzati da due circuiti, uno “lato terreno” con un fluido termovettore ed uno “lato pompa di calore” con il fluido refrigerante.

Il fluido termovettore è solitamente una miscela di acqua e glicole propilenico in quanto la prima è in grado di trasferire facilmente il calore, oltre ad essere poco costosa e facile da reperire, mentre il glicole permette di abbassarne il punto di congelamento, proteggendo inoltre le tubazioni dalla possibile corrosione causata dagli agenti chimici presenti nel sottosuolo.

La portata del fluido ed il diametro delle tubazioni (solitamente in polietilene in quanto è molto più economico, durevole e resistente alla corrosione rispetto al rame) sono dimensionati in modo da massimizzare il trasferimento del calore (e quindi mantenendo un flusso turbolento nel sottosuolo) e

cercando di limitare le perdite di carico idrauliche per contenere le spese per il pompaggio, oltre che, ovviamente, per sopperire ai fabbisogni richiesti dall'edificio e quindi dalla pompa di calore.

Come visibile in **Figura 14** sono possibili tre tipologie di configurazione

- **Configurazione con sonde orizzontali (Figura 14 A)**

Gli impianti geotermici aventi sonde disposte parallelamente al terreno sono più economici rispetto agli impianti con sonde verticali in quanto la posa delle serpentine avviene a profondità limitate, comprese tra 0,8 e 4 metri dalla superficie e pertanto lo sbancamento o la trincea possono essere effettuati con semplici macchinari per la movimentazione della terra senza la necessità di strumenti più specifici e costosi. La posa delle tubazioni è inoltre semplice e, in base all'area a disposizione, alla natura del terreno, alle zone d'ombra e all'eventuale vegetazione da piantumare o da conservare, è possibile sviluppare gli scambiatori nelle configurazioni a serpentina, a chiocciola, ad anello, a spirale o a canestro (vedasi **Figura 16**).

Poiché negli impianti aventi sonde con configurazione orizzontale il calore presente nel terreno è spesso in parte anche quello fornito dal sole, bisogna evitare di coprire le sonde con costruzioni o altri impedimenti che causino impermeabilizzazione e zone d'ombra.

Le configurazioni più diffuse sono gli scambiatori e chiocciola e a serpentina, in quanto sono semplici da installare, con rese che vanno da 10 ai 40 W/m² [35] all'aumentare del grado di umidità nel terreno. I primi, grazie alla continua alternanza tra le tubazioni di mandata e quelle di ritorno permettono di mantenere una temperatura del terreno più omogenea, specialmente nel periodo invernale quando un raffreddamento del terreno troppo "spinto" potrebbe promuovere il formarsi di zone troppo fredde con una conseguente riduzione delle prestazioni delle macchine.

La configurazione ad anello, invece, permette di posare le tubazioni direttamente in trincea, senza la necessità di sbancamento – e quindi con costi più contenuti. Per garantire tuttavia una sufficiente superficie di scambio termico è possibile disporre gli anelli su più piani paralleli tra loro (**Figura 17**), a scapito però di rese lineari dei tubi più basse a causa delle interferenze termiche reciproche, con valori che vanno dai 4 ai 16 W/m² per le tubazioni a singolo anello, fino a valori compresi tra 3,2 e 12,8 W/m² per le tubazioni con tre anni [35]. La minor resa è tuttavia compensata dai risparmi ottenuti riducendo l'entità degli scavi.

La configurazione con gli scambiatori a spirale è effettuata con cerchi aventi diametro costante fra loro sovrapposti (**Figura 18**). Così come per le tubazioni ad anello anche in questo caso la loro posa è possibile in scavi sia a sbancamento che a trincea. Per evitare un raffreddamento eccessivo del terreno è consigliabile distanziare le trincee le une dalle altre. La resa è compresa tra i 7 e i 26 W/m² per spirali con passo pari al diametro, e può salire fino a 10-40 W/m² per spirali con passo D/4 [35].

La più recente tipologia di configurazione per impianti geotermici orizzontali è quella degli scambiatori a canestri (**Figura 19**), ovvero tubi in polietilene che vengono fissati ad armature in ferro o in plastica e dentro a quali scorre il fluido termovettore. La forma dei canestri può essere conica o cilindrica e la loro realizzazione può essere effettuata direttamente in cantiere. Questa configurazione permette di ridurre la superficie utilizzata del 30-50% rispetto agli scambiatori sopradescritti [35].

- **Configurazione con geostrutture energetiche (Figura 14 B)**

Durante la fase di costruzione di un edificio è possibile accoppiare le fondazioni strutturali alle sonde di scambio termico con il terreno, andando quindi a costruire una geostruttura energetica. Il vantaggio principale è l'economicità di questi impianti perché il costo degli scavi è di per sé nullo, in quanto già previsto per la costruzione dell'edificio stesso. A seconda della tipologia di struttura è possibile distinguere in pali di fondazione, tunnel e muri energetici.

I pali energetici (**Figura 20**) sfruttano la necessità strutturale di alcuni grandi edifici di essere costruiti su pali in cemento armato, ad esempio quanto il terreno non ha la portanza necessaria e quindi richiede opere di consolidamento. Lungo la circonferenza del pilastro possono essere installati, distanziati tra loro, più tubi a U o a spirale che vengono innanzitutto ancorati alla struttura e poi collegati alle pompe di calore installate nell'edificio. È importante che queste strutture vengano progettate nel dettaglio per evitare che il calore raccolto dalle sonde sottoponga i pilastri a cicli di dilatazioni e contrazioni che, nel lungo periodo, potrebbero causarne la rottura.

I tunnel energetici, invece, nascono dalla possibilità di accoppiare i sistemi geotermici a tunnel e gallerie realizzati per il transito dei veicoli. In queste strutture, infatti, è presente un'elevata area a contatto con il terreno che può essere utilizzata per lo scambio di calore con il sottosuolo. Il primo brevetto di anelli prefabbricati in cemento armato dotati di un circuito per il passaggio del fluido termovettore è del Politecnico di Torino, ed è stato realizzato in via sperimentale con il progetto ENERTUN sulla linea 1 della metropolitana nel tratto Lingotto-Bengasi [36]. Questa applicazione può inoltre essere estesa a tutte le tipologie di tunnel che transitano nel terreno, come ad esempio acquedotti e fognature.

Come per i pali di fondazione, anche i muri (o diaframmi) sono strutture che vengono realizzate per motivi strutturali (ad esempio per il contenimento del terreno di una scarpata o nel seminterrato di un edificio) e ad essi possono essere accoppiati circuiti in grado di scambiare calore con terreno, andando quindi a formare i muri energetici. Rispetto ai pali energetici, queste strutture sono spesso caratterizzate da superfici di scambio molto più elevate e per la costruzione possono essere utilizzati calcestruzzi ricchi di silice per migliorarne la conducibilità.

- **Configurazione con sonde verticali (Figura 14 C)**

Le sonde verticali, anche note con l'acronimo BHE (Borehole Heat-Exchanger), rappresentano la configurazione più diffusa e più efficiente delle sonde geotermiche a bassa entalpia. I tubi sono installati verticalmente raggiungendo in alcuni casi anche i 200 m di profondità, con un conseguente aumento della resa termica.

Esistono diverse tecniche per realizzare il foro [24]. La preferibilità di una tecnica rispetto alle altre è dovuta alla tipologia del terreno presente ed alle dimensioni del foro da realizzare. Ad esempio:

- il *Down The Hole Hammer* (DTH) è un metodo che permette di forare e contestualmente estrarre i detriti grazie alla presenza di una perforatrice idraulica con fondo forato che alterna il movimento rotatorio e percussivo ad una fase di iniezione di aria compressa che permette la risalita dei detriti.
- Il *Percussion drilling* è un metodo che consiste nella caduta di una massa battente per lo scavo del foro, senza però procedere con l'estrazione dei detriti e questo limita la sua applicazione a fori profondi poche decine di metri.
- Il *Conventional rotary drilling* prevede invece sia una trivella per la perforazione, sia un utensile per l'estrazione dei detriti, sia un meccanismo per l'iniezione di fanghi per il raffreddamento delle aste di perforazione.
- La tecnica *Push* consiste invece in una serie di tubi di perforazione, realizzati in acciaio cavo, che spingono verso un liquido verso il basso realizzando il foro. Questa metodologia è però limitata a scavi in argilla e terreni morbidi.
- Il *Sonic drilling*, infine, consiste in una vibrazione ad alta frequenza che viene applicata al tubo di perforazione, raggiungendo quindi rapide velocità di perforazione.

Il foro realizzato ha solitamente un diametro che varia tra i 100 e i 150 mm e al suo interno sono inseriti i tubi in polietilene ad alta densità reticolato (PEHD), materiale adatto per lavorare a pressioni elevate. I tubi possono essere posati in configurazione a U, a doppia U o Coassiali. Nel

primo caso nel pozzo è presente un unico tubo a forma di U, con mandata e ritorno. Il vantaggio è dato dalla facilità di installazione e dai costi ridotti. Tuttavia, la superficie di scambio termico non è ottimizzata e in caso di ostruzione il circuito viene compromesso totalmente. Per questo motivo spesso si preferisce la configurazione a doppia U, con l'installazione di due circuiti affiancati e sufficientemente distanziati tra loro. In questo modo si aumenta la superficie di scambio termico e si ottimizzano i costi, riducendo la probabilità di compromissione dell'impianto in caso di ostruzione o rottura di un circuito. La terza configurazione prevede invece che i condotti di mandata e ritorno siano tra loro coassiali, massimizzando quindi la superficie di scambio termico anche in fori stretti. (**Figura 15**)

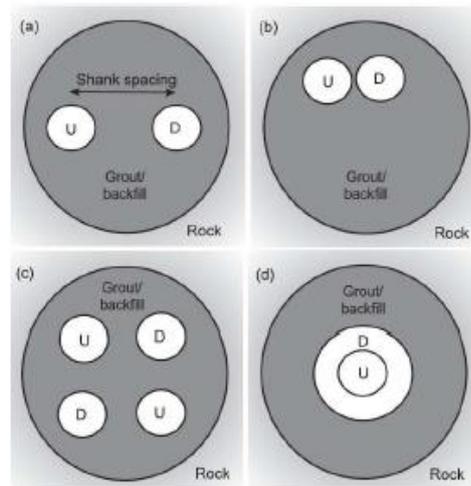


Figura 15 - Configurazione circuiti, sezioni [24]

Per la posa è solitamente utilizzato un peso a perdere, in modo che le sonde raggiungano facilmente la profondità realizzata, mentre sono installati dei distanziatori per mantenere i circuiti lontani tra loro.

Il sistema si completa poi con il riempimento dell'intercapedine tra i tubi in modo da fornire un contatto tra la roccia ed il tubo a U. Il riempimento può avvenire mediante acqua (tecnica pratica ed economica, ma valida solo nel caso in cui le pareti del pozzo siano autoportanti), materiale poroso (come ghiaia o sabbia ricca di quarzo per una maggiore conduttività termica) o calcestruzzo contenente bentonite e additivi che, oltre a proteggere le sonde, garantiscono una buona conducibilità (**Figura 21**). In ogni caso il riempimento deve essere effettuato partendo dalla parte inferiore e andando verso l'alto per evitare la formazione di vuoti di aria.

Si procede infine con il riempimento del fluido termovettore ed il collegamento alla pompa di calore. Per evitare interferenze, nel caso di più sonde, è preferibile posizionarle ad una distanza non inferiore agli 8 m le une dalle altre. Le rese termiche lineari variano in base alle condizioni del terreno e sono comprese tra i 20 e gli 80 W/m [35]. Da non sottovalutare è la possibile contaminazione del sottosuolo nel caso di realizzazione di impianti geotermici con sonde verticali, specialmente nel caso in cui siano presenti falde acquifere nel sottosuolo. Per questo motivo è necessario rispettare scrupolosamente la normativa vigente, che varia, purtroppo, da una Regione all'altra.

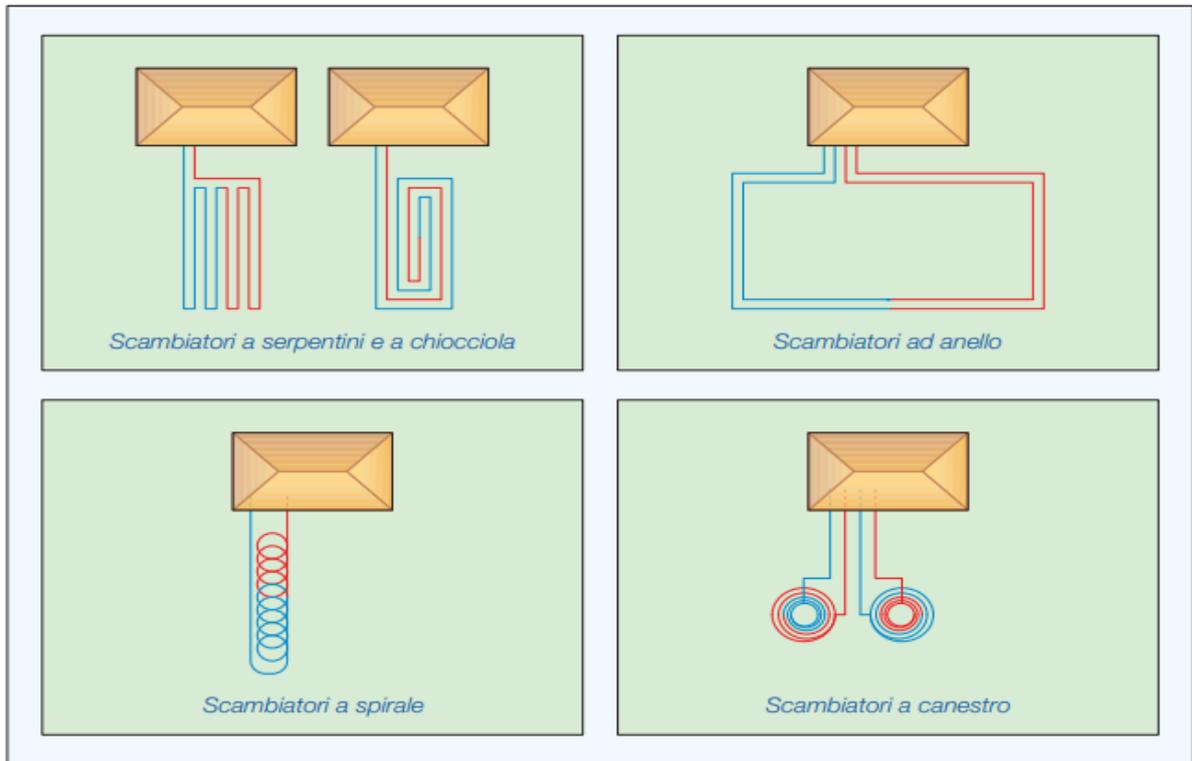


Figura 16 - Configurazione sonde geotermiche orizzontali [35]

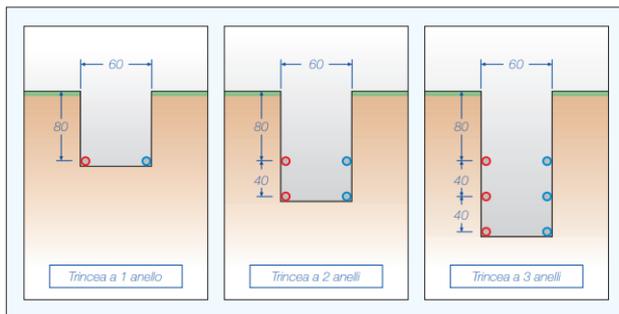


Figura 17 - Configurazioni sonde geotermiche ad anello [35]

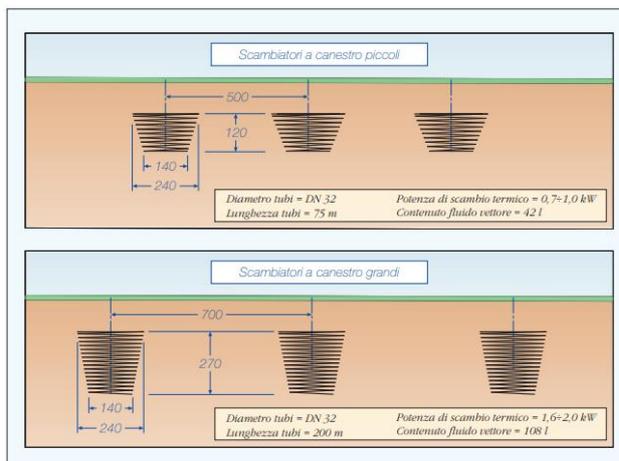


Figura 19 - Configurazione sonde geotermiche a canestri [35]

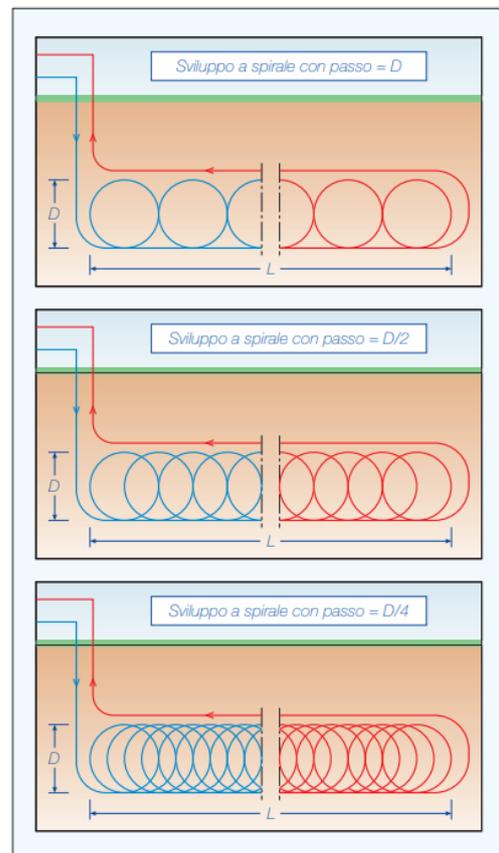


Figura 18 - Configurazione sonde geotermiche a spirale [35]

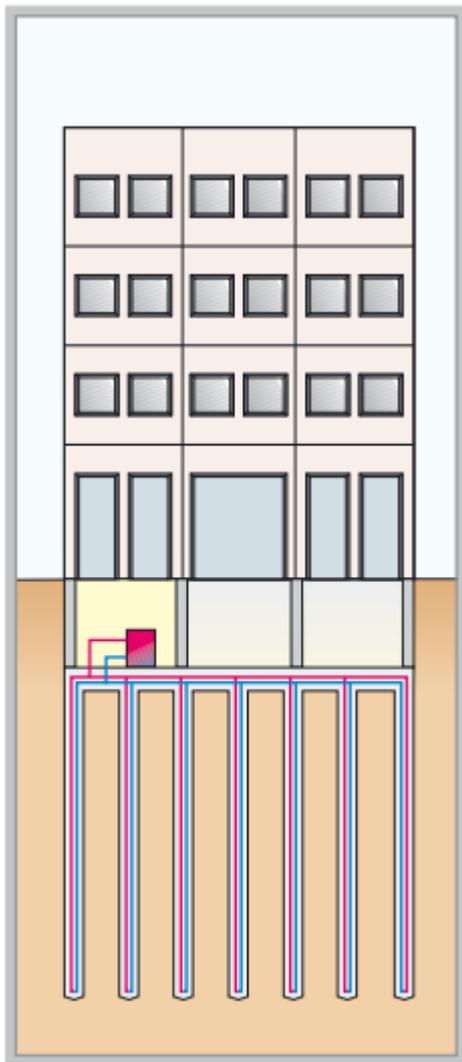


Figura 20 - Pali energetici [35]

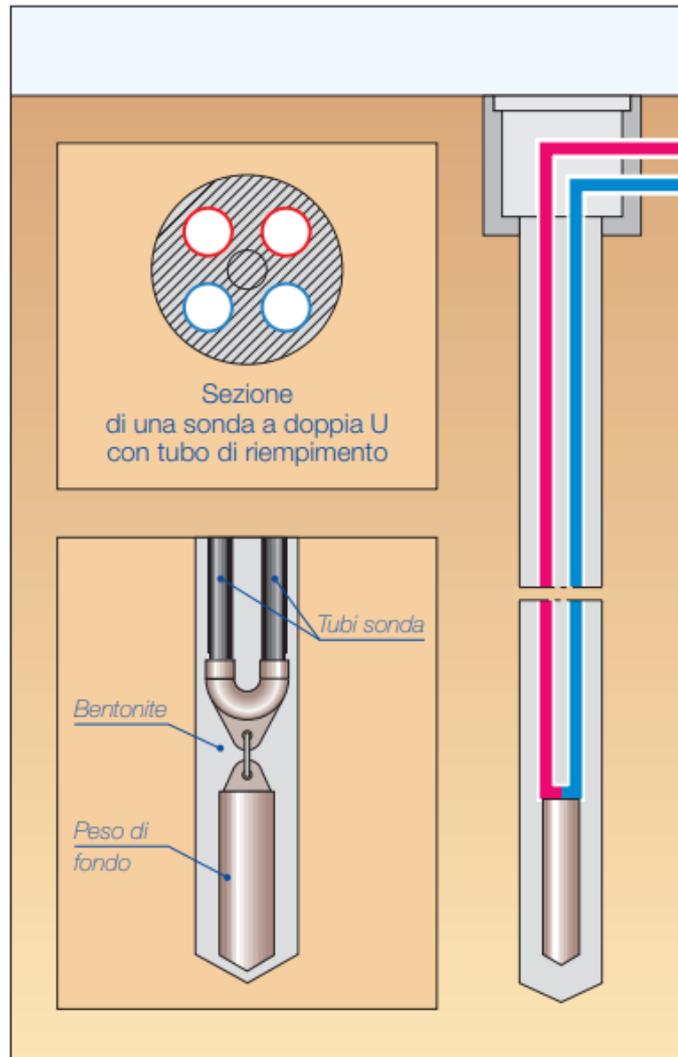


Figura 21 - Sonde verticali [35]

Riassumendo si può dire che i sistemi a circuito chiuso hanno come punto di forza l'elevata efficienza dovuta alla temperatura del terreno che è circa costante nel tempo. Rispetto ai sistemi a circuito aperto, i sistemi closed-loop presentano un impatto ambientale più basso perché, non prelevando acqua dal sottosuolo, evitano il rischio di inquinamento delle risorse idriche ed il possibile alteramento dell'ecosistema sotterraneo. Per lo stesso motivo sono anche soggetti a minori restrizioni normative e quindi la loro realizzazione è burocraticamente più snella rispetto agli open-loop. Inoltre, poiché non dipendono dalla disponibilità della risorsa idrica, possono essere facilmente installati ovunque e questo li rende versatili e adatti anche nelle aree urbane, dove, in base alla superficie a disposizione, è possibile scegliere tra impianti orizzontali o impianti verticali.

3. Campo sperimentale

3.1 Pompa di calore dell'Energy Center

Presso l'Energy Center del Politecnico di Torino è stata realizzata una geostruttura il cui sistema è stato brevettato con il nome di GeothermSkin®[\[37\]](#). Si tratta a tutti gli effetti di un muro energetico, ovvero un impianto geotermico che utilizza come superficie di scambio termico la porzione di un edificio a contatto con il terreno. Questo sistema riduce i limiti burocratici e operativi presenti nei sistemi geotermici tradizionali, quali le richieste autorizzative e i costi delle perforazioni per l'installazione delle sonde verticali o le grandi superfici di scavo necessarie per gli impianti con serpentine orizzontali.

Il vantaggio principale del GeothermSkin® è che può essere applicato sia su edifici di nuova costruzione, sia su edifici sottoposti a ristrutturazione, in quanto l'unica prerogativa è la necessità di avere un muro contro terra (ad esempio garages e piani seminterrati) sul quale andare ad installare i moduli prefabbricati. Sono possibili sia la configurazione con sviluppo prevalentemente orizzontale (GeothermSkin-H), sia quella con sviluppo prevalentemente verticale (GeothermSkin-V). In entrambi i casi è possibile sia il collegamento in serie, sia quello in parallelo. I circuiti sono realizzati con tubazioni in polietilene reticolato perossidico (Pe-Xa) ad alta densità percorsi da un fluido termovettore che scambia calore con il terreno. Il diametro delle tubazioni è di 20 mm, con uno spessore pari a 2 mm.

L'impianto realizzato presso l'Energy Center ha come obiettivo l'analisi ed il monitoraggio delle rese termiche e delle prestazioni del GeothermSkin® al variare delle condizioni ambientali esterne, nonché valutare la capacità di accumulo e di cambio termico del terreno e le conseguenti deformazioni indotte sul muro.

Il muro energetico è stato realizzato tra i mesi di maggio e luglio 2019 [\[38\]](#) utilizzando il muro di contenimento in cemento armato – avente spessore pari a 80cm – situato contro terra sul prospetto sud-est dell'edificio.

Poiché l'impianto è stato installato su un edificio esistente, l'installazione delle sonde geotermiche ha comportato uno scavo sul perimetro interessato. Dato lo spazio a disposizione lo scavo è stato sviluppato per lo più verticalmente, con conseguente necessità di installazione di puntoni in ferro per contenere il terreno circostante. Quest'ultima operazione non sarebbe servita nel caso in cui il muro di contenimento fosse stato di nuova realizzazione, ovvero in fase di costruzione dell'edificio stesso. Dopodiché, raggiunta la profondità di 4,70 m, è stato gettato uno strato di magrone necessario per creare un piano su cui è stato posizionato il trabattello utilizzato per l'installazione delle sonde sul muro. Sono stati installati tre circuiti, di cui due in configurazione orizzontale e uno in configurazione verticale,



Figura 22 - Operazioni di costruzione del muro energetico: scavo e realizzazione armatura [32]

aventi lunghezza rispettivamente pari a 26.6, 27.0 e 29.3 metri, così come visibile in **Figura 23**. Ogni circuito, con un'area di scambio effettiva pari a 6.3 m^2 è stato collegato, mediante dei fori sulla parete, al collettore. I fori sul muro sono stati eseguiti mediante una carotatrice ad acqua⁷. Sono stati inoltre predisposti dei fori per il passaggio delle tubazioni dei sensori del sistema. Naturalmente, in caso di edifici di nuova costruzione è possibile evitare i carotaggi andando a progettare dei modelli perforati prima del getto del calcestruzzo.

⁷ La carotatrice ad acqua è un utensile che utilizza il getto dell'acqua sia per la realizzazione del carotaggio, sia per raffreddare la punta durante il processo stesso di foratura. Essa si compone di tre parti: l'impugnatura con mandrino rotativo, la punta a tazza diamantata ed il tubo per il collegamento all'impianto idrico.

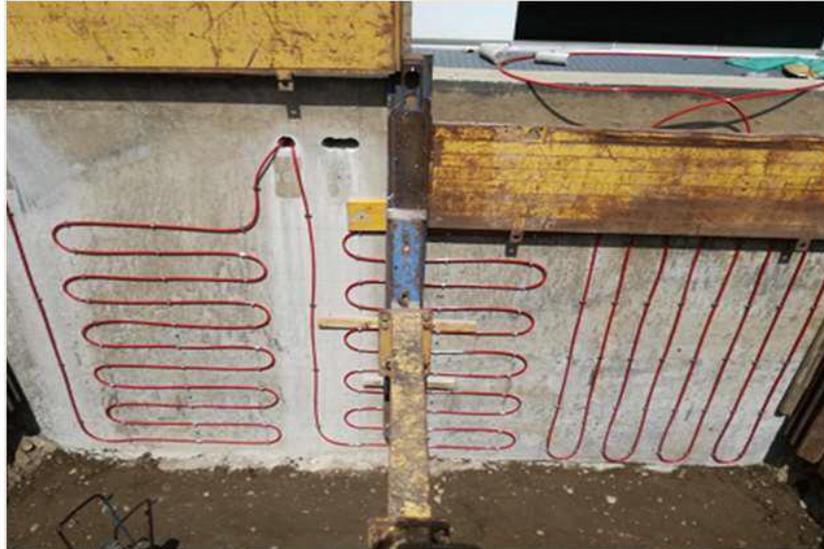


Figura 23 – Operazioni di costruzione del muro energetico: posizionamento delle sonde [32]

I circuiti, ancorati al muro grazie a dei semplici tasselli, sono stati poi ricoperti con il terreno precedentemente spostato, ripristinando quindi lo stato dei luoghi. La posa della sensoristica è avvenuta in diverse fasi del rinterro, al fine di monitorare non solo le condizioni fisiche del terreno, quali temperatura e umidità alle diverse profondità, ma anche analizzare gli effetti termo-meccanici indotti dall'attivazione del muro energetico. Questo sistema di monitoraggio è stato installato dalla Winet S.R.L., azienda specializzata nella realizzazione di sensoristica. Il sistema si compone di:

- Sensori di temperatura, ovvero sistemi ad immersione composti da un cilindro esterno in acciaio inox contenente al suo interno il sensore, a sua volta immerso in resine termo-conduttive.
- Sensori di pressione, in grado di controllare la pressione esercitata dal terreno sul muro energetico. Questi sensori sono costituiti da un trasduttore di pressione elettrico che, al variare della pressione presente all'interno di un piatto riempito di olio disareato, producono un segnale elettrico.
- Barrette estensimetriche, ovvero sensori in grado di monitorare lo stato tensionale e deformativo delle strutture sui cui sono ancorate. Al loro interno è presente un cavo in acciaio in tensione, la cui variazione in lunghezza è proporzionale alla frequenza di oscillazione.
- Igrometri, per rilevare la misura dell'umidità presente nel terreno.
- Misuratori del potenziale idrico, ovvero sensori in grado di misurare l'energia potenziale che possiede l'acqua nel terreno. Tali strumenti sono costituiti da due dischi di ceramica porosi che, dopo essere stati inseriti tra il circuito, rilevano le variazioni del contenuto di acqua.



Figura 24 - Operazioni di costruzione del muro energetico: rinterro [32]

I sensori per il monitoraggio dei parametri dell'impianto lato terreno sono stati installati su quattro piani a differenti profondità, così come visibile in **Figura 25**.

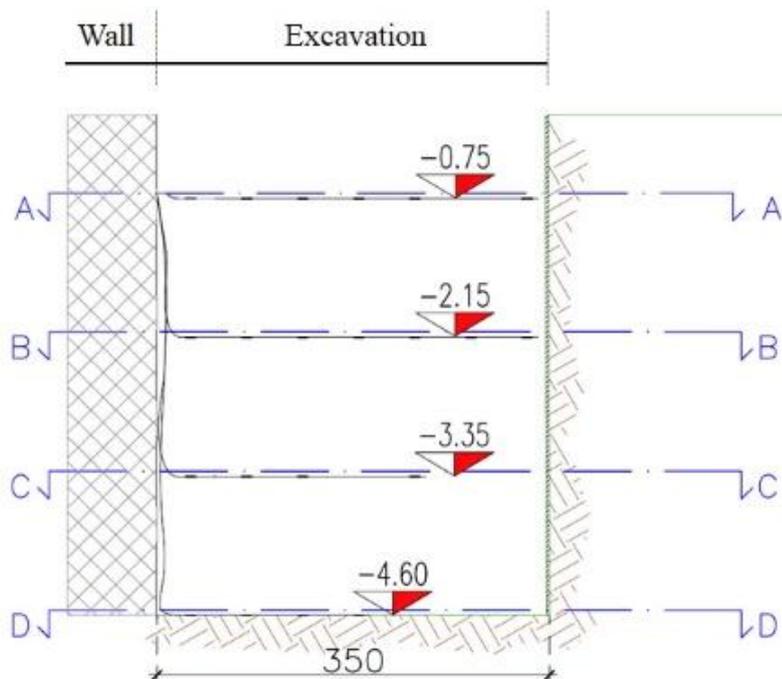


Figura 25 - Localizzazione in profondità dei sensori installati [38]

Nelle immagini seguenti (**Figura 26**, **Figura 27**, **Figura 28** e **Figura 29**) sono invece riportati i posizionamenti dei diversi sensori all'allontanarsi dal muro energetico. Per ottenere poi una ricostruzione dei punti misurati il più accurata possibile, i sensori sono stati installati in maniera sfalsata tra loro.

Oltre ai vari sensori per le misurazioni termiche sono stati inoltre installati degli igrometri per misurare l'umidità del terreno nei diversi punti.

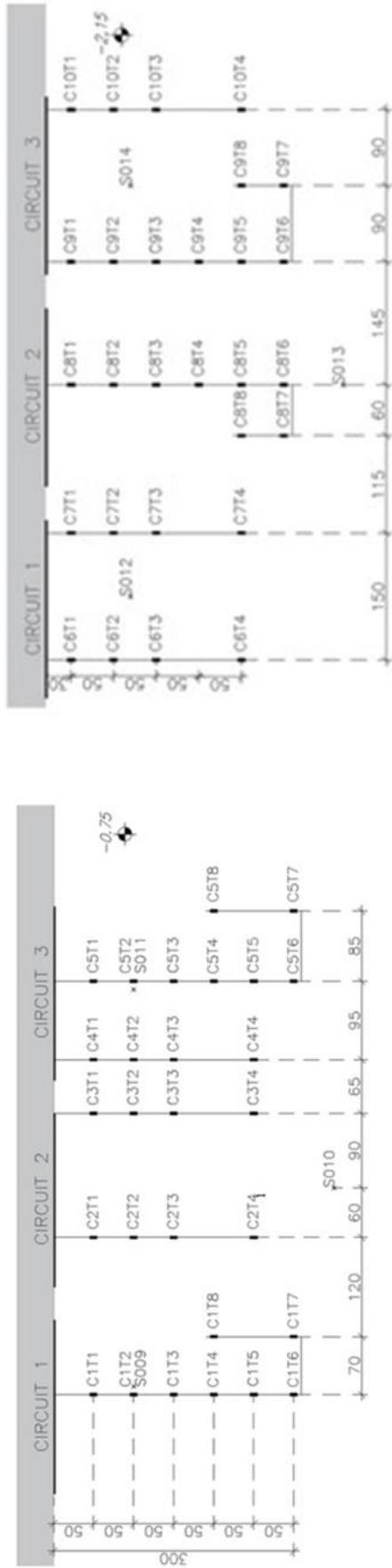


Figura 26 - Sensori posizionati sul piano B [38]

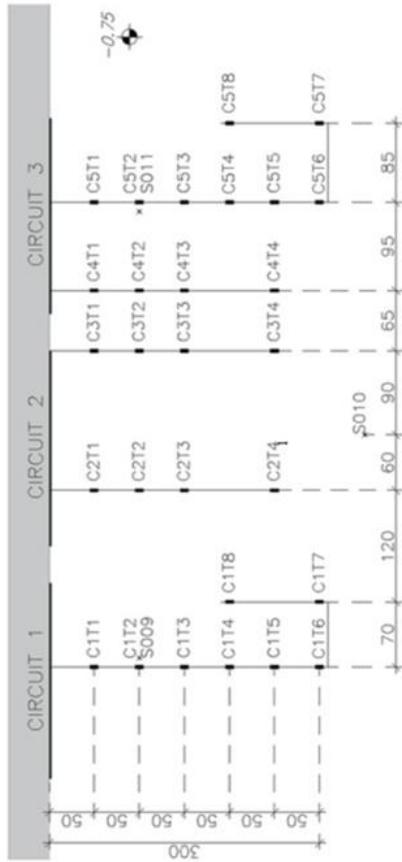


Figura 28 - Sensori posizionati sul piano A [38]

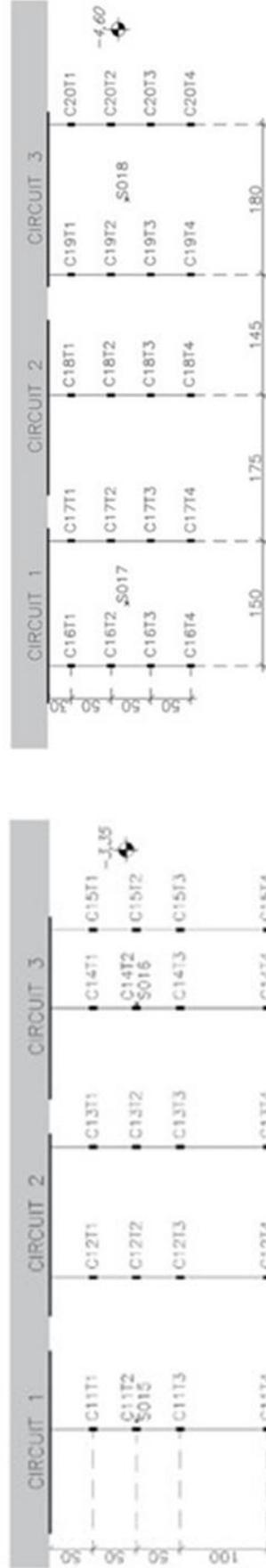


Figura 27 - Sensori posizionati sul piano D [38]



Figura 29 - Sensori posizionati sul piano C [38]

Le sonde geotermiche sono state infine collegate alla pompa di calore mediante un circuito idraulico. Poiché il locale dove ha sede la pompa di calore (Isola 1) si trova a circa 65m di distanza dal muro energetico (isola 2), le tubazioni, fissate alle pareti tramite una serie di fascette, sono state opportunamente coibentate utilizzando un materiale elastomerico a cellule chiuse di spessore 20 mm e con una conducibilità termica nominale di 0,034 W/mK a 0 °C. Le tubazioni hanno un diametro nominale maggiore di 32 mm (DN32), quindi più grande rispetto alle sonde, in quanto devono consentire di alimentare più circuiti di calore contemporaneamente. Inoltre, per poter testare le diverse configurazioni delle sonde nel terreno, è stato inserito un collettore che, grazie ad una serie di valvole, permette non solo di escludere uno o più moduli dal test, ma anche di impostare la circolazione del fluido termovettore in configurazione serie o parallelo. Si rimanda alla **Figura 30** per evidenziare la posizione dei componenti, nonché il passaggio delle tubazioni di collegamento.

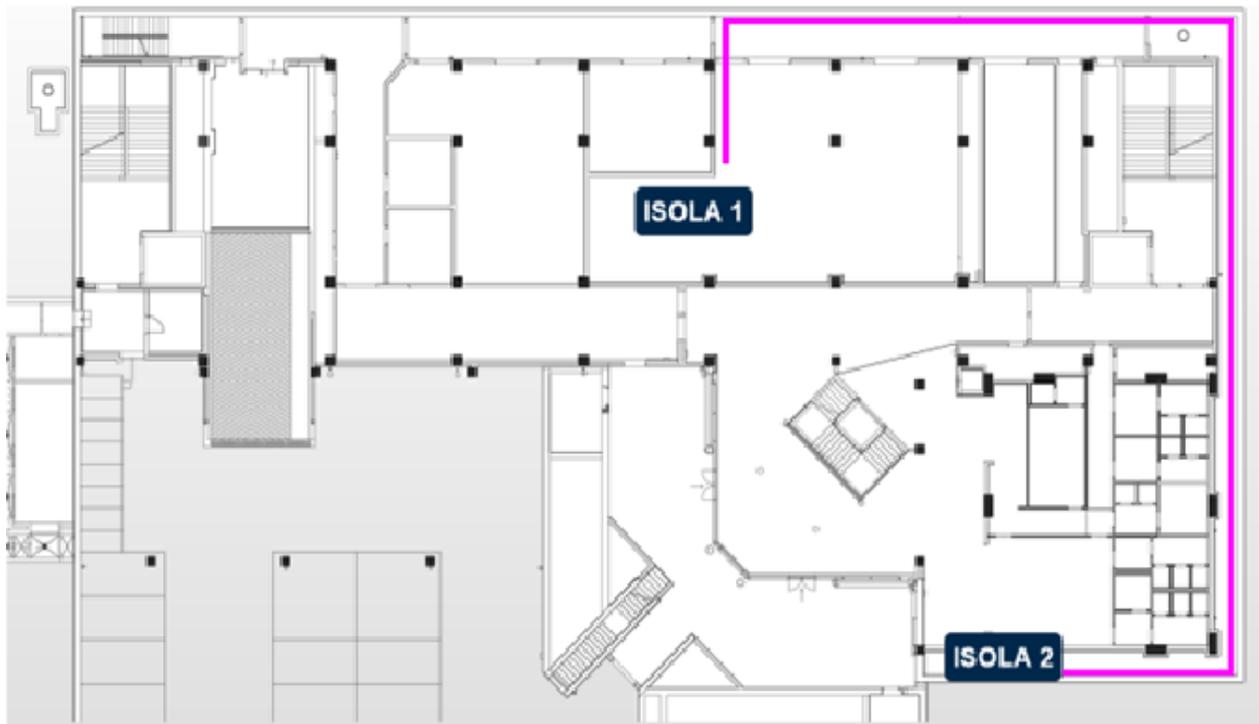


Figura 30 - Planimetria piano seminterrato: Isola 1 (pompa di calore e utenza), Isola 2 (muro energetico) [32]

Il sistema presente nell'isola 1 dell'impianto sperimentale dell'Energy Center è costituito dalla pompa di calore geotermica, da un volano termico da 100 litri e dall'utenza, ovvero da un ventilconvettore idronico in grado di riscaldare o raffreddare l'ambiente in base alla prova in corso di svolgimento. Il sistema si completa con la presenza di n.2 vasi di espansione da 8 litri che hanno lo scopo di bilanciare eventuali variazioni di pressione nel circuito (e quindi evitare possibili danni per l'impianto) e n.2 circolatori (uno interno alla pompa di calore a servizio del fluido frigorifero, e uno esterno necessario per far circolare l'acqua glicolata).

Lo schema di progetto è visibile in **Figura 31**.

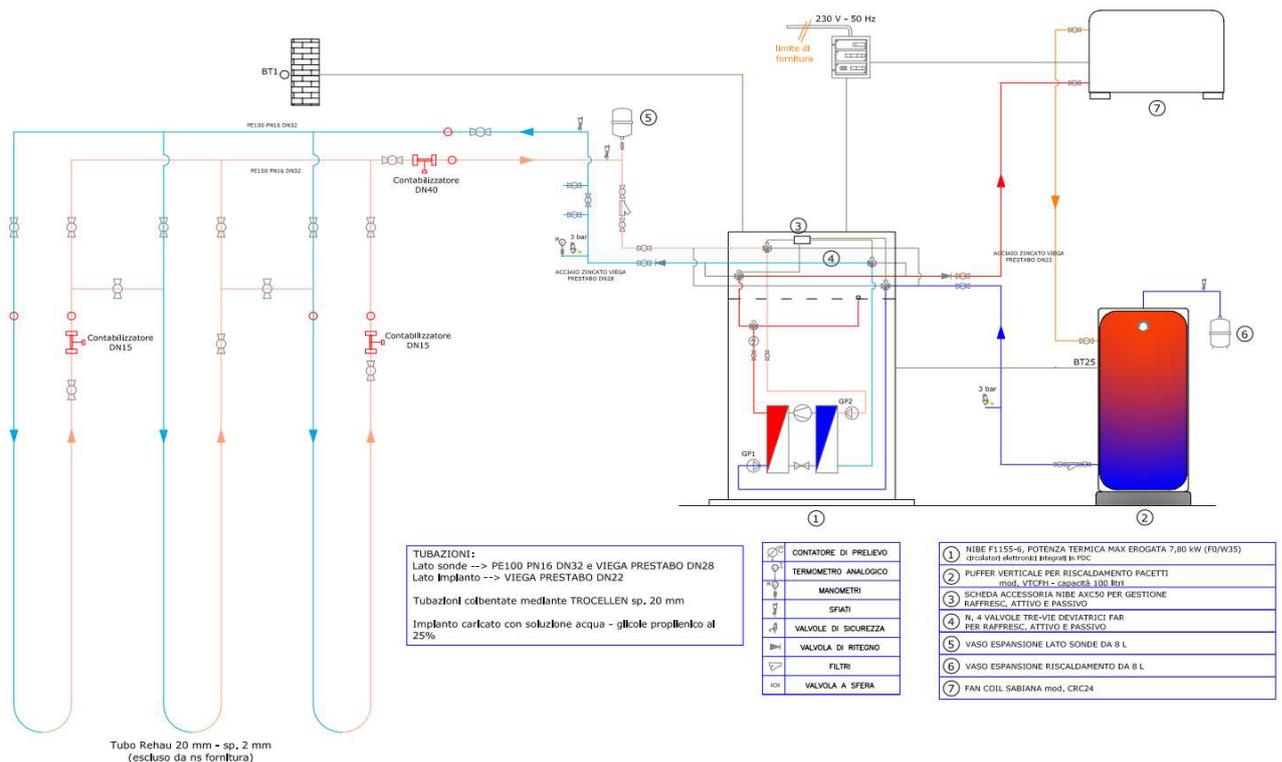


Figura 31 - Schema di progetto dell'impianto [32]

Si possono distinguere tre circuiti principali:

- A sinistra, il **circuito primario**, rappresentato dalle sonde nel terreno attraversate da una soluzione di acqua e glicole propilenico al 25%, il cui compito è quello di estrarre calore dal terreno facendo evaporare il fluido refrigerante presente nella pompa di calore in caso di funzionamento in assetto riscaldamento o di cedere il calore al terreno in caso di funzionamento in modalità raffreddamento. La circolazione avviene mediante un apposito circolatore installato all'interno della pompa di calore (indicato con l'acronimo GP2 nella **Figura 33**). Le proprietà dell'acqua glicolata sono riportate nella **Tabella 3** in funzione della temperatura del fluido.

Temperatura	[°C]	-5	0	20	40	60
Concentrazione	[%]			25		
Punto di congelamento	[°C]			-10		
Densità	[kgm ⁻³]	1032,7	1031,2	1023,4	1013,8	1002,3
Calore specifico	[kJkg ⁻¹ K ⁻¹]	3,86	3,87	3,92	3,97	4,01
Conduttività termica	[Wm ⁻¹ K ⁻¹]	0,437	0,443	0,467	0,488	0,502

Tabella 3 - Proprietà miscela acqua glicolata al 25% [32]

- A destra, il **circuito secondario**, attraversato da acqua, il cui compito è quello di trasportare l'acqua riscaldata (o raffreddata) all'utenza, rappresentata nello specifico caso da un ventilconvettore modello CRC24 della Sabiana. In questo circuito è inoltre presente il volano termico da 100 litri, modello VTCFH della Pacetti, il cui obiettivo è quello di conservare il calore estratto dalla pompa di calore per quando richiesto dall'utenza in un range di temperatura che varia tra i -10°C e i +90°C. La circolazione in questo circuito avviene mediante un apposito circolatore, anch'esso installato all'interno della pompa di calore e indicato con l'acronimo GP1 nella **Figura 33**.

- Nella zona centrale tra i due circuiti appena descritti è presente la pompa di calore con al suo interno il **circuito con il fluido refrigerante** che ha il compito di eseguire il ciclo termodinamico già mostrato nel capitolo precedente in **Figura 11**, ovvero passando attraverso il condensatore, l'evaporatore, il compressore e la valvola di laminazione.

Si riporta nella **Figura 32** una fotografia dell'impianto installato.



Figura 32 - Pompa di calore (a destra), serbatoio di accumulo (a sinistra), ventilconvettore (dietro)

La pompa di calore è del modello “NIBE F1155-6”, prodotta dall’omonima azienda svedese NIBE. I dati tecnici sono riportati nel manuale di installazione [39]. Il modello installato lavora con alimentazione monofase (230V) e presenta una potenza termica nominale di design pari a 6 kW. Questo modello è inoltre stato dotato di resistenze elettriche fino a 7 kW che permettono di sopperire alla richiesta di calore dell’utenza nel caso in cui il calore estratto dal terreno non fosse sufficiente.

Si riportano i valori di potenza e le relative prestazioni in modalità riscaldamento – considerando una temperatura esterna pari a T_j ed una temperatura dell’acqua in uscita pari a 55°C – nella **Tabella 4**

T_j [$^\circ\text{C}$]	P [kW]	COP [-]
-7	5,0	3,06
+2	3,0	3,97
+7	2,0	4,63
+12	1,2	4,86

Tabella 4 - Prestazioni pompa di calore NIBE F1155-6 1x230V [39]

Il fluido termovettore utilizzato dalla NIBE F1155-6 è l’R407C, ovvero un gas serra composto da una miscela di idroclorofluorocarburi (R32 nel 23%, R125 nel 25% e R134a nel 52%). Tale gas, con buone caratteristiche per le applicazioni di condizionamento (temperatura critica pari a $86,1^\circ\text{C}$ e pressione

critica pari a 46,3 bar) presenta tuttavia un GWP⁸ pari a 1'774 ed è quindi particolarmente dannoso in caso di rilascio in atmosfera.

La pompa di calore oggetto di analisi risulta composta da diversi componenti, indicati nella **Figura 33**.

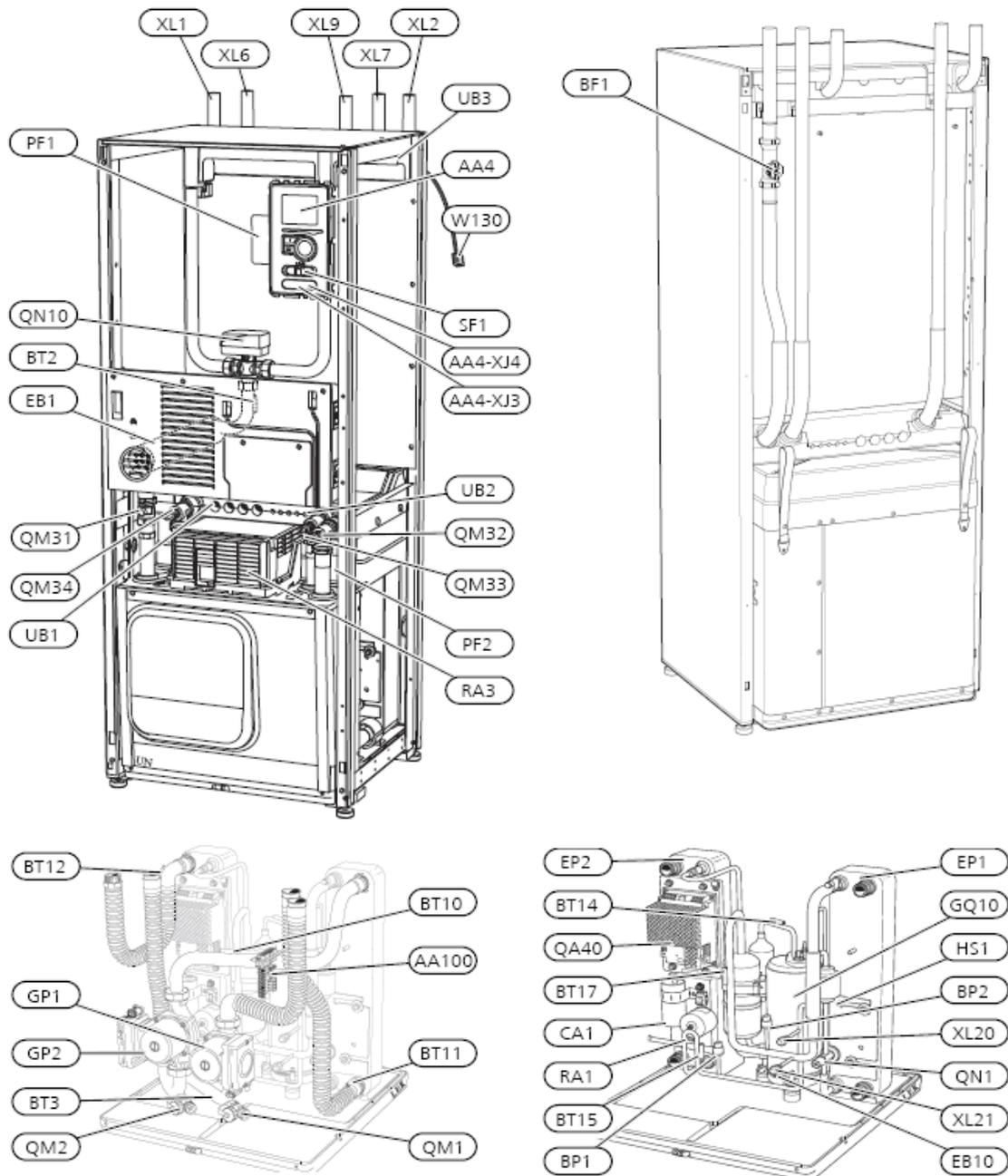


Figura 33 - Componenti pompa di calore NIBE F1155-6 [39]

Andando in ordine rispetto agli indici presenti è possibile osservare, nella **Figura 33** in altro a sinistra:

- PF1, targhetta dei dati di funzionamento;
- QN10, valvola di commutazione, sistema di climatizzazione/bollitore;

⁸ GWP, acronimo di Global Warming Potential (potenziale di riscaldamento globale), è la misura che determina il potere climalterante dei gas serra mettendo in relazione il potenziale di riscaldamento in un periodo pari a 100 anni di un chilogrammo di gas rispetto a quello di un chilogrammo di CO₂ [40][40].

- BT2, sensori di temperatura mandata all'impianto;
- EB1, resistenza elettrica;
- QM31, valvola di sezionamento, mandata lato impianto;
- QM34, valvola di sezionamento, ingresso lato sonde;
- UB1, passacavo;
- XL1, raccordo della mandata all'impianto;
- XL6, raccordo dell'ingresso lato sonde;
- XL9, raccordo del bollitore dell'acqua calda;
- XL7, raccordo dell'uscita lato sonde;
- XL2, raccordo del ritorno dall'impianto;
- UB3, passacavo;
- AA4, display
- W130, cavo di rete;
- SF1, interruttore;
- AA4-XJ4, presa USB;
- AA4-XJ3, uscita di servizio;
- UB2, passacavo;
- QM32, valvola di arresto ritorno dall'impianto;
- QM33, valvola di sezionamento uscita lato sonde;
- PF2, targhetta del modello, modulo frigorifero;
- RA3, riduzione (non presente sul modello F1155-6);
- BF1, flussometro.

In **Figura 33** in basso a sinistra sono presenti invece:

- BT12, sensore della temperatura in ingresso al condensatore;
- GP1, pompa di circolazione per il fluido frigorifero;
- GP2, pompa di circolazione lato sonde;
- BT3, sensore di temperatura sul ritorno del fluido frigorifero;
- QM2, valvola di scarico per circuito lato sonde;
- BT10, sensore di temperatura sull'ingresso del fluido dalle sonde;
- AA100, scheda elettrica di collegamento;
- BT11, sensore di temperatura sull'uscita del fluido alle sonde;
- QM1, valvola di scarico per il sistema di climatizzazione.

Infine, in **Figura 33** in basso a destra sono presenti:

- EP2, condensatore;
- BT14, sensore di temperatura sul gas riscaldato;
- QA40, inverter;
- BT17, sensore di temperatura sul gas in aspirazione;
- CA1, componente elettrica su condensatore;
- RA1, riduzione elettrica;
- BT15, sensore di temperatura sul gas liquido;
- BP1, pressostato di alta pressione;
- EP1, componente elettrica su evaporatore;
- GQ10, compressore;
- HS1, filtro deidratante per la protezione del circuito con il gas frigorifero da umidità, acidi e impurità;
- BP2, pressostato di bassa pressione;

- XL20, attacco di servizio alta pressione;
- QN1, valvola di espansione;
- XL21, attacco di servizio bassa pressione;
- EB10, componente elettrico scalda-compressore;

Generalmente le pompe di calore possono seguire un funzionamento intermittente – quando la temperatura è impostata dall’utente – oppure possono seguire una curva climatica. Nel caso analizzato la regolazione avviene manualmente. La logica utilizzata dal sistema è la regolazione del compressore, in arresto e in avvio, in funzione della temperatura progressiva calcolata tramite l’approccio dei gradi minuto (DM), espressi come:

$$DM = \sum_{i=1}^{t_i} (T_a - T_s) \cdot t_i \quad (3.1)$$

Dove:

- T_a è la temperatura del fluido in uscita lato utenza (sensore BT3);
- T_s è la temperatura di set point dell’ambiente da climatizzare;
- t_i è la variabile temporale, ovvero il tempo trascorso dall’avvio

Il valore dei gradi minuto calcolati vengono poi confrontati con i limiti inferiori e superiori imposti dall’utente, superati i quali avviene l’accensione o lo spegnimento del compressore e quindi della pompa di calore.

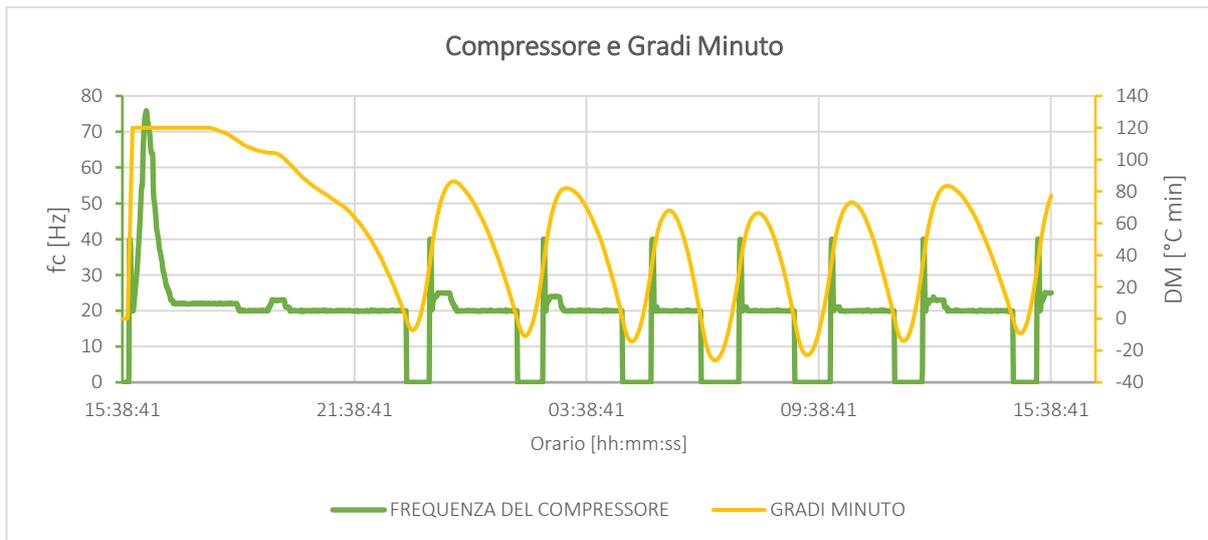


Figura 34 - Andamento della frequenza del compressore rispetto ai DM tra il 7 e l'8 giugno 2022, modalità raffrescamento

Nella **Figura 34** è possibile osservare l’andamento della frequenza del compressore (linea verde) rispetto ai gradi minuto (linea gialla) nell’arco delle 24 ore tra il 7 e l’8 giugno 2022. Dato il periodo estivo si tratta di una prova di raffrescamento dell’ambiente. Si può notare come il compressore si attivi tutte le volte che i gradi minuto si trovano sopra una certa soglia, in questo caso impostata pari a 30 °Cmin e si spenga quanto questi diventano negativi, ovvero quanto la temperatura dell’ambiente da climatizzare è pari alla temperatura di set-point desiderata.

Il ciclo di accensione iniziale differisce dai cicli successivi per due aspetti: il primo è l’ampiezza della frequenza del compressore, il secondo è il suo tempo di accensione. Poiché l’ambiente da raffreddare si trova ad una temperatura molto superiore rispetto a quella desiderata (DM molto elevati), il compressore deve lavorare in maniera più consistente e per un periodo di tempo maggiore per

abbassare la temperatura dell'ambiente. Allo stesso modo, dato il funzionamento intermittente della pompa di calore ci si aspetta che vi sia una fluttuazione nei valori di temperatura tra mandata e ritorno (sia lato utenza che lato terreno) nel corso della giornata.

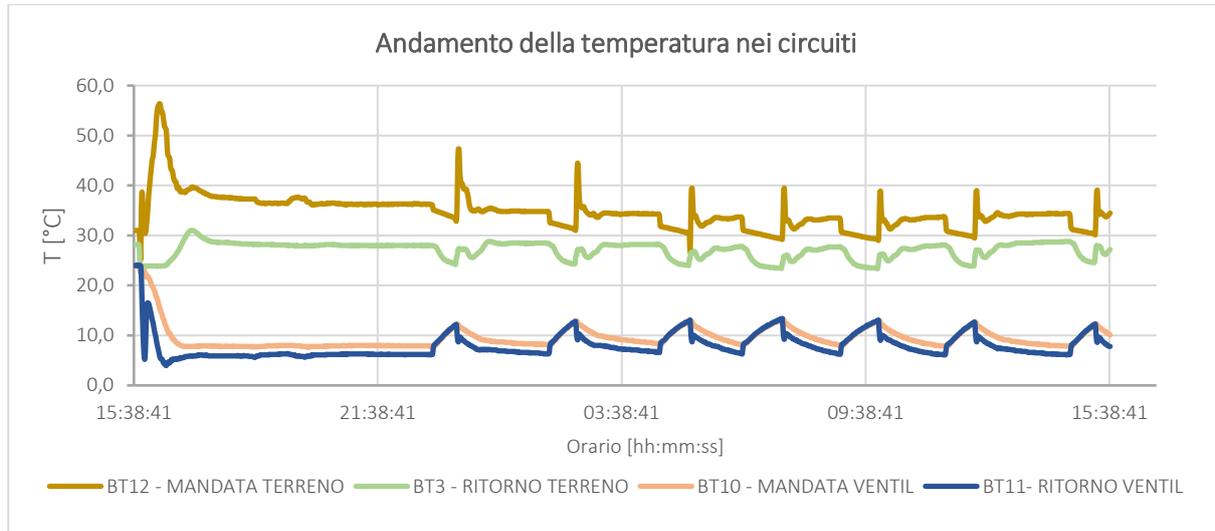


Figura 35 - Andamento della temperatura nel circuito primario e nel circuito secondario, modalità raffrescamento

La **Figura 35** mostra la fluttuazione pocanzi descritta. Anche in questo caso si nota come nel primo ciclo di accensione vi sia una differenza di temperatura maggiore tra mandata e ritorno in ogni circuito, differenza che tende a raggiungere un valore costante con il passare del tempo. Per una visione più chiara del funzionamento si rimanda alla **Figura 36** nella quale è possibile vedere in maniera definita la correlazione tra l'andamento della temperatura in mandata al ventilconvettore, ed il funzionamento del compressore. L'accensione del compressore comporta l'effetto utile desiderato, ovvero la riduzione della temperatura di mandata verso il terminale di erogazione, mentre con il suo spegnimento è possibile osservarne un incremento. Ci si aspetta, nel caso di un'eventuale prova in riscaldamento, di ottenere un andamento opposto della temperatura, ovvero un incremento durante l'accensione del compressore ed una diminuzione quando il compressore è fermo.

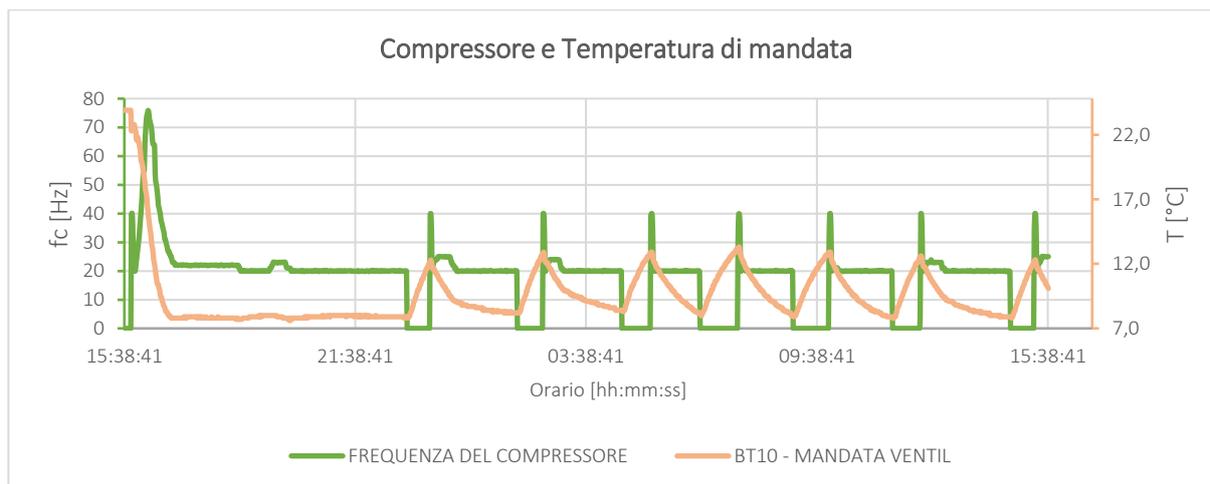


Figura 36 - Andamento della temperatura in mandata al ventilconvettore rispetto all'azionamento del compressore in modalità raffrescamento

3.2 Prove sperimentali e modellazione

L'obiettivo del presente paragrafo è quello di andare a studiare il comportamento dell'impianto pocanzi descritto, calcolando le potenze scambiate, le portate in gioco, e le prestazioni della pompa di calore.

Risulta pertanto necessario, anche a causa della mancanza di strumentazione specifica, procedere con la formulazione di alcune ipotesi, necessarie per i calcoli che verranno effettuati:

- All'interno della pompa di calore il sistema risulta adiabatico, ovvero si ipotizza che non vi siano dissipazioni di calore fra i vari componenti della pompa di calore, quali compressore, evaporatore, condensatore, valvola di laminazione e lungo le tubazioni di collegamento fra i componenti stessi;
- Il compressore segue un funzionamento ideale, con una compressione adiabatica che porta il fluido dalla condizione di gas saturo alla condizione di gas surriscaldato;
- Il condensatore segue un funzionamento ideale, con una trasformazione isoterma raggiunta alla fine della condensazione sulla curva limite inferiore;
- La valvola di laminazione segue un funzionamento ideale, con una trasformazione isoentalpica a partire dalla curva limite inferiore (alta pressione);
- La pressione del circuito primario è pari a 2 bar;
- La pompa di calore lavora in un range di pressione compreso tra 16 bar (alta pressione) e 7 bar (bassa pressione);
- Non vi sono perdite di pressione durante il funzionamento della pompa di calore;
- La portata volumica media dell'acqua glicolata al 25% presente nel circuito primari (lato terreno) è costante ed è pari a $0,65 \text{ m}^3/\text{h}$;
- La portata volumica media dell'acqua glicolata al 25% presente nel circuito secondario (lato fan coil) è costante ed è pari a $0,29 \text{ m}^3/\text{h}$;
- Le proprietà dell'acqua glicolata possono essere calcolate in funzione di quanto riportato nella **Tabella 3**;
- Le proprietà del fluido frigorifero R407C possono essere stimate tramite il software CoolPack per ogni caposaldo del circuito.

I dati messi a disposizione ed estratti dalla centralina di gestione della pompa di calore NIBE F1155 riguardano le prove di raffrescamento effettuate tra il 7 giugno ed il 4 luglio 2022. I parametri sono stati registrati con una cadenza pari ad un minuto grazie ai sensori presenti sull'impianto e sono stati esportati, per ogni giornata di analisi, direttamente dalla pompa di calore in un documento di testo in formato ".log". Successivamente si è provveduto alla conversione dei dati in appositi fogli di calcolo, mediante l'utilizzo di Excel, ottenendo:

- Data e ora;
- Temperatura in mandata (BT11) e in ritorno (BT10) del fluido lato utenza;
- Temperatura in mandata (BT12) e in ritorno (BT3) del fluido lato terreno;
- Temperatura esterna (BT1);
- Temperatura in ingresso (BT17) e in uscita (BT14) del fluido frigorifero al compressore;
- Frequenza del compressore;
- Gradi minuto (DM);
- Velocità delle pompe di circolazione (GP1 e GP2);
- Eventuali segnali di errore.

Parallelamente ai calcoli con Excel è stato utilizzato "CoolPack", un software di simulazione termodinamica sviluppato alla fine degli anni Novanta dal Danish Technological Institute (DTI) per progettare sistemi di refrigerazione e condizionamento dell'aria, permettendo di simulare il

comportamento di compressori, evaporatori, condensatori e altri componenti presenti nei cicli di termodinamici e dei loro fluidi termovettori. Le funzionalità del programma possono essere divise in tre magro categorie [41]:

1. **Refrigeration Utilities**, utilizzato per calcolare le proprietà dei refrigeranti più comuni e creare i grafici delle loro proprietà (come i diagrammi p-h, T-s e h-s) e per calcolare le perdite di pressione nelle tubazioni, nonché per creare grafici con le proprietà dell'aria umida.
2. **EESCoolTools**, utilizzato per la progettazione dei sistemi di refrigerazione, a partire dalla scelta del ciclo in base ai parametri principali, il dimensionamento dei componenti, il calcolo delle condizioni operative in funzione dei componenti selezionati e l'analisi energetica del sistema.
3. **Dynamics**, sezione che contiene i programmi dinamici di CoolPack, in grado di simulare il raffreddamento di un oggetto o di un ambiente al variare di alcune condizioni.

In particolare, per la realizzazione del presente studio, sono stati utilizzati *Refrigerant Calculator* (per il calcolo delle caratteristiche e delle proprietà del fluido frigorifero R407C sul diagramma p-h con l'obiettivo di calcolare le prestazioni della pompa di calore), *Heat transfer fluids calculator* (per il calcolo delle caratteristiche del fluido presente nel circuito primario lato terreno) e *Cycle Analysis* (utilizzato come metodo alternativo ad Excel per il calcolo delle efficienze e delle grandezze energetiche).

In **Figura 37** è riportato il ciclo termodinamico della pompa di calore funzionante in assetto estivo. Il calore viene assorbito dall'ambiente da climatizzare, attraverso l'evaporatore, al fluido frigorifero, per poi raggiungere il condensatore attraverso il quale viene ceduto al terreno.

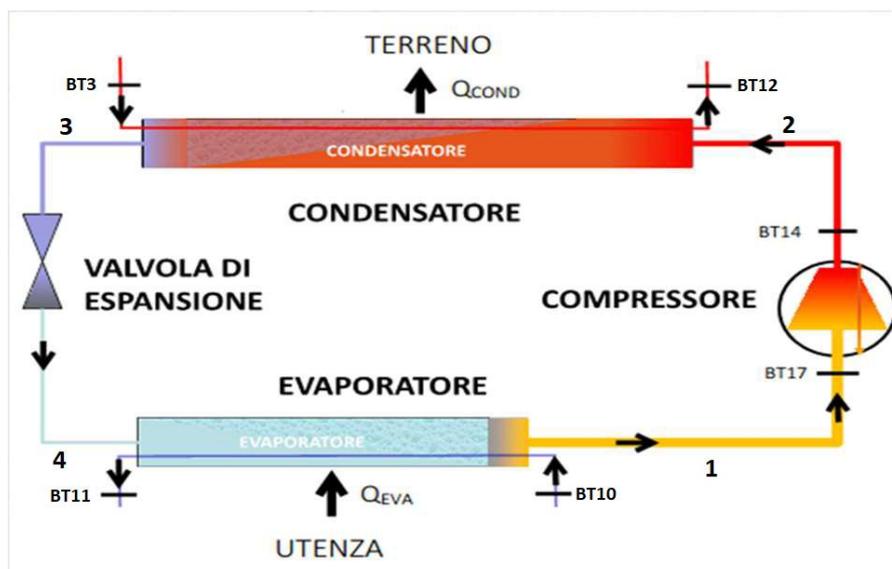


Figura 37 - Ciclo termodinamico stagione estiva [32]

L'efficienza, che in questo caso prende il nome di EER (Energy Efficiency Ratio), rappresenta il rapporto tra il lavoro utile fornito dall'evaporatore e quello speso dal compressore. Poiché inizialmente la portata massica del fluido refrigerante presente all'interno della pompa di calore non è un dato noto, il calcolo dell'efficienza può essere effettuato in termini di quantità specifiche piuttosto che di grandezze estensive:

$$EER = \frac{q_{eva}}{l_{i,c}} \quad (3.2)$$

Per il calcolo del lavoro speso per la compressione del fluido frigorifero (tratto 1-2) può essere applicato il primo principio per i sistemi aperti:

$$q - l_{i,c} = \Delta u + \Delta e_c + \Delta e_p \quad (3.3)$$

Poiché si è ipotizzata una compressione adiabatica che porta il fluido alla condizione di gas surriscaldato e assumendo nulle le variazioni delle componenti dovute all'energia cinetica e a quella potenziale, si ottiene:

$$l_{i,c} = -[c_{p,R407C_BP} \cdot T_{BT17} - c_{p,R407C_AP} \cdot T_{BT14}] \quad (3.4)$$

Dopo essere stato compresso ed aver raggiunto la condizione di gas surriscaldato, il fluido pronto per scambiare calore attraverso il condensatore: attraverso una trasformazione isobara (tratto 2-3) il fluido raggiunge la condizione di gas saturo. Il calore scambiato con il terreno può essere calcolato come differenza tra l'entalpia finale e quella iniziale, poiché lo scambio avviene a pressione costante [26]:

$$q_{cond} = h_3 - h_2 = h_{BTy} - h_{BT14} \quad (3.5)$$

Attraverso la valvola di laminazione il fluido passa dallo stato di alta pressione a quello di bassa pressione. Questa trasformazione può essere considerata isoentalpica e adiabatica e pertanto non ci sono variazioni tra l'entalpia del fluido in uscita al condensatore e quella in ingresso all'evaporatore. Le proprietà di questo caposaldo possono essere facilmente ricavate andando ad intersecare la curva di saturazione inferiore con l'isobara di alta pressione (16 bar) nel diagramma p-h.

Nell'evaporatore invece avviene il passaggio di stato da liquido (miscela liquido gas in quanto ci si trova al di sotto della campana delimitata dalla CLS e CLI) a gas saturo. Per poter calcolare il calore scambiato all'evaporatore è possibile utilizzare nuovamente la (3.3) e assumere nulle le variazioni di energia cinetica e potenziale, nonché il lavoro interno. Ricordando inoltre la definizione di entalpia [26]:

$$h = u + p \cdot v \quad (3.6)$$

Dato che l'evaporazione avviene a pressione costante, combinando la (3.3) e la (3.6), è possibile determinare la potenza scambiata all'evaporatore. Quest'ultima corrisponde alla differenza di entalpia che subisce il fluido refrigerante attraverso l'evaporatore [26]:

$$q_{eva} = h_{BT17} - h_{BTx} \quad (3.7)$$

L'entalpia del fluido R407C in uscita dall'evaporatore può essere facilmente determinata grazie alla temperatura rilevata dal sensore BT17 e alla pressione del ramo di bassa pressione (7bar). Per quanto riguarda invece l'entalpia in ingresso all'evaporatore, avendo ipotizzato il processo di laminazione come isentropico, questa può essere considerata pari a quella in uscita dal condensatore.

Con i dati disponibili si può procedere con il calcolo dell'efficienza della pompa di calore per ogni periodo di tempo considerato e realizzare il grafico del ciclo termodinamico sul diagramma $\log(p)$ -h.

Prima di procedere con il calcolo delle efficienze è necessario escludere dal calcolo i dati relativi ai periodi di tempo in cui il compressore non è operativo. Inoltre, è importante verificare l'assenza di fluido in regione bifasica all'interno del compressore; nel caso in cui ciò accada, bisogna escludere tali dati poiché le proprietà del fluido non verrebbero calcolate correttamente da CoolPack, e si otterrebbero dei risultati non veritieri. A livello "operativo", la prevenzione di questo fenomeno è essenziale per evitare rotture e malfunzionamenti del compressore. Tale controllo può essere facilmente effettuato osservando le temperature sui sensori in ingresso e in uscita al condensatore, ovvero BT17 e BT14.

Affinché non vi siano goccioline di liquido bisogna necessariamente che la temperatura del fluido sia maggiore della temperatura di saturazione sia in ingresso (bassa pressione – BP) che in uscita (alta pressione – AP), ovvero che:

$$\begin{cases} T_{BT17} > T_{sat,BP} \\ T_{BT14} > T_{sat,AP} \end{cases} \quad (3.8)$$

Il passo successivo da compiere dopo aver calcolato le quantità specifiche è rappresentato dalla determinazione della portata di fluido refrigerante (R407c) presente all'interno del circuito della pompa di calore. Per fare ciò è sufficiente applicare il primo principio della termodinamica per sistemi aperti, considerando lo scambio di calore che avviene tra il fluido refrigerante ed il circuito primario, rappresentato in **Figura 38**.

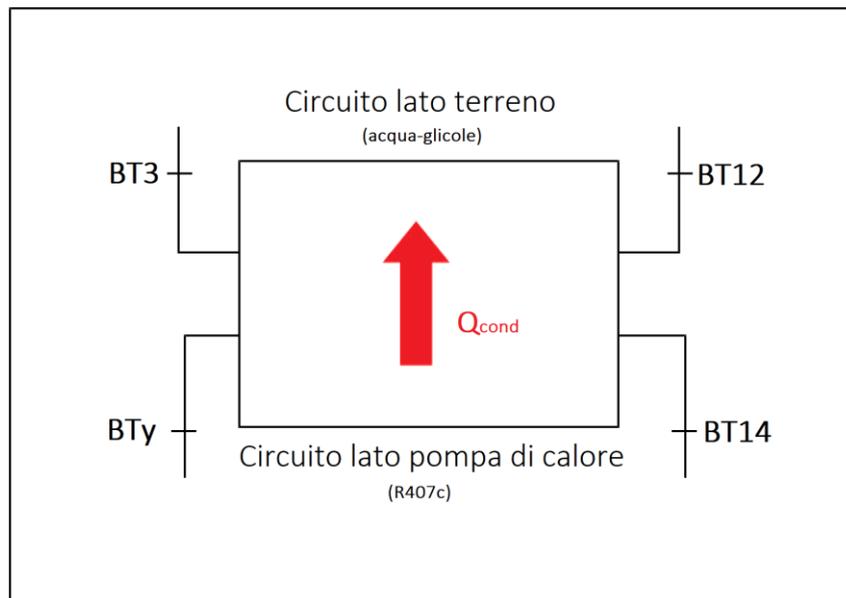


Figura 38 - Schema semplificato del condensatore

Avendo ipotizzato il funzionamento del condensatore come ideale, la potenza estratta dal circuito della pompa di calore corrisponde alla potenza ceduta al circuito lato terreno.

Pertanto:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{R407C} \cdot c_{p,R407C} \cdot (T_{BT14} - T_{BTy}) \\ = \dot{m}_{acqua-glicole} \cdot c_{p,acqua-glicole} \cdot (T_{BT12} - T_{BT3}) \end{aligned} \quad (3.9)$$

La (3.9) può essere anche espressa esplicitando la potenza specifica scambiata al condensatore calcolata precedentemente:

$$\dot{m}_{R407C} \cdot q_{cond,R407C} = \dot{m}_{acqua-glicole} \cdot c_{p,acqua-glicole} \cdot (T_{BT12} - T_{BT3}) \quad (3.10)$$

Combinando la (3.9) e la (3.10) si ricava facilmente, con i dati a disposizione, la portata del fluido refrigerante R407C:

$$\dot{m}_{R407C} = \frac{\dot{m}_{acqua-glicole} \cdot c_{p,acqua-glicole} \cdot (T_{BT12} - T_{BT3})}{q_{cond,R407C}} \quad (3.11)$$

A questo punto è possibile calcolare le potenze scambiate in termini estensivi:

$$Q_{cond} = \dot{m}_{R407C} \cdot q_{cond,R407C} \quad (3.12)$$

$$Q_{eva} = \dot{m}_{R407C} \cdot q_{eva,R407C} \quad (3.13)$$

$$L_{i,c} = \dot{m}_{R407C} \cdot l_{i,c} \quad (3.14)$$

Avendo ora tutti i dati a disposizione si può procedere con la modellazione del ciclo termodinamico utilizzando la sezione "Cycle Specification" all'interno del tool CoolPack già utilizzato per il calcolo delle proprietà del fluido R407c nei capisaldi.

Per modellare correttamente il ciclo, i primi dati che vengono richiesti dal sistema sono quelli necessari per identificare il range di pressione, ovvero viene richiesto di inserire le temperature di saturazione per il gas ad alta e a bassa pressione. Si ipotizza che non vi siano cadute di pressione, né differenze di temperatura dovute a surriscaldamento o sottoraffreddamento impostando questi delta a zero.

Inserendo poi i dati calcolati tramite Excel (portata del fluido refrigerante, potenza assorbita dal compressore e temperature in ingresso ed in uscita da quest'ultimo), il programma esegue il calcolo dell'efficienza del sistema e riporta il ciclo termodinamico su un grafico di tipo log(p)-h il ciclo termodinamico.

3.3 Risultati

Effettuando una media minuto per minuto dei dati validi, ovvero quelli in cui il compressore è in funzione e sono rispettate le condizioni di cui alla (3.8), è possibile ottenere le temperature in ingresso (BT17) e in uscita (BT14) dal compressore, che risultano rispettivamente pari a 14,04°C e 54,13°C. Con questi valori è possibile calcolare le proprietà dei capisaldi, riportate nella **Tabella 5**.

N° Caposaldo	Sensore	T [°C]	p [bar]	cp [kJ/kgK]	h [kJ/kg]	s [kJ/kgK]
1	BT17	14,04	7,0	0,889	421,45	1.782,91
2	BT14	54,13	16,0	1,055	445,43	1.794,57
3	BTy	36,54	16,0	1,794	257,92	1.192,43
4	BTx	8,07	7,0	1,364	257,92	1.205,06
1	BT17	14,04	7,0	0,889	421,45	1.782,91

Tabella 5 - Capisaldi

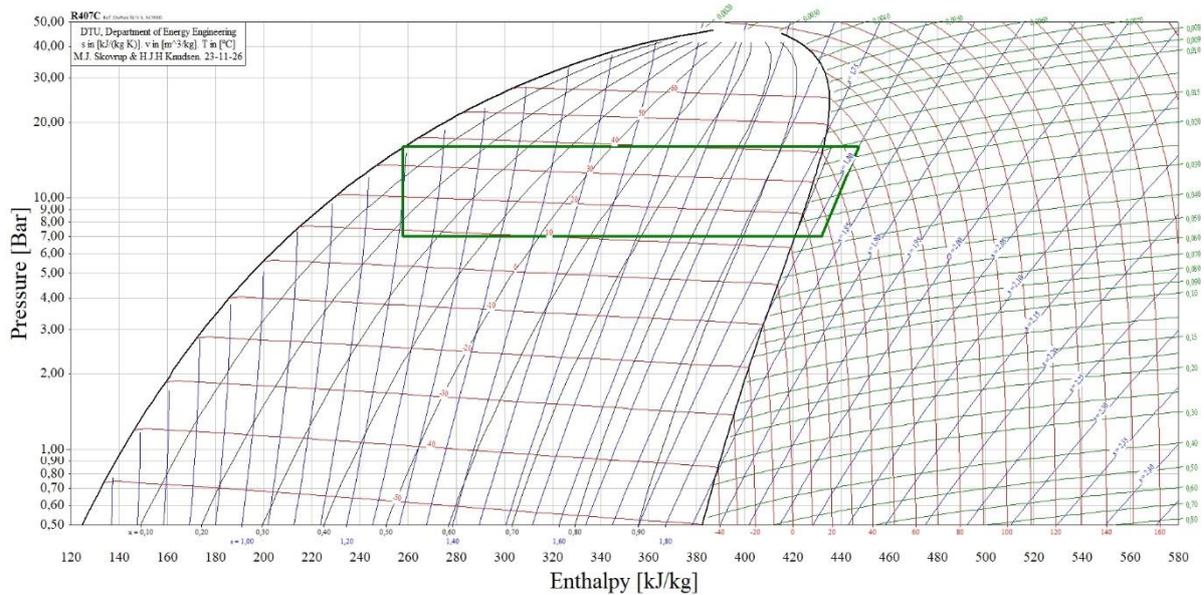


Figura 39 - Ciclo termodinamico nel diagramma log(p)-h per il fluido R407C

A questo punto, applicando la (3.4) si calcola il lavoro speso per la compressione:

$$\begin{aligned}
 l_{i,c} &= -[c_{p,R407C_{BP}} \cdot T_{BT17} - c_{p,R407C_{AP}} \cdot T_{BT14}] \\
 &= -[0,889 \text{ kJ/kgK} \cdot 14,04^\circ\text{C} - 1,055 \text{ kJ/kgK} \cdot 54,13^\circ\text{C}] \\
 &= 44,61 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

Si precisa che le temperature sono state volontariamente inserite in gradi Celsius in quanto applicate all'interno di una differenza. Diversamente sarebbe stato necessario inserire le temperature in Kelvin.

Applicando poi la (3.5) si calcola il calore scambiato con il condensatore:

$$\begin{aligned}
 q_{cond} &= h_{BTy} - h_{BT14} \\
 &= 257,92 \text{ kJ/kg} - 445,43 \text{ kJ/kg} \\
 &= -187,51 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

Mentre con la (3.7) si ricava il calore scambiato all'evaporatore:

$$\begin{aligned}
 q_{eva} &= h_{BT17} - h_{BTx} \\
 &= 421,15 \text{ kJ/kg} - 257,92 \text{ kJ/kg} \\
 &= 163,53 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

Avendo tutti i dati a disposizione è possibile calcolare l'efficienza di raffreddamento della pompa di calore secondo la (3.2):

$$EER = \frac{q_{eva}}{l_{i,c}}$$

$$= \frac{163,53 \text{ kJ/kg}}{44,61 \text{ kJ/kg}} = 3,67 [-]$$

Nel caso in cui il calcolo non avesse tenuto conto delle condizioni di cui alla (3.8), ovvero effettuando la media delle temperature misurate dai sensori BT17 e BT14 senza escludere i valori in cui vengono superate le temperature di saturazione di bassa e alta pressione, si sarebbe ottenuto un'efficienza più alta di quella pocanzi calcolata, così come riportato nel diagramma seguente.

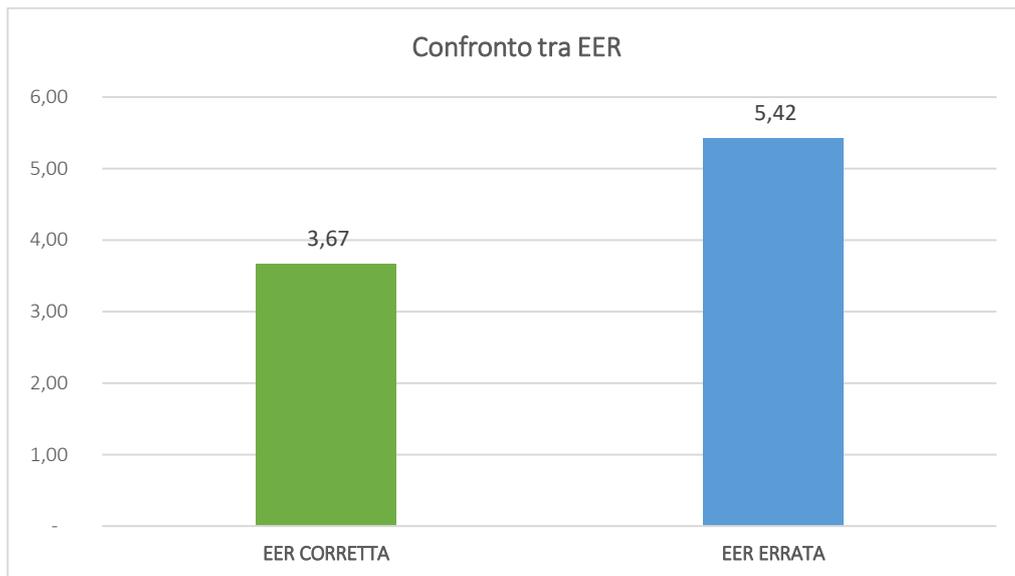


Figura 40 - Confronto tra l'EER ottenuta rimuovendo i valori che non rispecchiano la (3.2) e quella ottenuta dalla media di tutti i valori registrati dai sensori

Si è poi passati al calcolo della portata del fluido refrigerante applicando la (3.11):

$$\dot{m}_{R407C} = \frac{\dot{m}_{acqua-glicole} \cdot c_{p,acqua-glicole} \cdot (T_{BT12} - T_{BT3})}{q_{cond,R407C}}$$

$$= \frac{0,185 \text{ kg/s} \cdot 3,93 \text{ kJ/kgK} \cdot (37,0 - 30,5) \text{ K}}{187,51 \text{ kJ/kgK}}$$

$$= 0,0248 \text{ kg/s}$$

Per il calcolo delle grandezze estensive è stato sufficiente moltiplicare le potenze specifiche per la portata appena calcolata, così come riportato nelle equazioni (3.12), (3.13) e (3.14).

$$Q_{cond} = \dot{m}_{R407C} \cdot q_{cond,R407C}$$

$$= 0,0248 \text{ kg/s} \cdot 187,51 \text{ kJ/kgK}$$

$$= 4,66 \text{ kW}$$

$$\begin{aligned} Q_{eva} &= \dot{m}_{R407C} \cdot q_{eva,R407C} \\ &= 0,0248 \text{ kg/s} \cdot 163,53 \text{ kJ/kgK} \\ &= 4,06 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_{i,c} &= \dot{m}_{R407C} \cdot l_{i,c} \\ &= 0,0248 \text{ kg/s} \cdot 44,61 \text{ kJ/kgK} \\ &= 1,11 \text{ kW} \end{aligned}$$

Si rimanda alla **Figura 41** per visionare i dati inseriti come input in CoolPack, mentre nella **Figura 42** è possibile esaminare il ciclo termodinamico del fluido refrigerante ottenuto tramite il suddetto software.

CYCLE SPECIFICATION								
TEMPERATURE LEVELS		PRESSURE LOSSES		SUCTION GAS HEAT EXCHANGER		REFRIGERANT		
T_E [°C]:	13,0	ΔT_{SH} [K]:	0	Δp_{SL} [K]:	0	No SGHX	0,00	R407C
T_C [°C]:	41,8	ΔT_{SC} [K]:	0	Δp_{DL} [K]:	0			
CYCLE CAPACITY								
Mass flow \dot{m} [kg/s]	0,0248	\dot{Q}_E : 4,041 [kW]	\dot{Q}_C : 4,652 [kW]	\dot{m} : 0,0248 [kg/s]	\dot{V}_S : 3,11 [m ³ /h]			
COMPRESSOR PERFORMANCE								
Power consumption \dot{W} [kW]	1,11	η_{IS} : 0,457 [-]	\dot{W} : 1,11 [kW]					
COMPRESSOR HEAT LOSS								
Discharge temperature T_2 [°C]	54,13	f_Q : 47,1 [%]	T_2 : 54,1 [°C]	\dot{Q}_{LOSS} : 0,523 [kW]				
SUCTION LINE								
Outlet temperature T_8 [°C]	14,0	\dot{Q}_{SL} : 23 [W]	T_8 : 14,0 [°C]	$\Delta T_{SH,SL}$: 1,1 [K]				

Figura 41 - Dati in input per il calcolo dell'EER con CoolPack

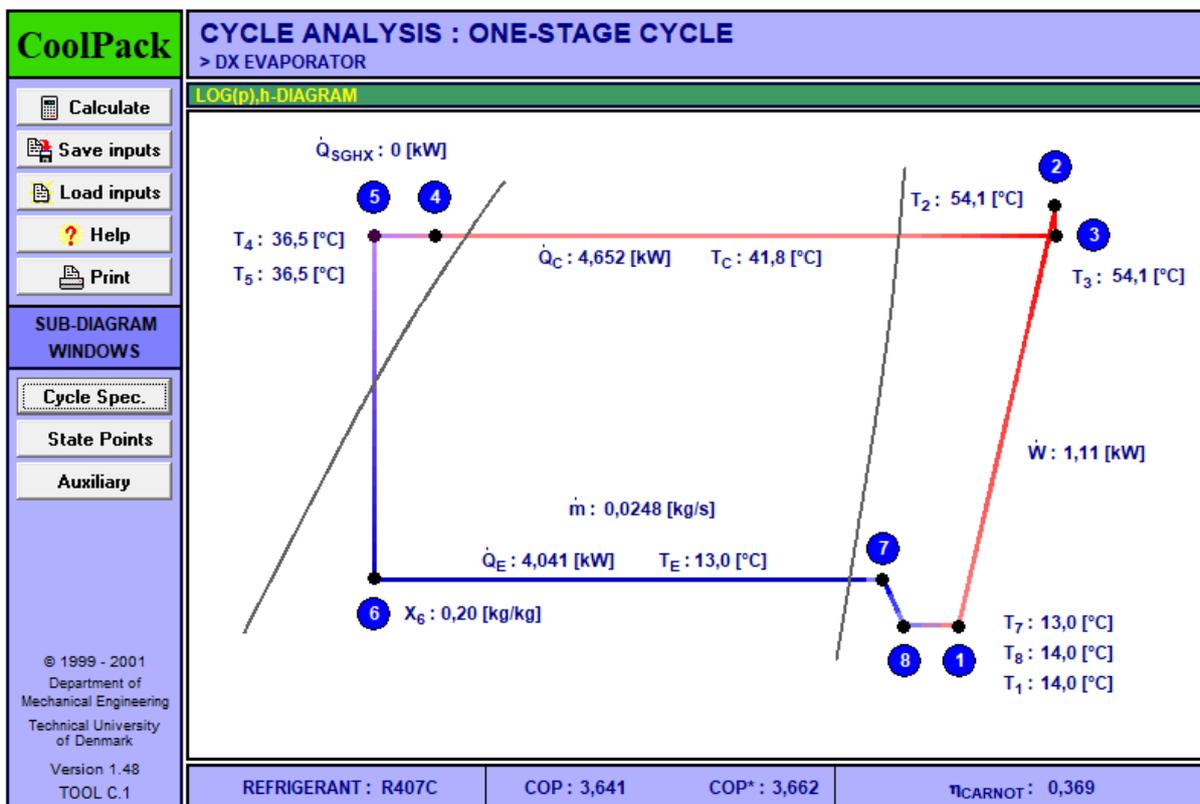


Figura 42 - Ciclo termodinamico ed EER ottenuti con CoolPack

Lo stesso procedimento pocanzi descritto è stato applicato anche ai singoli giorni: l'elevata granularità temporale dei dati a disposizione ha consentito la rimozione dei valori errati minuto per minuto, ottenendo come risultato la media giornaliera curata e precisa di ogni parametro.

Si riporta in **Tabella 6** il confronto tra le principali grandezze calcolate (potenze scambiate ed efficienza) e quelle ottenute mediante CoolPack, avendo impostato e mantenuto costante il range di pressione pari a 7 bar per il ramo di bassa pressione e pari a 16 bar per il ramo di alta pressione.

	Portata R407C [kg/s]	Lc [kW]	Qeva [kW]	Qeva COOLPACK [kW]	Scostamento [%]	Qcond [kW]	Qcond COOLPACK [kW]	Scostamento [%]	EER [-]	EER COOLPACK [-]	Scostamento [%]
07/06/2022	0,06197	2,69	10,23	10,10	-1,2%	11,65	11,64	0,0%	3,79	3,81	-1,2%
08/06/2022	0,02727	1,11	4,46	4,44	-0,3%	5,11	5,00	-2,2%	4,03	4,02	-0,2%
09/06/2022	0,02478	0,96	4,05	4,04	-0,4%	4,49	4,50	0,1%	4,22	4,23	0,2%
10/06/2022	0,02572	1,00	4,21	4,19	-0,5%	4,66	4,68	0,3%	4,19	4,22	0,6%
11/06/2022	0,02516	0,99	4,11	4,10	-0,4%	4,58	4,59	0,1%	4,14	4,17	0,6%
12/06/2022	0,02405	0,95	3,93	3,92	-0,4%	4,39	4,39	0,1%	4,12	4,15	0,7%
13/06/2022	0,02389	1,05	3,91	3,89	-0,4%	4,46	4,46	0,0%	3,73	3,73	0,0%
14/06/2022	0,02243	1,03	3,66	3,65	-0,1%	4,23	4,23	0,0%	3,56	3,56	0,1%
15/06/2022	0,02145	1,02	3,50	3,50	0,0%	4,07	4,07	0,0%	3,43	3,43	0,1%
16/06/2022	0,02116	1,06	3,45	3,45	-0,1%	4,07	4,07	-0,1%	3,26	3,26	0,0%
17/06/2022	0,02379	1,20	3,89	3,88	-0,2%	4,53	4,60	1,6%	3,23	3,24	0,5%
18/06/2022	0,02127	1,07	3,47	3,47	-0,1%	4,11	4,10	-0,1%	3,23	3,25	0,7%
19/06/2022	0,02169	1,07	3,54	3,53	-0,1%	4,16	4,16	-0,1%	3,32	3,31	0,0%
20/06/2022	0,02169	1,10	3,53	3,53	0,0%	4,19	4,19	-0,1%	3,21	3,22	0,4%
21/06/2022	0,02486	1,34	4,05	4,05	0,1%	4,88	4,88	-0,1%	3,02	3,03	0,3%
22/06/2022	0,02673	1,40	4,36	4,36	0,0%	5,21	5,21	-0,1%	3,10	3,12	0,5%
23/06/2022	0,03047	1,55	4,97	4,96	-0,2%	5,90	5,90	-0,1%	3,20	3,22	0,4%
24/06/2022	0,04514	2,05	7,52	7,35	-2,3%	8,65	8,64	0,0%	3,67	3,68	0,2%
25/06/2022	0,08255	3,73	14,09	13,45	-4,8%	16,15	16,13	-0,1%	3,78	3,78	0,1%

Tabella 6 - Confronto tra potenze ed efficienza calcolate ed i valori ottenuti tramite CoolPack

L'analisi dei dati si interrompe il 25 giugno, poiché nei giorni successivi il compressore risulta spento, rendendo così superflua la loro ulteriore esaminazione.

Ogni parametro è stato riportato in un istogramma per apprezzare meglio il confronto tra i risultati ottenuti, così come visibile in **Figura 43**, **Figura 44** e **Figura 45**.

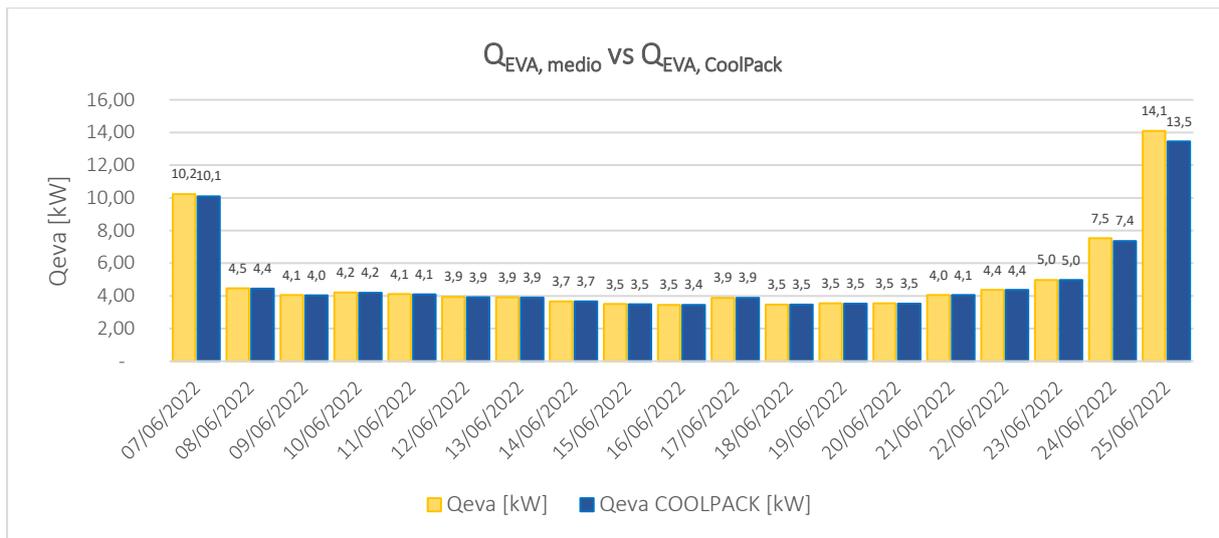


Figura 43 - Confronto tra i valori calcoli e quelli ottenuti tramite CoolPack della potenza termica scambiata all'evaporatore

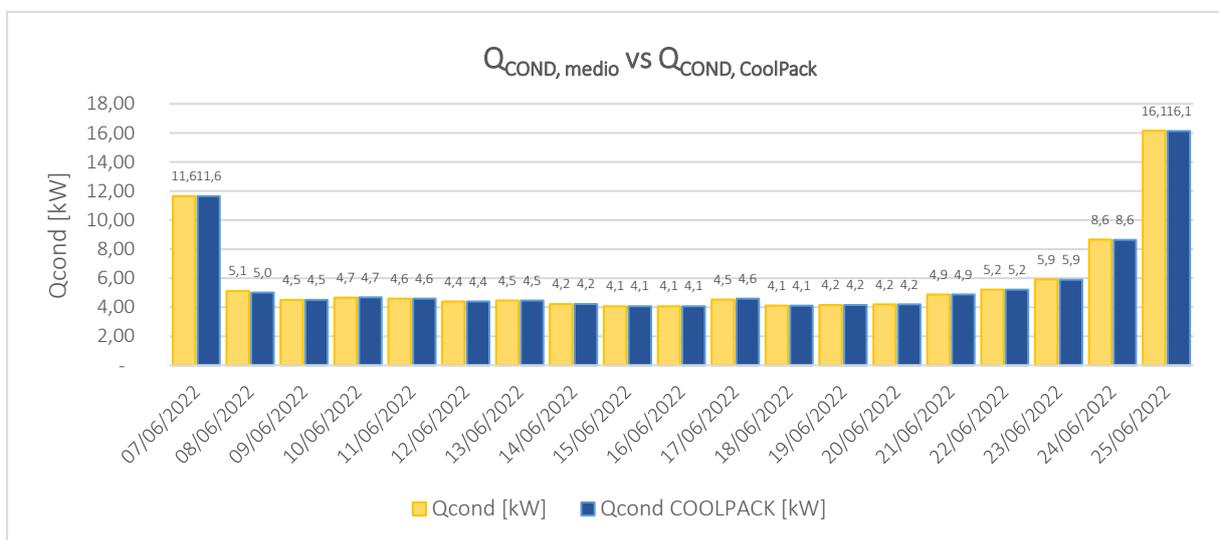


Figura 44 - Confronto tra i valori calcoli e quelli ottenuti tramite CoolPack della potenza termica scambiata al condensatore

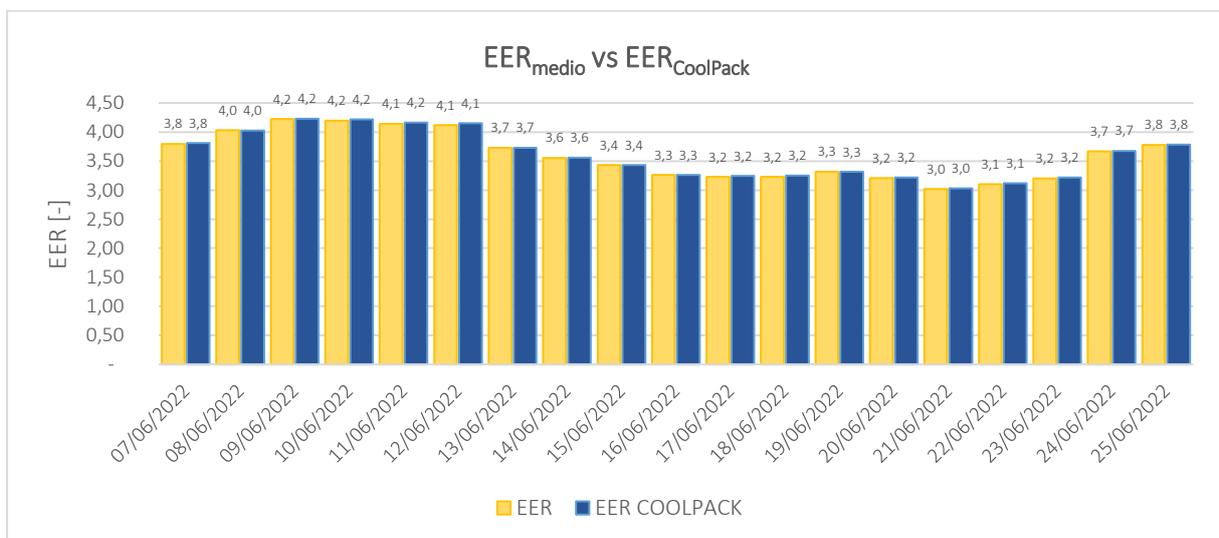


Figura 45 - Confronto tra i valori calcoli e quelli ottenuti tramite CoolPack dell'efficienza della pompa di calore

Risulta interessante confrontare l'andamento dell'efficienza della pompa di calore in relazione alla temperatura esterna. Come già evidenziato nei paragrafi precedenti, le prestazioni delle pompe di calore sono fortemente influenzate dalle temperature operative. In modalità raffrescamento, tanto più è alta la temperatura esterna, tanto più si riduce l'efficienza della pompa di calore. Ciò è dovuto alla riduzione della differenza di temperatura tra l'ambiente esterno ed il refrigerante in uscita dal condensatore. Ci si aspetta, quindi, di osservare un EER più basso all'aumentare della temperatura registrata dal sensore BT1. Questo presupposto risulta confermato nell'analisi dei valori medi giornalieri di EER e nell'andamento della temperatura media esterna tra il 7 e il 25 giugno 2022, come evidenziato in **Figura 46**.

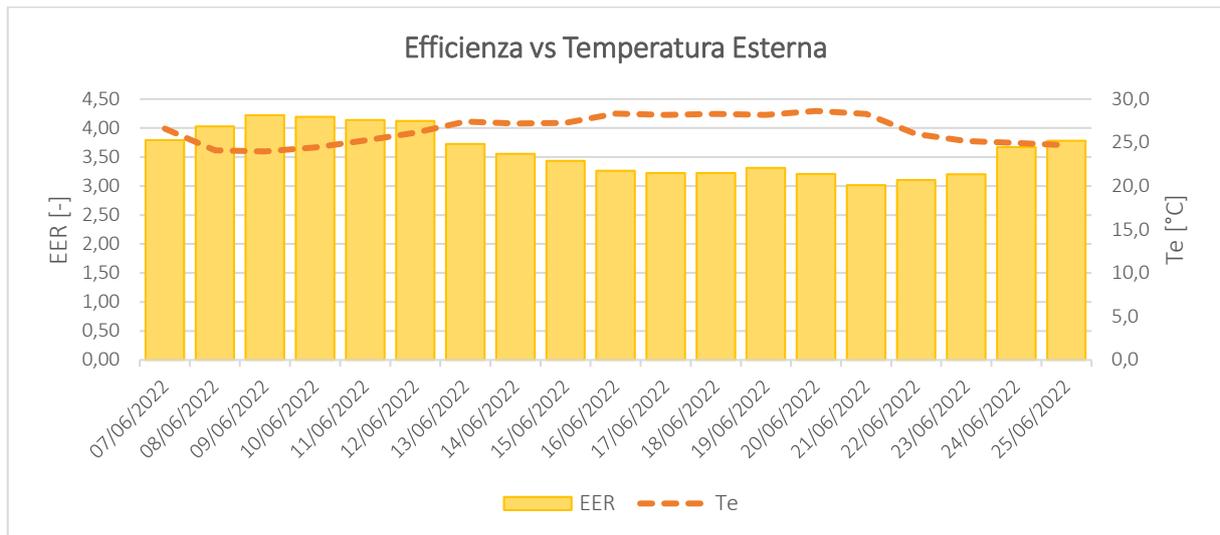


Figura 46 - Confronto tra l'efficienza e la temperatura esterna

Allo stesso modo anche le potenze scambiate al condensatore e all'evaporatore e quella spesa per la compressione sono correlate all'evoluzione della temperatura esterna e, più in particolare, seguono l'andamento di quest'ultima così come visibile in **Figura 47**.

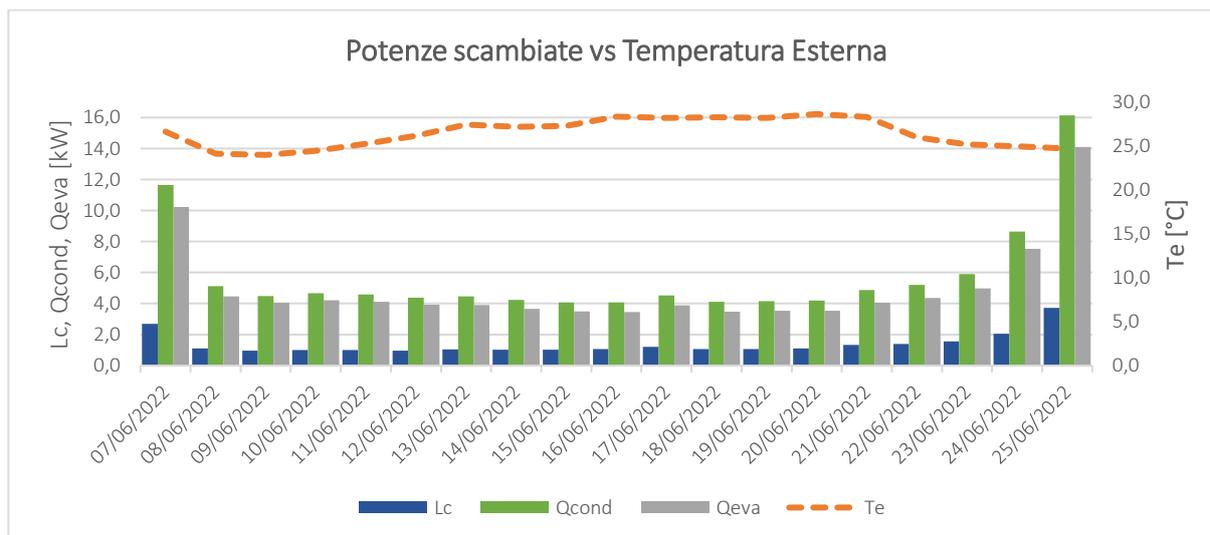


Figura 47 - Confronto tra le potenze scambiate e l'evoluzione della temperatura esterna

Questo fenomeno si verifica poiché, all'aumentare della temperatura esterna, la pompa di calore è costretta ad intensificare la propria operatività per garantire la temperatura di mandata impostata dall'utente e pertanto vi è un aumento della quantità di calore da sottrarre all'ambiente (Q_{eva}). Di

conseguenza aumentano anche il lavoro di compressione richiesto dalla pompa di calore (L_c) e la quantità di calore da cedere al terreno (Q_{cond}). Il trend presenta un'evidente deviazione rispetto all'andamento previsto nei due giorni finali del grafico. Questo potrebbe essere attribuito a potenziali malfunzionamenti associati al compressore. In quei giorni, infatti, l'analisi dei dati registrati dalla pompa di calore NIBE evidenzia temperature del fluido refrigerante in uscita dal compressore notevolmente elevate, pari rispettivamente a 17°C il 24/06 e 22°C il giorno successivo. Questi valori si discostano parecchio dalle temperature registrate nei giorni precedenti, la cui media è di circa 13,8°C.

Infine, poiché il calore rimosso dall'ambiente è stato ceduto al terreno, risulta interessante andare a valutare le condizioni del terreno alle diverse profondità. L'analisi è possibile grazie ai dati registrati dalla sensoristica installata in prossimità del muro energetico e il cui posizionamento è stato mostrato in precedenza in **Figura 25**, **Figura 26**, **Figura 27**, **Figura 28** e in **Figura 29**. I dati registrati sono reperibili sul sito della WINET SRL, previo login con le credenziali dell'Energy Center. Per il periodo analizzato i dati a disposizione arrivano fino al 25 giugno, successivamente l'impianto risulta spento così come desunto in precedenza osservando l'accensione del compressore della pompa di calore. I valori sono stati campionati con un periodo di 15 minuti, ma il loro download è disponibile anche sotto forma di valore medio orario o medio giornaliero. Per questa analisi sono stati utilizzati i valori orari.

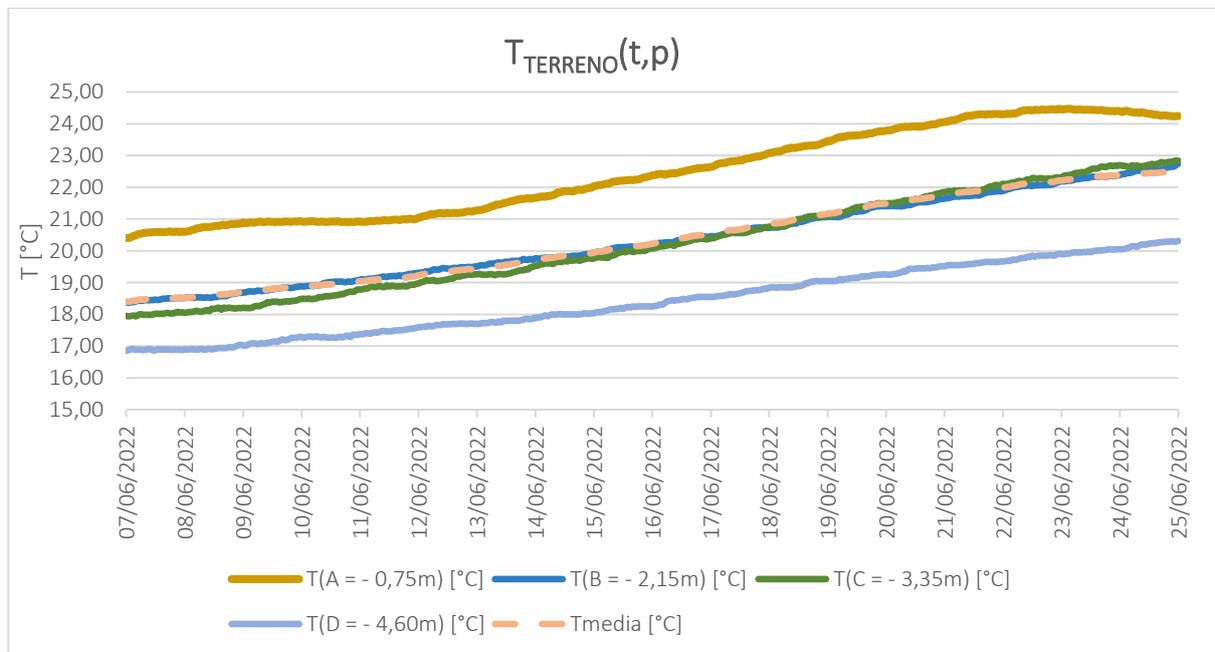


Figura 48 - Andamento della temperatura nel terreno

È possibile osservare un progressivo incremento della temperatura del terreno, che passa da un valore medio di 18,4°C il 7 giugno (20,4°C in prossimità della superficie e 16,9°C alla profondità di 4,6m – temperatura media dell'aria esterna pari a 16,6°C) a 22,5°C il 25 giugno (24,2°C in prossimità della superficie e 20,3°C alla profondità di 4,6m – temperatura media dell'aria esterna pari a 24,7°C). L'incremento medio è quindi pari a 4,1°C. Questi dettagli forniscono una panoramica approfondita delle variazioni termiche in diverse profondità e nell'ambiente circostante.

Un altro dato che viene misurato dai sensori installati presso l'impianto sperimentale dell'Energy Center è l'umidità nel terreno alle diverse profondità. L'evoluzione nel tempo di tale parametro è riportata nella **Figura 49**. Si nota chiaramente come, con il passare dei giorni e quindi con il trasferimento del calore verso il terreno, questo subisca una progressiva riduzione della sua umidità. Si può notare, inoltre, come i valori misurati dai sensori posti più in profondità siano circa costanti nel tempo, esplicitando la loro

indipendenza rispetto alle condizioni metereologiche che interessano maggiormente le zone superficiali.

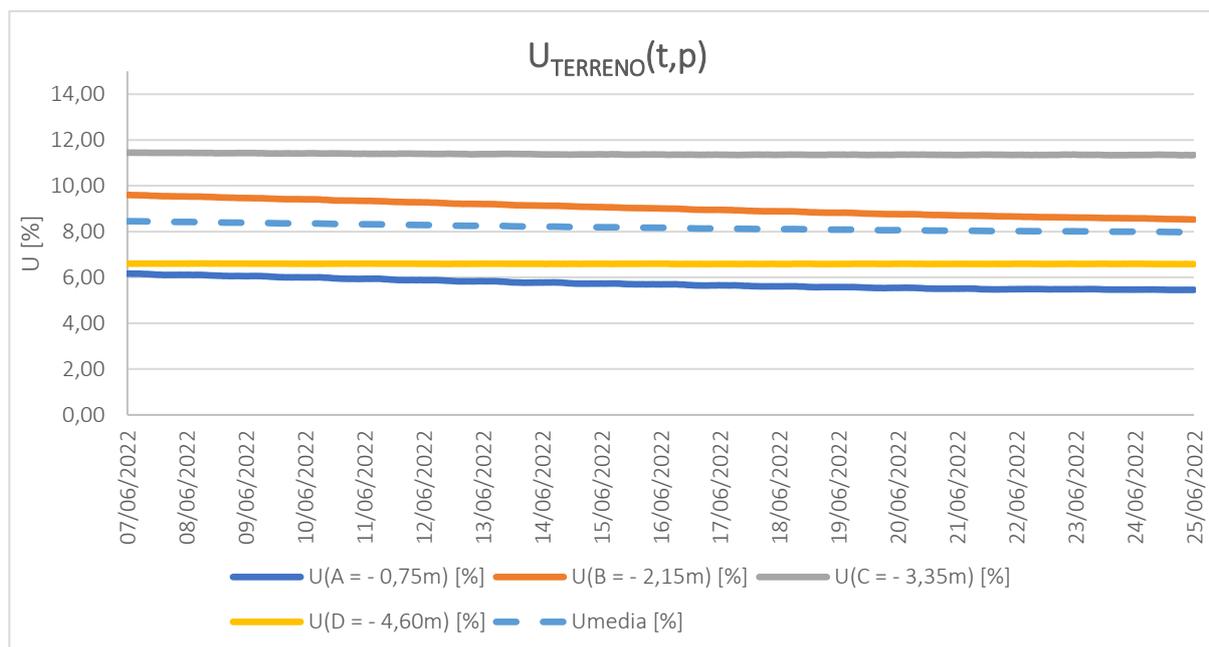


Figura 49 - Andamento dell'umidità nel terreno

L'analisi pocanzi descritta circa le variazioni di temperatura e umidità del terreno è stata eseguita facendo una media dei valori misurati dalle sonde sui diversi piani. Tuttavia, poiché si vuole valutare la loro correlazione con il muro energetico, risulta particolarmente interessante andare a confrontarli in base alla loro distanza rispetto alle serpentine del GeothermSkin.

Le sonde più lontane sono la S010 (**Figura 28**) e la S013 (**Figura 26**), posizionate ad una distanza di circa 3,5 m rispetto al muro energetico rispettivamente sul piano A (-0,75 m) e sul piano B (-2,15 m). I valori misurati da questi sensori possono essere rappresentativi delle condizioni del terreno indisturbato, ovvero la porzione di terreno che meno risente del calore ceduto (o assorbito) dall'impianto geotermico.

Limitando l'analisi ai due piani A e B di cui fanno parte le sonde S010 e S013, le sonde più vicine al muro risultano essere quelle denominate S009 ed S011 per il piano A (**Figura 28**) e S012 ed S014 per il piano B (**Figura 26**). Confrontando i valori medi delle sonde più vicine sui due piani con quelli misurati in lontananza, si ottengono le evoluzioni riportate in **Figura 50**.

La temperatura del terreno in prossimità del muro energetico risulta essere più alta rispetto a quella misurata in lontananza, sia per quanto riguarda il piano A, sia per quanto riguarda il piano B. Inoltre, l'innalzamento termico risulta evidentemente maggiore vicino al muro, mentre diminuisce allontanandosi da esso.

Sul piano A, infatti, la temperatura media delle sonde S009 e S011 passa da 20,5°C il 7 giugno a 24,9°C il 25 giugno, con un incremento netto di 4,4°C mentre il valore misurato dalla sonda più lontana (S010) passa da 20,3°C a 23,0°C, con un incremento nettamente inferiore, pari a soli 2,7°C.

Lo stesso avviene sul piano B, dove la temperatura media delle sonde S012 e S014 passa da 18,8°C a 24,1°C, con un incremento pari a 5,3°C, mentre la sonda più lontana (S013) passa da 17,7°C a 20,0°C con un incremento di 2,3°C.

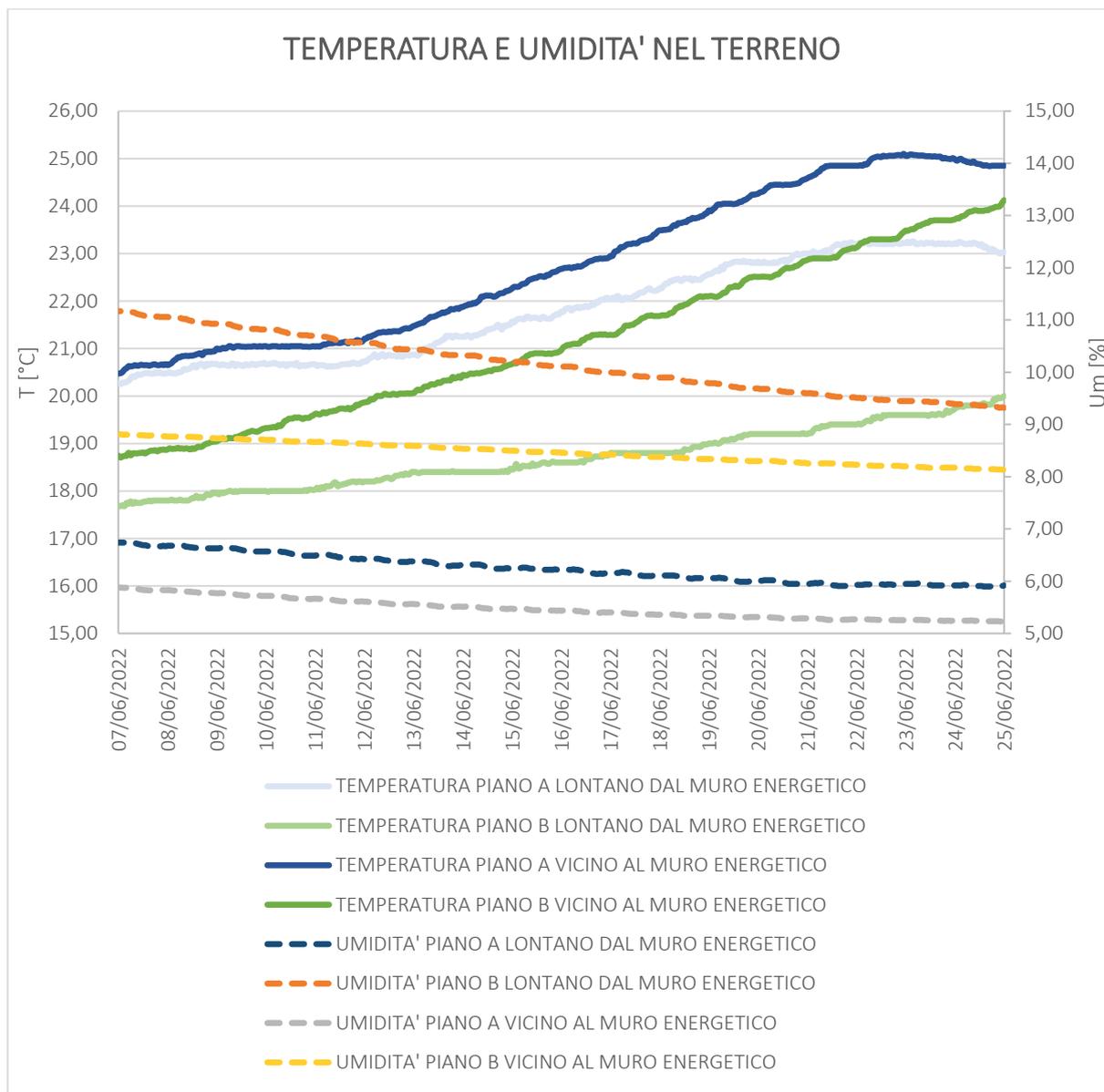


Figura 50 - Andamento della temperatura e dell'umidità del terreno sui piani A e B

Osservando invece i valori dell'umidità si nota come sia sul piano A che sul piano B, l'umidità in prossimità delle sonde geotermiche sia minore rispetto ai valori misurati in lontananza: il primo giorno di misura si passa infatti dal 5,9% al 6,7% per il piano A e dall'8,8% all'11,2% per il piano B, fino a passare dal 5,2% al 5,9% per il piano A e dall'8,1% al 9,3% per il piano B nell'ultimo giorno di misura.

In definitiva i dati raccolti mostrano chiaramente come la porzione di terreno in prossimità del muro energetico risenta maggiormente dello scambio termico dovuto all'impianto installato, mentre allontanandosi da esso vi è una progressiva riduzione delle interazioni. La temperatura presenta un andamento crescente nel tempo, mentre l'umidità un andamento opposto. Mentre il primo parametro dipende principalmente dal calore ceduto dalla pompa di calore al terreno, il secondo non solo è influenzato dall'impianto geotermico che riscaldando il terreno porta da una sua deumidificazione, ma è influenzato anche dalle condizioni ambientali esterne. Durante il periodo analizzato non si sono verificati temporali o rovesci che avrebbero potuto aumentare l'umidità del terreno e pertanto il valore di tale parametro è diminuito nel tempo. A tal proposito si fa notare come l'umidità sul piano A, in prossimità della superficie esterna, sia di gran lunga inferiore a quella misurata sul piano B, sia in prossimità del muro energetico, sia in lontananza.

3.4 Analisi di sensitività

L'analisi di sensitività rappresenta un approccio cruciale nell'ambito dell'ottimizzazione dei sistemi, consentendo di valutare l'impatto delle variazioni dei parametri chiave sugli indicatori di prestazione. Nell'ottica quindi di migliorare le prestazioni della pompa di calore risulta interessante osservare l'evoluzione dell'efficienza al variare del salto di pressione che subisce il fluido refrigerante all'interno del compressore.

Si suppone quindi di mantenere costanti la temperatura in ingresso al compressore e la pressione minima (quest'ultima pari a 7 bar), e di variare la pressione massima fino a 20 bar. Poiché per le configurazioni di studio non sono disponibili dati sperimentali, è necessario stabilire una metodologia di calcolo per ottenere la temperatura del fluido refrigerante in uscita dal compressore. Come prima ipotesi si potrebbe pensare di ipotizzare una compressione isentropica, tuttavia, avendo a disposizione le misurazioni reali, è possibile utilizzare una funzione politropica il cui esponente "n" può essere calcolato a partire dai dati effettivi.

L'equazione della politropica [26] è riportata nella (3.15):

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} \quad (3.15)$$

Da cui si ricava l'esponente:

$$n = \frac{\ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right)}{\ln\left(\frac{T_2}{T_1} \cdot \frac{p_1}{p_2}\right)} \quad (3.16)$$

Le pressioni e le temperature devono essere espresse rispettivamente in bar e in Kelvin, tuttavia, mentre le prime sono un dato costante per le varie giornate analizzate (7 e 16 bar), le seconde possono essere calcolate facendo una media tra i dati misurati di ogni giorno. Al fine di mitigare l'effetto dei valori anomali (temperature troppo alte o troppo basse), per rendere il valore medio più rappresentativo del valore tendenziale dei dati si è deciso di scartare dal calcolo tutti i valori che discostano – in eccesso o in difetto – dalla deviazione standard del valore medio. I risultati di quest'ultimo calcolo sono riportati nella **Tabella 7**. Inoltre, poiché la temperatura in uscita dal compressore è direttamente proporzionale a quella in ingresso, il calcolo pocanzi descritto è stato eseguito solamente sulle quantità misurate dal sensore BT17, utilizzando i medesimi giorni "validi" per il calcolo del valore medio di BT14. Sono state quindi ottenute le seguenti temperature:

- **BT17_m'** temperatura media in ingresso al compressore pari a 13,8 °C (287,0 K)
- **BT14_m'** temperatura media in ingresso al compressore pari a 55,6 °C (328,7 K)

Applicando la (3.16) si ottiene un esponente n pari a 1,196.

	$BT17_i$ [°C]	$BT17_m$ [°C]	σ [°C]	$BT17_m + \sigma$ [°C]	$BT17_m - \sigma$ [°C]	$BT17_i'$ [°C]	$BT17_m'$ [°C]
07/06/2022	15,7	14,5	2,1	16,6	12,4	15,7	13,8
08/06/2022	13,9					13,9	
09/06/2022	14,0					14,0	
10/06/2022	14,2					14,2	
11/06/2022	14,1					14,1	
12/06/2022	14,1					14,1	
13/06/2022	14,0					14,0	
14/06/2022	13,6					13,6	
15/06/2022	13,4					13,4	
16/06/2022	13,5					13,5	
17/06/2022	13,8					13,8	
18/06/2022	13,5					13,5	
19/06/2022	13,6					13,6	
20/06/2022	13,4					13,4	
21/06/2022	13,3					13,3	
22/06/2022	13,4					13,4	
23/06/2022	13,7					13,7	
24/06/2022	17,5					17,5	
25/06/2022	22,1					22,1	

Tabella 7 - Calcolo della temperatura media in ingresso al compressore

Avendo ora ottenuto il coefficiente n della politropica in grado di descrivere la compressione, è possibile ricavare la formula per il calcolo della temperatura del fluido refrigerante in uscita dal compressore. Partendo dalla (3.15) si ottiene:

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} \quad (3.17)$$

A questo punto si può procedere con il calcolo delle temperature nei capisaldi e delle rispettive proprietà mediante CoolPack. I valori ottenuti al variare del valore di alta pressione sono riportati nelle seguenti tabelle.

Caposaldo [-]	Sensore [-]	T [°C]	P [bar]	Cp [kJ/kgK]	h [kJ/kg]	s [kJ/kgK]	lic, [kJ/kg]	q_cond [kJ/kg]	q_eva [kJ/kg]	EER [-]
1	BT17	13,83	7,0	0,889	421,26	1.782,26	46,25	-189,01	163,34	3,53
2	BT14	55,56	16,0	1,054	446,93	1.799,16				
3	BTy	36,54	16,0	1,794	257,92	1.195,43				
4	BTx	8,20	7,0	1,356	257,92	1.214,66				
1	BT17	13,83	7,0	0,889	421,26	1.782,26				

Tabella 8 - Capisaldi ed EER del ciclo con alta pressione pari a 16 bar

Caposaldo [-]	Sensore [-]	T [°C]	P [bar]	Cp [kJ/kgK]	h [kJ/kg]	s [kJ/kgK]	lic, [kJ/kg]	q_cond [kJ/kg]	q_eva [kJ/kg]	EER [-]
1	BT17	13,83	7,0	0,889	421,26	1.782,26	50,69	-186,58	158,99	3,14
2	BT14	58,85	17,0	1,070	448,85	1.800,31				
3	BTy	38,99	17,0	1,833	262,27	1.209,08				
4	BTx	8,20	7,0	1,344	262,27	1.229,98				
1	BT17	13,83	7,0	0,889	421,26	1.782,26				

Tabella 9 - Capisaldi ed EER del ciclo con alta pressione pari a 17 bar

Caposaldo [-]	Sensore [-]	T [°C]	P [bar]	Cp [kJ/kgK]	h [kJ/kg]	s [kJ/kgK]	lic, [kJ/kg]	q_cond [kJ/kg]	q_eva [kJ/kg]	EER [-]
1	BT17	13,83	7,0	0,889	421,26	1.782,26	55,06	-184,15	154,77	2,81
2	BT14	61,98	18,0	1,087	450,64	1.801,37				
3	BTy	41,34	18,0	1,873	266,49	1.222,26				
4	BTx	8,33	18,0	1,331	266,49	1.246,02				
1	BT17	13,83	7,0	0,889	421,26	1.782,26				

Tabella 10 - Capisaldi ed EER del ciclo con alta pressione pari a 18 bar

Caposaldo [-]	Sensore [-]	T [°C]	P [bar]	Cp [kJ/kgK]	h [kJ/kg]	s [kJ/kgK]	lic, [kJ/kg]	q_cond [kJ/kg]	q_eva [kJ/kg]	EER [-]
1	BT17	13,83	7,0	0,889	421,26	1.782,26	59,36	-181,69	150,62	2,54
2	BT14	64,96	19,0	1,103	452,33	1.802,32				
3	BTy	43,60	19,0	1,915	270,64	1.235,06				
4	BTx	8,56	19,0	1,320	270,64	1.260,56				
1	BT17	13,83	7,0	0,889	421,26	1.782,26				

Tabella 11 - Capisaldi ed EER del ciclo con alta pressione pari a 19 bar

Caposaldo [-]	Sensore [-]	T [°C]	P [bar]	Cp [kJ/kgK]	h [kJ/kg]	s [kJ/kgK]	lic, [kJ/kg]	q_cond [kJ/kg]	q_eva [kJ/kg]	EER [-]
1	BT17	13,83	7,0	0,889	421,26	1.782,26	63,61	-179,25	146,57	2,30
2	BT14	67,82	20,0	1,119	452,94	1.803,23				
3	BTy	45,77	20,0	1,960	274,69	1.247,49				
4	BTx	8,59	20,0	1,308	274,69	1.275,77				
1	BT17	13,83	7,0	0,889	421,26	1.782,26				

Tabella 12 - Capisaldi ed EER del ciclo con alta pressione pari a 20 bar

Poiché è stato previsto di aumentare la pressione massima del fluido, è possibile notare dalle tabelle sopra riportate un progressivo incremento del lavoro di compressione. Inoltre, si nota una graduale riduzione della potenza scambiata al condensatore e all'evaporatore (questo perché è stata mantenuta l'ipotesi di liquido saturo), con conseguente riduzione delle prestazioni della pompa di calore. Per apprezzare meglio queste variazioni, in **Figura 51** è stato riportato il diagramma p-h riportante i capisaldi del ciclo termodinamico al variare della pressione, mentre in **Figura 52** sono visibili i valori di EER.

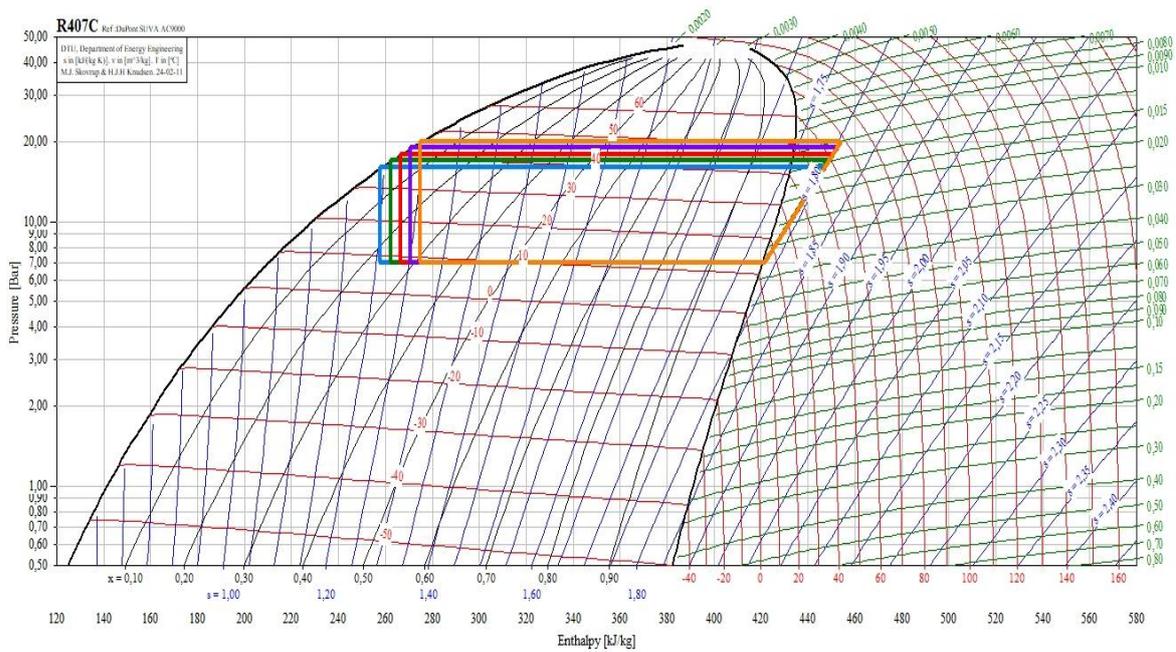


Figura 51 - Ciclo termodinamico nel diagramma $\log(p)$ -h per il fluido R407C al variare della pressione massima

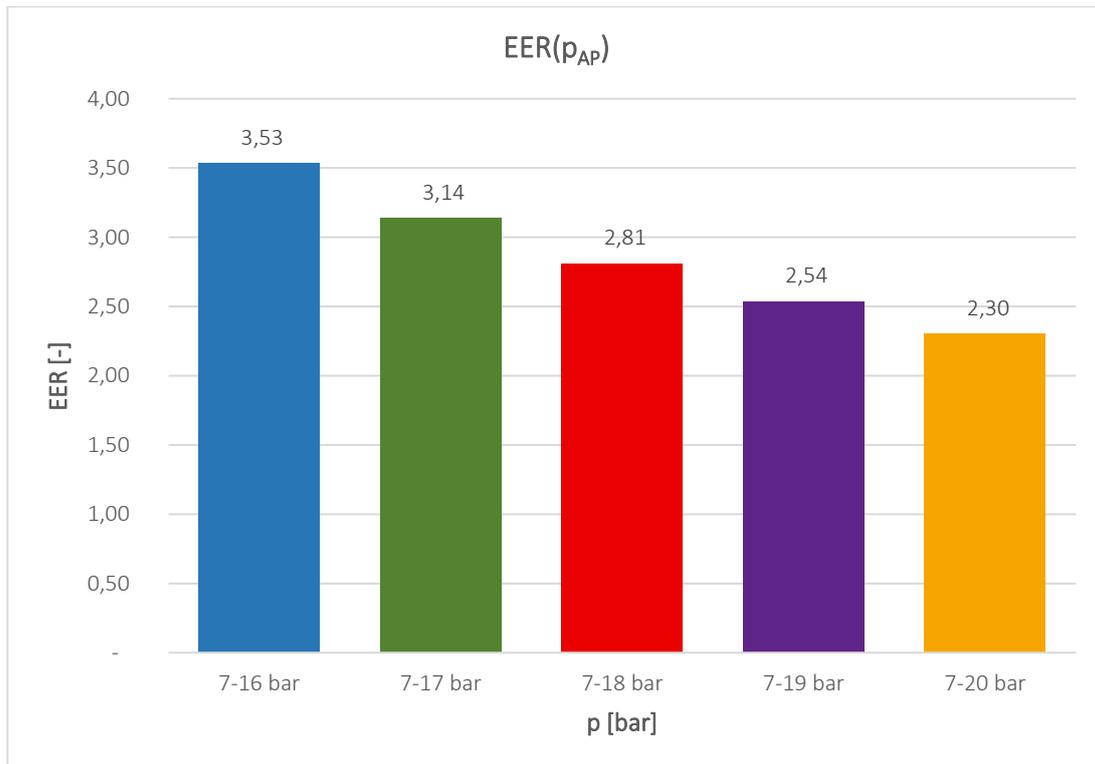


Figura 52 - EER in funzione dell'alta pressione AP

Si procede ora andando a calcolare l'efficienza al variare della pressione minima. I procedimenti sono i medesimi appena appena eseguiti per l'analisi di sensitività variando il valore della pressione sul ramo di alta pressione. Nelle seguenti tabelle sono riportate le proprietà dei capisaldi ottenuti mantenendo costante la pressione massima, pari a 16 bar, e la temperatura misurata con il sensore BT14, pari a 55,56 °C (valore ottenuto come media dei valori reali misurati tra il 7 e il 23 giugno 2022).

Caposaldo [-]	Sensore [-]	T [°C]	P [bar]	Cp [kJ/kgK]	h [kJ/kg]	s [kJ/kgK]	lic, [kJ/kg]	q_cond [kJ/kg]	q_eva [kJ/kg]	EER [-]
1	BT17	6,66	6,0	0,866	416,68	1.779,12	52,77	-189,01	158,76	3,01
2	BT14	55,56	16,0	1,054	446,93	1.799,16				
3	BTy	36,54	16,0	1,794	257,92	1.195,43				
4	BTx	3,35	6,0	1,313	257,92	1.213,70				
1	BT17	6,66	6,0	0,866	416,68	1.779,12				

Tabella 13 - Capisaldi ed EER del ciclo con bassa pressione pari a 6 bar

Caposaldo [-]	Sensore [-]	T [°C]	P [bar]	Cp [kJ/kgK]	h [kJ/kg]	s [kJ/kgK]	lic, [kJ/kg]	q_cond [kJ/kg]	q_eva [kJ/kg]	EER [-]
1	BT17	10,36	6,5	0,878	419,05	1.780,74	49,45	-189,01	161,13	3,26
2	BT14	55,56	16,0	1,054	446,93	1.799,16				
3	BTy	36,54	16,0	1,794	257,92	1.195,43				
4	BTx	5,80	6,5	1,337	257,92	1.211,58				
1	BT17	10,36	6,5	0,878	419,05	1.780,74				

Tabella 14 - Capisaldi ed EER del ciclo con bassa pressione pari a 6,5 bar

Caposaldo [-]	Sensore [-]	T [°C]	P [bar]	Cp [kJ/kgK]	h [kJ/kg]	s [kJ/kgK]	lic, [kJ/kg]	q_cond [kJ/kg]	q_eva [kJ/kg]	EER [-]
1	BT17	13,83	7,0	0,889	421,26	1.782,26	46,25	-189,01	163,34	3,53
2	BT14	55,56	16,0	1,054	446,93	1.799,16				
3	BTy	36,54	16,0	1,794	257,92	1.195,43				
4	BTx	8,20	7,0	1,356	257,92	1.214,66				
1	BT17	13,83	7,0	0,889	421,26	1.782,26				

Tabella 15 - Capisaldi ed EER del ciclo con bassa pressione pari a 7 bar

Caposaldo [-]	Sensore [-]	T [°C]	P [bar]	Cp [kJ/kgK]	h [kJ/kg]	s [kJ/kgK]	lic, [kJ/kg]	q_cond [kJ/kg]	q_eva [kJ/kg]	EER [-]
1	BT17	17,10	7,5	0,899	423,34	1.783,68	43,16	-189,01	165,42	3,83
2	BT14	55,56	16,0	1,054	446,93	1.799,16				
3	BTy	36,54	16,0	1,794	257,92	1.195,43				
4	BTx	10,31	7,5	1,383	257,92	1.208,65				
1	BT17	17,10	7,5	0,899	423,34	1.783,68				

Tabella 16 - Capisaldi ed EER del ciclo con bassa pressione pari a 7,5 bar

Caposaldo [-]	Sensore [-]	T [°C]	P [bar]	Cp [kJ/kgK]	h [kJ/kg]	s [kJ/kgK]	lic, [kJ/kg]	q_cond [kJ/kg]	q_eva [kJ/kg]	EER [-]
1	BT17	20,19	8,0	0,910	425,30	1.785,01	40,17	-189,01	167,38	4,17
2	BT14	55,56	16,0	1,054	446,93	1.799,16				
3	BTy	36,54	16,0	1,794	257,92	1.195,43				
4	BTx	12,25	8,0	1,405	257,92	1.207,15				
1	BT17	20,19	8,0	0,910	425,30	1.785,01				

Tabella 17 - Capisaldi ed EER del ciclo con bassa pressione pari a 8 bar

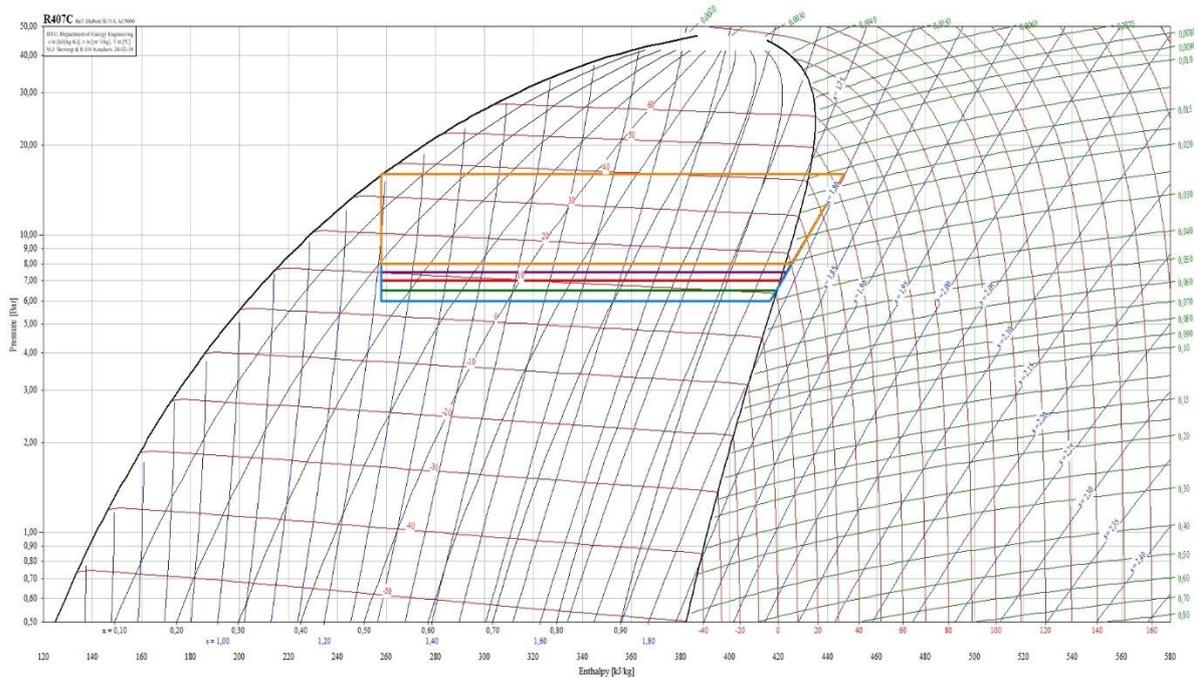


Figura 53 - Ciclo termodinamico nel diagramma $\log(p)$ - h per il fluido R407C al variare della pressione minima

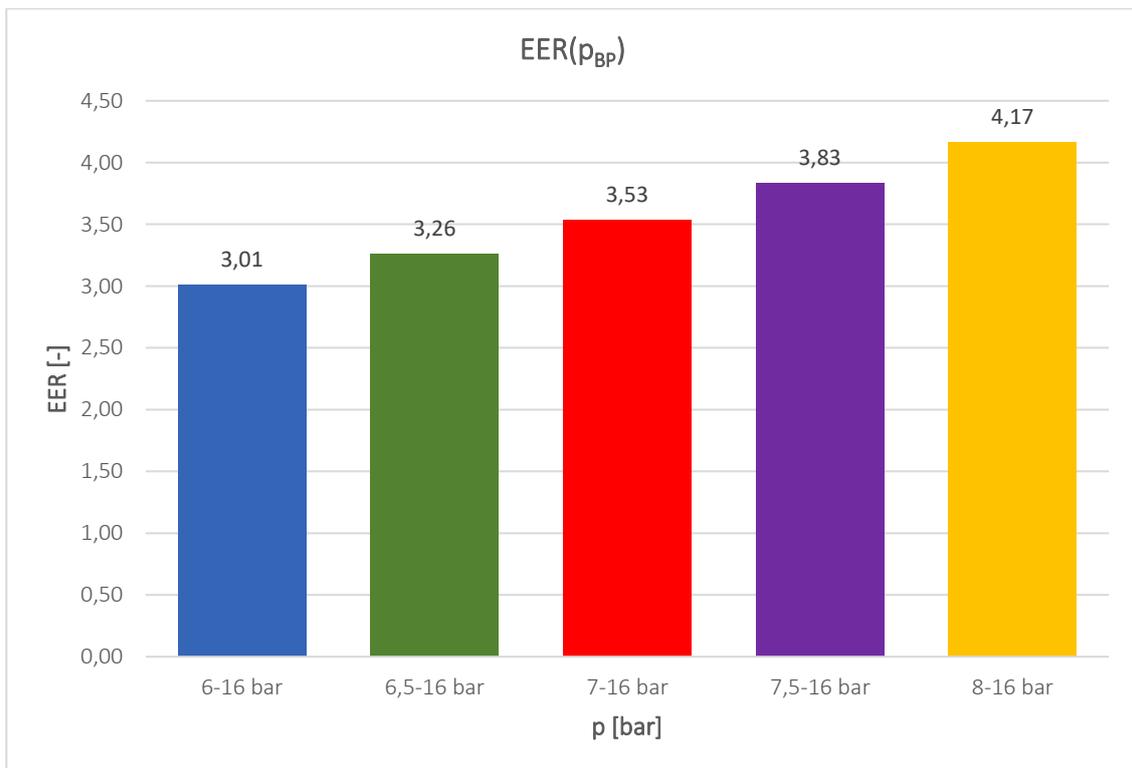


Figura 54 - EER in funzione dell'alta pressione BP

Dal grafico soprastante si nota come via via un consistente incremento dell'efficienza andando ad aumentare il valore della pressione minima. Questo fenomeno è dovuto sia alla riduzione del salto di pressione a carico del compressore (riduzione del lavoro speso), sia ad un progressivo incremento della temperatura del fluido in ingresso al compressore (BT17).

Confrontando infine i lavori scambiati nei diversi componenti nelle diverse configurazioni, così come riportato nella **Figura 55**, è possibile osservare come il solo aumento della pressione sul ramo AP sia svantaggioso, in quanto determina una riduzione dell'effetto utile q_{eva} (calore rimosso all'utenza) a scapito di un incremento del lavoro speso per la compressione. L'incremento di un solo bar di pressione, ovvero il passaggio da 16 a 17 bar, comporta una maggiorazione dei costi per la compressione del 10% ed una riduzione dell'effetto utile del 3%, con una complessiva riduzione dell'efficienza dell'11%.

D'altro canto, anche la riduzione della pressione sul ramo BP ha effetti negativi: variando tale parametro da 7 a 6,5 bar si ottiene un incremento del lavoro di compressione del 7%, nonché una riduzione del calore rimosso dall'ambiente dell'1% con una riduzione dell'efficienza dell'ordine dell'8%. La variazione a 6 bar non merita di essere considerata, in quanto in tale configurazione non si rispetta quanto riportato nella (3.8), in quanto si ha una temperatura di saturazione per la bassa pressione maggiore della temperatura BT17 (presenza di fase liquida in ingresso al compressore).

Si nota infine che un incremento della pressione sul ramo di bassa pressione ha effetti positivi per il sistema: passando da 7 a 8 bar si ottiene una riduzione del lavoro speso per il compressore del 13%, con un incremento del calore rimosso dall'ambiente del 2% ed un incremento dell'efficienza del 18%.

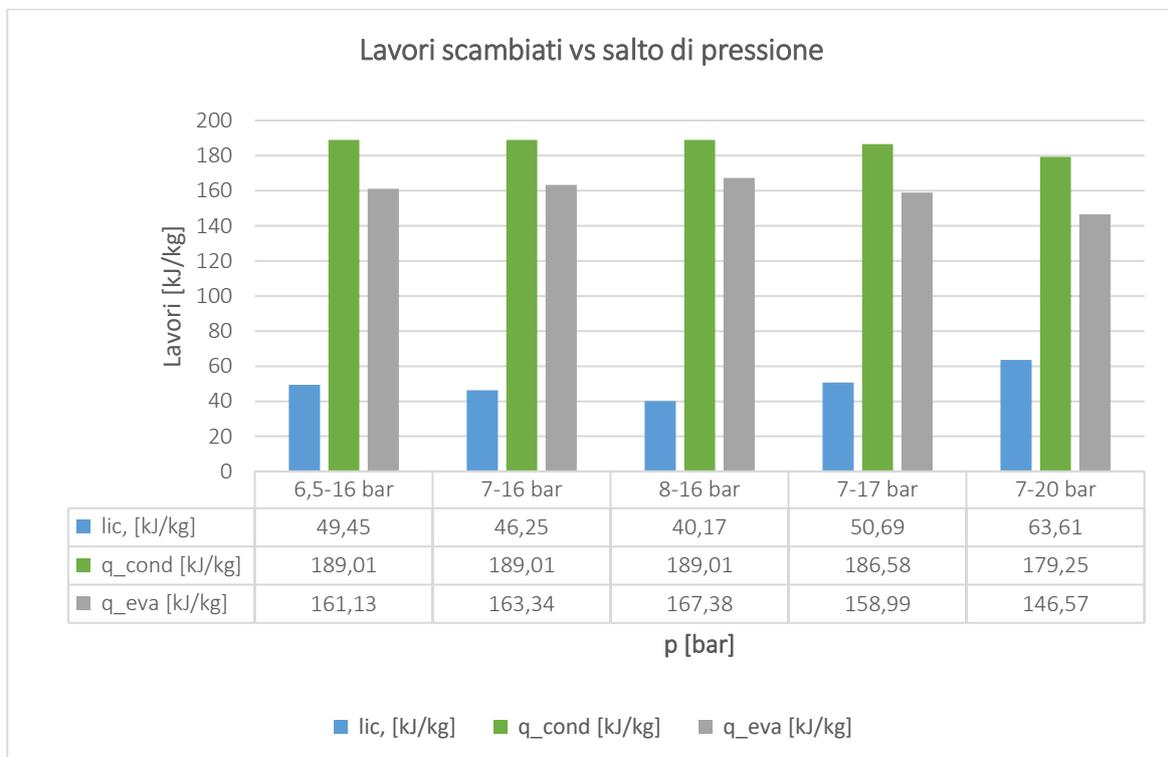


Figura 55 - Confronto tra i lavori scambiati e le variazioni di pressione sul ramo BP e AP

Tra i parametri che impattano sulle prestazioni di una pompa di calore, si includono le temperature di ingresso del fluido al compressore (BT17) e quella in uscita dal condensatore (BTy). Di conseguenza, è possibile condurre un'analisi di sensibilità, osservando gli effetti di un aumento della temperatura in ingresso al compressore, noto come surriscaldamento, e di una diminuzione nel condensatore, chiamato sottoraffreddamento.

Nel caso del surriscaldamento il gas refrigerante, dopo aver attraversato la fase di evaporazione e raggiunto la Curva Limite Superiore (CLS), e trovandosi quindi allo stato di gas saturo, viene sottoposto ad un aumento di temperatura a pressione costante. Questa pratica mira a mantenere il gas completamente allo stato gassoso prima che entri nella fase di compressione, riducendo la probabilità

di condensazione indesiderata del gas all'interno del sistema, che potrebbe causare danni al compressore.

Nelle seguenti tabelle sono riportate le proprietà dei capisaldi ottenuti andando ad operare un surriscaldamento pari a +5°C per ogni curva di analisi. La base di partenza è data dalle condizioni standard ottenute con i dati reali aventi pressione minima pari a 7 bar e pressione massima pari a 16 bar.

Caposaldo [-]	Sensore [-]	T [°C]	P [bar]	Cp [kJ/kgK]	h [kJ/kg]	s [kJ/kgK]	lic, [kJ/kg]	q_cond [kJ/kg]	q_eva [kJ/kg]	EER [-]
1	BT17	18,83	7,0	0,894	425,72	1.797,65	47,62	-195,03	167,80	3,52
2	BT14	61,28	16,0	1,052	452,95	1.817,32				
3	BTy	36,54	16,0	1,794	257,92	1.195,43				
4	BTx	8,20	7,0	1,356	257,92	1.214,66				
1	BT17	13,83	7,0	0,889	421,26	1.782,26				

Tabella 18 - Capisaldi ed EER del ciclo con surriscaldamento pari a +5°C

Caposaldo [-]	Sensore [-]	T [°C]	P [bar]	Cp [kJ/kgK]	h [kJ/kg]	s [kJ/kgK]	lic, [kJ/kg]	q_cond [kJ/kg]	q_eva [kJ/kg]	EER [-]
1	BT17	23,83	7,0	0,899	430,20	1.812,87	49,05	-201,06	172,28	3,51
2	BT14	67,01	16,0	1,052	458,98	1.835,18				
3	BTy	36,54	16,0	1,794	257,92	1.195,43				
4	BTx	8,20	7,0	1,356	257,92	1.214,66				
1	BT17	13,83	7,0	0,889	421,26	1.782,26				

Tabella 19 - Capisaldi ed EER del ciclo con surriscaldamento pari a +10°C

Caposaldo [-]	Sensore [-]	T [°C]	P [bar]	Cp [kJ/kgK]	h [kJ/kg]	s [kJ/kgK]	lic, [kJ/kg]	q_cond [kJ/kg]	q_eva [kJ/kg]	EER [-]
1	BT17	28,83	7,0	0,905	434,71	1.827,94	50,53	-207,09	176,79	3,50
2	BT14	72,74	16,0	1,054	465,01	1.852,77				
3	BTy	36,54	16,0	1,794	257,92	1.195,43				
4	BTx	8,20	7,0	1,356	257,92	1.214,66				
1	BT17	13,83	7,0	0,889	421,26	1.782,26				

Tabella 20 - Capisaldi ed EER del ciclo con surriscaldamento pari a +15°C

Caposaldo [-]	Sensore [-]	T [°C]	P [bar]	Cp [kJ/kgK]	h [kJ/kg]	s [kJ/kgK]	lic, [kJ/kg]	q_cond [kJ/kg]	q_eva [kJ/kg]	EER [-]
1	BT17	33,83	7,0	0,912	439,25	1.842,86	52,08	-213,13	181,33	3,48
2	BT14	78,46	16,0	1,057	471,05	1.870,07				
3	BTy	36,54	16,0	1,794	257,92	1.195,43				
4	BTx	8,20	7,0	1,356	257,92	1.214,66				
1	BT17	13,83	7,0	0,889	421,26	1.782,26				

Tabella 21 - Capisaldi ed EER del ciclo con surriscaldamento pari a +20°C

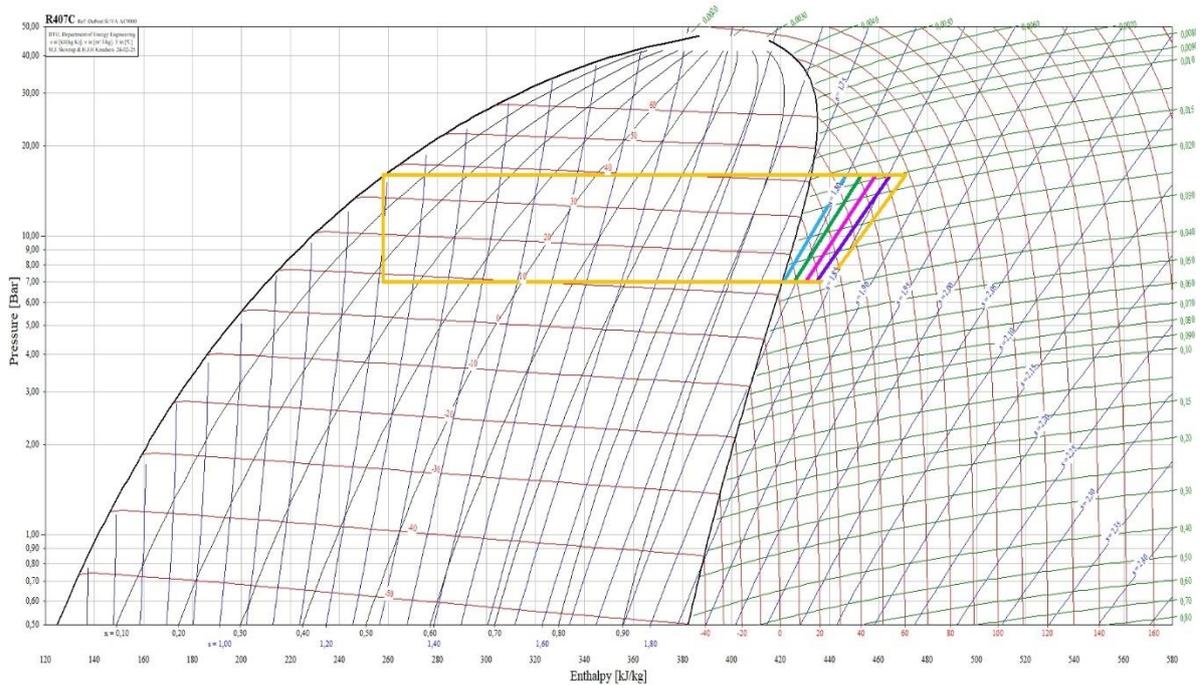


Figura 56 - Ciclo termodinamico nel diagramma log(p)-h per il fluido R407C con presenza di surriscaldamento del fluido in ingresso al compressore

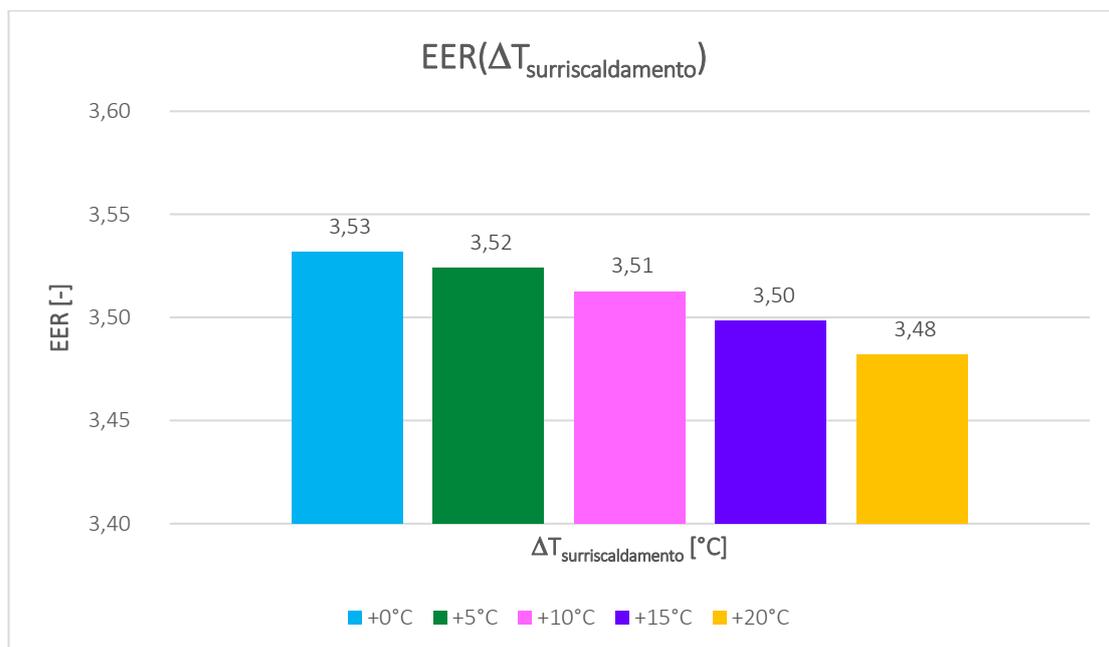


Figura 57 - EER con presenza di surriscaldamento del fluido in ingresso al compressore

Dai grafici sopra riportati emerge chiaramente come il surriscaldamento del fluido in ingresso al compressore porti ad una lieve diminuzione dell'efficienza della pompa di calore. Sebbene l'effetto utile, ossia la rimozione del calore dall'ambiente da climatizzare, aumenti, i costi energetici associati alla compressione mostrano un incremento maggiore. Il bilancio globale indica quindi che, a parità di efficienza del compressore e considerando la compressione come adiabatica, vi sia una riduzione dell'efficienza complessiva. Tuttavia, poiché questa la variazione è minima, è ragionevole ipotizzare che il surriscaldamento sia comunque conveniente, poiché contribuisce a eliminare il verificarsi di potenziali danni causati dalla presenza di goccioline di fluido durante la compressione.

Nel caso invece del sottoraffreddamento il gas refrigerante, dopo aver raggiunto la Curva Limite Inferiore (CLI), e trovandosi quindi allo stato di liquido saturo, prosegue la condensazione a pressione costante, abbassando ulteriormente la sua temperatura e quindi il calore ceduto al terreno.

Nelle seguenti tabelle sono riportate le proprietà dei capisaldi ottenuti andando ad operare un sottoraffreddamento pari a -5°C per ogni curva di analisi. La base di partenza è data dalle condizioni standard ottenute con i dati reali aventi pressione minima pari a 7 bar e pressione massima pari a 16 bar.

Caposaldo [-]	Sensore [-]	T [°C]	P [bar]	Cp [kJ/kgK]	h [kJ/kg]	s [kJ/kgK]	lic, [kJ/kg]	q_cond [kJ/kg]	q_eva [kJ/kg]	EER [-]
1	BT17	13,83	7,0	0,889	421,26	1.782,26	46,25	-197,64	171,97	3,72
2	BT14	55,56	16,0	1,054	446,93	1.799,16				
3	BTy	31,54	16,0	1,725	249,29	1.167,93				
4	BTx	7,83	7,0	1,384	249,29	1.178,45				
1	BT17	13,83	7,0	0,889	421,26	1.782,26				

Tabella 22 - Capisaldi ed EER del ciclo con sottoraffreddamento pari a -5°C

Caposaldo [-]	Sensore [-]	T [°C]	P [bar]	Cp [kJ/kgK]	h [kJ/kg]	s [kJ/kgK]	lic, [kJ/kg]	q_cond [kJ/kg]	q_eva [kJ/kg]	EER [-]
1	BT17	13,83	7,0	0,889	421,26	1.782,26	46,25	-206,01	180,34	3,90
2	BT14	55,56	16,0	1,054	446,93	1.799,16				
3	BTy	26,54	16,0	1,666	240,92	1.140,78				
4	BTx	7,58	7,0	1,408	240,92	1.148,32				
1	BT17	13,83	7,0	0,889	421,26	1.782,26				

Tabella 23 - Capisaldi ed EER del ciclo con sottoraffreddamento pari a -10°C

Caposaldo [-]	Sensore [-]	T [°C]	P [bar]	Cp [kJ/kgK]	h [kJ/kg]	s [kJ/kgK]	lic, [kJ/kg]	q_cond [kJ/kg]	q_eva [kJ/kg]	EER [-]
1	BT17	13,83	7,0	0,889	421,26	1.782,26	46,25	-214,13	188,46	4,07
2	BT14	55,56	16,0	1,054	446,93	1.799,16				
3	BTy	21,54	16,0	1,615	232,80	1.113,92				
4	BTx	7,29	7,0	1,430	232,80	1.118,67				
1	BT17	13,83	7,0	0,889	421,26	1.782,26				

Tabella 24 - Capisaldi ed EER del ciclo con sottoraffreddamento pari a -15°C

Caposaldo [-]	Sensore [-]	T [°C]	P [bar]	Cp [kJ/kgK]	h [kJ/kg]	s [kJ/kgK]	lic, [kJ/kg]	q_cond [kJ/kg]	q_eva [kJ/kg]	EER [-]
1	BT17	13,83	7,0	0,889	421,26	1.782,26	46,25	-222,05	196,38	4,25
2	BT14	55,56	16,0	1,054	446,93	1.799,16				
3	BTy	16,54	16,0	1,569	224,88	1.087,28				
4	BTx	7,09	7,0	1,452	224,88	1.090,15				
1	BT17	13,83	7,0	0,889	421,26	1.782,26				

Tabella 25 - Capisaldi ed EER del ciclo con sottoraffreddamento pari a -20°C

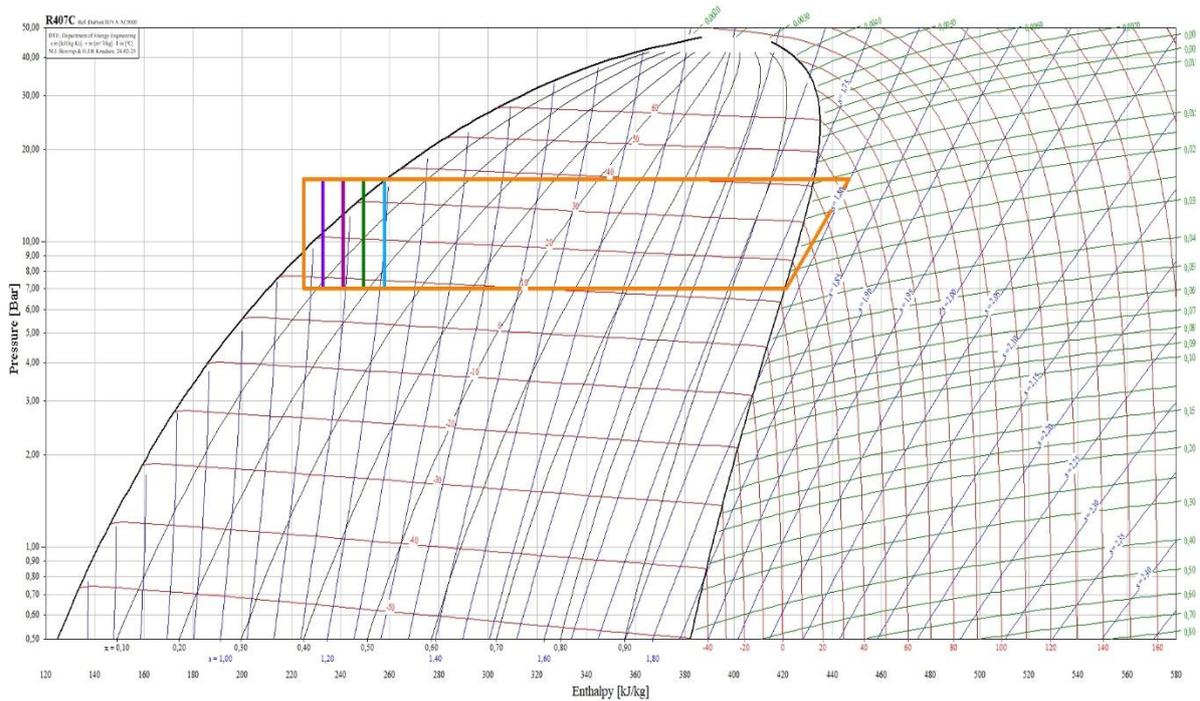


Figura 58 - Ciclo termodinamico nel diagramma $\log(p)$ - h per il fluido R407C con presenza di sottoraffreddamento del fluido

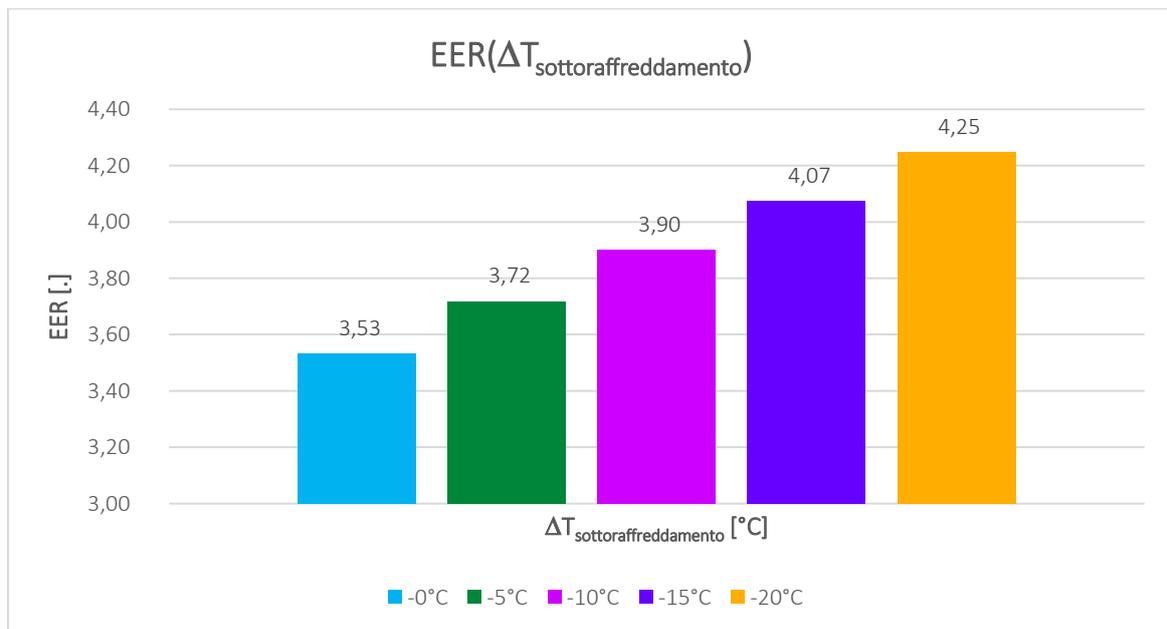


Figura 59 - EER con presenza di sottoraffreddamento del fluido

Dai grafici sopra riportati emerge chiaramente come il sottoraffreddamento del fluido porti ad un decisivo incremento dell'efficienza della pompa di calore. Questo risultato è attribuibile al mantenimento costante del lavoro necessario per la compressione, mentre aumentano sia il calore rimosso dall'ambiente che quello ceduto al terreno. Tuttavia, è importante notare che questa operazione richiede che una maggiore quantità di calore venga ceduto al terreno, il che implica la necessità di una superficie di scambio termico più ampia, garantendo in ogni caso il rispetto delle condizioni ambientali di lavoro.

4. Campo applicativo

4.1 Stato di fatto

Si vuole ora analizzare l'installazione di un impianto geotermico a servizio di un edificio residenziale situato nelle campagne del Comune di Pianfei (CN), più precisamente in località Gariè (**Figura 60**).



Figura 60 - Localizzazione dell'edificio, estratto da Google Maps [42]



Figura 61 - Foto del fabbricato oggetto di analisi

Si riporta di seguito una breve descrizione dell'edificio nella sua configurazione ex-ante, al fine di individuare gli interventi propedeutici all'installazione del sistema geotermico.

L'immobile in oggetto, una vecchia cascina libera su tre lati, è composto da due piani fuori terra, disposti su una pianta rettangolare e comprende una porzione residenziale ed una ad ex uso agricolo (stalla con fienile sovrastante), così come visibile in **Figura 61**.

La struttura risulta essere in muratura portante, realizzata con mattoni pieni intorno agli anni Quaranta. La finitura delle pareti, sia internamente che esternamente, è in intonaco. La copertura a doppia falda, in struttura lignea, è stata oggetto di manutenzione nei primi anni 2000, con la rimozione dei vecchi coppi in terracotta e l'installazione di tegole in laterizio. I serramenti sulla porzione residenziale sono caratterizzati da un telaio in legno, con vetro singolo e sono dotati di vecchie e ormai danneggiate persiane anch'esse in legno.

Il fabbricato non risulta dotato di un impianto termico moderno: le stanze sono caratterizzate dalla presenza di vecchi caminetti a muro o da stufe e, in talune, sono presenti dei radiatori elettrici ormai fuori uso. Infine, per la produzione di acqua calda ad uso sanitario, risultano installati dei boiler elettrici da 1,2 kW nei due bagni.

Prima di procedere con la progettazione degli interventi di ristrutturazione atti all'installazione del nuovo impianto geotermico risulta fondamentale andare ad indagare la normativa vigente nella zona oggetto di intervento. Per fare ciò è possibile consultare sia il P.R.G.C.⁹ che la Carta di Sintesi della Pericolosità Geomorfologica e dell'Idoneità all'Utilizzazione Urbanistica¹⁰.

All'interno del P.R.G.C. [43] del Comune di Pianfei (**Figura 62**), l'edificio si trova nella sezione "*Aree residenziali edificate di recupero del capoluogo e dei nuclei rurali*", pertanto non risulta presente alcun vincolo circa gli interventi realizzabili.

Nella Carta di Sintesi [44] invece, la presenza della campitura gialla (**Figura 63**), mostra come il fabbricato si trovi nella CLASSE II, pertanto risulta necessario adottare un minimo di prudenza sugli interventi da realizzare sul fabbricato. A tale classe, infatti, appartengono le "*Porzioni di territorio nelle quali le condizioni di moderata pericolosità geomorfologica possono essere agevolmente superate attraverso l'adozione ed il rispetto di modesti accorgimenti tecnici esplicitati a livello di norme di attuazione ispirate al D.M. 11/03/88 e realizzabili a livello di progetto esecutivo esclusivamente nell'ambito del singolo lotto*

⁹ Il P.R.G.C. – Piano Regolatore Generale Comunale – è lo strumento urbanistico adottato dai comuni italiani per disciplinare l'uso del suolo e l'edificabilità del territorio comunale. Definisce inoltre le norme urbanistiche che regolano la distribuzione delle attività umane sul territorio, indicando ad esempio le zone destinate alla residenza, all'agricoltura, all'industria e ai servizi, nonché le infrastrutture e le opere pubbliche. Il P.R.G.C. viene redatto sulla base delle direttive regionali e nazionali in materia urbanistica, tenendo conto delle caratteristiche specifiche del territorio comunale e delle esigenze della comunità locale. Viene approvato dall'amministrazione comunale e ha una validità temporale generalmente di alcuni anni, dopo i quali può essere rivisto e aggiornato.

¹⁰ La Carta di Sintesi della Pericolosità Geomorfologica e dell'Idoneità all'Utilizzazione Urbanistica è uno strumento cartografico utilizzato nel campo dell'urbanistica e della pianificazione territoriale il cui obiettivo è quello di fornire una rappresentazione sintetica delle zone del territorio che presentano rischi o pericoli legati ai fenomeni geomorfologici, come frane, dissesti idrogeologici, cedimenti del terreno, ecc. La carta può essere suddivisa in diverse classi o zone in base al grado di pericolosità e all'idoneità dell'area all'utilizzo urbanistico. Ad esempio, possono essere individuate zone ad alta pericolosità dove è necessario adottare misure di mitigazione del rischio, come divieti di edificazione o restrizioni all'uso del suolo, e zone a bassa pericolosità dove è possibile lo sviluppo urbano in modo sicuro. Questo strumento è fondamentale per la pianificazione del territorio e per garantire la sicurezza degli insediamenti umani, in quanto permette agli enti locali di prendere decisioni informate sulla gestione del territorio e sull'urbanizzazione.

edificatorio o dell'intorno significativo circostante. Tali interventi non dovranno, in alcun modo, incidere negativamente sulle aree limitrofe, né condizionarne la propensione all'edificabilità”.



Figura 62 - Localizzazione dell'edificio, estratto dal PRGC del Comune di Pianfei [43]

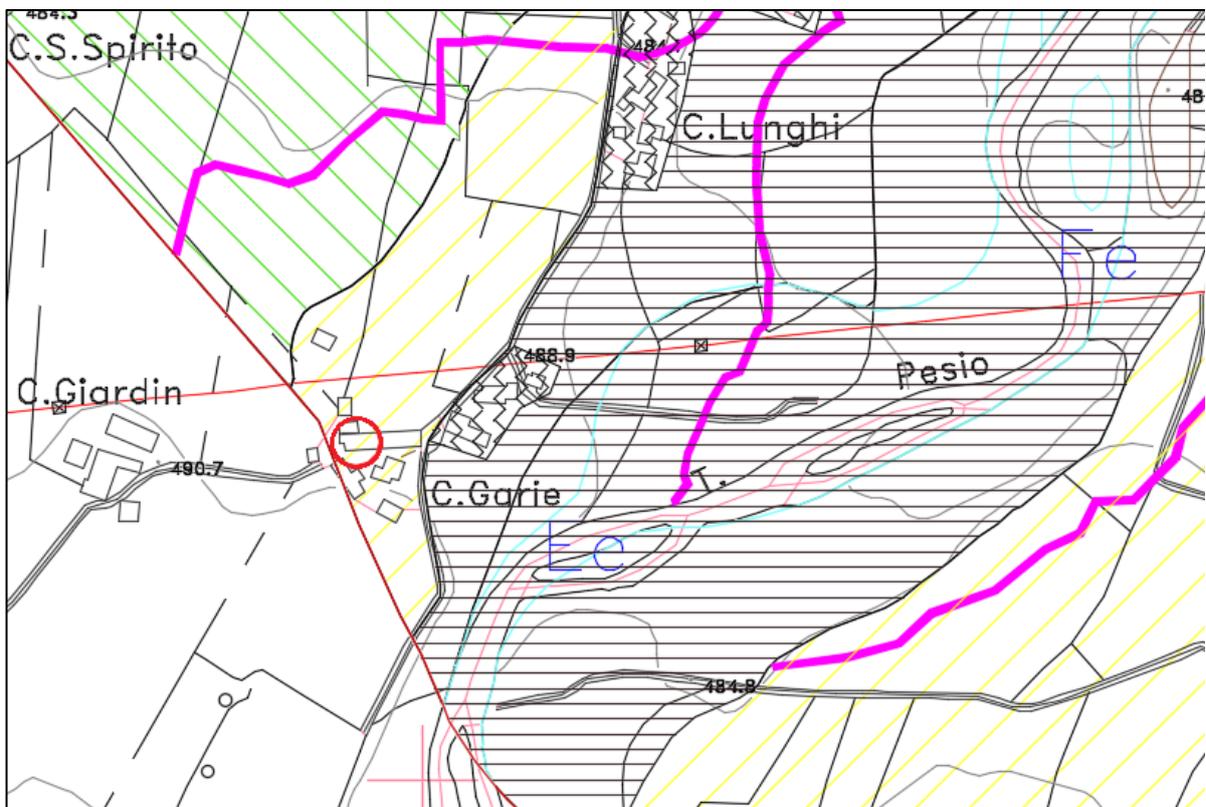


Figura 63 - Estratto Carta di sintesi della pericolosità geomorfologica e dell'idoneità all'utilizzazione urbanistica [44]

Al fine di andare ad individuare gli interventi da realizzare sul fabbricato, è necessario modellare l'edificio nel suo stato di fatto. In questo modo sarà inoltre possibile confrontare i consumi nelle due configurazioni (ex-ante ed ex-post) e le relative emissioni.

Per il calcolo delle prestazioni energetiche dell'edificio è stato utilizzato EC700 [45], software fornito dalla ditta EDILCLIMA SRL, che consente di effettuare i calcoli in conformità alle specifiche tecniche dettate dalla norma UNI TS 11300¹¹, considerando tutti i servizi previsti da tale normativa, come gli impianti di climatizzazione invernale ed estiva, la produzione di acqua calda sanitaria, la ventilazione e l'illuminazione, nonché gli impianti per il trasporto di cose e persone [46]. In accordo con tale normativa, tuttavia, gli ultimi due parametri riportati (illuminazione e trasporto) sono previsti solamente quando il calcolo è effettuato su edifici di tipo non residenziale.

Nel caso analizzato la destinazione d'uso secondo il D.P.R. 412/93¹² risulta essere "E.1(1) – Abitazioni adibite a residenza con carattere continuativo: quali abitazioni civili e rurali"; si escludono pertanto dal calcolo delle prestazioni energetiche gli impianti di illuminazione e quelli destinati al trasporto di cose e persone.

Per il periodo di accensione dell'impianto termico segue la zona climatica di appartenenza. Il Comune di Pianfei (CN), caratterizzato da 2939 gradi giorno secondo il D.P.R. 412/93, appartiene alla zona climatica E, il cui periodo di accensione risulta essere pari a 183 giorni, dal 15 ottobre al 15 aprile, così come già mostrato nei capitoli precedenti e riportato nella **Tabella 2**.

Nel software di calcolo, dopo aver localizzato l'edificio e scelto la destinazione d'uso, è possibile procedere con la modellazione dei componenti dell'involucro edilizio, andando a selezionare per ogni struttura i materiali che la compongono.

L'output è diviso, per ogni struttura, in sezioni. Nella sezione "stratigrafia" viene riportato l'elenco dei materiali utilizzati e le rispettive caratteristiche termiche (conducibilità, resistenza termica, massa volumica, capacità termica e resistenza alla diffusione del vapore), mentre nella sezione "descrizione della struttura" è presente un riassunto con le proprietà termiche della struttura nel suo insieme a partire dalla trasmittanza – ovvero la capacità del componente di condurre il calore – fino ad arrivare allo sfasamento dell'onda termica – cioè il tempo che l'onda termica (esterna o interna) impiega per attraversare la struttura. In altre parole, maggiore è lo sfasamento termico, maggiore è il tempo che il calore impiega ad attraversare la parete e questo si traduce in un miglioramento del comfort. In estate, infatti, durante il giorno il calore tende ad entrare verso l'interno dell'edificio dove la temperatura è più bassa. Se lo sfasamento è elevato prima che il calore raggiunga l'interno è tornata la notte, e vi è quindi un'inversione del flusso (il calore torna a muoversi verso l'esterno), permettendo così di mantenere l'ambiente più fresco all'interno del fabbricato.

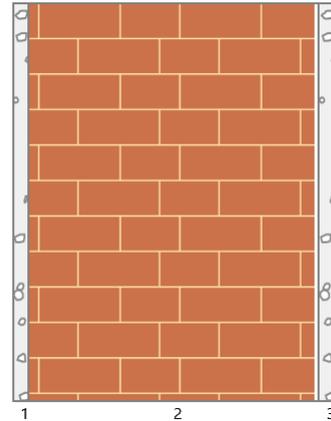
Per ogni componente risultano infine riportate le caratteristiche igrometriche, come la formazione di condensa superficiale ed interstiziale. Tali informazioni sono visibili, per ogni struttura, nelle pagine seguenti.

Muratura perimetrale confinante con l'ambiente esterno:

¹¹ Le normative UNI TS 11300, la cui evoluzione è iniziata a partire dal 2008 in risposta alla normativa europea UNI EN ISO 13790, definiscono una metodologia di calcolo univoca e standardizzata per valutare le prestazioni energetiche degli edifici.

¹² Il Decreto del Presidente della Repubblica Italiana n.412 emanato nel 1993 stabilisce norme e disposizioni in materia di concessioni edilizie per la realizzazione di nuove costruzioni o la ristrutturazione di edifici esistenti.

Trasmittanza termica	1,385	W/m ² K
Spessore	400	mm
Temperatura esterna (calcolo potenza invernale)	-9,8	°C
Permeanza	54,945	10 ⁻¹² kg/sm ² Pa
Massa superficiale (con intonaci)	712	kg/m ²
Massa superficiale (senza intonaci)	648	kg/m ²
Trasmittanza periodica	0,195	W/m ² K
Fattore attenuazione	0,141	-
Sfasamento onda termica	-12,8	h



Stratigrafia:

N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,130	-	-	-
1	Intonaco di calce e sabbia	20,00	0,8000	0,025	1600	1,00	10
2	Mattone pieno	360,00	0,7800	0,462	1800	0,84	9
3	Intonaco di calce e sabbia	20,00	0,8000	0,025	1600	1,00	10
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,081	-	-	-

Legenda simboli

s	Spessore	mm
Cond.	Conducibilità termica, comprensiva di eventuali coefficienti correttivi	W/mK
R	Resistenza termica	m ² K/W
M.V.	Massa volumica	kg/m ³
C.T.	Capacità termica specifica	kJ/kgK
R.V.	Fattore di resistenza alla diffusione del vapore in capo asciutto	-

Condizioni al contorno per le caratteristiche igrometriche

Temperature e umidità relativa esterne variabili, medie mensili

Temperatura interna nel periodo di riscaldamento

20,0 °C

Criterio per l'aumento dell'umidità interna

Classe di concentrazione del vapore (0,006 kg/m³)

Verifica criticità di condensa superficiale

Verifica condensa superficiale ($f_{RSI,max} \leq f_{RSI}$)

Negativa

Mese critico

Novembre

Fattore di temperatura del mese critico

$f_{RSI,max}$ **0,706**

Fattore di temperatura del componente

f_{RSI} **0,688**

Umidità relativa superficiale accettabile

80 %

Verifica del rischio di condensa interstiziale (secondo UNI EN ISO 13788)

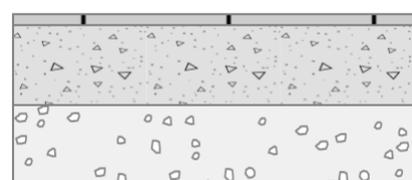
Non si verifica formazione di condensa interstiziale nella struttura durante tutto l'arco dell'anno.

Pavimento controterra:

Descrizione della struttura: Pavimento PT vs Terreno

Codice: P1

Trasmittanza termica	2,448	W/m ² K
Trasmittanza controterra	0,862	W/m ² K
Spessore	215	mm
Temperatura esterna (calcolo potenza invernale)	-9,8	°C
Permeanza	0,001	10 ⁻¹² kg/sm ² Pa
Massa superficiale (con intonaci)	390	kg/m ²
Massa superficiale (senza intonaci)	390	kg/m ²
Trasmittanza periodica	1,309	W/m ² K
Fattore attenuazione	1,519	-
Sfasamento onda termica	-6,2	h

Stratigrafia:

N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,170	-	-	-
1	Piastrelle in ceramica (piastrelle)	15,00	1,3000	0,012	2300	0,84	9999999
2	C.I.s. in genere	100,00	0,7300	0,137	1600	1,00	96
3	Sabbia e ghiaia	100,00	2,0000	0,050	1950	1,05	50
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,040	-	-	-

Legenda simboli

s	Spessore	mm
Cond.	Conduttività termica, comprensiva di eventuali coefficienti correttivi	W/mK
R	Resistenza termica	m ² K/W
M.V.	Massa volumica	kg/m ³
C.T.	Capacità termica specifica	kJ/kgK
R.V.	Fattore di resistenza alla diffusione del vapore in capo asciutto	-

Condizioni al contorno

Temperature e umidità relativa esterne variabili, medie mensili

Temperatura interna nel periodo di riscaldamento

20,0 °C

Criterio per l'aumento dell'umidità interna

Classe di concentrazione del vapore (0,006 kg/m³)Verifica criticità di condensa superficialeVerifica condensa superficiale ($f_{RSI,max} \leq f_{RSI}$)**Positiva**

Mese critico

aprile

Fattore di temperatura del mese critico

 $f_{RSI,max}$ **0,449**

Fattore di temperatura del componente

 f_{RSI} **0,488**

Umidità relativa superficiale accettabile

80 %Verifica del rischio di condensa interstiziale (secondo UNI EN ISO 13788)

Non si verifica formazione di condensa interstiziale nella struttura durante tutto l'arco dell'anno.

Solaio confinante con il sottotetto:

Trasmittanza termica	1,820	W/m ² K
Spessore	225	mm
Temperatura esterna (calcolo potenza invernale)	-6,8	°C
Permeanza	32,949	10 ⁻¹² kg/sm ² Pa
Massa superficiale (con intonaci)	280	kg/m ²
Massa superficiale (senza intonaci)	256	kg/m ²
Trasmittanza periodica	1,000	W/m ² K
Fattore attenuazione	0,549	-
Sfasamento onda termica	-6,3	h



Stratigrafia:

N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,100	-	-	-
1	C.l.s. in genere	50,00	0,7300	0,068	1600	1,00	96
2	Soletta in laterizio spess. 16 - Interasse 50	160,00	0,6100	0,262	1100	0,84	7
3	Intonaco di calce e sabbia	15,00	0,8000	0,019	1600	1,00	10
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,100	-	-	-

Legenda simboli

s	Spessore	mm
Cond.	Conduttività termica, comprensiva di eventuali coefficienti correttivi	W/mK
R	Resistenza termica	m ² K/W
M.V.	Massa volumica	kg/m ³
C.T.	Capacità termica specifica	kJ/kgK
R.V.	Fattore di resistenza alla diffusione del vapore in capo asciutto	-

Condizioni al contorno

Temperature e umidità relativa esterne variabili, medie mensili

Temperatura interna nel periodo di riscaldamento

20,0 °C

Criterio per l'aumento dell'umidità interna

Classe di concentrazione del vapore (0,006 kg/m³)

Verifica criticità di condensa superficiale

Verifica condensa superficiale ($f_{RSI,max} \leq f_{RSI}$)

Positiva

Mese critico

novembre

Fattore di temperatura del mese critico

$f_{RSI,max}$ **0,674**

Fattore di temperatura del componente

f_{RSI} **0,706**

Umidità relativa superficiale accettabile

80 %

Verifica del rischio di condensa interstiziale (secondo UNI EN ISO 13788)

Non si verifica formazione di condensa interstiziale nella struttura durante tutto l'arco dell'anno.

Dopo aver definito l'involucro opaco risulta necessario individuare i ponti termici e indicare le caratteristiche dei serramenti (involucro trasparente).

Per il calcolo della trasmittanza termica lineica dei ponti termici è stato utilizzato l'applicativo EC709, modulo del software EC700 di Edilclima, in cui sono stati inseriti come dati in input le strutture opache poci definite ed i coefficienti di correzione della temperatura nel caso di ambiente confinante verso locali non climatizzati. Si riporta di seguito l'elenco dei ponti termici individuati in base alla conformazione del fabbricato e i relativi valori di trasmittanza ottenuti dal calcolo.

- Parete – Copertura (sottotetto) → - 0,757 W/mK
- Parete – Balcone → 0,084 W/mK
- Parete – Solaio interpiano → 0,219 W/mK
- Parete – Solaio controterra → - 0,180 W/mK
- Parete – Telaio → 0,185 W/mK
- Parete – Solaio rialzato → - 0,651 W/mK

Per l'involucro trasparente invece ogni serramento è stato modellato indicando la sua geometria (forma e dimensioni dell'infisso) e le caratteristiche del telaio (materiale e spessore di traversi, montanti e divisori), nonché le dimensioni e le proprietà di ogni sottofinestra. Sono state inoltre definite la tipologia di vetro (spessore, trasmittanza del vetro, fattore di trasmittanza solare) e le caratteristiche delle chiusure oscuranti.

Si riportano di seguito le caratteristiche termiche di un componente finestrato di esempio, che ben caratterizza la tipologia presente sull'immobile oggetto di intervento.

Descrizione della finestra: PT - 100 x 140

Codice: W1

Caratteristiche del serramento

Tipologia di serramento	Singolo		
Classe di permeabilità	Senza classificazione		
Trasmittanza termica	U _w	3,970	W/m ² K
Trasmittanza solo vetro	U _g	4,682	W/m ² K

Dati per il calcolo degli apporti solari e delle schermature

Emissività	ε	0,837	-
Fattore di trasmittanza solare	g _{gl,n}	0,850	-
Fattore trasmissione solare *	g _{tot}	0,215	-
* Calcolato secondo UNI EN ISO 52022-1			
Fattore trasmissione solare totale	g _{gl+sh}	0,212	-

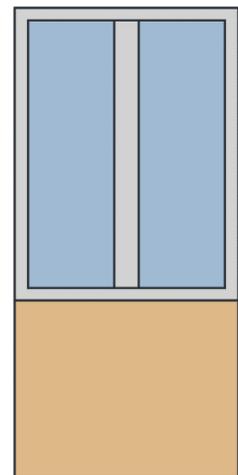
Caratteristiche delle chiusure oscuranti

Resistenza termica chiusure		0,09	m ² K/W
f shut		0,6	-
Trasmittanza serramento *	U _{w,e}	3,343	W/m ² K

* Valore calcolato considerando l'effetto della chiusura oscurante (UNI EN ISO 10077)

Dimensioni e caratteristiche del serramento

Larghezza	100,0	cm
Altezza H	140,0	cm



Caratteristiche del telaio

Trasmittanza termica del telaio	U_f	2,20	W/m ² K
K distanziale	K_d	0,000	W/mK
Area totale	A_w	1,400	m ²
Area vetro	A_g	0,998	m ²
Area telaio	A_f	0,402	m ²
Fattore di forma	F_f	0,71	-
Perimetro vetro	L_g	6,680	m
Perimetro telaio	L_f	4,800	m

Stratigrafia del pacchetto vetrato

Descrizione strato	s	λ	R	
Resistenza superficiale interna	-	-	0,130	
Primo vetro	3,0	1,00	0,003	
Resistenza superficiale esterna	-	-	0,081	

Legenda simboli

s	Spessore	mm
λ	Conduttività termica	W/mK
R	Resistenza termica	m ² K/W

Caratteristiche del modulo

Trasmittanza termica del modulo	U	2,997	W/m ² K
---------------------------------	-----	--------------	--------------------

Muro sottofinestra

Struttura opaca associata	M3	Muro vs Esterno 40 S	
Trasmittanza termica	U	1,385	W/m ² K
Altezza	H_{sott}	85,0	cm
Larghezza	L_{sott}	100,0	cm
Area		0,85	m ²

Ponte termico del serramento

Ponte termico associato	Z5	W - Parete - Telaio	
Trasmittanza termica lineica	ψ	0,185	W/mK
Lunghezza perimetrale		4,80	m

A questo punto, dopo aver definito tutte le proprietà dell'involucro, è possibile procedere con la creazione del modello-edificio all'interno dell'input grafico del programma. In questa sezione è possibile disegnare, ricalcando la planimetria del fabbricato, l'involucro edilizio, associando correttamente ponti termici e inserendo i serramenti nelle rispettive posizioni. È importante, in questa fase, andare ad indicare la presenza di ingombri che potrebbero andare a diminuire gli apporti solari, quali edifici limitrofi o aggetti verticali e orizzontali (balconi).

Infine, prima di procedere con l'esportazione del modello, è necessario indicare la posizione del nord, effettuare il calcolo degli ombreggiamenti e associare ogni ambiente ad un locale, inserendone la destinazione d'uso ed il relativo ricambio di aria (0,5vol/h per i locali nobili; 1,5vol/h per le cucine; 2vol/h per i bagni).

Si riporta di seguito la visualizzazione dell'input grafico dell'edificio oggetto di analisi, in cui è rappresentata la planimetria del piano primo e la vista 3D dell'edificio modellato. Come detto in precedenza, ai fini del calcolo del fabbisogno del fabbricato interessano solamente i locali riscaldati: per

questo motivo osservando la **Figura 64** non si notano i limitrofi locali non climatizzati ed il sottotetto, anch'esso non riscaldato.

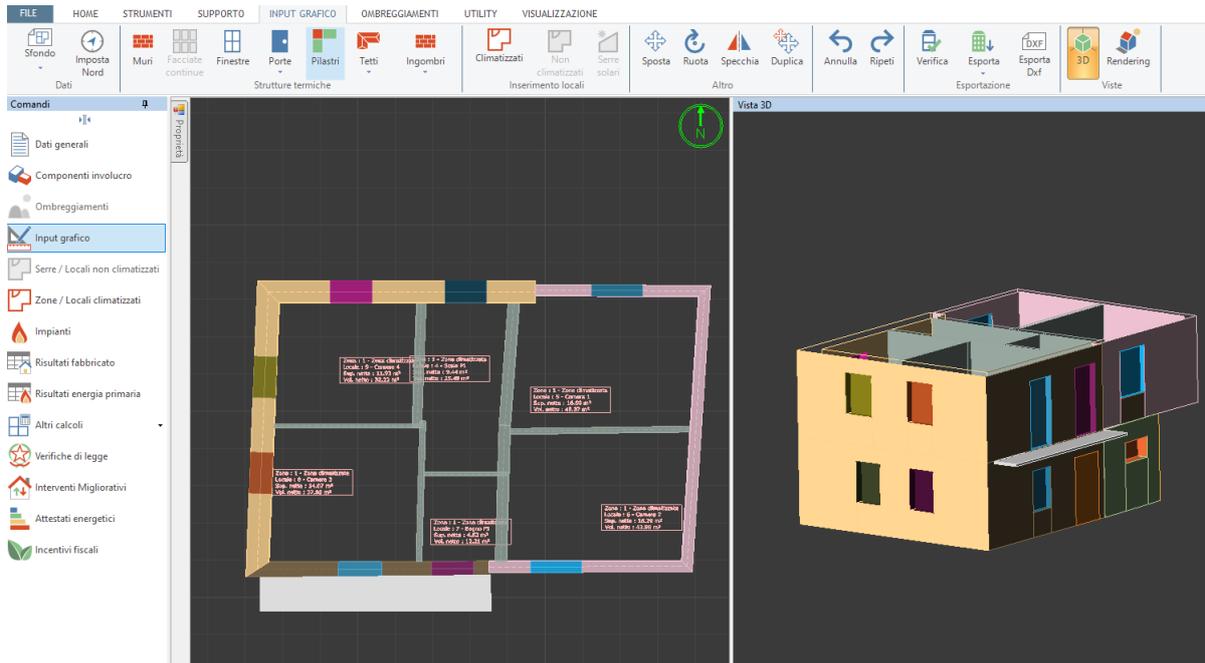


Figura 64 - Rappresentazione dell'Input grafico all'interno del software di calcolo EC700

Posizionandosi poi sulla scheda “Risultati fabbricato” vengono riportate le dispersioni dell’edificio, espresse in kW, suddivise in dispersioni per locale, dispersioni per componente e dispersioni per orientamento. È inoltre presente un quadro riassuntivo con le dispersioni totali. Sempre in questa scheda sono presenti gli scambi termici ed i fabbisogni di energia termica utile, espressi in kWh, sia per la stagione di riscaldamento che per quella di raffrescamento.

Nella **Tabella 26** sono riportati i risultati del calcolo effettuato sul fabbricato nella configurazione ex-ante.

Potenza invernale	
Potenza dispersa per trasmissione Φ_{tr}	18.837 W
Potenza dispersa per ventilazione Φ_{ve}	1.900 W
Potenza totale Φ_{hl}	20.738 W
Volume netto riscaldato V	316,6 m ³
Potenza estiva nel mese più caldo (luglio)	
Carico sensibile Q _{gl,sen}	8.409 W
Carico latente Q _{gl,lat}	1.695 W
Carico totale Q_{gl}	10.104 W

Tabella 26 - Risultati fabbricato, stato ex-ante, software di calcolo EC700 di EDILCLIMA

Come si può notare dalla tabella sovrastante, l’immobile in oggetto presenta le caratteristiche tipiche di un vecchio edificio, ovvero un elevato fabbisogno in riscaldamento (circa 65 W/m³) dovuto alle pareti poco isolante, ed un più basso fabbisogno di raffrescamento (circa 32 W/m³), grazie alle spesse pareti realizzate in mattoni pieni che delimitano il fabbricato.

Come ultima operazione, per caratterizzare correttamente il modello edificio e renderlo pari allo stato attuale, è necessario posizionarsi sulla scheda “Impianti” ed inserire gli impianti presenti, ovvero i caminetti a legna ed i boiler elettrici. Di default, in accordo con la UNI/TS 11300-2, il programma

stabilisce i rendimenti di emissione, regolazione e distribuzione, nonché il rendimento base di generazione per l'impianto termico ed il rendimento stagionale per l'impianto di produzione di ACS. Tali rendimenti dipendono dai componenti installati, e possono essere modificati solo in caso di diagnosi energetica se sono disponibili le schede prodotto o in base alle condizioni dell'edificio. In caso invece di calcolo regolamentare, ovvero nel presente studio, occorre adottare il rendimento normativo ed i valori convenzionali proposti.

Portandosi infine sulla sezione "Attestati energetici" è possibile visualizzare l'Attestato di Prestazione Energetica (APE) e l'Attestato di Qualificazione Energetica (AQE), nei quali sono riportate le informazioni energetiche del fabbricato, comprese le emissioni di CO₂. Si riporta di seguito l'estrapolazione dei dati maggiormente significativi.

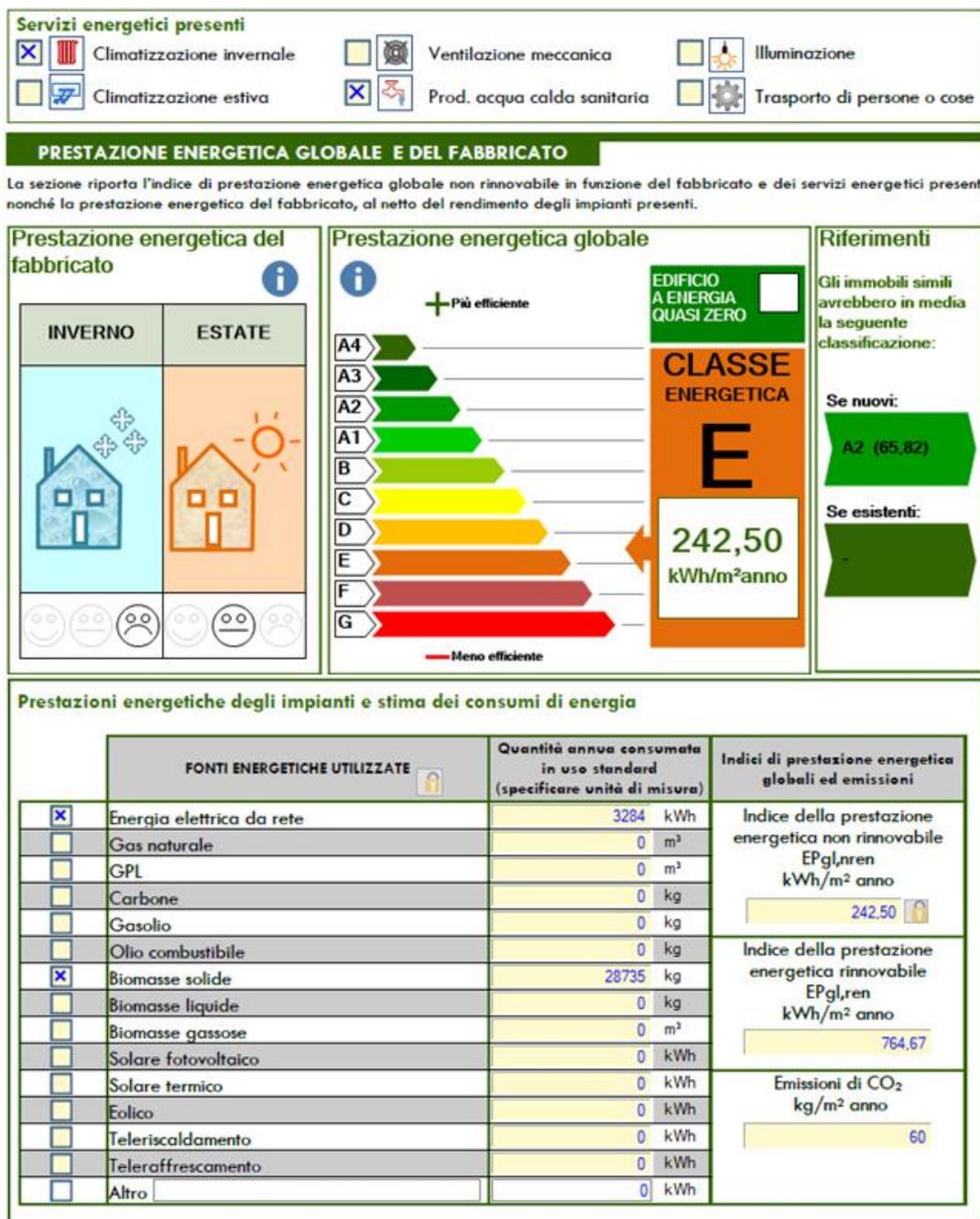


Figura 65 - Estrapolazione dati dalla simulazione APE Ante Intervento, EC700

4.2 Progetto

L'obiettivo di questo capitolo è quello di ridurre i fabbisogni del fabbricato oggetto di studio in modo che lo stesso possa essere servito da un impianto geotermico a bassa entalpia facilmente installabile nel sottosuolo. Per individuare gli interventi maggiormente efficaci si è partiti dall'analisi dei risultati ottenuti dalla simulazione dello stato di fatto ed in particolare dall'individuazione degli elementi dell'involucro che presentano le dispersioni più importanti.

Gli interventi a progetto, inoltre, devono garantire il rispetto dei requisiti di legge previsti dal D.M.26/06/2015¹³ [47] e la copertura da fonte rinnovabile deve rispettare il DLgs.199 08/11/2021¹⁴ [48]

Tenuto conto del fatto che il calore si diffonde principalmente verso l'alto, il primo elemento su cui intervenire è la copertura del piano primo confinante con il sottotetto. Dai dati ottenuti nella simulazione dello stato attuale le dispersioni verso il sottotetto rappresentano il 23,4% delle dispersioni totali. Data la caratteristica piana del solaio risulta particolarmente semplice andare ad effettuare un isolamento all'estradosso del componente, utilizzando un doppio strato di materiale isolante, ovvero 12 cm di fibra di legno (conducibilità 0,038 W/mK e densità 120 kg/m³) e 12 cm di XPS – polistirene espanso estruso – (conducibilità 0,036 W/mK), per un totale di 24 cm di materiale isolante. Applicando tale coibentazione la nuova trasmittanza del solaio risulterà essere pari a 0,140 W/m²K (rispettando quindi il limite di legge della zona climatica E pari a 0,200 W/m²K). Si consiglia infine di finire il solaio con la posa di pannelli di legno truciolare pressato (OSB), in modo che lo stesso possa essere calpestato ed utilizzato, se necessario, come deposito.

La scelta di utilizzare due materiali isolanti nel sottotetto è dovuta alle loro differenti proprietà. L'XPS è un buon isolante e poiché è estruso è ideale per le pavimentazioni orizzontali calpestabili; la fibra di legno, se scelta con densità medio-alta, oltre ad isolare fornisce un elevato sfasamento termico, utile a garantire il comfort estivo [49].

Il secondo elemento opaco disperdente su cui intervenire è dato dalle pareti opache verticali. L'elevata superficie verticale confinante verso l'esterno e verso ambienti non climatizzati fa sì che le dispersioni attraverso tali componenti incida per il 44,5% del totale. Il sistema di isolamento a "cappotto" si presenta come una delle soluzioni più vantaggiose e ampiamente adottate per migliorare le prestazioni termiche delle pareti [50]. Questo sistema prevede che lo strato isolante sia posizionato all'esterno della muratura, offrendo diversi benefici. Innanzitutto, protegge la parete dalle variazioni di temperatura, consentendo alla massa muraria di mantenere una temperatura più stabile, garantendo così un maggiore comfort abitativo sia in inverno che in estate. Inoltre, riduce notevolmente il rischio di condensa e formazione di muffe, problema comune nei muri non isolati o isolati verso l'interno. Un altro vantaggio significativo del cappotto esterno è la riduzione dei ponti termici, come solai, travi e pilastri, che possono essere fonte di dispersione del calore. Questo sistema viene realizzato applicando pannelli

¹³ Il Decreto Interministeriale del 26/06/2015 [47] stabilisce disposizioni e criteri per valutare il miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici e delle loro parti. In particolare, il Decreto contiene i requisiti minimi che gli edifici devono soddisfare se sottoposti ad interventi di isolamento termico o di sostituzione integrale o parziale degli impianti tecnologici.

¹⁴ Il Decreto Legislativo n.199/2021 [48] va ad abrogare l'allegato III del D. Lgs.28/2011, variando ad esempio le percentuali minime di copertura da fonte rinnovabile (copertura totale da fonte rinnovabile e copertura di acqua calda sanitaria da fonte rinnovabile) che un edificio deve rispettare quando viene sottoposto a ristrutturazione, le quali passano dal 50% al 60%. Varia anche il confronto dell'indice di prestazione energetica globale che viene sostituito con la prestazione energetica per la climatizzazione invernale, estiva e produzione di acqua calda sanitaria. Infine, viene incrementato il valore minimo della potenza elettrica da fonte rinnovabile che deve essere installata sull'edificio, che passa da 0,020 a 0,025 kW per ogni m² di superficie in pianta a livello del terreno (0,050 kW/m² nel caso di edifici di nuova costruzione)

isolanti, che possono essere realizzati con una varietà di materiali, sia naturali come sughero e fibra di legno, sia derivati dal ciclo degli idrocarburi come polistirolo e poliuretano. Sebbene i materiali derivati dagli idrocarburi abbiano generalmente una maggiore resistenza termica, possono presentare una minore permeabilità al vapore, limitando la traspirazione tra l'interno e l'esterno dell'edificio. Per valutare l'efficacia isolante di un materiale, è importante considerare il suo coefficiente di conduttività termica, che dovrebbe essere il più basso possibile.

Nell'edificio in esame si prevede di realizzare un cappotto esterno, sia sulle pareti confinanti verso l'esterno, che verso i locali non climatizzati, utilizzando dei pannelli in lana di roccia da 16 cm (conducibilità 0,035 W/mK e densità 100 kg/m³). Grazie a questo materiale tutte le pareti avranno una conducibilità inferiore a 0,230 W/m²K come previsto per il rispetto dei requisiti della zona climatica E.

L'ultimo intervento di coibentazione da effettuare riguarda il pavimento controterra ed il pavimento verso il locale non climatizzato. Queste superfici rappresentano di per sé solamente il 12,9% delle dispersioni ma, in previsione di installare un impianto a pavimento radiante, risulta positivo intervenire mediante la loro coibentazione. A livello normativo, inoltre, l'intervento previsto ricade nella ristrutturazione importante di primo livello, con un intervento che riguarda più del 50% della superficie disperdente ed il rifacimento dell'impianto termico [47]. Per rispettare i requisiti della ristrutturazione importante di primo livello è necessario che l'indice di prestazione termica utile per il riscaldamento sia inferiore ad un valore soglia e, tale rispetto, si ottiene principalmente andando a coibentare le superfici disperdenti. Si fa notare che tale parametro non sarebbe stato preso in considerazione nel caso in cui l'intervento si fosse configurato come ristrutturazione importante di secondo livello (intervento che riguarda più del 25% della superficie disperdente e che può interessare l'impianto termico). Si prevede quindi rimuovere la pavimentazione esistente ed il relativo strato di massetto, per poi posare uno strato isolante di poliuretano avente spessore pari a 8 cm (conducibilità inferiore o uguale a 0,022 W/mK), e posare quindi il pacchetto con l'impianto a pavimento radiante. La scelta di utilizzare il poliuretano si rende necessaria a causa delle altezze dei locali in cui si opera. Normalmente, per isolare i pavimenti si sceglie di utilizzare un materiale estruso, adatto alla compressione e al calpestio, ma tali materiali sono caratterizzati da una conducibilità pari a circa 0,033-0,038 W/mK, e per rispettare il requisito di legge dei pavimenti (trasmissione inferiore a 0,250 W/m²K) bisognerebbe utilizzarne uno spesso almeno 10-12 cm, con conseguente riduzione delle altezze nette all'interno dei locali. Nel caso in analisi, per garantire le altezze interne pari a 2,70 m risulta fondamentale limitare lo spessore dell'isolante e questo può essere effettuato tramite l'utilizzo del poliuretano, che presenta una conducibilità più bassa, a scapito tuttavia di un costo maggiore.

Per quanto riguarda i serramenti, attualmente responsabili del 19,2% delle dispersioni, si prevede la loro sostituzione con nuovi elementi dotati di vetrocamera con rivestimento basso-emissivo e valore di trasmittanza (valore medio vetro/telaio) che rispetti i requisiti di legge per la zona climatica E, ovvero inferiore a 1,30 W/m²K. Tale sostituzione risulta fondamentale per la riduzione del fabbisogno dell'edificio. Infatti, anche a seguito della variazione delle condizioni climatiche esterne, gli infissi consentono di evitare la dispersione dell'aria calda presente all'interno e di mantenere quindi ottime le condizioni di comfort in ambiente, con una completa assenza di condensa [51].

Prima di procedere con il calcolo del nuovo fabbisogno del fabbricato al fine di dimensionare correttamente l'impianto geotermico, è possibile procedere con il calcolo della potenza elettrica da fonte rinnovabile da installare per garantire il rispetto delle verifiche di legge. Come visto in precedenza il D.lgs. n.199/2021 prevede nel caso di ristrutturazione una potenza minima pari a 0,025 kW per ogni m² di superficie a livello del terreno. Nel caso analizzato, essendo la superficie pari a 98,8 m², si rende necessario installare un impianto fotovoltaico di potenza pari almeno a 2,47 kW. Si prevede quindi a progetto l'installazione di un impianto da 3,2 kWp. Successivamente, a seguito della scelta degli

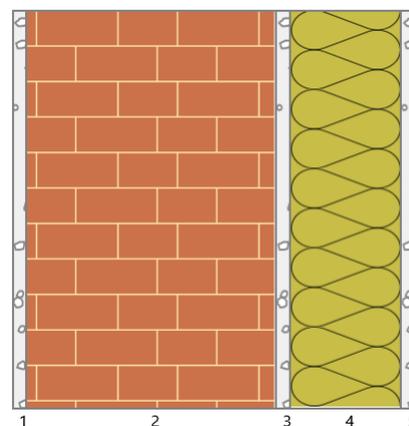
impianti, bisognerà verificare anche il rispetto delle percentuali di copertura totale da fonte rinnovabile e la copertura di acqua calda sanitaria da fonte rinnovabile.

Si riportano di seguito le caratteristiche termiche e igrometriche di alcune delle principali strutture opache già descritte nello stato ex-ante.

Descrizione della struttura: *Muro vs Esterno 40 CAPPOTTO*

Codice: *M3*

Trasmittanza termica	0,187	W/m ² K
Spessore	580	mm
Temperatura esterna (calcolo potenza invernale)	-9,8	°C
Permeanza	45,455	10 ⁻¹² kg/sm ² Pa
Massa superficiale (con intonaci)	754	kg/m ²
Massa superficiale (senza intonaci)	664	kg/m ²
Trasmittanza periodica	0,006	W/m ² K
Fattore attenuazione	0,030	-
Sfasamento onda termica	-18,7	h



Stratigrafia:

N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,130	-	-	-
1	Intonaco di calce e sabbia	20,00	0,8000	0,025	1600	1,00	10
2	Mattone pieno	360,00	0,7800	0,462	1800	0,84	9
3	Intonaco di calce e sabbia	20,00	0,8000	0,025	1600	1,00	10
4	Pannello in lana di roccia	160,00	0,0350	4,571	100	1,03	1
5	Intonaco plastico per cappotto	20,00	0,3000	0,067	1300	0,84	30
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,081	-	-	-

Legenda simboli

s	Spessore	mm
Cond.	Conduttività termica, comprensiva di eventuali coefficienti correttivi	W/mK
R	Resistenza termica	m ² K/W
M.V.	Massa volumica	kg/m ³
C.T.	Capacità termica specifica	kJ/kgK
R.V.	Fattore di resistenza alla diffusione del vapore in capo asciutto	-

Verifica criticità di condensa superficiale

Verifica condensa superficiale ($f_{RSI,max} \leq f_{RSI}$)

Positiva

Mese critico

novembre

Fattore di temperatura del mese critico

$f_{RSI,max}$ **0,706**

Fattore di temperatura del componente

f_{RSI} **0,954**

Umidità relativa superficiale accettabile

80 %

Verifica del rischio di condensa interstiziale (secondo UNI EN ISO 13788)

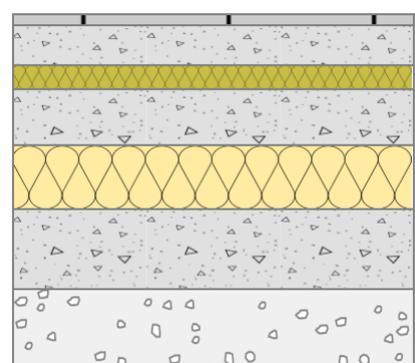
Non si verifica formazione di condensa interstiziale nella struttura durante tutto l'arco dell'anno.

Pavimento controterra:

Descrizione della struttura: Pavimento PT vs Terreno ISOLATO + RISC. PAV.

Codice: P1

Trasmittanza termica	0,195	W/m ² K
Trasmittanza controterra	0,169	W/m ² K
Spessore	445	mm
Temperatura esterna (calcolo potenza invernale)	-9,8	°C
Permeanza	0,001	10 ⁻¹² kg/sm ² Pa
Massa superficiale (con intonaci)	553	kg/m ²
Massa superficiale (senza intonaci)	553	kg/m ²
Trasmittanza periodica	0,010	W/m ² K
Fattore attenuazione	0,060	-
Sfasamento onda termica	-16,7	h



Stratigrafia:

N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,170	-	-	-
1	Piastrelle in ceramica (piastrelle)	15,00	1,3000	0,012	2300	0,84	9999999
2	Caldana additivata per pannelli	50,00	1,0000	0,050	1800	0,88	30
3	Tubo del pannello - H30	0,00	-	-	-	-	-
4	Polistirene espanso per COVER	30,00	0,0350	0,857	25	1,30	70
5	C.I.s. in genere	70,00	0,3800	0,184	1000	1,00	96
6	Poliuretano espanso rigido imperm. ai gas	80,00	0,0220	3,636	35	1,40	60
7	C.I.s. in genere	100,00	0,7300	0,137	1600	1,00	96
8	Sabbia e ghiaia	100,00	2,0000	0,050	1950	1,05	50
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,040	-	-	-

Legenda simboli

s	Spessore	mm
Cond.	Conducibilità termica, comprensiva di eventuali coefficienti correttivi	W/mK
R	Resistenza termica	m ² K/W
M.V.	Massa volumica	kg/m ³
C.T.	Capacità termica specifica	kJ/kgK
R.V.	Fattore di resistenza alla diffusione del vapore in capo asciutto	-

Verifica criticità di condensa superficiale

Verifica condensa superficiale ($f_{RSI,max} \leq f_{RSI}$)		Positiva
Mese critico		aprile
Fattore di temperatura del mese critico	$f_{RSI,max}$	0,449
Fattore di temperatura del componente	f_{RSI}	0,952
Umidità relativa superficiale accettabile		80 %

Verifica del rischio di condensa interstiziale (secondo UNI EN ISO 13788)

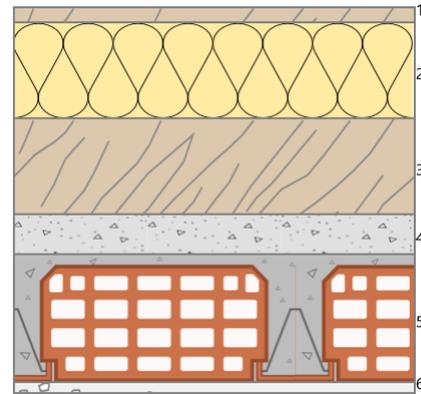
Non si verifica formazione di condensa interstiziale nella struttura durante tutto l'arco dell'anno.

Solaio confinante con il sottotetto:

Descrizione della struttura: Soffitto vs Sottotetto ISOLATO

Codice: S2

Trasmittanza termica	0,140	W/m ² K
Spessore	485	mm
Temperatura esterna (calcolo potenza invernale)	-6,8	°C
Permeanza	7,672	10 ⁻¹² kg/sm ² Pa
Massa superficiale (con intonaci)	312	kg/m ²
Massa superficiale (senza intonaci)	288	kg/m ²
Trasmittanza periodica	0,011	W/m ² K
Fattore attenuazione	0,082	-
Sfasamento onda termica	-16,7	h



Stratigrafia:

N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	0,100	-	-	-
1	Pannelli di trucioli di legno pressati	20,00	0,1600	0,125	700	1,70	70
2	Polistirene espanso estruso con pelle (sp >= 120 mm)	120,00	0,0360	3,333	30	1,45	150
3	Fibra di legno	120,00	0,0380	3,158	120	2,00	5
4	C.I.s. in genere	50,00	0,7300	0,068	1600	1,00	96
5	Soletta in laterizio spess. 16 - Interasse 50	160,00	0,6100	0,262	1100	0,84	7
6	Intonaco di calce e sabbia	15,00	0,8000	0,019	1600	1,00	10
-	Resistenza superficiale interna	-	-	0,100	-	-	-

Legenda simboli

s	Spessore	mm
Cond.	Conduttività termica, comprensiva di eventuali coefficienti correttivi	W/mK
R	Resistenza termica	m ² K/W
M.V.	Massa volumica	kg/m ³
C.T.	Capacità termica specifica	kJ/kgK
R.V.	Fattore di resistenza alla diffusione del vapore in capo asciutto	-

Verifica criticità di condensa superficiale

Verifica condensa superficiale ($f_{RSI,max} \leq f_{RSI}$)

Positiva

Mese critico

novembre

Fattore di temperatura del mese critico

$f_{RSI,max}$ **0,674**

Fattore di temperatura del componente

f_{RSI} **0,967**

Umidità relativa superficiale accettabile

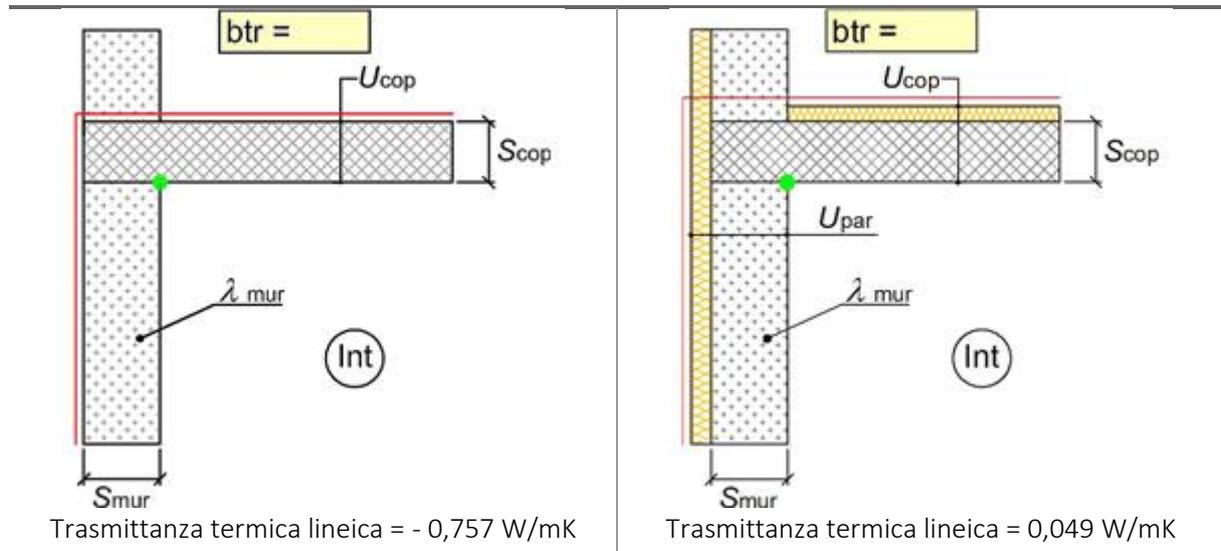
80 %

Verifica del rischio di condensa interstiziale (secondo UNI EN ISO 13788)

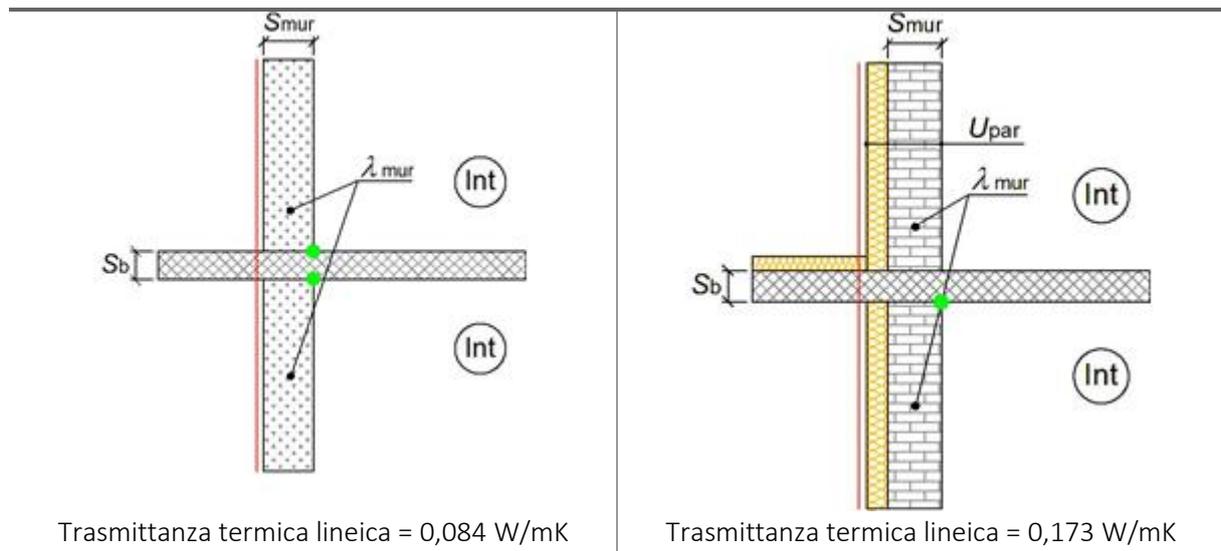
Non si verifica formazione di condensa interstiziale nella struttura durante tutto l'arco dell'anno.

Si riporta in **Tabella 27** il confronto tra i ponti termici presenti nella situazione ex- ante e quelli previsti in progetto, al fine di osservare come gli stessi siano stati corretti tramite l'applicazione dell'isolante.

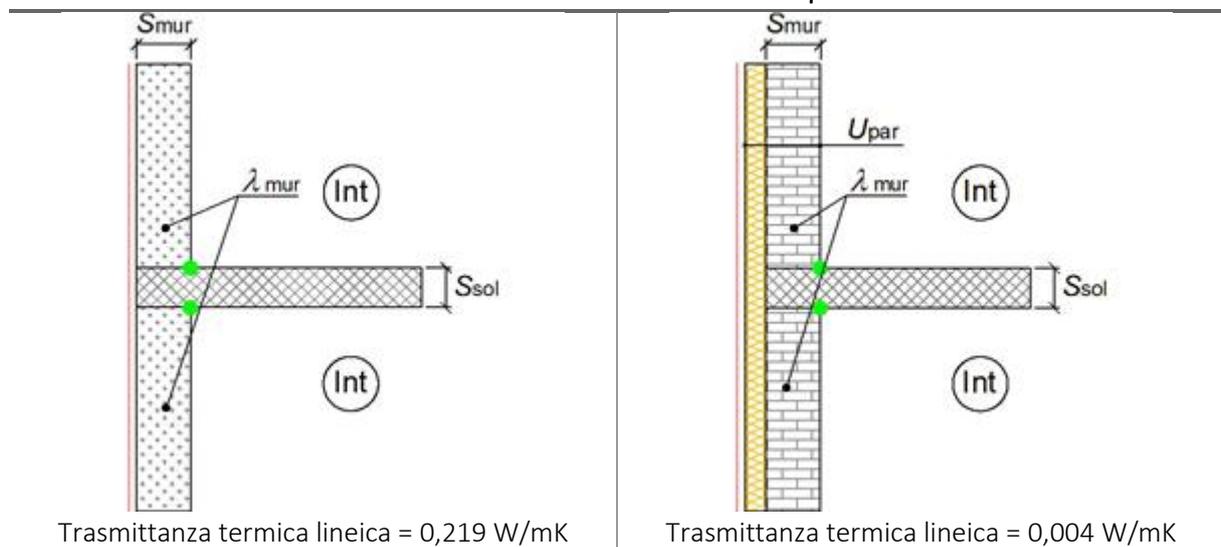
Ponte termico Parete – Copertura



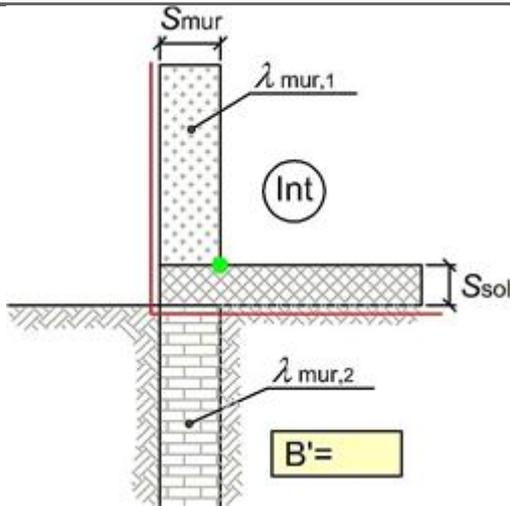
Ponte termico Parete – Balcone



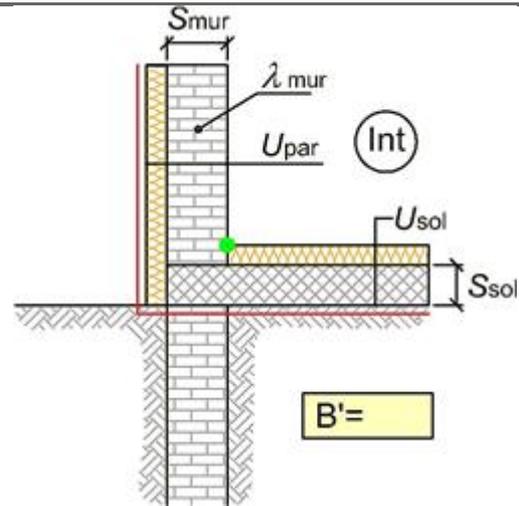
Ponte termico Parete – Solaio interpiano



Ponte termico Parete – Solaio controterra

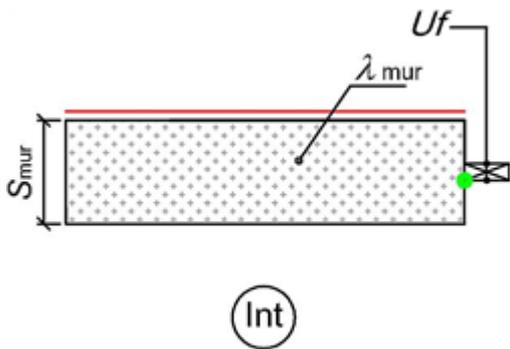


Trasmittanza termica lineica = - 0,180 W/mK

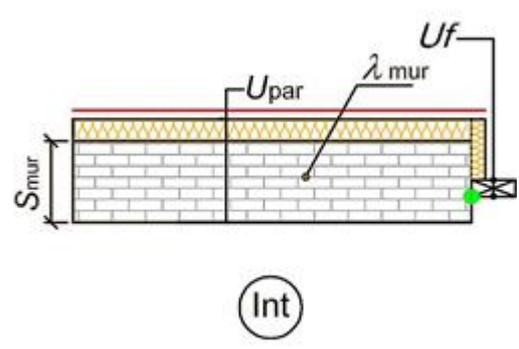


Trasmittanza termica lineica = 0,094 W/mK

Ponte termico Parete – Telaio

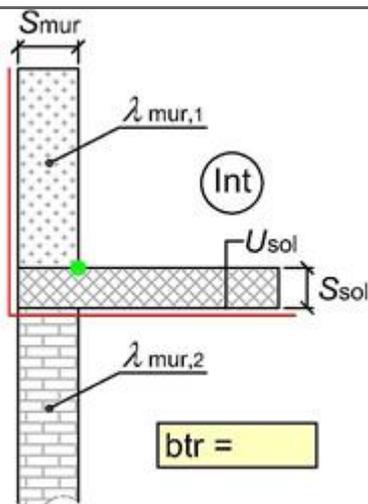


Trasmittanza termica lineica = 0,185 W/mK

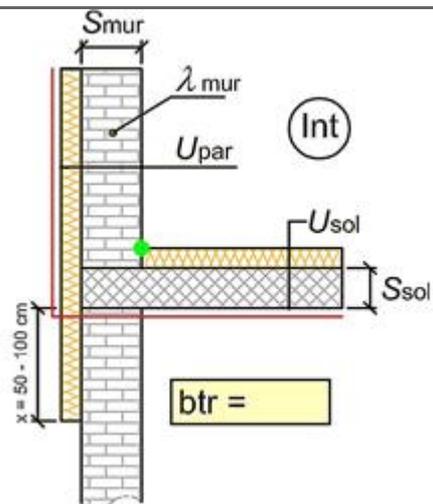


Trasmittanza termica lineica = 0,124 W/mK

Ponte termico Parete – Solaio rialzato



Trasmittanza termica lineica = - 0,651 W/mK



Trasmittanza termica lineica = 0,061 W/mK

Tabella 27 - Confronto tra i ponti termici nella situazione ex-ante e quelli corretti previsti a progetto

Si riportano di seguito alcune viste di come sarà il fabbricato a seguito dell'intervento di riqualificazione.



Figura 66 – Modello dell'edificio eseguito su REVIT [52]



Figura 67 - Sezione dell'edificio tramite il software REVIT [52]

Avendo definito gli interventi sull'involucro è quindi possibile andare ad osservare i nuovi fabbisogni del fabbricato, sia in termini di potenza che in termini di energia. Il risultato di tale calcolo, ottenuto mediante il software EC700 di Edilclima è riportato nella **Tabella 28**.

Potenza invernale	
Potenza dispersa per trasmissione Φ_{tr}	3.927 W
Potenza dispersa per ventilazione Φ_{ve}	1.900 W
Potenza totale Φ_{hl}	5.827 W
Volume netto riscaldato V	316,6 m ³
Potenza estiva nel mese più caldo (luglio)	
Carico sensibile $Q_{gl,sen}$	7.005 W
Carico latente $Q_{gl,lat}$	1.695 W
Carico totale Q_{gl}	8.700 W

Tabella 28 - Risultati fabbricato, stato ex-post, software di calcolo EC700 di EDILCLIMA

Definite le potenze necessarie per climatizzare l'edificio, è possibile procedere con la scelta della pompa di calore e la modellazione dell'impianto, sia dal punto di vista del sistema lato sonde, sia lato edificio.

La modellazione dell'impianto sul software di calcolo inizia con l'inserimento dei corpi scaldanti. A progetto si prevede l'installazione di un impianto a pavimento radiante, con una regolazione ambiente, in modo da poter intervenire sulla temperatura in ogni stanza. Per fare ciò si prevede di installare delle testine elettrotermiche sui collettori di distribuzione, in modo che la loro apertura/chiusura possa essere decisa dall'utente tramite il termostato ambiente [53].

Si procede poi con l'inserimento dei valori di temperatura di progetto. Dato l'impianto radiante si prevede una temperatura di mandata pari a 38,5°C con una differenza tra mandata e ritorno pari a 7°C.

Date le potenze in gioco il dimensionamento della pompa di calore viene effettuata per soddisfare le esigenze in raffrescamento dell'edificio, leggermente più alte di quelle in riscaldamento.

Fra le macchine disponibili sul mercato la scelta è ricaduta sulla HPG 12 CS PREMIUM della Stiebel Eltron [54], una pompa di calore terra-acqua con tecnologia inverter adatta a riscaldamento, raffrescamento e produzione di ACS. Il grande vantaggio della tecnologia inverter è la modulazione della potenza erogata in base al carico richiesto momento per momento, con conseguente riduzione dell'energia spesa.



Figura 68 - Pompa di calore HPG 12 CS PREMIUM della STIEBEL ELTRON [54]

Le principali caratteristiche reperibili sulla scheda tecnica sono riportate di seguito:

▪ Temperatura cut-off minima fredda	-5 °C
▪ Temperatura cut-off massima fredda	20 °C
▪ Temperatura cut-off minima calda	15 °C
▪ Temperatura cut-off massima calda	75 °C
▪ Potenza utile in riscaldamento (10/35)	12,7 kW
▪ COP (10/35)	5,86 -
▪ Potenza utile in raffrescamento (30/7)	9,0 kW
▪ EER (30/7)	6,50 -

Come visibile dai dati tecnici la pompa di calore presenta un range di temperatura operativo lato terreno compreso tra -5 e +20 °C, permettendo di riscaldare l'acqua glicolata fino a 75 °C. Inoltre, secondo il software di calcolo, la temperatura media annua del terreno nel sito di intervento risulta essere pari a 11,6 °C; pertanto la pompa di calore proposta risulta adatta alle caratteristiche locali.

Per effettuare tramite EC700 una simulazione precisa del comportamento termico dell'edificio, è stata impostata, in accordo con la UNI/TS 11300 la metodologia di calcolo regolamentare (calcolo analitico). Per tale motivo si è reso necessario inserire come ulteriore dato in input per la pompa di calore, non solo le prestazioni nominali riportate nel precedente elenco puntato, ma fornire i valori di potenza e COP al variare sia della temperatura esterna del terreno che della temperatura dell'acqua di mandata. I valori sono stati reperiti tramite i grafici presenti sulla scheda tecnica e poi riportati in tabella.

COP [-]			
Tf/Tc [°C]	35	45	55
-5	4,59	3,67	2,75
0	5,01	4,07	3,13
5	5,43	4,47	3,51
10	5,86	4,87	3,89

Tabella 29 - COP pompa di calore HPG 12 CS PREMIUM della STIEBEL ELTRON

Potenza [kW]			
Tf/Tc [°C]	35	45	55
-5	12,68	11,40	10,30
0	12,70	11,90	11,20
5	12,73	12,40	12,10
10	12,75	12,90	13,00

Tabella 30 - Potenza utile pompa di calore HPG 12 CS PREMIUM della STIEBEL ELTRON

Per concludere l'inserimento dei dati in input nel modello di calcolo per il circuito lato utenza, risulta necessario andare a valutare le dimensioni del serbatoio inerziale per la pompa di calore, nonché i diametri delle tubazioni in centrale termica e le caratteristiche delle pompe di circolazione. Per fare ciò sono state utilizzate le formule reperite dal Manuale del termotecnico [55]. I dati ottenuti risultano essere i seguenti:

- Volume serbatoio inerziale 200 l
- Volume vaso di espansione accumulo inerziale 20 l
- Diametro tubazioni in centrale termica 20 mm
- Pompa di circolazione circuito PT
 - Portata 0,35 m³/h
 - Prevalenza 4,4 m
- Pompa di circolazione circuito P1
 - Portata 0,70 m³/h
 - Prevalenza 5,5 m

Avendo ricavato i valori teorici risulta necessario procedere con la scelta dei materiali da installare. In particolare, la scelta del serbatoio inerziale ricade all'interno della vasta gamma di puffer proposti dalla Stiebel Eltron, mentre per le pompe di circolazione una delle marche più diffuse e reputate valide risulta essere la Grundfos.

Il puffer venduto in abbinamento dalla Stiebel per la pompa di calore in questione è il modello STH 210 PLUS, un serbatoio termico da 207 litri, pressione e temperatura massime pari rispettivamente a 4 bar e 95 °C, ed un coefficiente di dispersione termica pari a 1,019 W/K, la cui rappresentazione è visibile in **Figura 68** accanto alla pompa di calore.

Avendo scelto di suddividere l'abitazione in due circuiti (zona giorno al piano terra e zona notte al piano primo), risulta necessaria l'installazione di due pompe di circolazione le cui caratteristiche sono state calcolate tramite il Manuale del termotecnico e sono riportate nel precedente elenco puntato. I modelli commerciali della Grundfos [56] che rispettano tali caratteristiche risultano essere l'ALPHA2 25-60 180 per il circuito al piano terra e l'ALPHA2 25-80 180 per il circuito al piano primo. Entrambi i modelli consentono di operare, alle condizioni impostate, con alti livelli di rendimento e bassi consumi energetici. Si riporta, a titolo esemplificativo, la curva di funzionamento del modello ALPHA2 25-60 180, in cui si può osservare un rendimento del 90% ed una potenza assorbita di appena 20W per i punti di funzionamento considerati.

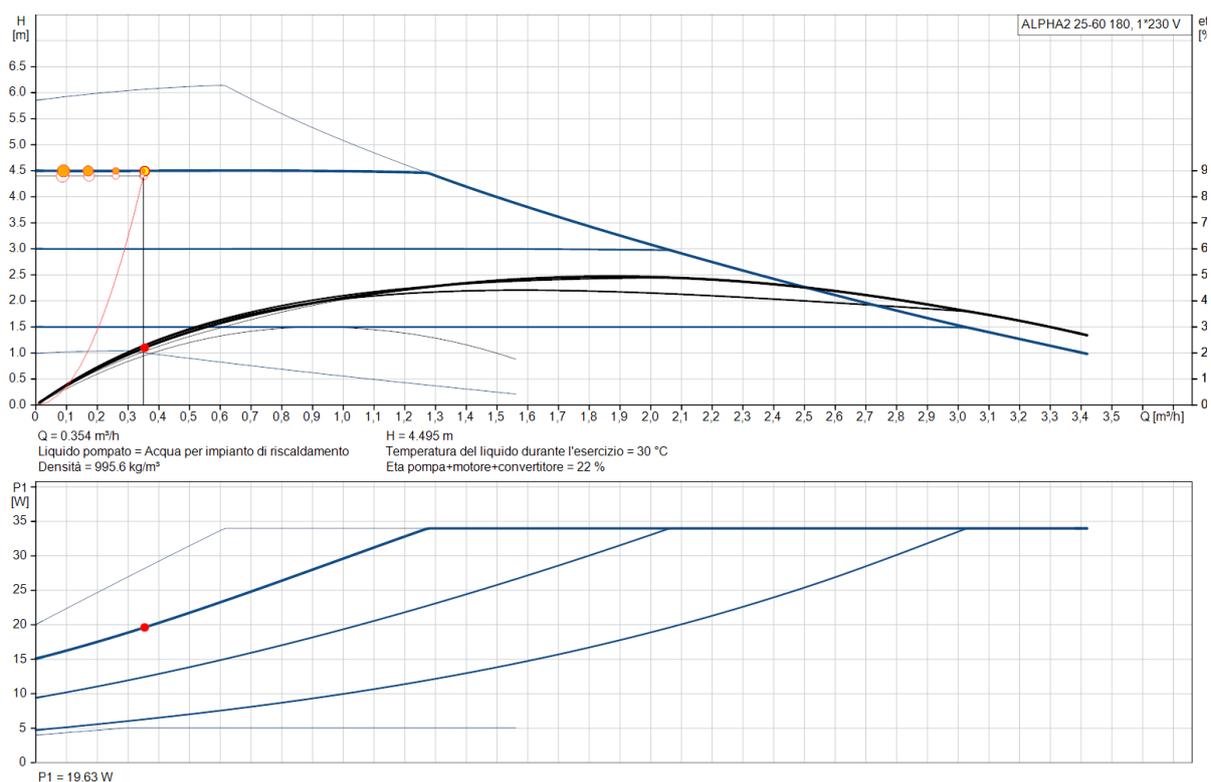


Figura 69 - Curva di funzionamento della pompa di circolazione ALPHA2 25-60 180 della Grundfos [56]

Avendo a disposizione i dati delle dispersioni termiche del puffer (1,019 W/K) e la potenza assorbita dai circolatori (20 W per il circolatore a PT e 35 W per quello a P1), è possibile procedere con il loro inserimento su EC700, insieme anche alle prestazioni in raffreddamento della pompa di calore.

L'ultimo componente da inserire per modellare correttamente l'edificio nella sua configurazione post-intervento è il produttore per l'acqua calda sanitaria. Il fabbisogno giornaliero di ACS, calcolato senza difficoltà seguendo quanto riportato nel paragrafo 7.1.1 della UNI/TS 11300 parte 2, risulta essere pari a 162 litri/giorno. Tale quantità può essere coperta da un bollitore in pompa di calore dedicato.

Tra le macchine disponibili sul mercato la scelta è ricaduta sul modello AQUA SWAN 190 della CLIVET [57], un bollitore in pompa di calore con accumulo da 176 litri il cui assorbimento elettrico, compreso tra 420 e 460 W, può essere coperto dall'impianto fotovoltaico. Le prestazioni, reperibili sulla scheda tecnica, sono riportate nella seguente tabella.

55 °C			
Tf [°C]	COP [-]	Pu [kW]	Pe [kW]
7	3,22	1,36	0,42
15	3,66	1,61	0,44
20	3,93	1,76	0,45
35	4,86	2,25	0,46

Tabella 31 - Prestazioni bollitore in pompa di calore AQUA SWAN 190 della CLIVET [57]

In condizioni nominali (7/55) la potenza utile risulta essere pari a 1,36 kW mentre il COP pari a 5,18.

A questo punto, prima di procedere con la verifica dei requisiti di legge attualmente in vigore, è possibile valutare le caratteristiche delle sonde geotermiche da installare al fine di garantire il corretto funzionamento della pompa di calore.

Per fare ciò è stato utilizzato un altro software fornito da Edilclima S.R.L.: EC714 IMPIANTI GEOTERMICI [58]. Il programma permette, dopo aver calcolato le prestazioni energetiche del fabbricato e definito le potenze in gioco, di dimensionare l'impianto geotermico in funzione del fabbisogno energetico dell'edificio, definendo inoltre come input le caratteristiche termiche del sottosuolo ed ottimizzando l'impianto al variare delle performances delle macchine e dei salti di temperatura. Tramite il software vengono calcolate la lunghezza delle sonde e le perdite di carico, ed è possibile effettuare una stima economica per la realizzazione dell'impianto.

Il primo passaggio da effettuare su EC714 è scegliere la sorgente (acqua di falda o terreno) e le sonde (verticali od orizzontali), nonché indicare l'utilizzo dell'energia termica prodotta (riscaldamento, raffrescamento, produzione di ACS o altri usi); poi è necessario inserire il luogo di progetto al fine di ottenere la temperatura media annuale del terreno che, come visto anche su EC700, per Pianfei (CN) risulta essere pari a 11,6°C. Nel caso in analisi è stato selezionato un impianto a terreno con sonde orizzontali per produzione di energia a servizio dell'impianto di riscaldamento invernale e raffrescamento estivo.

Dopodiché è necessario fornire i fabbisogni mensili di energia termica in uscita dal sottosistema di generazione. I dati sono, funzione delle caratteristiche dell'involucro e dell'impianto dell'edificio, sono stati estrapolati da EC700 e corretti per tenere conto dei rendimenti di emissione, distribuzione e regolazione, utilizzando la seguente formulazione:

$$\text{Fabbisogno di energia} = \frac{\text{Energia utile mensile}}{h_e \cdot h_d \cdot h_c} \text{ [kWh]} \quad (4.1)$$

Dove:

- h_e è il rendimento di emissione, assunto pari a 0,96
- h_d è il rendimento di distribuzione, assunto pari 0,98
- h_c è il rendimento di regolazione, assunto pari 0,98

Nel caso analizzato i valori ottenuti applicando la (4.1) per l'energia termica utile in riscaldamento ($Q_{H,nd}$) e raffrescamento ($Q_{C,nd}$) sono stati riportati nella **Tabella 32**.

	$Q_{H,nd}$ [kWh]	$Q_{C,nd}$ [kWh]
Gennaio	1.727	-
Febbraio	1.317	-
Marzo	835	-
Aprile	263	-
Maggio	-	1
Giugno	-	193
Luglio	-	408
Agosto	-	146
Settembre	-	-
Ottobre	318	-
Novembre	1.123	-
Dicembre	1.774	-

Tabella 32 - Fabbisogni di energia per l'impianto in progetto

Si procede quindi con l'inserimento delle caratteristiche tecniche della pompa di calore e delle condizioni di progetto. Il programma effettua le verifiche riportando:

- Il flusso termico annuale (Q_a), ovvero il bilancio energetico annuo tra il calore prelevato in inverno ed il calore ceduto in estate. Se tale parametro risulta essere maggiore di zero, allora il bilancio energetico è in perdita, ovvero il terreno si scarica ogni anno di quel quantitativo di energia. Al contrario, se si ottiene un flusso termico annuale minore di zero, allora il bilancio energetico è in guadagno, ed il terreno si arricchisce di energia.
- Le ore di funzionamento annuali con funzionamento dell'impianto a pieno carico in riscaldamento (t_H) e raffreddamento (t_C).
- Le prestazioni reali della pompa di calore, determinate sulle condizioni di progetto, durante la stagione di riscaldamento (COP_{REALE}) e di raffreddamento (EER_{REALE}).
- Le temperature in ingresso ($q_{w,i}$) e in uscita ($q_{w,o}$) dallo scambiatore.
- Il fattore di carico parziale (PFL_m), ovvero un parametro che ci informa su quanto la pompa di calore è utilizzata rispetto alla sua capacità massima.

In **Figura 70** sono riportati i parametri inseriti come input (celle con sfondo bianco) e quelli ottenuti come output (celle con sfondo giallo) sul software di calcolo EC714 utilizzato per il dimensionamento delle sonde geotermiche.

Carichi termici di progetto													
	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giù	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	
Fabb. di energia termica	1727	1317	835	263	0	0	0	0	0	318	1123	1774	kWh
Fabb. di energia per altri usi	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	kWh
Fabb. di energia per ACS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	kWh
TOTALE energia termica	1727	1317	835	263	0	0	0	0	0	318	1123	1774	kWh
Fabb. di energia frigorifera	0	0	0	0	1	193	408	146	0	0	0	0	kWh
Fabb. di energia per altri usi	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	kWh
TOTALE energia frigorifera	0	0	0	0	1	193	408	146	0	0	0	0	kWh

Caratteristiche pompa di calore		Fabbisogni elettrici																
Marca/Serie/Modello: STIEBEL ELTRON/HPG/12 CS PREMIUM		P media degli ausiliari	1000 W															
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Riscaldamento</th> <th>Raffrescamento</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Potenza nominale</td> <td>12.75 kW</td> <td>9.00 kW</td> </tr> <tr> <td>COP/ERR nominale</td> <td>5.86</td> <td>5.34</td> </tr> <tr> <td>T mandata PdC</td> <td>T_{out} 75.0 °C</td> <td>12.0 °C</td> </tr> <tr> <td>T ingresso PdC</td> <td>T_{in} 15.0 °C</td> <td>25.0 °C</td> </tr> </tbody> </table>			Riscaldamento	Raffrescamento	Potenza nominale	12.75 kW	9.00 kW	COP/ERR nominale	5.86	5.34	T mandata PdC	T _{out} 75.0 °C	12.0 °C	T ingresso PdC	T _{in} 15.0 °C	25.0 °C	P pompa di circolazione	55 W
	Riscaldamento	Raffrescamento																
Potenza nominale	12.75 kW	9.00 kW																
COP/ERR nominale	5.86	5.34																
T mandata PdC	T _{out} 75.0 °C	12.0 °C																
T ingresso PdC	T _{in} 15.0 °C	25.0 °C																
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Condizioni di progetto</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>T mandata PdC</td> <td>T_{out} 38.5 °C / 18.0 °C</td> </tr> <tr> <td>Diff. temp. scambiatore</td> <td>Δt_{gw} 11.0 °C / 17.0 °C</td> </tr> <tr> <td>Salto termico del fluido</td> <td>Δt_w 3.0 °C / 5.0 °C</td> </tr> </tbody> </table>		Condizioni di progetto		T mandata PdC	T _{out} 38.5 °C / 18.0 °C	Diff. temp. scambiatore	Δt _{gw} 11.0 °C / 17.0 °C	Salto termico del fluido	Δt _w 3.0 °C / 5.0 °C	Fluido Tipologia fluido: Soluzione acqua-glicole propilenico Concentrazione: 25 % Calore specifico: 3.93 kJ/kgK Temp. di congelamento: -9.00 °C Massa volumica: 1016.95 kg/m³ Conduttività termica: 0.49 W/mK								
Condizioni di progetto																		
T mandata PdC	T _{out} 38.5 °C / 18.0 °C																	
Diff. temp. scambiatore	Δt _{gw} 11.0 °C / 17.0 °C																	
Salto termico del fluido	Δt _w 3.0 °C / 5.0 °C																	

Pompa di calore																			
Flusso termico annuale	Q _a 640.51 W																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Riscaldamento</th> <th>Raffrescamento</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Ore di funzionamento annuali</td> <td>τ_h 577 h</td> <td>τ_c 83 h</td> </tr> <tr> <td>COP/EER reale</td> <td>8.32</td> <td>6.60</td> </tr> <tr> <td>Temp uscente scambiatore</td> <td>ε_{wo} 0.6 °C</td> <td>ε_{wo} 28.6 °C</td> </tr> <tr> <td>Temp entrante scambiatore</td> <td>ε_{wi} -2.4 °C</td> <td>ε_{wi} 33.6 °C</td> </tr> <tr> <td>Fattore di carico parziale</td> <td>PLF_m 0.19 < 1</td> <td>PLF_m 0.06 < 1</td> </tr> </tbody> </table>			Riscaldamento	Raffrescamento	Ore di funzionamento annuali	τ _h 577 h	τ _c 83 h	COP/EER reale	8.32	6.60	Temp uscente scambiatore	ε _{wo} 0.6 °C	ε _{wo} 28.6 °C	Temp entrante scambiatore	ε _{wi} -2.4 °C	ε _{wi} 33.6 °C	Fattore di carico parziale	PLF _m 0.19 < 1	PLF _m 0.06 < 1
	Riscaldamento	Raffrescamento																	
Ore di funzionamento annuali	τ _h 577 h	τ _c 83 h																	
COP/EER reale	8.32	6.60																	
Temp uscente scambiatore	ε _{wo} 0.6 °C	ε _{wo} 28.6 °C																	
Temp entrante scambiatore	ε _{wi} -2.4 °C	ε _{wi} 33.6 °C																	
Fattore di carico parziale	PLF _m 0.19 < 1	PLF _m 0.06 < 1																	

VERIFICA POSITIVA: i dati dell'impianto sono compatibili con la tipologia di pompa di calore selezionata.

Figura 70 - Dati in input e condizioni di esercizio per la modellazione delle sonde su EC714 [58]

A questo punto, posizionandosi nella scheda "scambiatori" è possibile inserire le caratteristiche della trincea. Nel caso oggetto di studio si prevede la realizzazione di un unico scavo, posizionando le sonde

ad una distanza di un metro le une dalle altre [59]. Il terreno è stato considerato come terreno umido (conducibilità termica pari a 1,7 W/mK), e le sonde scelte sono in tubi di PE-X Classe A con diametro esterno pari a 0,032 m ed interno pari a 0,025 m. In questa configurazione, per garantire il corretto apporto di energia termica all'impianto, le sonde risultano dover avere una lunghezza pari a 223 m.

Si riportano di seguito i risultati del calcolo. In particolare, osservando i totali in **Tabella 33** si osserva un consumo annuo di elettricità pari appena a 1490 kWh per la stagione invernale di riscaldamento e poco più di 200 kWh per il raffrescamento estivo.

	<u>Riscaldamento</u>	<u>Raffrescamento</u>
Portata totale degli scambiatori	33,67 l/min	31,12 l/min
COP/EER di calcolo	8,32	6,60
Δt di calcolo	-1,9 °C	31,1 °C
Velocità fluido negli scambiatori	0,07 m/s	0,07 m/s
Numero di Reynolds	748	691
Regime fluido	Flusso laminare	Flusso laminare

Mese	t [h]	E_H [kWh _{et}]	E_C [kWh _{et}]
Gennaio	135	350,6	-
Febbraio	103	267,4	-
Marzo	65	169,5	-
Aprile	21	53,4	-
Maggio	-	-	0,3
Giugno	21	-	51,9
Luglio	45	-	109,7
Agosto	16	-	39,2
Settembre	-	-	-
Ottobre	25	64,6	-
Novembre	88	228,0	-
Novembre	88	228,0	-
Dicembre	139	360,1	-
COMPLESSIVI	577	1.493,5	201,0

Tabella 33 - Consumi annui di elettricità per il condizionamento invernale ed estivo

Il regime di scambio termico è laminare, in quanto il Numero di Reynolds¹⁵ risulta essere inferiore a 2.000. Ciò si traduce in un buon scambio termico tra il terreno e le sonde, e quindi una maggiore efficienza dell'impianto [60].

Si riporta di seguito la planimetria del piano terra con indicazione del posizionamento delle sonde e dei vari componenti dell'impianto.

¹⁵ Il Numero di Reynolds ($Re = \frac{\rho \cdot V \cdot L}{\mu}$) è un numero adimensionale che descrive il regime di flusso di un fluido ed è definito come il rapporto tra le forze inerziali (densità, velocità e lunghezza caratteristica) e le forze viscosse (viscosità dinamica). Ad un $Re < 2.000$ corrisponde un flusso laminare, mentre ad un $Re > 4.000$ un regime turbolento. Nella zona intermedia si parla di regime di transizione. Nel primo caso il calore viene trasferito in maniera uniforme e senza grandi dispersioni, mentre nel secondo caso in maniera più rapida e caotica [60].

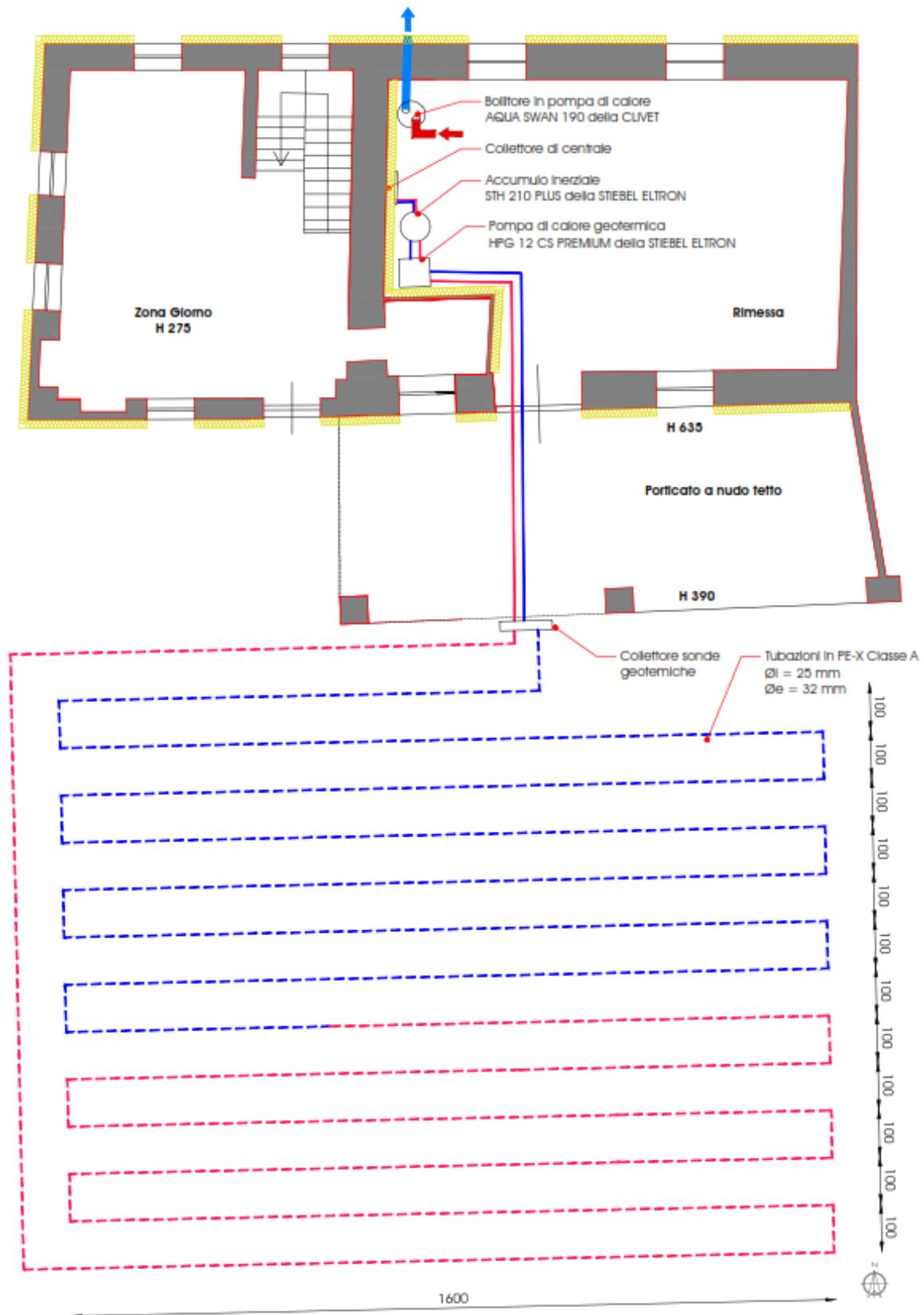


Figura 71 - Disposizione impianto a progetto

Si può ora procedere con il controllo del rispetto dei requisiti di legge previsti dalla normativa vigente. Nel caso specifico, secondo il DM 26.06.2015 [47], l'intervento si configura come ristrutturazione

importante di primo livello, ovvero un intervento che riguarda più del 50% della superficie disperdente con contestuale rifacimento dell'impianto termico. In questo devono essere positivi i seguenti controlli:

1. *Verifica termoigrometrica*: assenza di condensa superficiale e interstiziale in tutte le superfici opache disperdenti (muri, solai e pavimenti) durante tutto l'arco dell'anno.
2. *Verifica sull'area solare equivalente estiva per unità di superficie utile*: la somma delle aree equivalenti estive (rapporto tra l'area solare equivalente e la superficie utile) deve essere inferiore o uguale a 0,030. Nel progetto analizzato tale parametro risulta uguale a 0,009, pertanto la verifica risulta verificata.
3. *Controllo del coefficiente medio globale di scambio termico per trasmissione ($H't$)*: tale parametro deriva dalla somma dei coefficienti medi di scambio termico per trasmissione degli elementi dell'involucro edilizio (opaco e trasparente) rispetto alla superficie esterna lorda. A sua volta il coefficiente medio di scambio termico deriva dal prodotto tra la trasmittanza della struttura, espressa in W/m^2K , e la sua superficie. Il valore massimo di tale coefficiente è riportato nella Tabella 10 dell'Appendice A del Decreto dei Requisiti Minimi come funzione del rapporto di forma (S/V) e la zona climatica di appartenenza. Considerando l'edificio in progetto il limite per tale parametro è $0,50 W/m^2K$. Il valore ottenuto dai calcoli è di $0,25 W/m^2K$, pertanto, la verifica ha un esito positivo.
4. *Rispetto dell'indice di prestazione termica utile per riscaldamento*: l'indice di prestazione termica utile per il riscaldamento rappresenta il rapporto tra il fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione invernale e la superficie utile dell'edificio. Per ottenere un esito positivo sulla verifica, tale parametro calcolato sull'edificio reale deve essere inferiore a quello calcolato sull'edificio di riferimento, ovvero un edificio ideale che presenta la stessa forma e le stesse dimensioni dell'edificio reale, nonché lo stesso orientamento e destinazione d'uso ma i cui componenti (strutture opache e trasparenti e impianti) presentano valori di trasmittanza ed efficienza pari a quelli riportati nell'Appendice A del Decreto dei Requisiti Minimi. Per l'edificio a progetto tale parametro valutato sull'edificio reale è pari a $58,14 kWh/m^2$, mentre sull'edificio di riferimento è pari a $66,18 kWh/m^2$. La verifica risulta quindi positiva.
5. *Rispetto dell'indice di prestazione termica utile per il raffrescamento*: anche in questo caso l'indice prestazione termica utile per il raffrescamento rappresenta il rapporto tra il fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione estiva e la superficie utile del fabbricato. Il rispetto di tale requisito avviene quando il valore ottenuto sull'edificio reale è inferiore a quello ottenuto sull'edificio di riferimento. Nel caso specifico è stato ottenuto un valore pari a $5,91 kWh/m^2$ sull'edificio reale e $8,06 kWh/m^2$ su quello di riferimento, verificando quindi il rispetto di tale parametro.
6. *Rispetto dell'indice di prestazione energetica globale*: la prestazione energetica globale massima da rispettare è nuovamente quella calcolata sull'edificio di riferimento come somma degli indici di prestazione energetica per ogni servizio presente nell'edificio (riscaldamento, acqua calda sanitaria, raffrescamento, ventilazione e illuminazione). Nello specifico caso analizzato il valore ottenuto sull'edificio reale è pari a $88,86 kWh/m^2$ mentre quello sull'edificio di riferimento è pari a $145,26 kWh/m^2$. La verifica risulta quindi positiva anche per questo parametro.
7. *Verifica dell'efficienza media stagionale dell'impianto per servizi di riscaldamento, acqua calda sanitaria e raffrescamento*: l'efficienza media globale stagionale per ogni impianto

viene calcolata come rapporto tra il fabbisogno e l'energia primaria totale (rinnovabile e non rinnovabile) relativa a quell'impianto.

Inoltre, nel caso si voglia dare all'edificio la definizione di edificio N-ZEB risulta necessario rispettare, oltre ai requisiti appena descritti, la *verifica sulla temperatura critica interna del ponte termico*, ovvero l'assenza del rischio di formazione muffe in ogni ponte termico dell'edificio.

Si rimanda alla **Tabella 34** dove è riportata l'estrapolazione delle verifiche di legge per ristrutturazione importante di primo livello eseguite dal software di calcolo sul fabbricato oggetto del presente studio.

Tipo verifica	Esito	Valore ammissibile		Valore calcolato	u.m.
<i>Verifica termoigrometrica</i>	Positiva				
<i>Verifica sulla temperatura critica interna del ponte termico</i>	Positiva				
<i>Area solare equivalente estiva per unità di superficie utile</i>	Positiva	0,030	≥	0,009	-
<i>Coefficiente medio globale di scambio termico per trasmissione (H't)</i>	Positiva	0,50	≥	0,25	W/m ² K
<i>Indice di prestazione termica utile per riscaldamento</i>	Positiva	66,18	>	58,14	kWh/m ²
<i>Indice di prestazione termica utile per il raffrescamento</i>	Positiva	8,06	>	5,91	kWh/m ²
<i>Indice di prestazione energetica globale</i>	Positiva	145,26	>	88,86	kWh/m ²
<i>Efficienza media stagionale dell'impianto per servizi riscaldamento, acqua calda sanitaria e raffrescamento</i>	Positiva				

Tabella 34 - Rispetto dei requisiti di legge secondo il DM.26.06.2015 per l'edificio a progetto sottoposto a ristrutturazione importante di primo livello

Risulta inoltre necessario il rispetto dei requisiti sulle fonti rinnovabili definite dal D.lgs. n.199 del 08.11.2021 [48]

il quale prevede di garantire:

1. La *copertura totale da fonte rinnovabile*: almeno il 60% dell'energia consumata deve essere prodotta da fonte rinnovabile. Nel caso a progetto si prevede una copertura pari all'89,51% pertanto il requisito viene rispettato.
2. La *copertura di acqua calda sanitaria da fonte rinnovabile*: almeno il 60% dell'energia necessaria alla copertura del servizio dei ACS deve essere prodotta da fonte rinnovabile. Poiché nell'edificio in progetto è prevista l'installazione di una pompa di calore aria/acqua l'unico vettore energetico utilizzato per la produzione di acqua calda sanitaria è l'elettricità e siccome è presente un impianto fotovoltaico sulla copertura, buona parte della copertura per l'ACS proviene da tale impianto. La verifica viene quindi rispettata con una copertura a progetto pari al 90,58%.
3. La *verifica della potenza elettrica installata*: come anticipato in precedenza l'obbligo di produzione di energia elettrica dipende dalla superficie in pianta del terreno. Nell'edificio in progetto la potenza minima corrisponde a 2,47 kW mentre quella in progetto è pari a 3,2 kW, pertanto anche tale verifica risulta rispettata.

Tipo verifica	Esito	Valore ammissibile		Valore calcolato	u.m.
<i>Copertura totale da fonte rinnovabile</i>	Positiva	60,00	<	89,51	%
<i>Copertura acqua sanitaria da fonte rinnovabile</i>	Positiva	60,00	<	90,58	%
<i>Verifica potenza elettrica installata</i>	Positiva	2,47	<	3,20	kW

Tabella 35 - Rispetto dei requisiti di legge secondo il D.lgs. 199 del 08.11.2021 per la copertura da fonte rinnovabile

Come fatto in precedenza dopo aver modellato l'edificio nella sua configurazione ex-ante, portandosi nella sezione "Attestati energetici" del modello in progetto è possibile visualizzare l'Attestato di Prestazione Energetica (APE) comprendente le informazioni energetiche del fabbricato e le emissioni di CO₂. Si riporta di seguito l'estrapolazione dei dati maggiormente significativi.

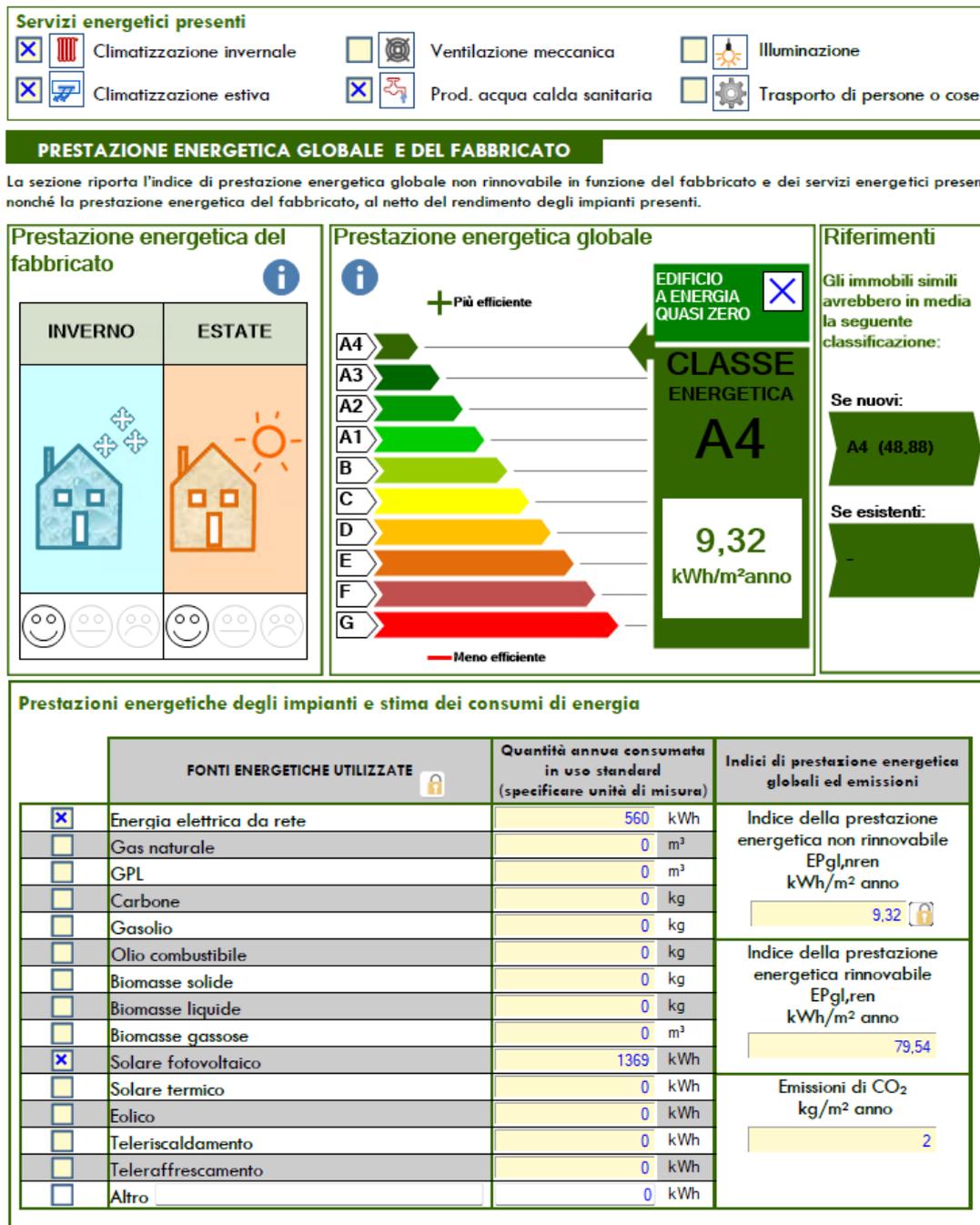


Figura 72 - Estrapolazione dati dalla simulazione APE Post Intervento, EC700

Confrontando le due situazioni ante e post-intervento presentate rispettivamente in **Figura 65** ed in **Figura 72** è possibile osservare un netto miglioramento delle prestazioni energetiche del fabbricato, con un indice di prestazione energetica che passa da 242,50 kWh/m²anno (classe E) a 9,32 kWh/m²anno (classe A4 con prestazioni NZEB), con contestuale riduzione dei consumi energetici e delle rispettive emissioni di CO₂, passando queste ultime da 60 a 2 kg/m²anno (-96,7%). Allo stesso tempo si nota un decisivo incremento delle prestazioni invernali ed estive dell'involucro: entrambe raggiungono la classe "alta", le prime partendo da una classe "bassa" e le seconde da una "media".

Infine, confrontando i dati riportati nella **Tabella 26** (situazione ex-ante) e nella **Tabella 28** (situazione in progetto) è possibile osservare una notevole riduzione dei fabbisogni dell'edificio. La potenza necessaria in riscaldamento risulta infatti passare da 20,7 kW a 5,8 kW, con una riduzione di quasi 15 kW, mentre quella in raffrescamento, valutata nel mese di picco (luglio) passa da 10,1 a 8,7 kW. Per apprezzare meglio la riduzione di tali parametri si rimanda al grafico seguente.

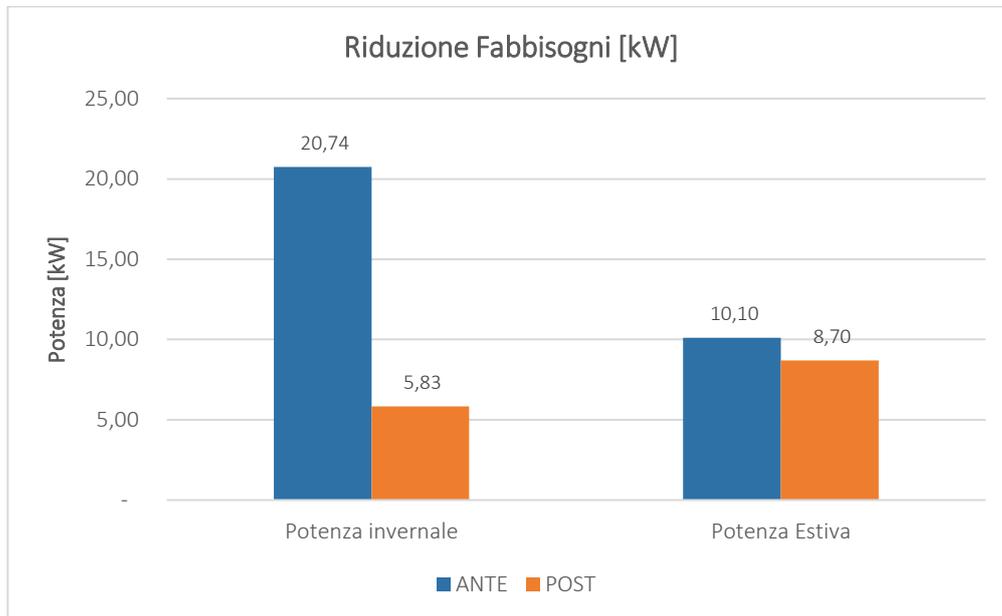


Figura 73 - Confronto dei fabbisogni richiesti [kW] tra le configurazioni ex-ante ed ex-post

4.3 Analisi economica

Il presente paragrafo ha come obiettivo quello di valutare gli aspetti economici legati alla ristrutturazione edilizia dell'edificio presentato in precedenza, in particolare si vuole valutare la convenienza dovuta all'installazione del sistema geotermico a progetto confrontandolo sia con una caldaia a condensazione accoppiata a degli split per il raffrescamento, sia con una pompa di calore aria-acqua. In entrambi gli scenari la valutazione economica tiene conto sia dell'investimento iniziale, sia dei costi di esercizio. I costi di investimento sono stati stimati mediante la stesura di un computo metrico, ovvero di un documento che contiene una lista dettagliata dei costi dei materiali e della manodopera necessari per realizzare l'intervento. Per la valutazione di tali costi è stato utilizzato il prezzario regionale¹⁶ messo a disposizione dalla Regione Piemonte [61]. Il software utilizzato per l'elaborazione del computo metrico è Primus della Acca Software S.R.L. [62].

Tutte e tre le configurazioni prevedono una serie di interventi comuni, quali la coibentazione dell'involucro e sostituzione dei serramenti al fine di ridurre i fabbisogni e l'installazione della pompa di calore e dell'impianto fotovoltaico per garantire la copertura di acqua da fonte rinnovabile come previsto dalla normativa. Sono stati inoltre considerati tutti i costi relativi alla sicurezza del cantiere, al rifacimento dell'impianto elettrico e dell'impianto termico di distribuzione con installazione di pannelli radianti a pavimento, nonché la sostituzione dei serramenti interni e la tinteggiatura delle pareti. Aggiungendo infine le spese tecniche relative alla progettazione è possibile avere un'idea di costo per

¹⁶ Il prezzario è un documento tecnico messo a disposizione da una regione o da un ente locale – come, ad esempio, la Camera di Commercio – che fornisce una serie di prezzi di riferimento per le opere edili, elettriche e meccaniche all'interno di una specifica area geografica. Tali prezzi sono stabiliti dalle condizioni locali del mercato e possono variare da regione a regione.

la ristrutturazione dell'immobile. La seguente tabella riassume le voci di spesa relative agli interventi base. Si rimanda al computo metrico in appendice per ulteriori dettagli.

SCENARIO BASE	
Sicurezza Cantiere	14.866,82 €
Cappotto esterno	37.268,01 €
Isolamento solaio sottotetto	10.207,39 €
Isolamento pavimenti	40.208,42 €
Sostituzione serramenti	34.850,44 €
Sostituzione oscuranti	8.983,06 €
Pompa di calore per ACS	3.616,21 €
Impianto termico	8.935,97 €
Impianto elettrico	8.484,30 €
Impianto idraulico	8.873,09 €
Porte Interne	4.475,65 €
Tinteggiatura interna	9.552,79 €
Impianto fotovoltaico	8.152,16 €
TOTALE INTERVENTI	198.474,31 €
IVA SU LAVORI (10%)	19.847,43 €
SPESE TECNICHE LORDE (12%)	23.816,92 €
TOTALE INTERVENTI BASE	222.291,23 €

Tabella 36 - Costi intervento "base"

Nelle seguenti tabelle sono invece riportati i costi di investimento relativi ai diversi scenari e in particolare:

- La **Tabella 37** riporta lo scenario A, Pompa di calore geotermica.
- La **Tabella 38** riporta lo scenario B, Caldaia a condensazione e split.
- La **Tabella 39** riporta lo scenario C, Pompa di calore aria-acqua.

SCENARIO A	
Scavi	5.946,17 €
Sonde	3.769,17 €
Pompa di calore geotermica	7.323,31 €
TOTALE INTERVENTI SCENARIO A	17.038,65 €
IVA SU LAVORI (10%)	1.703,87 €
SPESE TECNICHE LORDE (12%)	2.044,64 €
TOTALE SCENARIO A	20.787,15 €

Tabella 37 - Costi intervento "Scenario A: pompa di calore geotermica"

SCENARIO B

Caldaia e allaccio gas	4.227,42 €
Split	7.093,07 €
TOTALE INTERVENTI SCENARIO B	11.320,49 €
IVA SU LAVORI (10%)	1.132,05 €
SPESE TECNICHE LORDE (12%)	1.358,46 €
TOTALE SCENARIO B	13.811,00 €

Tabella 38 - Costi intervento "Scenario B: caldaia a condensazione e split"

SCENARIO C

Pompa di calore aria-acqua	13.141,01 €
TOTALE INTERVENTI SCENARIO C	13.141,01 €
IVA SU LAVORI (10%)	1.314,01 €
SPESE TECNICHE LORDE (12%)	1.576,92 €
TOTALE SCENARIO C	16.032,03 €

Tabella 39 - Costi intervento "Scenario C: pompa di calore aria-acqua"

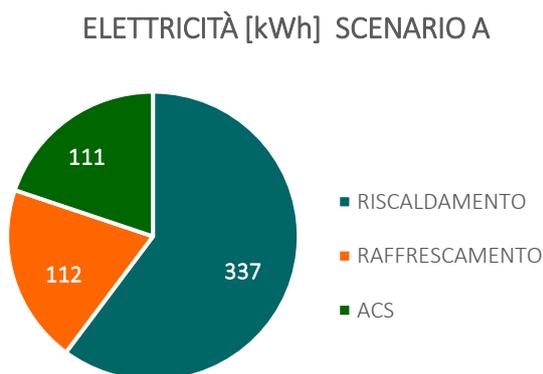
Osservando gli importi evidenziati nelle tabelle si nota che lo scenario A, pompa di calore geotermica, prevede dei costi di investimento notevolmente superiori rispetto agli altri due scenari considerati. Ciò è dovuto principalmente al costo degli scavi e delle sonde geotermiche, mentre il costo per l'installazione della caldaia accoppiata agli split si equivale abbastanza al costo di installazione della pompa di calore aria-acqua. Risulta quindi fondamentale valutare attentamente i costi di esercizio per poter stabilire quale delle tre configurazioni è più conveniente da un punto di vista economico. Nel caso delle pompe di calore i costi di esercizio corrispondono ai consumi di energia elettrica legati al compressore, agli ausiliari e alle pompe di circolazione, mentre nello scenario con la caldaia a condensazione e gli split all'energia consumata dai circolatori e dagli ausiliari si aggiungono il combustibile della caldaia (gas metano) e l'energia elettrica assorbita dagli split. Inoltre, in tutti e tre gli scenari bisogna considerare i costi annuali legati alla manutenzione delle macchine, quali pulizia dei filtri, ispezione delle pompe e del compressore, nonché alla pulizia del bruciatore e del sistema di scarico fumi nel caso della caldaia a condensazione.

Per quanto riguarda i costi dei vettori energetici, si è fatto riferimento ai valori medi riportati dall'ARERA per l'anno 2023 [63], ovvero 329,48 €/MWh per l'elettricità e 0,93357 €/Sm³ per il metano mentre per i costi annuali di manutenzione è stato utilizzato il valore medio reperito sul portale della Viessmann sia per le pompe di calore [64], che per le caldaie [65].

I consumi di elettricità e di metano, riportati nel seguito sono stati ricavati dalla simulazione energetica dell'edificio modellato su EC700. I consumi, divisi per servizio e al netto dell'energia prodotta dall'impianto fotovoltaico e autoconsumata, sono riportati nelle seguenti tabelle.

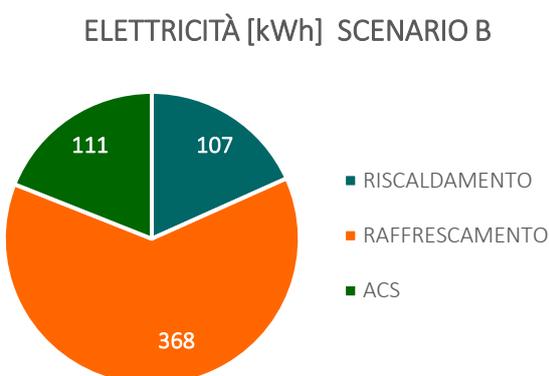
SCENARIO A	Metano [m3]	Elettricità [kWh]
Riscaldamento	-	337
Raffrescamento	-	112
ACS	-	111
TOTALE	-	560

Tabella 40 - Consumi energetici per servizio "Scenario A: pompa di calore geotermica"



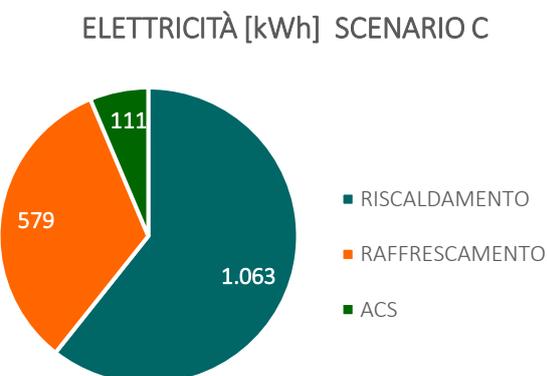
SCENARIO B	Metano [m3]	Elettricità [kWh]
Riscaldamento	806	107
Raffrescamento	-	368
ACS	-	111
TOTALE	806	586

Tabella 41 - Consumi energetici per servizio "Scenario B: caldaia a condensazione e split"



SCENARIO C	Metano [m3]	Elettricità [kWh]
Riscaldamento	-	1.063
Raffrescamento	-	579
ACS	-	111
TOTALE	-	1.753

Tabella 42 - Consumi energetici per servizio "Scenario C: pompa di calore aria-acqua"



A questo punto, avendo a disposizione i consumi energetici di ogni scenario, è possibile calcolare i costi di esercizio annuali. I valori sono riportati nella seguente tabella riassuntiva.

	Servizio	Quantità	Costo unitario	Spesa	Spesa ESERCIZIO
Scenario A Pompa di calore geotermica	Elettricità	560 kWh	0,32948 €/kWh	184,51 €	364,51 €
	Manutenzione	1	180,00 €/cad	180,00 €	
Scenario B Caldaia e Split	Gas	806 Sm ³	0,93357 €/Sm ³	752,46 €	1.095,53 €
	Elettricità	586 kWh	0,32948 €/kWh	193,08 €	
	Manutenzione	1	150,00 €/cad	150,00 €	
Scenario C Pompa di calore aria-acqua	Elettricità	1.753 kWh	0,32948 €/kWh	577,58 €	777,58 €
	Manutenzione	1	200,00 €/cad	200,00 €	

Tabella 43 - Costi di esercizio per i diversi scenari

Osservando la **Tabella 43** si nota come i costi di esercizio per la pompa di calore geotermica siano notevolmente più bassi sia rispetto a quelli per la caldaia e gli split, sia rispetto ai costi della pompa di calore aria-acqua.

Confrontando le prime due configurazioni, infatti, si nota come la spesa elettrica dello scenario B rispetto allo scenario A sia riequilibrata, in maniera significativa, dagli elevati costi per il metano, assenti nel primo scenario. Poco influenza in questo caso la differenza del costo di manutenzione: il maggior costo dello scenario A è notevolmente compensato dal basso costo dell'elettricità.

Confrontando invece gli scenari con le due pompe di calore, e quindi il cui vi è lo stesso vettore energetico, si nota come i consumi della pompa di calore aria-acqua siano più alti rispetto a quelli calcolati per la pompa di calore geotermica. Questo è dovuto al fatto che, mentre le prestazioni della prima risentono in maniera significativa delle fluttuazioni della temperatura esterna, l'efficienza della pompa di calore geotermica è circa costante durante tutto l'anno, e ciò si traduce in un minor consumo elettrico per la pompa di calore geotermica rispetto a quella aria-acqua.

Per procedere con la valutazione in termini economici dell'investimento è possibile utilizzare la metodologia del VAN (Valore Attuale Netto), ovvero uno strumento finanziario che fornisce indicazioni sulla redditività dell'investimento confrontando il valore attuale di tutti i flussi di cassa, positivi e negativi, generati dall'investimento con il costo iniziale dello stesso. Un VAN positivo è indice di un investimento che genera profitti, mentre un VAN negativo rappresenta un investimento in perdita. Più è alto il VAN e minore è il tempo di ritorno dell'investimento, con conseguente aumento dei guadagni. La definizione di VAN [66] è riportata nella seguente formula:

$$VAN = -I_0 + \sum_{j=1}^n \frac{I_j}{(1+i)^j} \quad (4.2)$$

- I_0 rappresenta l'investimento iniziale ed è considerato con il segno negativo in quanto si tratta di un flusso di cassa "uscente";
- I_j è flusso di cassa all'anno j-esimo ed è considerato con il segno positivo se "entrante", negativo se "uscente";
- i è il tasso di rendimento;
- n è il numero che rappresenta la vita utile dell'impianto.

Poiché l'intervento "base" prevede più scenari per quanto riguarda l'impianto di generazione, è possibile utilizzare la metodologia del VAN differenziale per il confronto delle diverse alternative. Tale calcolo prevede la valutazione della differenza tra i VAN a confronto. Modificando la (4.2) si ottiene:

$$VAN_{diff} = -\Delta I_0 + \sum_{j=1}^n \frac{\Delta I_j}{(1+i)^j} \quad (4.3)$$

Il tempo esatto al quale il VAN diventa pari a zero è detto Pay Back Time (PBT), ovvero il tempo al quale l'investimento risulta ripagato grazie alla somma dei flussi di cassa attualizzati.

Considerando l'impianto a servizio di un edificio residenziale è possibile ipotizzare un tempo di vita utile pari a 20 anni ($n=20$). Il tasso di rendimento, secondo i tassi attualmente in vigore [67], può essere considerato pari al 4,5% ($i=0,045$).

Si riporta di seguito la tabella riassuntiva del primo confronto, ovvero pompa di calore geotermica vs caldaia a condensazione e split.

	Soluzione A	Soluzione B	DIFFERENZA
INVESTIMENTO	243.078,38 €	236.102,23 €	+ 6.976,16 €
ESERCIZIO	364,51 €	1.095,53 €	- 731,02 €

Tabella 44 - Confronto 1: PDC Geotermica vs Caldaia a condensazione e Split

Il valore positivo sulla differenza dell'investimento sta a significare che il sistema geotermico è caratterizzato da un costo iniziale più alto rispetto alla caldaia a condensazione abbinata agli split, mentre il valore negativo sulla differenza dei costi di esercizio ne indica una minore spesa annua di gestione. Applicando la (4.3) si ottengono i valori riportati nella **Tabella 45**.

Anno	Cash Flow	VAN_{diff}
0	- 6.976,16	- 6.976,16
1	+ 699,54	- 5.276,61
2	+ 669,42	- 5.607,19
3	+ 640,59	- 4.966,60
4	+ 613,01	- 4.353,59
5	+ 586,61	- 3.766,98
6	+ 561,35	- 3.205,63
7	+ 537,18	- 2.668,45
8	+ 514,05	- 2.154,40
9	+ 491,91	- 1.662,50
10	+ 470,73	- 1.191,77
11	+ 450,46	- 741,31
12	+ 431,06	- 310,25
13	+ 412,50	+ 102,24
14	+ 394,73	+ 496,97
15	+ 377,73	+ 874,71
16	+ 361,47	+ 1.236,18

17	+ 345,90	+ 1.582,08
18	+ 331,01	+ 1.913,09
19	+ 316,75	+ 2.229,84
20	+ 303,11	+ 2.532,96

Tabella 45 – Flusso di Cassa e VAN differenziale scenario 1: PDC Geotermica vs Caldaia a condensazione e split

I valori ottenuti sono stati riportati in un grafico a barre al fine di comprendere meglio i risultati del confronto.

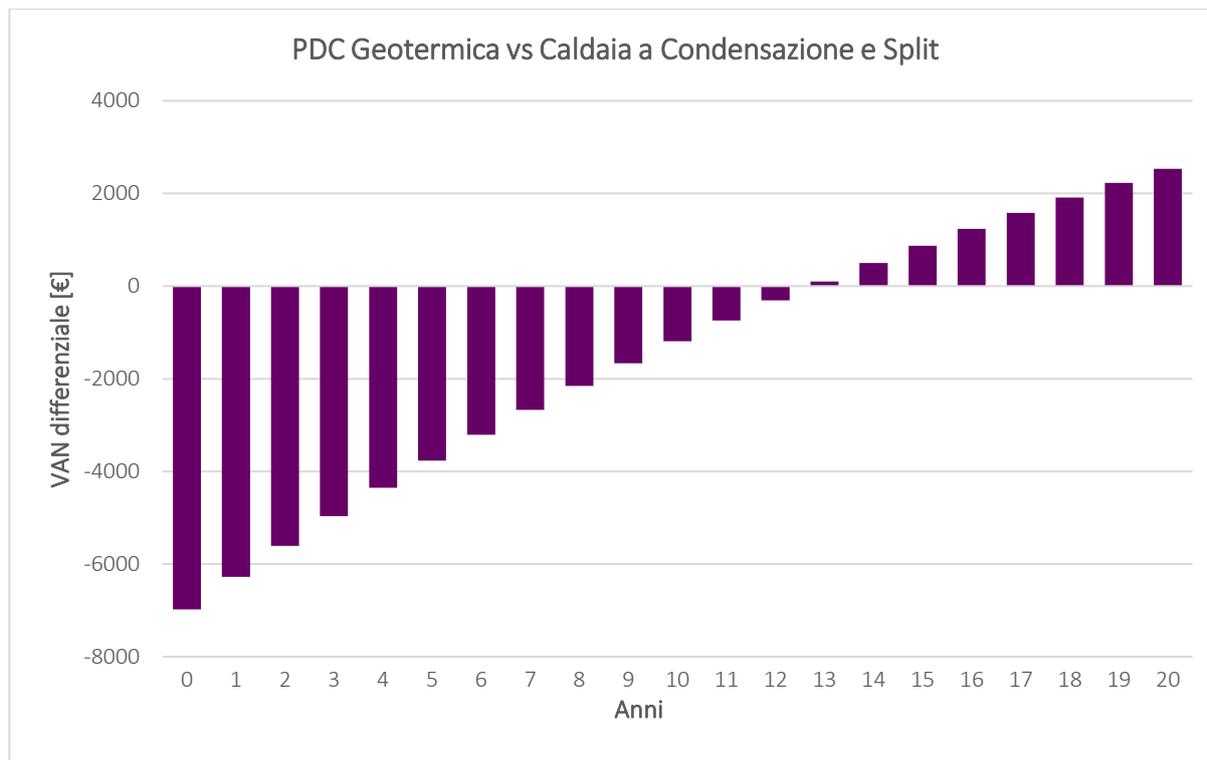


Figura 74 - VAN differenziale per PDC Geotermica vs Caldaia a Condensazione e split

Dal grafico si osserva come a cavallo tra il dodicesimo ed il tredicesimo anno di esercizio dell'impianto, quando il valore del VAN diventa positivo, la pompa di calore inizia ad essere più conveniente rispetto al sistema caldaia + split. Il momento esatto in cui ciò accade (PBT_{diff}) è pari a 12 anni e 9 mesi circa. Avendo assunto una vita utile degli impianti pari a 20 anni, è interessante osservare come al raggiungimento del ventesimo anno di esercizio la pompa di calore abbia generato un risparmio netto rispetto all'impianto con la caldaia che supera i 2.500,00 euro.

In maniera analoga è possibile effettuare il confronto tra la pompa di calore geotermica e la pompa di calore aria-acqua. I valori di spesa e di risparmio sono riportati nella **Tabella 46**.

	Soluzione A	Soluzione C	DIFFERENZA
INVESTIMENTO	244.078,38 €	237.009,16 €	+ 6.365,36 €
ESERCIZIO	364,51 €	777,58 €	- 413,07 €

Tabella 46 - Confronto 2: PDC Geotermica vs PDC Aria-Acqua

Anche in questo caso è possibile osservare un costo di investimento maggiore ed un costo di esercizio annuo minore per la pompa di calore geotermica rispetto a quella aria-acqua. Il calcolo dei NPV, applicato a tale confronto, è riportato nella **Tabella 47**.

Anno	Cash Flow	VAN _{diff}
0	-4.755,12	- 4.755,12
1	+ 395,28	- 4.359,84
2	+ 378,26	- 3.981,58
3	+ 361,97	- 3.619,16
4	+ 346,38	- 3.273,22
5	+ 331,47	- 2.941,75
6	+ 317,19	- 2.624,56
7	+ 303,54	- 2.321,02
8	+ 290,46	- 2.030,56
9	+ 277,96	- 1.752,60
10	+ 265,99	- 1.486,62
11	+ 254,53	- 1.232,08
12	+ 243,57	- 988,51
13	+ 233,08	- 755,43
14	+ 223,05	- 532,38
15	+ 213,44	- 318,94
16	+ 204,25	- 114,69
17	+ 195,45	+ 80,76
18	+ 187,04	+ 267,80
19	+ 178,98	+ 446,79
20	+ 171,28	+ 618,06

Tabella 47 - Flusso di Cassa e VAN differenziale scenario 2: PDC Geotermica vs PDC Aria-Acqua

Osservando la tabella si nota che il risparmio annuo è notevolmente inferiore rispetto allo scenario di confronto con la caldaia e gli split, ottenendo in questo caso un risparmio, per il ventesimo anno di esercizio, pari a soli 171,28€. Ciò è dovuto al fatto che a parità di condizioni dell'acqua in uscita e del tempo di funzionamento, la pompa di calore aria-acqua necessita di una maggior quantità di energia elettrica per funzionare a causa delle fluttuazioni di temperatura della sorgente calda. L'aria è infatti soggetta a variazioni di temperatura maggiori rispetto al terreno. Per lo stesso motivo anche il VAN, al ventesimo anno, è minore rispetto al confronto precedente, con un valore che è pari a 618,06€. Questo significa che l'intervento con la pompa di calore geotermica è più conveniente rispetto alla pompa di calore aria-acqua, seppure la differenza in termini di costi non sia così notevole a causa dei maggiori costi di investimento necessari per l'impianto geotermico.

Si rimanda alla **Figura 75** in cui è rappresentato l'andamento del VAN.

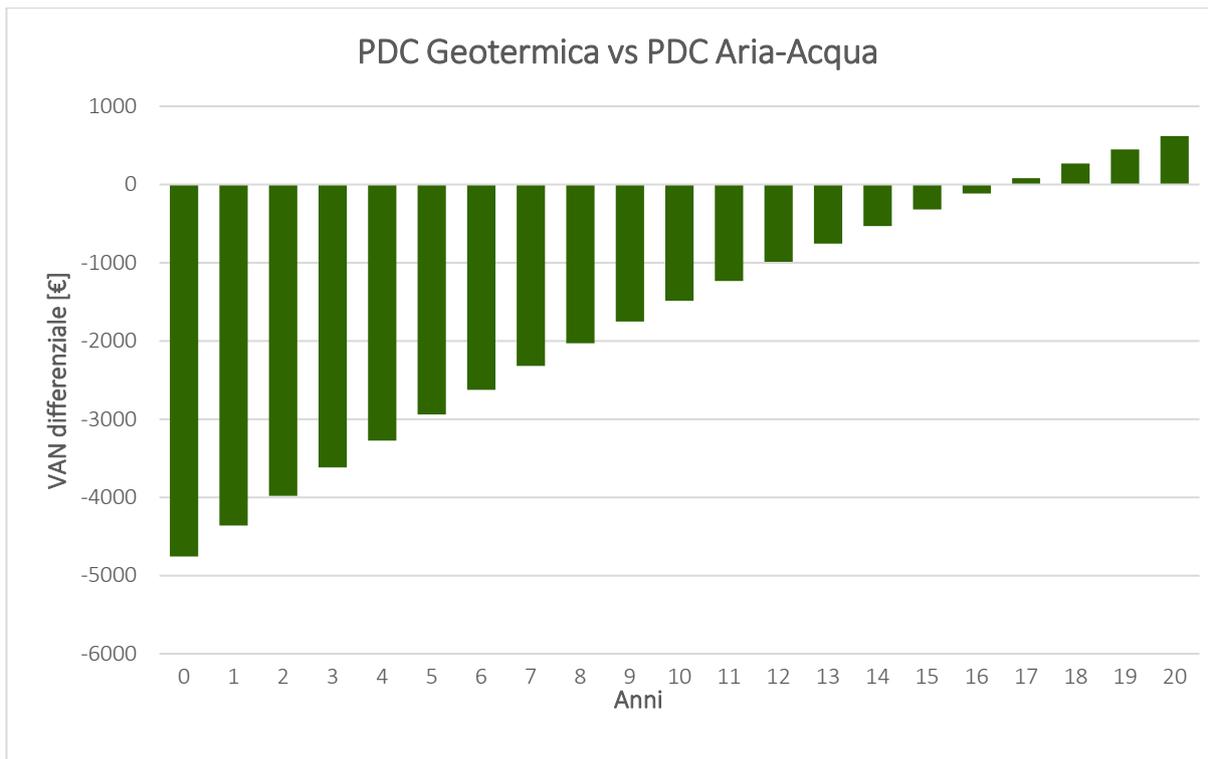


Figura 75 - VAN differenziale per PDC Geotermica vs PDC Aria-Acqua

Il tempo di ritorno dell'investimento differenziale (PBT_{diff}) è situato questa volta tra il sedicesimo ed il diciassettesimo anno, più precisamente a 16 anni e 7 mesi.

Un'ulteriore considerazione economica può essere fatta considerando l'accesso al contributo del GSE tramite il Conto Termico 2.0 [23], un mezzo attraverso il quale vengono promossi, a livello italiano, gli interventi per l'incremento dell'efficienza energetica degli edifici e la produzione dell'energia da fonti rinnovabili. Fra gli interventi agevolati vi sono sia le caldaie a condensazione, sia le pompe di calore, in funzione della zona climatica di appartenenza e delle caratteristiche delle macchine. L'accesso al contributo per le caldaie, tuttavia, è riservato solamente alle Pubbliche Amministrazioni; pertanto, l'incentivo non è erogabile a valere sul caso in progetto (Scenario B).

Per poter accedere all'incentivo, le pompe di calore devono rispettare i valori minimi di prestazione, in particolare per le pompe di calore geotermiche il COP deve essere non inferiore a 4,3 mentre per le pompe di calore aria/acqua deve essere almeno pari a 4,1. Secondo quanto riportato nelle Regole Applicative del Conto Termico 2.0 [23] l'incentivo annuo viene calcolato come:

$$I_a = E_i \cdot C_i \quad (4.4)$$

Dove:

- C_i rappresenta un coefficiente di valorizzazione dell'energia termica prodotta ed è definito dalla tabella 7 del Decreto 16/02/2016 in funzione della taglia e della tipologia di pompa di calore (per i generatori di potenza inferiore a 35 kW è pari a 0,110 €/kWh per le pompe di calore aria/acqua e 0,175 €/kWh per le pompe di calore geotermiche).
- E_i rappresenta l'energia termica incentivata prodotta in un anno, calcolata applicando la seguente relazione:

$$E_i = P_n \cdot Q_{uf} \cdot \left[1 - \frac{1}{COP} \right] \quad (4.5)$$

In cui:

- P_n è la potenza termica nominale della pompa di calore
- Q_{uf} è il coefficiente di utilizzo della pompa di calore, funzione della zona climatica di esercizio (pari a 1.700 per la zona climatica E in cui si trova l'edificio a progetto)

L'incentivo viene erogato in due annualità se la potenza del generatore è inferiore a 35 kW, in cinque annualità se superiore. Nel caso oggetto del presente studio l'incentivo sarà dunque erogato in due anni; pertanto, bisognerà moltiplicare per due il valore ottenuto applicando la (4.4).

In base alle caratteristiche delle pompe di calore a confronto (Scenario A e Scenario C) sono stati calcolati gli incentivi applicando prima la (4.5) e poi la (4.4). I valori ottenuti sono stati infine moltiplicati per due per tenere conto delle due rate erogate dal GSE. I valori sono stati riassunti nella **Tabella 48**.

	Pompa di calore Geotermica	Pompa di calore Aria-Acqua
P_n [kW]	12,75	12,28
Q_{uf} [h]	1.700	1.700
COP [-]	5,86	4,60
E_i [kWh]	17.976	16.338
C_i [€/kWh]	0,175	0,110
I_a [€]	3.145,83 €	1.797,15 €
$I_{a,tot}$ [€]	6.291,67 €	3.594,30 €

Tabella 48 - Incentivi erogabili dal GSE per le pompe di calore a progetto

Avendo a disposizione il contributo erogabile dal GSE è possibile ricalcolare i valori del VAN nei diversi scenari, in particolare i cash flow dovranno tenere conto dell'erogazione delle due rate in corrispondenza dell'anno 1 e dell'anno 2 le quali saranno pari a:

- 3.145,83 €/rata (3.145,83 – 0,00) per il primo confronto (Scenario A vs Scenario B).
- 1.348,68 €/rata (3.145,83 – 1.797,15) per secondo confronto (Scenario A vs Scenario C).

Si riportano di seguito i calcoli dei flussi di cassa, del VAN differenziale e del PBT differenziale per gli scenari di confronto, tenendo conto del contributo erogato dal GSE nelle prime due annualità di esercizio.

In particolare, nella **Tabella 49** sono riportati i valori del primo confronto, ovvero lo Scenario A (pompa di calore geotermica) rispetto allo scenario B (caldaia a condensazione e split) mentre i valori graficati sono riportati nella **Figura 76**. Si può chiaramente notare come, con il contributo del GSE, l'intervento con la pompa di calore geotermica risulti particolarmente vantaggioso rispetto alla caldaia in quanto l'incentivo erogato permette di ripagare la differenza dell'investimento in meno di due anni, con un valore attuale netto differenziale dell'intervento che sfiora i novemila euro al ventesimo anno di vita dell'impianto.

Anno	Cash Flow	VAN _{diff}
------	-----------	---------------------

0	- 6.976,16	- 6.976,16
1	+ 3.845,38	- 3.130,78
2	+ 3,815,25	+ 684,48
3	+ 640,59	+ 1.325,07
4	+ 613,01	+ 1.938,08
5	+ 586,61	+ 2.524,69
6	+ 561,35	+ 3.086,04
7	+ 537,18	+ 3.623,04
8	+ 514,05	+ 4.137,26
9	+ 491,91	+ 4.629,17
10	+ 470,73	+ 5.099,90
11	+ 450,46	+ 5.550,35
12	+ 431,06	+ 5.981,41
13	+ 412,50	+ 6.393,91
14	+ 394,73	+ 6.788,64
15	+ 377,73	+ 7.166,38
16	+ 361,47	+ 7.527,85
17	+ 345,90	+ 7.873,75
18	+ 331,01	+ 8.204,76
19	+ 316,75	+ 8.521,56
20	+ 303,11	+ 8.824,63

Tabella 49 - Flusso di Cassa e VAN differenziale scenario 1: PDC Geotermica vs Caldaia a condensazione e split con contributo GSE

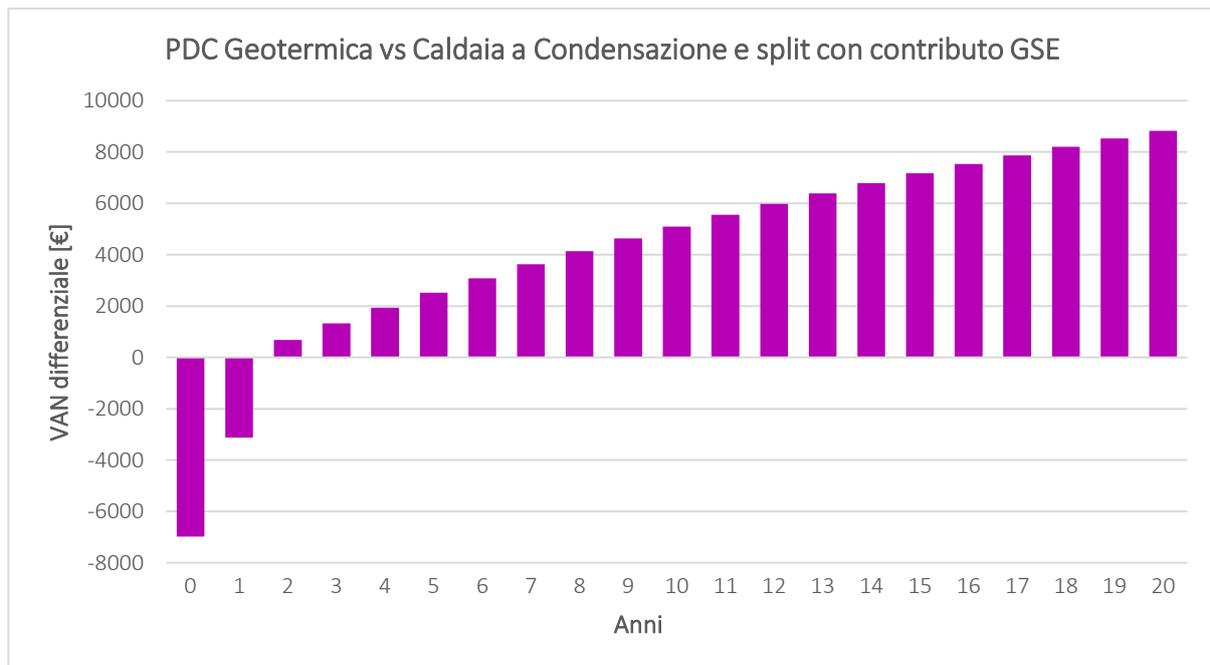


Figura 76 - VAN differenziale scenario 1: PDC Geotermica vs Caldaia a condensazione e split con contributo GSE

Anno	Cash Flow	VAN _{diff}
0	-4.755,12	- 4.755,12
1	+ 1.743,96	- 3.011,16
2	+ 1.726,94	- 1.284,21
3	+ 361,97	- 922,24
4	+ 346,38	- 575,86
5	+ 331,47	- 244,39
6	+ 317,19	+ 72,81
7	+ 303,54	+ 376,34
8	+ 290,46	+ 666,80
9	+ 277,96	+ 944,76
10	+ 265,99	+ 1.210,75
11	+ 254,53	+ 1.465,28
12	+ 243,57	+ 1.708,85
13	+ 233,08	+ 1.941,94
14	+ 223,05	+ 2.164,98
15	+ 213,44	+ 2.378,42
16	+ 204,25	+ 2.582,68
17	+ 195,45	+ 2.778,13
18	+ 187,04	+ 2.965,17
19	+ 178,98	+ 3.144,15
20	+ 171,28	+ 3.315,43

Tabella 50 - Flusso di Cassa e VAN differenziale scenario 2: PDC Geotermica vs PDC Aria-Acqua con contributo GSE

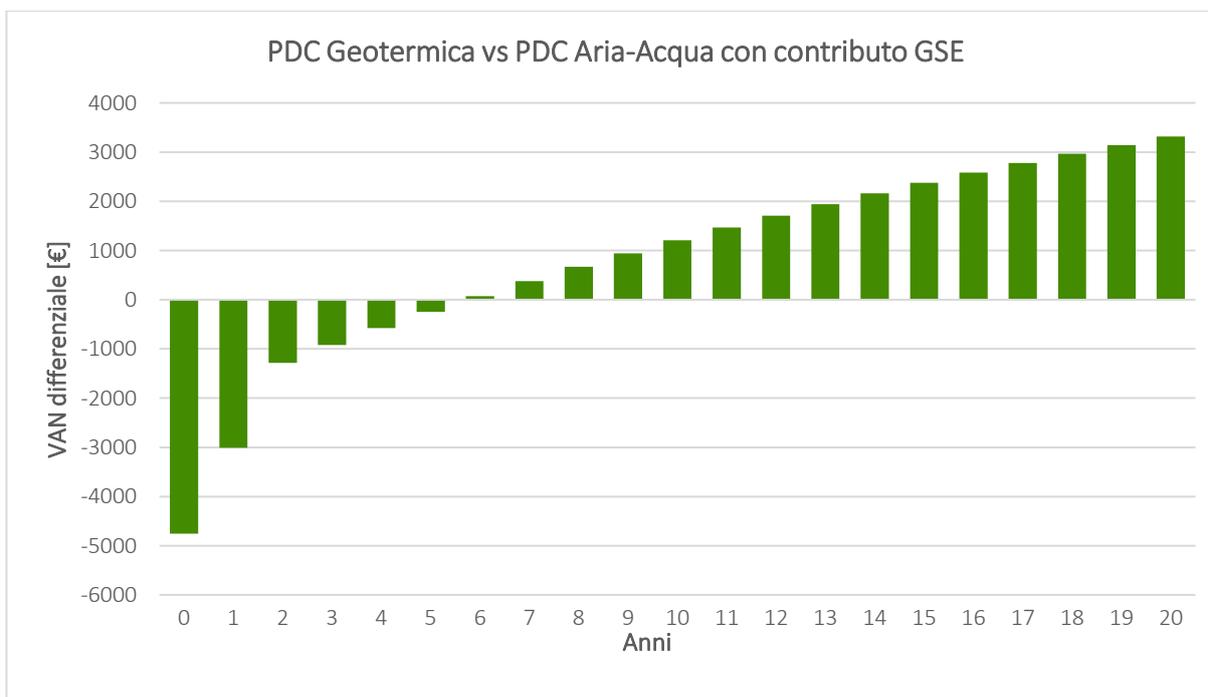


Figura 77 - VAN differenziale scenario 2: PDC Geotermica vs PDC Aria-Acqua con contributo GSE

I valori del secondo confronto, cioè lo Scenario A (pompa di calore geotermica) rispetto allo scenario C (pompa di calore aria-acqua) sono stati riportati nella precedente **Tabella 50** mentre i valori graficati nella **Figura 77**. Anche in questo caso la presenza del contributo del GSE permette una riduzione del tempo di ritorno dell'investimento differenziale, con un incremento del valore attuale netto a fine vita. Il primo parametro si riduce passando da 16 anni e 7 mesi a 5 anni e 9 mesi, mentre il secondo aumenta il vantaggio economico dell'investimento nel ventesimo anno, che passa da 618,06€ a 3.315,43€.

Tralasciando per un momento l'aspetto economico, un'ulteriore considerazione che può essere fatta per i tre scenari appena confrontati è il loro impatto ambientale in termini di emissioni di CO₂ e PM10 durante la loro vita utile di esercizio. I fattori di emissione sono stati reperiti a partire dal rapporto annuale dell'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) in collaborazione con le Agenzie Regionali per la Protezione dell'Ambiente (ARPA) "Efficiency and decarbonization indicators in Italy and in the biggest European Countries Edition 2023" [68]. I valori ottenuti sono riportati nella seguente tabella.

	CO ₂	PM10
Metano	1,927 kg/m ³	10,36 mg/m ³
Energia Elettrica	0,433 kg/kWh _{el}	8,10 mg/ kWh _{el}

Tabella 51 - Indicatori di emissione per metano ed energia elettrica [68]

Confrontando tali valori con i consumi riportati in **Tabella 40**, **Tabella 41** e **Tabella 42** si ottengono le emissioni riportate nella **Tabella 52**.

	CO ₂ kg/anno	PM10 mg/anno
SCENARIO A	242,5	4.536
SCENARIO B	1.806,9	13.097
SCENARIO C	759,0	14.199

Tabella 52 - Emissioni di CO₂ e PM10 per gli scenari analizzati

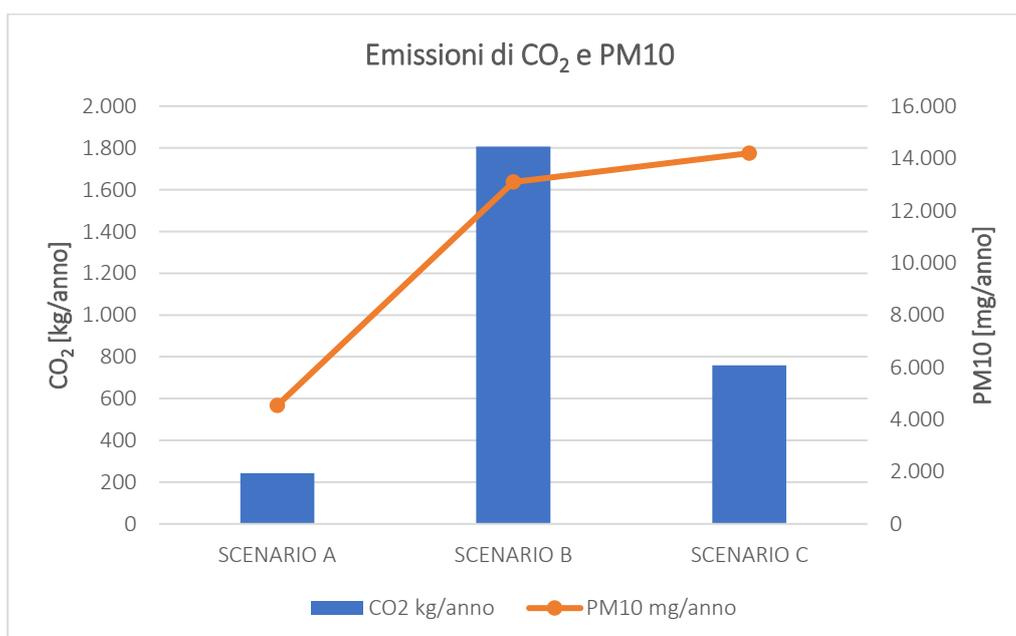


Figura 78 - Confronto emissioni di CO₂ e PM10 per i tre scenari analizzati

Confrontando le emissioni di CO₂ e PM10 per i differenti scenari analizzati si nota come lo scenario A (Pompa di calore geotermica) sia quello che comporta una minore quantità di emissioni. Rispetto alla soluzione con caldaia a condensazione e split, la pompa di calore geotermica comporta una riduzione di 1.564 kg/anno di CO₂ e 8.560 mg/anno di PM10. Rispetto invece alla soluzione con pompa di calore aria-acqua, la pompa di calore geotermica prevede minori valori di CO₂ e PM10 pari rispettivamente a 516 kg/anno e 9.663 mg/anno. Da questo confronto emerge che l'adozione della pompa di calore geotermica è una scelta molto più sostenibile da un punto di vista ambientale rispetto agli altri due scenari confrontati, contribuendo quindi alla mitigazione dei cambiamenti climatici e alla riduzione dell'inquinamento atmosferico.

5. Conclusioni

Lo studio eseguito ha consentito di dimostrare la convenienza, in termini ambientali ed economici, dell'utilizzo di una pompa di calore geotermica al fine di riscaldare e raffrescare un edificio residenziale.

Partendo dal contesto energetico nazionale ed europeo, analizzando i consumi energetici e le rispettive emissioni di CO₂, e sottolineando la necessità di favorire l'efficienza energetica degli edifici, il presente lavoro di tesi ha permesso di approfondire le potenzialità che l'energia geotermica ha da offrire per il settore residenziale.

Sono state inizialmente analizzate le varie forme di energia estraibili dal terreno, prestando particolare attenzione ai sistemi a bassa entalpia e alle configurazioni che tali sistemi possono assumere (*open* o *closed loop*) e come queste ultime si possano integrare agli elementi edilizi andando a formare quelle che sono chiamate geostrutture energetiche.

Successivamente sono state analizzate le prestazioni della pompa di calore geotermica installata presso l'Energy Center del Politecnico di Torino, le cui sonde sono state posizionate su una parete energetica, permettendo quindi di valutare le potenze in gioco ed i rendimenti durante le condizioni operative. In particolare, sono state analizzate le prestazioni delle prove di raffrescamento eseguite nel mese di giugno 2022, dalle quali è emerso un EER massimo pari a 4,2 nel periodo considerato. Lo studio è stato approfondito tramite il confronto dei valori misurati in campo sperimentale con quelli ottenuti mediante il software *CoolPack*. Con tale programma è stata inoltre effettuata un'analisi di sensitività al variare delle condizioni operative, dove è emerso che l'efficienza maggiore si ottiene mantenendo il salto di pressione tra gli 8 e i 16 bar, limitando il surriscaldamento del fluido termovettore all'ingresso del compressore e favorendone il sottoraffreddamento al condensatore.

Infine, lo studio della pompa di calore è stato applicato ad un edificio reale in provincia di Cuneo, integrando le conoscenze assimilate durante il corso di studi con quelle acquisite in fase di tirocinio e di lavoro. Scelto l'edificio di intervento, sono stati valutati i vincoli previsti dal *Piano Regolatore Generale Comunale* e dalla *Carta di Sintesi della Pericolosità Geomorfologica e dell'Idoneità all'Utilizzazione Urbanistica*, per poi calcolare, tramite il software *EC700* di Edilclima, le dispersioni del fabbricato nella sua configurazione ante intervento, permettendo quindi di stabilire le lavorazioni necessarie per la riduzione del fabbisogno energetico in accordo con la normativa vigente dettata dal D.M. 26.06.2015 (Decreto "Requisiti Minimi"). In particolare, è stata ipotizzata l'installazione di una pompa di calore geotermica per la climatizzazione invernale ed estiva del fabbricato e sono state calcolate le dimensioni delle sonde geotermiche utilizzando il software *EC714* di Edilclima. Per completare lo studio sono state effettuate sia un'analisi economica, sia uno studio delle emissioni di CO₂ e di PM10 confrontando lo scenario con l'impianto geotermico rispetto ad una caldaia a condensazione e ad una pompa di calore tradizionale (aria-acqua). Per la parte economica i costi sono stati analizzati prendendo come riferimento il *Prezzario della Regione Piemonte 2024* e ordinando le voci relative alle lavorazioni tramite *Primus* di ACCA Software. A questo punto sono stati valutati i VAN differenziali dei diversi scenari comprendendo anche la possibilità di accedere all'incentivo del *Conto Termico 2.0* previsto dal GSE per le pompe di calore, dai quali è emersa la netta convenienza dell'installazione dell'impianto geotermico rispetto alle altre tecnologie attualmente sul mercato.

In conclusione, grazie allo studio effettuato nel presente elaborato, è possibile affermare con certezza che le pompe di calore geotermiche, e in particolare quelle di tipologia closed-loop, sono particolarmente interessanti sia dal punto di vista delle prestazioni che dei costi. Il loro funzionamento, infatti, sfrutta il calore del terreno, disponibile a temperatura circa costante per tutto l'anno, per produrre calore senza influenze sostanziali dell'efficienza rispetto alle condizioni climatiche superficiali. I costi inoltre risultano confrontabili e competitivi rispetto alle altre tecnologie disponibili, senza contare

il vantaggio ambientale che deriva da questi sistemi, i quali emettono in atmosfera quantità di CO₂ e PM10 considerevolmente minori rispetto alle caldaie a gas e alle tradizionali pompe di calore aria-acqua.

Nomenclatura

Operatori

$\frac{d}{dx}$	Derivata rispetto alla generica variabile X
Δ	Differenza finita
∇	Gradiente
∇^2	Laplaciano
$\sum_{i=0}^n f(i)$	Sommatoria

Lettere e simboli

A_s	$[-]$	Ampiezza media della sinusoide
A	$[m^2]$	Area
Q	$[W]$	Calore
q	$[W/m^2]$	Calore per unità di superficie
q'''	$[W/m^3]$	Calore per unità di volume
c_p	$[J/kg \cdot K]$	Calore specifico
C_i	$[€/kWh]$	Coefficiente di valorizzazione dell'energia
COP	$[-]$	Coefficient of Performance
k	$[W/m \cdot K]$	Conducibilità termica
ρ	$[kg/m^3]$	Densità
L	$[m]$	Distanza
E	$[kWh]$	Energia
e_c	$[kJ/kg]$	Energia cinetica per unità di massa
u	$[kJ/kg]$	Energia interna per unità di massa
e_p	$[kJ/kg]$	Energia potenziale per unità di massa
EER	$[-]$	Energy Efficiency Ratio

h	$[kJ/kg]$	Entalpia
s	$[kJ/kg \cdot K]$	Entropia
n	$[-]$	Esponente della politropica
PFL	$[-]$	Fattore di carico parziale della pompa di calore
β_s	$[-]$	Fattore di smorzamento
DM	$[^{\circ}C \text{ min}]$	Gradi minuto
i	$[-]$	Gradiente idraulico
l	$[kJ/kg]$	Lavoro per unità di massa
Re	$[-]$	Numero di Reynolds
\dot{m}	$[kg/s]$	Portata massica
j	$[-]$	Porosità
Z	$[m^3/day]$	Portata di falda
P	$[kW]$	Potenza
W	$[kW_{et}]$	Potenza elettrica
p	$[Pa] \text{ o } [bar]$	Pressione
ω	$[s^{-1}]$	Pulsazione
T	$[^{\circ}C] \text{ o } [K]$	Temperatura
q	$[^{\circ}C] \text{ o } [K]$	Temperatura
t	$[s]$	Tempo
t	$[h]$	Tempo
T	$[m^2/day]$	Trasmissività dell'acquifero
l	$[W/m^2 \cdot K]$	Trasmittanza termica
V	$[m^3]$	Volume
v	$[m^3/kg]$	Volume specifico

Bibliografia e Sitografia

- [1]. **National Oceanic and Atmospheric Administration**. *2022 NOAA Science Report*. Marzo 2023
- [2]. **Raworth, K. 2021**. *Economia della ciambella: realtà sociali ed ecologiche al centro del pensiero economico*. [intervistato] Luca Crivelli e Carlo Giardinetti. 10 maggio 2021
- [3]. **Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente (ARERA)**. *Relazione Annuale Stato dei Servizi 2021*. Milano: Maggioli Editore, luglio 2022.
- [4]. **Portale "Next Generation EU"**, ultimo accesso maggio 2023.
- [5]. **Portale del Governo italiano**. *Relazione sul Piano Nazionale di Resistenza e Resilienza (PNRR)*, <https://www.governo.it/sites/governo.it/files/PNRR.pdf>, ultimo accesso maggio 2023.
- [6]. **Dipartimento Unità per l'Efficienza Energetica dell'ENEA**. *Rapporto Annuale Efficienza Energetica 2022*. Roma: ENEA, dicembre 2022.
- [7]. **Portale del Consiglio dell'Unione Europea**. *Spiegazione del piano REPowerEU*, <https://www.consilium.europa.eu/it/infographics/repowereu/>, ultimo accesso giugno 2023
- [8]. **Portale del Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE)**. *Piano per la Transizione Ecologica*, <https://www.mase.gov.it/pagina/piano-la-transizione-ecologica>, ultimo accesso maggio 2023
- [9]. **Portale del Gestore dei Servizi Energetici (GSE)**. *Rapporto Attività 2022* <https://www.gse.it/dati-e-scenari/rapporti>, ultimo accesso maggio 2023.
- [10]. **Portale dell'International Energy Agency (IEA)**. *Sezione "Paesi e Regioni", Dati e grafici*, <https://www.iea.org/countries/italy>, ultimo accesso maggio 2023.
- [11]. **Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)**. *Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change*. IPCC, 2022
- [12]. **Portale Climalteranti**. <https://www.climalteranti.it/2020/07/30/quanto-a-lungo-rimane-la-co2-in-atmosfera/>, ultimo accesso maggio 2023
- [13]. **Portale del Global Carbon Project**. <https://www.globalcarbonproject.org/>, ultimo accesso giugno 2023.
- [14]. **International Energy Agency (IEA)**. *World Energy Outlook 2022*. Francia, ottobre 2022
- [15]. **European Environment Agency (EEA)**. *Environmental Statement 2022*. Copenhagen, Maggio 2023
- [16]. **REN21 Secretariat c/o UN Environment Programme**. *Renewables 2022: Global Status Report for Buildings and Construction*. Parigi, 2022.
- [17]. **Dipartimento Unità per l'Efficienza Energetica dell'ENEA**. *Direttiva EBPD*. Roma: ENEA, giugno 2023.
- [18]. **Parlamento italiano. 2005**. *Decreto Legislativo 192/2005 del 19 agosto 2005 "Attuazione della direttiva (UE) 2018/844, che modifica la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica, della direttiva 2010/31/UE, sulla prestazione energetica nell'edilizia, e della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia"*, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Serie Generale, n.222 del 23 settembre 2005.

- [19]. **Ministero dello Sviluppo Economico, Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. 2015.** *Decreto Interministeriale del 26 giugno 2015 “Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni dei requisiti minimi degli edifici – Allegato 1: Linee guida nazionali per l’Attestazione della Prestazione Energetica degli edifici”*, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Serie Generale, n.162 del 15 luglio 2015
- [20]. **Portale Certifico.** *Zone Climatiche: Tabella A aggiornata D.P.R. 412/1993* <https://www.certifico.com/impianti/documenti-impianti/337-documenti-impianti-riservati/7099-zone-climatiche-tabella-a-aggiornata-d-p-r-412-1993>, ultimo accesso giugno 2023.
- [21]. **Agenzia Nazionale per l’Efficienza Energetica (ENEA).** *Rapporto Annuale 2022: Certificazione Energetica degli Edifici*. Roma: ENEA, novembre 2022.
- [22]. **Politecnico di Milano.** *Smart Building Report 2022*. Milano: Politecnico di Milano, 2023.
- [23]. **Portale del Gestore dei Servizi Energetici (GSE),** *Regole Applicative del Conto Termico 2.0* <https://www.gse.it/servizi-per-te/news/conto-termico-aggiornate-le-regole-applicative> ultimo accesso aprile 2024.
- [24]. **Lo Russo, S. 2021.** *Geothermal Energy: Slides del Corso*. Politecnico di Torino, A.A. 2020/2021.
- [25]. **Molnar, P. 2020** *The Dynamics of Plate Tectonics and Mantle Convection: From Wilson's Cycle to Mantle Plumes*. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2020
- [26]. **Torchio, M. F. 2018.** *Termodinamica Applicata e Trasmissione del Calore: Slides del Corso*. Politecnico di Torino, A. A. 2018/2019
- [27]. **Lund, J. W.; Boyd, T. L. 2018.** *Enhanced geothermal systems (EGS): High-enthalpy reservoirs and their potential*. Energy, 2018
- [28]. **Smirnova, O. K.; Ershov, A. P. 2020.** *Medium-Enthalpy Geothermal Systems: Advances in Exploration and Utilization*. Renewable Energy, 2020.
- [29]. **Portale Energy Education.** *Encyclopedia “Geothermal Gradient”*. https://energyeducation.ca/encyclopedia/Geothermal_gradient, ultimo accesso luglio 2023.
- [30]. **Leski, K.; Luty, P.; Gwadera, M.; Larwa, B. 2021.** *Numerical Analysis of Minimum Ground Temperature for Heat Extraction in Horizontal Ground Heat Exchangers*. 2 settembre 2021.
- [31]. **Mazzoldi, S. Nigro, G.; Voci, A. 2018.** *Fondamenti di Fisica*. Einaudi, 2018.
- [32]. **Papurello, D. 2021.** *Laboratorio di Impianti Energetici: Slides del Corso*. Politecnico di Torino, A.A. 2021/2022.
- [33]. **Parlamento italiano. 2014.** *Decreto Legislativo 102/2014 del 4 luglio 2014 “Attuazione della direttiva 2012/27/UE sull’efficienza energetica, che modifica le direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE e abroga le direttive 2004/8/CE e 2006/32/CE”*, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Serie Generale, n.165 del 18 luglio 2014.
- [34]. **Portale Geoera.** *Impianti geotermici open loop e closed loop*. <https://geoera.eu/>, ultimo accesso luglio 2023.

- [35]. **Caleffi, pubblicazione periodica di informazione professionale, 2010.** *Impianti a pompe di calore geotermiche*. Novara: Caleffi, giugno 2010.
- [36]. **Poliflash Magazine 2017.** *Con il brevetto del Politecnico di Torino "Enertun" la metropolitana può riscaldare le case*. Torino: Politecnico di Torino Magazine, novembre 2017
- [37]. **Politecnico di Torino.** *GeothermSkin prototipo di parete energetica – manuale di funzionamento e gestione*. Torino: Politecnico di Torino, 2023.
- [38]. **Baralis, M. 2020.** *Optimization of geothermal resources in urban areas*. Torino: Politecnico di Torino, luglio 2020.
- [39]. **NIBE AB Sweden, manuale di installazione, 2018.** *NIBE F1155 Pompa di calore geotermica*. Hannabadsvägen, gennaio 2018.
- [40]. **Smith, S. J. 2023.** *Global Warming Potentials for the Greenhouse Gases: A New Approach*. Atmospheric Chemistry and Physics, 2023.
- [41]. **Juel Skovrup, M.; Dindler Rasmussen, B.; Jakobsen, A.; Engedal Andersen, S. 2011.** *CoolPack tutorial. For CoolPack version 1.49*. 3 luglio 2011.
- [42]. **Google Maps, Servizio cartografico online** <https://google.com/maps/>, ultimo accesso aprile 2024.
- [43]. **Comune di Pianfei, P.R.G.C.** *Piano Regolatore Generale Comunale*, ultimo accesso aprile 2024.
- [44]. **Portale GeoPiemonte.** *Carta di sintesi della pericolosità geomorfologica e dell'idoneità all'utilizzazione urbanistica*. <https://geoportale.igr.piemonte.it/cms/>, ultimo accesso aprile 2024.
- [45]. **EDILCLIMA SRL.** *EC700 versione 12*. 29 marzo 2024.
- [46]. **UNI TS 11300.** *Prestazioni energetiche degli edifici*, ottobre 2014.
- [47]. **Ministero dello Sviluppo Economico, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. 2015.** *Decreto Interministeriale del 26 giugno 2015 "Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni dei requisiti minimi degli edifici"*, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Serie Generale, n.162 del 15 luglio 2015.
- [48]. **Parlamento italiano. 2021.** *Decreto Legislativo 199/2021 dell'8 novembre 2021 "Attuazione della direttiva (UE) 2018/2001 del Parlamento europeo del Consiglio, dell'11 dicembre 2018, sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili"*, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Serie Generale, n.285 del 30 novembre 2021.
- [49]. **Agenzia Nazionale per l'Efficienza Energetica (ENEA).** *Guida pratica alla riqualificazione energetica degli edifici*. Roma: ENEA, 2020.
- [50]. **Baldassari, C.** *Il sistema a cappotto termico: progettazione, posa in opera, diagnosi energetica*. LSWR Edizioni 2018.
- [51]. **Hermelink, A.; Manteuffel, B.; Grözinger, J.** *Minimum performance requirements for window replacement in the residential sector*. ECOFYS, 2017.
- [52]. **AUTODESK INC.** *REVIT* <https://www.autodesk.it/products/revit/>

- [53]. **De Carli, M.** *Impianti di riscaldamento e climatizzazione. Tecniche di progettazione e criteri di dimensionamento.* Maggioli editore, 2015.
- [54]. **Stiebel Eltron,** *Pompe di calore geotermiche.* <https://www.stiebel-eltron.it/it/prodotti-e-soluzioni/energie-rinnovabili/pompa-di-calore/pompe-di-calore-acqua-glicolata-acqua/hpg-i-04-15-cs-premium/hpg-i-12-cs-premium.html>, ultimo accesso aprile 2024.
- [55]. **Rossi N.** *Manuale del termotecnico,* Lavis (Trento): Ulrico Hoepli Editore S.p.A. 2014.
- [56]. **Grundfos,** *Pompe di circolazione.* <https://product-selection.grundfos.com/it/applications>, ultimo accesso aprile 2024.
- [57]. **Clivet,** *Pompe di calore per acqua calda sanitaria.* <https://www.clivet.com/acqua-calda-sanitaria-aqua>, ultimo accesso aprile 2024
- [58]. **EDILCLIMA SRL.** *EC714 versione 1.* marzo 2024.
- [59]. **Kavanaugh, S. P., Rafferty, K. D.** *Ground Source Heat Pumps: Design and Installation,* 2014
- [60]. **Munson B. R., Okiishi T. H., Huebsch W. W., Rothmayer A. P. 1990.** *Fundamentals of Fluid Mechanics,* USA: John Wiley & Sons, Inc. 2013.
- [61]. **Direzione Regionale Opere Pubbliche, Difesa del Suolo, Protezione Civile, Trasporti e Logistica. 2024.** *“Prezzario della Regione Piemonte 2024”.* Centro Stampa Regione Piemonte, marzo 2024.
- [62]. **ACCA SOFTWARE S.P.A.** *PRIMUS* <https://www.acca.it/software-contabilita-lavori>
- [63]. **ARERA.** *Costo medio della fornitura elettrica e di gas* <https://www.arera.it/dati-e-statistiche>, ultimo accesso aprile 2024
- [64]. **Viessmann, Finarelli G., luglio 2023.** *Manutenzione pompa di calore.* <https://residenziale.viessmannitalia.it/manutenzione-pompa-di-calore-come-farla-e-quando#:~:text=I%20costi%20di%20manutenzione%20di,%2015%20e%20i%2025%20euro>, ultimo accesso aprile 2024.
- [65]. **Viessmann, Ferrarese M., settembre 2023.** *Manutenzione caldaia.* <https://residenziale.viessmannitalia.it/manutenzione-caldaia-e-arrivato-il-momento>, ultimo accesso aprile 2024.
- [66]. **Leone P., Verda V., Lanzini A.,** *Thermal Design and Optimization: Slides del Corso.* Politecnico di Torino, A.A. 2019/2020.
- [67]. **Il Sole 24 ore,** *Tasso BCE* <https://mutuionline.24oreborsaonline.ilssole24ore.com/guide-mutui/tasso-bce.asp>, ultimo accesso aprile 2024.
- [68]. **ISPRA, Caputo A., maggio 2023,** *Efficiency and decarbonization indicators in Italy and in the biggest European Countries Edition 2023.* Roma, Maggio 2023.

Comune di Pianfei

Provincia di Cuneo

COMPUTO METRICO

OGGETTO: Ristrutturazione edilizia di edificio rurale sito nel Comune di Pianfei (CN) in Borgata Gariè.

Analisi dei differenti scenari per la ristrutturazione dell'impianto termico:

- **SCENARIO A:**
Pompa di calore geotermica per riscaldamento e raffrescamento;
- **SCENARIO B:**
Caldaia a condensazione per riscaldamento e split per raffrescamento;
- **SCENARIO C:**
Pompa di calore aria/acqua per riscaldamento e raffrescamento.

PREZZARIO: Regione Piemonte 2024

Num. Ord. TARFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI	
		par.ug	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE
	<u>LAVORI A CORPO</u>							
	Interventi BASE (SpCat 1) Approntamento cantiere (Cat 1) Cantiere (SbCat 8)							
1 / 5 28.A05. E10.005	RECINZIONE di cantiere realizzata con elementi prefabbricati di rete metallica e montanti tubolari zincati con altezza minima di 2,00 m, posati su idonei supporti in calcestruzzo, compreso montaggio in opera e successiva rimozione. Nolo calcolato sullo sviluppo lineare nolo per il primo mese	1,00	80,00			80,00		
	SOMMANO m					80,00	3,70	296,00
2 / 6 28.A05. E10.010	RECINZIONE di cantiere realizzata con elementi prefabbricati di rete metallica e montanti tubolari zincati con altezza minima di 2,00 m, posati su idonei supporti in calcestruzzo, compreso montaggio in opera e successiva rimozione. Nolo calcolato sullo sviluppo lineare nolo per ogni mese successivo al primo Vedi voce n° 5 [m 80.00]	1,00	5,00			400,00		
	SOMMANO m					400,00	0,46	184,00
3 / 7 28.A05. D25.00 5	BAGNO CHIMICO PORTATILE per cantieri edili, in materiale plastico, con superfici interne ed esterne facilmente lavabili, con funzionamento non elettrico, dotato di un WC alla turca ed un lavabo, completo di serbatoio di raccolta delle acque nere della capacità di almeno 200 l, di serbatoio di accumulo dell'acqua per il lavabo e per lo scarico della capacità di almeno 50 l, e di connessioni idrauliche acque chiare e scure. Dimensioni orientative 120 x 120 x 240 cm. Il WC dovrà avere una copertura costituita da materiale che permetta una corretta illuminazione interna, senza dover predisporre un impianto elettrico. Compreso trasporto, montaggio, smontaggio, preparazione della base, manutenzione e spostamento durante le lavorazioni. Compreso altresì servizio di pulizia periodica settimanale (4 passaggi/mese) e il relativo scarico presso i siti autorizzati. nolo primo mese o frazione di mese	1,00	1,00			1,00		

Num. Ord. TARFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI	
		par.ug	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE
	SOMMANO cad					1,00	234,87	234,87
4 / 8 28.A05. D25.01 0	BAGNO CHIMICO PORTATILE per cantieri edili, in materiale plastico, con superfici interne ed esterne facilmente lavabili, con funzionamento non elettrico, dotato di un WC alla turca ed un lavabo, completo di serbatoio di raccolta delle acque nere della capacità di almeno 200 l, di serbatoio di accumulo dell'acqua per il lavabo e per lo scarico della capacità di almeno 50 l, e di connessioni idrauliche acque chiare e scure. Dimensioni orientative 120 x 120 x 240 cm. Il WC dovrà avere una copertura costituita da materiale che permetta una corretta illuminazione interna, senza dover predisporre un impianto elettrico. Compreso trasporto, montaggio, smontaggio, preparazione della base, manutenzione e spostamento durante le lavorazioni. Compreso altresì servizio di pulizia periodica settimanale (4 passaggi/mese) e il relativo scarico presso i siti autorizzati. nolo per ogni mese o frazione di mese successivo al primo	1,00	5,00			5,00		
	SOMMANO cad					5,00	161,47	807,35
5 / 9 28.A20. A05.010	CARTELLONISTICA di segnalazione conforme alla normativa vigente, di qualsiasi genere, per prevenzione incendi ed infortuni. Posa e nolo per una durata massima di 2 anni. di dimensione media (fino a 50x50 cm)	1,00	5,00			5,00		
	SOMMANO cad					5,00	11,12	55,60
6 / 10 01.P24. E70.005	Nolo di argano a cavalletto con palo della portata di kg 250, compresa energia elettrica ed ogni onere connesso per il tempo di effettivo impiego, escluso l'onere del manovratore Nolo di argano (1 mese)	1,00	160,00			160,00		
	SOMMANO h					160,00	4,94	790,40
	Ponteggi (SbCat 9)							
7 / 1 01.P25.	Nolo di ponteggio tubolare esterno eseguito con tubo - giunto, compreso trasporto, montaggio,							

Num. Ord. TARFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI	
		par.ug	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE
A60.005	smontaggio, nonchè ogni dispositivo necessario per la conformita' alle norme di sicurezza vigenti, comprensivo della documentazione per l'uso (Pi.M.U.S.) e della progettazione della struttura prevista dalle norme, escluso i piani di lavoro e sottopiani da compensare a parte (la misurazione viene effettuata in proiezione verticale). Per i primi 30 giorni		50,00		7,000	350,00		
	SOMMANO m ²					350,00	19,22	6'727,00
8 / 2 01.P25. A60.010	Nolo di ponteggio tubolare esterno eseguito con tubo - giunto, compreso trasporto, montaggio, smontaggio, nonchè ogni dispositivo necessario per la conformita' alle norme di sicurezza vigenti, comprensivo della documentazione per l'uso (Pi.M.U.S.) e della progettazione della struttura prevista dalle norme, escluso i piani di lavoro e sottopiani da compensare a parte (la misurazione viene effettuata in proiezione verticale). Per ogni mese oltre al primo Vedi voce n° 1 [m ² 350.00]	1,00	2,00			700,00		
	SOMMANO m ²					700,00	3,29	2'303,00
9 / 3 01.P25. A91.005	Nolo di piano di lavoro, per ponteggi di cui alle voci 01.P25.A60 e 01.P25.A75, eseguito con tavolati dello spessore di 5 cm e/o elementi metallici, comprensivo di eventuale sottopiano, mancorrenti, fermapiedi, botole e scale di collegamento, piani di sbarco, piccole orditure di sostegno per avvicinamento alle opere e di ogni altro dispositivo necessario per la conformità alle norme di sicurezza vigenti, compreso trasporto, montaggio, smontaggio, pulizia e manutenzione; (la misura viene effettuata in proiezione orizzontale per ogni piano). Per ogni mese	3,00	50,00	1,200	3,000	540,00		
	SOMMANO m ²					540,00	3,04	1'641,60
10 / 4 28.A05. A07.005	Telo in PEAD dato in opera, per un periodo fino a 6 mesi, per contenimento materiali minuti e per protezione di ponteggi di facciata, continuo, opportunamente legato al ponteggio (almeno una legatura al m ² di telo) almeno una legatura al m ² di telo Vedi voce n° 1 [m ² 350.00]					350,00		

Num. Ord. TARFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI	
		par.ug	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE
	SOMMANO m ²					350,00	5,22	1'827,00
	Cappotto esterno (Cat 2) Opere preliminari alla posa (SbCat 1)							
11 / 11 02.P90. U05.01 0	Lavaggio semplice delle murature esterne con idropulitrice a bassa pressione senza uso di detergenti							
	Pareti vs esterno		42,00	6,500		273,00		
	Pareti vs non clim. PT		8,50	2,750		23,38		
	Pareti vs non clim. PT		6,50	2,750		17,88		
	SOMMANO m ²					314,26	14,33	4'503,35
12 / 12 01.A02. B80.010	Rimozione di parti metalliche compreso il ripristino del muro o del rivestimento Doccioni di gronda o tubi di discesa	2,00	7,00			14,00		
	SOMMANO m					14,00	4,00	56,00
13 / 13 02.P02. A42.010	Rimozione di opere in pietra, marmo e similari, quali gradini, davanzali, soglie, stipiti, di spessore: fino a 4 cm PT *(par.ug.=1,2+1,8+1,2+1,2+1+1+1+1,2+1,2) P1 *(par.ug.=1,2+1+1+1+1+1+1+1,2+0,8)	11,80 9,20	0,15 0,15			1,77 1,38		
	SOMMANO m ²					3,15	68,98	217,29
14 / 14 01.A02. B70.005	Spicconatura d'intonaco di cemento o di materiali di analoga durezza, in qualunque piano di fabbricato, compresa la discesa o la salita a terra dei materiali, lo sgombero dei detriti, computando le superfici prima della demolizione, compreso il trasporto dei detriti ad impianto di trattamento autorizzato Per superfici di m ² 0,50 ed oltre Vedi voce n° 11 [m ² 314.26]	0,20				62,85		
	SOMMANO m ²					62,85	12,19	766,14
15 / 15 02.P02. A76.010	Caricamento a mezzo ragno o silos del materiale di risulta e trasporto ad impianto di trattamento autorizzato in un raggio di 8 km, esclusi oneri di							

Num. Ord. TARFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI	
		par.ug	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE
16 / 16 CED GG005	conferimento e tributi se dovuti Vedi voce n° 13 [m² 3.15] Vedi voce n° 12 [m 14.00]	0,03 0,12				0,09 1,68	33,44	59,19
	SOMMANO m³					1,77		
17 / 17 01.A10. A10.005	Smaltimento di rifiuti derivanti da scavi, fresature e demolizioni varie escluso materiale contenente fibre di amianto, depositati in idonei siti autorizzati. Vedi voce n° 15 [m³ 1.77]	1,50				2,66	15,00	39,90
	SOMMANO t					2,66		
18 / 18 01.P09. B15.060	Rinzaffo eseguito con malta di calce dolce su pareti, solai, soffitti, travi, ecc, sia in piano che in curva, compresa l'esecuzione dei raccordi negli angoli, delle zanche di separazione tra pareti e orizzontamenti, e della profilatura degli spigoli in cemento con esclusione del gesso Per una superficie complessiva di almeno m² 1 e per uno spessore fino a cm 2 Vedi voce n° 14 [m² 62.85]					62,85	22,52	1'415,38
	SOMMANO m²					62,85		
19 / 19 03.A07. A01.005	Fornitura e posa di materiale isolante (SbCat 2) Pannelli rigidi in lana di roccia della densita' di 100 kg/m³ e lambda inferiore a 0,035 W/mK. Per l'isolamento termo-acustico di pareti e solai e trattata con resine termoindurenti, Euroclasse A1 spessore 160 mm Vedi voce n° 11 [m² 314.26]					314,26	34,94	10'980,24
	SOMMANO m²					314,26		
	Realizzazione di isolamento termico a cappotto con lastre di qualsiasi dimensione e spessore, compreso il carico, lo scarico, il trasporto e deposito a qualsiasi piano del fabbricato. Sono compresi inoltre gli oneri relativi a: incollaggio e/o tassellatura e sagomatura dei pannelli, rasatura, stesura di fissativo, applicazione del rasante a base di calce idraulica naturale steso con spatola d'acciaio, compreso fornitura e posa di rete d'armatura e di ogni altro onere necessario per dare l'opera finita a perfetta							

Num. Ord. TARFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI	
		par.ug	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE
	regola d'arte. (esclusa la sola fornitura dell'isolante) Su superfici interne ed esterne verticali Vedi voce n° 18 [m² 314.26]					314,26		
	SOMMANO m²					314,26	51,72	16'253,53
	Opere connesse (SbCat 3)							
20 / 29 01.A19. A20.015	Provvista e posa in opera di tubi pluviali, in lamiera di ferro zincato del n. 28, graffati, compreso ogni accessorio per il fissaggio Del diametro di cm 10 Vedi voce n° 12 [m 14.00]					14,00		
	SOMMANO m					14,00	23,09	323,26
21 / 30 01.P18. A60.020	Pietra di luserna (spessore costante) In lastre dello spessore di cm 3 Soglie davanzali PT *(par.ug.=1,2+1,8+1,2+1,2+1+1+1+1,2+1,2) Soglie davanzali P1 *(par.ug.=1,2+1+1+1+1+1+1+1,2+0,8)	11,80	0,40			4,72		
		9,20	0,40			3,68		
	SOMMANO m²					8,40	214,37	1'800,71
22 / 31 01.A12. H20.00 5	Posa in opera di lastre in pietra o in marmo, la cui provvista sia compensata al metro quadrato, per colonne, pilastri, architravi, stipiti, davanzali, cornici, balconi, zoccoli, gradini, traverse, montanti, piccoli rivestimenti, ecc., incluse le eventuali graffe per l'ancoraggio, l'imbottitura della pietra contro le superfici di appoggio e la sigillatura dei giunti Di qualunque dimensione e spessore, per quantitativi di almeno m² 1 Vedi voce n° 30 [m² 8.40]					8,40		
	SOMMANO m²					8,40	101,55	853,02
	Isolamento estradosso del solaio (sottotetto) (Cat 3) Opere preliminari alla posa (SbCat 1)							
23 / 20 01.P01. A30.005	Operaio comune Ore normali							

Num. Ord. TARFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI	
		par.ug	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE
24 / 21 01.A02. C20.005	Preparazione del piano di posa	1,00	1,00	4,000		4,00		
	SOMMANO h					4,00	32,59	130,36
25 / 26 02.P02. A76.010	Discesa di materiali di risulta Dal piano di carico al cortile: per ogni piano.					0,50		
	SOMMANO m ³					0,50	17,24	8,62
26 / 27 CED GG005	Caricamento a mezzo ragno o silos del materiale di risulta e trasporto ad impianto di trattamento autorizzato in un raggio di 8 km, esclusi oneri di conferimento e tributi se dovuti Vedi voce n° 21 [m ³ 0.50]					0,50		
	SOMMANO m ³					0,50	33,44	16,72
27 / 22 01.P09. A56.005	Smaltimento di rifiuti derivanti da scavi, fresature e demolizioni varie escluso materiale contenente fibre di amianto, depositati in idonei siti autorizzati. Vedi voce n° 26 [m ³ 0.50]	1,50				0,75		
	SOMMANO t					0,75	15,00	11,25
Fornitura e posa di materiale isolante (SbCat 2)								
28 / 23 03.P09.l 04.035	Pannelli in polistirene espanso estruso (XPS) con o senza pelle, resistenza a compressione pari a 300 kPa (secondo la norma UNI EN 13164), Euroclasse E di resistenza al fuoco, marchiatura CE, lambda pari a 0,038 W/mK. Per isolamento termico interno ed esterno spessore 120 mm	1,00	100,00			100,00		
	SOMMANO m ²					100,00	44,84	4'484,00
28 / 23 03.P09.l 04.035	Pannelli in fibra di legno infeltrite e stabilizzate; assemblate senza collanti chimici; resistenti al fuoco, resistenti alla compressione, traspiranti, esente da sostanze tossiche e nocive. Per l'isolamento termo-acustico di coperture, intercapedine e solai. Densità 160 Kg/m ³ . Lambda <= 0,040 W/mK Spessore 120 mm Vedi voce n° 22 [m ² 100.00]					100,00		
						100,00		

Num. Ord. TARFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI	
		par.ug	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE
	SOMMANO m ²					100,00	28,91	2'891,00
29 / 24 01.A09. G50.00 5	Posa in opera di materiali per isolamento termico (lana di vetro o di roccia, polistirolo, poliuretano, materiali simili) sia in rotoli che in lastre di qualsiasi dimensione e spessore, compreso il carico, lo scarico, il trasporto e deposito a qualsiasi piano del fabbricato Per superfici in piano e simili Vedi voce n° 22 [m ² 100.00] Vedi voce n° 23 [m ² 100.00]					100,00 100,00		
	SOMMANO m ²					200,00	7,19	1'438,00
	Opere connesse (SbCat 3)							
30 / 25 01.P16. F30.015	Pannelli OSB, resistenti all'acqua, ottenuti dal riciclaggio e dalla pressatura di lamelle in legno sovrapposte in strati con l'orientamento delle scaglie lunghe alternato. Per sotto parquet, coperture dei tetti, pavimentazione, scaffalature, piai di lavoro industriali, ecc. spessore pari a 15 mm Vedi voce n° 22 [m ² 100.00]					100,00		
	SOMMANO m ²					100,00	7,06	706,00
31 / 28 01.P01. A30.005	Operaio comune Ore normali Posa pannelli OSB	2,00	1,00	8,000		16,00		
	SOMMANO h					16,00	32,59	521,44
	Isolamento del pavimento (Cat 4) Opere preliminari alla posa (SbCat 1)							
32 / 33 01.A02. B00.010	Demolizione di pavimenti interni, in qualunque piano di fabbricato, compresa la discesa o la salita a terra dei materiali, lo sgombero dei detriti in cantiere, per superfici di m ² 0,50 ed oltre, escluso il sottofondo da computarsi a parte In ceramica							
	PT	1,00	98,40			98,40		
	P1	1,00	73,00			73,00		

Num. Ord. TARFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI	
		par.ug	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE
	SOMMANO m ²					171,40	11,04	1'892,26
33 / 34 01.A02. A40.005	Demolizione di caldaie, sottofondi in calcestruzzo non armato, in qualunque piano di fabbricato, compresa la salita o discesa a terra dei materiali, lo sgombero dei detriti; i volumi si intendono computati prima della demolizione. Con carico e trasporto dei detriti ad impianto di trattamento autorizzato. Vedi voce n° 33 [m ² 171.40]				0,050	8,57		
	SOMMANO m ³					8,57	96,48	826,83
34 / 35 01.A01. A65.010	Scavo a sezione obbligata o a sezione ristretta per posa tubazione e manufatti, in terreni sciolti o compatti, fino a 2 m di profondità rispetto al piano di sbancamento, eseguito con idonei mezzi meccanici, con eventuale intervento manuale ove occorra, esclusa la roccia da mina ma compresi i trovanti rocciosi ed i blocchi di muratura fino a 0,50 m ³ , misurato in sezione effettiva, con deposito dei materiali ai lati dello scavo stesso. Anche in presenza di acqua fino ad un battente massimo di 20 cm. PT	1,00	98,40	0,500		49,20		
	SOMMANO m ³					49,20	13,56	667,15
35 / 36 02.P02. A76.010	Caricamento a mezzo ragno o silos del materiale di risulta e trasporto ad impianto di trattamento autorizzato in un raggio di 8 km, esclusi oneri di conferimento e tributi se dovuti. Vedi voce n° 33 [m ² 171.40] Vedi voce n° 34 [m ³ 8.57] Vedi voce n° 35 [m ³ 49.20]	0,02				3,43 8,57 49,20		
	SOMMANO m ³					61,20	33,44	2'046,53
36 / 37 C ED GG005	Smaltimento di rifiuti derivanti da scavi, fresature e demolizioni varie escluso materiale contenente fibre di amianto, depositati in idonei siti autorizzati. Vedi voce n° 36 [m ³ 61.20]	1,50				91,80		
	SOMMANO t					91,80	15,00	1'377,00

Num. Ord. TARFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI	
		par.ug	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE
	Fornitura e posa di materiale isolante (SbCat 2)							
37 / 38 01.A04. B15.010	Calcestruzzo per uso non strutturale confezionato a dosaggio con cemento tipo 32,5 R in centrale di betonaggio, diametro massimo nominale dell'aggregato 30 mm, fornito in cantiere. Escluso il getto, la vibrazione, il ponteggio, la cassaforma ed il ferro d'armatura; conteggiati a parte. Eseguito con 150 kg/m ³ PT	1,00	98,40	0,060		5,90		
	SOMMANO m ³					5,90	87,31	515,13
38 / 39 01.A04. C03.010	Getto in opera di calcestruzzo cementizio eseguito direttamente da autobetoniera con apposita canaletta In strutture di fondazione Vedi voce n° 38 [m ³ 5.90]					5,90		
	SOMMANO m ³					5,90	28,46	167,91
39 / 40 01.A04. E00.005	Vibratura mediante vibratore ad immersione, compreso il compenso per la maggiore quantità di materiale impiegato, noleggio vibratore e consumo energia elettrica o combustibile Di calcestruzzo cementizio armato Vedi voce n° 39 [m ³ 5.90]					5,90		
	SOMMANO m ³					5,90	9,86	58,17
40 / 41 02.P60. O55.030	Formazione di vespaio aerato mediante il posizionamento, su piano preformato, di cupole modulari in polipropilene(PP), tipo igloo, per carichi civili, compresi il getto di calcestruzzo per il riempimento dei vuoti, il getto di calcestruzzo per la soletta superiore spessore minimo 4 cm armata con rete elettrosaldata maglia 20x20 diametro 6 mm, adattamenti e tagli del materiale, esclusi la formazione del piano di appoggio e di eventuali sistemi di aerazione, per una superficie minima d'intervento di 10 m ² : con cupole di altezza oltre 20 cm fino a 30 cm	1,00	98,40			98,40		
	SOMMANO m ²					98,40	62,84	6'183,46
41 / 42 30.P50. D10.035	Pannello termoisolante in poliuretano espanso rigido per l'isolamento termico di pareti, sottopavimenti e coperture sotto manti impermeabili a colla o a caldo, composto da							

Num. Ord. TARFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI	
		par.ug	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE
	schiuma polyiso (PIR) espansa senza l'impiego di CFC o HCFC, rivestito su entrambe le facce con velo vetro saturato, conducibilità termica 0,027÷0,024 W/mk in funzione dello spessore, massa volumica media 35 kg/m ³ , Euroclasse E di reazione al fuoco, resistenza a compressione determinata al 10% di schiacciamento > 150 kPa, dotato di Marchiatura CE conforme alla norma UNI EN13165:2012+A2:2016, rispondente ai C.A.M. (Requisiti Ambientali Minimi) secondo D.M. 11/10/2017 e dotato di dichiarazione o certificazione ambientale di prodotto relativamente al contenuto di riciclato come richiesto dal decreto MITE 23 giugno 2022 paragrafo 2.5 e 2.5.7 Spessore mm 80							
	PT	1,00	98,40			98,40		
	P1	1,00	73,00			73,00		
	A detrarre porzione su ambiente riscaldato	-1,00	42,00			-42,00		
	Sommano positivi m ²					171,40		
	Sommano negativi m ²					-42,00		
	SOMMANO m ²					129,40	30,00	3'882,00
42 / 43 01.A09. G50.00 5	Posa in opera di materiali per isolamento termico (lana di vetro o di roccia, polistirolo, poliuretano, materiali similari) sia in rotoli che in lastre di qualsiasi dimensione e spessore, compreso il carico, lo scarico, il trasporto e deposito a qualsiasi piano del fabbricato Per superfici in piano e simili Vedi voce n° 42 [m ² 129.40]					129,40		
	SOMMANO m ²					129,40	7,19	930,39
	Opere connesse (SbCat 3)							
43 / 44 01.A11. A40.015	Sottofondo per pavimenti di spessore fino a cm 15 Eseguito in conglomerato leggero a base di argilla espansa per ogni cm di spessore e per superfici di almeno m ² 0,20							
	PT	1,00	98,40		7,000	688,80		
	P1	1,00	73,00		7,000	511,00		
	P1 per livellamento altezze	1,00	42,00		8,000	336,00		
	SOMMANO m ²					1'535,80	4,63	7'110,75
44 / 45	Massetto di sottofondo isolante termico ed							

Num. Ord. TARFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI	
		par.ug	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE
30.P05. H00.00 5	acustico, costituito da conglomerato cementizio alleggerito con granulato di polimeri riciclato al 100%. Il granulato è conforme alla norma UNI 10667-14, è miscelato con curva granulometrica esclusiva e possiede certificazione delle emissioni VOC. Il sottofondo è confezionato con 150/200 kg di cemento tipo 325 per mc di granulato, possiede a maturazione avvenuta densità indicativa di 650/700 kg/mc, conducibilità termica 0,076 W/mK e classe di compressibilità CP2. Dotati di dichiarazione o certificazione ambientale di prodotto relativamente al contenuto di riciclato come richiesto dal D.M. 23 giugno 2022 paragrafo 2.5. per cm di spessore PT	1,00	98,40		6,000	590,40		
	SOMMANO m ²					590,40	2,16	1'275,26
45 / 53 01.P07. B45.006	Provista di piastrelle per pavimenti e rivestimenti in gres ceramico fine porcellanato, ottenuto da impasto di argille nobili, di tipo omogeneo a tutto spessore, privo di trattamento superficiale, inassorbente, antigelivo, altamente resistente agli attacchi fisici e chimici, con superficie a vista tipo naturale o tipo antisdrucchiolo Nei formati cm 30X30 Vedi voce n° 33 [m ² 171.40]					171,40		
	SOMMANO m ²					171,40	25,90	4'439,26
46 / 54 01.A12. B70.005	Posa in opera di pavimento eseguito in piastrelle di gres ceramico anche con fascia lungo il perimetro e anche disposto a disegni, dato in opera con malta cementizia; escluso il sottofondo o il rinzafo Per una superficie di almeno m ² 0,20 Vedi voce n° 53 [m ² 171.40] A detrarre pavimenti bagni con piastrelle *(lung.=3,5+4,5)	-1,00	8,00			171,40		
	Sommano positivi m ² Sommano negativi m ²					171,40 -8,00		
	SOMMANO m ²					163,40	32,53	5'315,40
47 / 55 01.P07. B48.006	Provista di zoccolino battiscopa in gres ceramico fine porcellanato, ottenuto da impasto di argille nobili, di tipo omogeneo a tutto							

Num. Ord. TARFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI	
		par.ug	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE
	spessore, privo di trattamento superficiale, inassorbente, antigelivo, altamente resistente agli attacchi fisici e chimici, con bordi arrotondati o a squadra, compresi i pezzi speciali (angoli e spigoli) dimensione 7,5x80mm PT - Pareti *(par.ug.=30+31+7,5) P1 - Pareti *(par.ug.=+15+15+8,5+13+16+16) PT *(par.ug.=30+7,5)	68,50				68,50		
		83,50				83,50		
		37,50				37,50		
	SOMMANO m					189,50	11,25	2'131,88
48 / 56 01.A12. B60.005	Posa in opera di zoccolino battiscopa levigati e lucidati dello spessore cm 1 altezza da cm 6 a 10, compreso la sigillatura dell'intonaco sul bordo superiore Per una lunghezza di almeno m 2 Vedi voce n° 55 [m 189.50]					189,50		
	SOMMANO m					189,50	7,33	1'389,04
	Sostituzione dei serramenti (Cat 5) Serramenti - Legno/Alluminio (SbCat 4)							
49 / 57 01.A02. C00.005	Rimozione di infissi di qualsiasi natura, in qualunque piano di fabbricato, comprese la discesa o la salita dei materiali, lo sgombrò dei detriti, il trasporto degli stessi ad impianto di trattamento autorizzato, compreso la rimozione e l'accatastamento dei vetri nel caso di serramenti, computando le superfici prima della demolizione Con una superficie di almeno m ² 0,50							
	100x140	1,00	1,40		4,000	5,60		
	130x70	1,30	0,70		4,000	3,64		
	110x150	1,10	1,50		1,000	1,65		
	110x140	1,10	1,40		1,000	1,54		
	115x235	1,15	2,35		1,000	2,70		
	110x235	1,10	2,35		1,000	2,59		
	135x130	1,35	1,60		4,000	8,64		
	SOMMANO m ²					26,36	13,81	364,03
50 / 58 C ED GG005	Smaltimento di rifiuti derivanti da scavi, fresature e demolizioni varie escluso materiale contenente fibre di amianto, depositati in idonei siti autorizzati. Vedi voce n° 57 [m ² 26.36]	0,08	1,50			3,16		
	SOMMANO t					3,16	15,00	47,40

Num. Ord. TARFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI	
		par.ug	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE
51 / 59 01.P20. M00.05 5	Telaio per serramenti esterni in legno/alluminio; sistema completo per finestre, costruito con profili in legno con un grado di umidità del 10/12% e profili in alluminio lega 6060 UNI 3569 verniciato, comprensivo di profili fermavetro, gocciolatoio, ferramenta, serratura e maniglia; trasmittanza termica dei telai $U_f = <1,8$ e $=>1,4$ W/m ² K (UNI EN ISO 10077-2). (Per telai con diversa trasmittanza termica U_f , vedere 01.P20.M40) finestra a due ante anta/ribalta; di superficie fino a 3,5 m ²							
		100x140	1,00	1,40		4,000	5,60	
		130x70	1,30	0,70		4,000	3,64	
		110x150	1,10	1,50		1,000	1,65	
		110x140	1,10	1,40		1,000	1,54	
		135x130	1,35	1,60		4,000	8,64	
	SOMMANO m ²					21,07	544,20	11'466,29
52 / 60 01.P20. M10.04 5	Telaio per serramenti esterni in legno/alluminio; sistema completo per portefinestre, costruito con profili in legno con un grado di umidità del 10/12% e profili in alluminio lega 6060 UNI 3569 verniciato, comprensivo di profili fermavetro, gocciolatoio, ferramenta, serratura e maniglia; trasmittanza termica dei telai $U_f = <1,8$ e $=>1,4$ W/m ² K (UNI EN ISO 10077-2). (Per telai con diversa trasmittanza termica U_f , vedere 01.P20.M40) portafinestra a due ante anta/ribalta; di superficie fino a 3,5 m ²							
		115x235	1,15	2,35		1,000	2,70	
		110x235	1,10	2,35		1,000	2,59	
	SOMMANO m ²					5,29	558,45	2'954,20
53 / 61 01.P20. M40.01 5	Variazione del prezzo di telai per serramenti esterni in legno/alluminio 01.P20.M00, 01.P20.M10, 01.P20.M20 e 01.P20.M30 incremento per telaio per finestre e portefinestre scorrevoli con trasmittanza termica $U_f = <1,4$ e $=>1,0$ W/m ² K (UNI EN ISO 10077-2). 01.P20.M20 e 01.P20.M30 (percentuale del 10 %) Vedi voce n° 59 [m ² 21.07] Vedi voce n° 60 [m ² 5.29]							
							21,07	
							5,29	
	SOMMANO					26,36	55,13	1'453,23
54 / 62	Adeguamento nodo secondario e posa							

Num. Ord. TARFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI	
		par.ug	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE
01.A17. A90.005	serramento a tenuta all'aria su foro preesistente con adattamento del telaio per correzione ponti termici compreso nastri autoespandenti e schiuma poliuretana Vedi voce n° 57 [m² 26.36]					26,36		
	SOMMANO m²					26,36	102,21	2'694,26
55 / 63 01.A17. A85.005	Provista e posa in opera di controtelaio ad "L" in OSB3 (Oriented Strand Board) per serramento, con quarto lato per adeguamento nodo primario e correzione ponti termici compreso nastri autoespandenti e schiuma poliuretana . (par.ug.=+(1*2)+(1,4*2)) (par.ug.=(1,3*2)+(0,7*2)) (par.ug.=(1,1*2)+(1,5*2)) (par.ug.=(1,1*2)+(1,4*2)) (par.ug.=(1,15*2)+(2,35*2)) (par.ug.=(1,1*2)+(2,35*2)) (par.ug.=(1,35*2)+(1,60*2)) (par.ug.=(1,3*2)+(2,30*2)) (par.ug.=(1,8*2)+(2,30*2))	4,80 4,00 5,20 5,00 7,00 6,90 5,90 7,20 8,20			4,000 4,000 1,000 1,000 1,000 1,000 4,000 1,000 1,000	19,20 16,00 5,20 5,00 7,00 6,90 23,60 7,20 8,20		
	SOMMANO m					98,30	54,50	5'357,35
56 / 64 01.A17. L00.005	Posa in opera di serramenti esterni, finestre e portefinestre, completi di vetrata isolante e sistema telaio in legno/alluminio o in legno/pvc/alluminio Per qualsiasi dimensione, battenti e tipo di apertura Vedi voce n° 57 [m² 26.36]					26,36		
	SOMMANO m²					26,36	47,72	1'257,90
	Vetrature isolanti (SbCat 5)							
57 / 65 01.P20. B04.003	Vetrature isolanti tipo vetrocamera con basso emissivo; formate da due lastre di vetro, normale o stratificata, con interposta intercapedine d'aria o gas; complete di profilati distanziatori, giunti elastici, sali disidratanti etc.; i vetri antieffrazione sono costituiti da due lastre con interposta pellicola di polivinilbutirale (PVB). (Per vetri con altre caratteristiche vedere 01.P20.B06) 4+4.1(PVB 0,38)/15/4+4.1(PVB0,76) B.E. (basso emissivo) + argon Ug=1,0 W/m²K - Rw(C;Ctr) = 38(-2;-6)dB Vedi voce n° 64 [m² 26.36]					26,36		

Num. Ord. TARFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI	
		par.ug	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE
	SOMMANO m ²					26,36	148,42	3'912,35
	Portoncini termici (SbCat 6)							
58 / 71 01.A02. C00.005	Rimozione di infissi di qualsiasi natura, in qualunque piano di fabbricato, comprese la discesa o la salita dei materiali, lo sgombrò dei detriti, il trasporto degli stessi ad impianto di trattamento autorizzato, compreso la rimozione e l'accatastamento dei vetri nel caso di serramenti, computando le superfici prima della demolizione Con una superficie di almeno m ² 0,50							
	130x230	1,30	2,30		1,000	2,99		
	130x230	1,80	2,30		1,000	4,14		
	SOMMANO m ²					7,13	13,81	98,47
59 / 72 CED GG005	Smaltimento di rifiuti derivanti da scavi, fresature e demolizioni varie escluso materiale contenente fibre di amianto, depositati in idonei siti autorizzati. Vedi voce n° 71 [m ² 7.13]	0,08	1,50			0,86		
	SOMMANO t					0,86	15,00	12,90
60 / 73 01.P13. Q05.00 5	Porte pedonali esterne blindate ad un battente, con marcatura CE (UNI EN 14351-1); antieffrazione Classe 3 (RC3), norma ENV 1627; con trasmittanza termica complessiva Ud <= 1,30 W/m ² K (UNI EN ISO 10077-1 e 2), Permeabilità all'aria Classe 3 (UNI EN 12207, UNI EN 1026); costituita con telaio e anta in lamiera di acciaio e guarnizioni perimetrali, coibentata internamente e con rivestimenti su entrambi i lati, con isolamento termoacustico, pannellatura in legno e rivestimento esterno in legno o alluminio; completa di accessori, falsotelaio, serratura di sicurezza, maniglia interna ed esterna. (Per porte con diversa trasmittanza termica complessiva e finitura, vedere 01.P13.Q10) porta di dimensione standard di larg. mm. 800/850/900 e altezza mm. 2100/2300, con finitura in pannelli di legno liscio Vedi voce n° 71 [m ² 7.13]					7,13		
	SOMMANO m ²					7,13	676,25	4'821,66

Num. Ord. TARFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI	
		par.ug	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE
61 / 74 01.A17. C10.005	Posa in opera porte esterne blindate, con marcatura CE ,con telaio in lamiera di acciaio di qualunque forma,dimensione e numero di battenti, con isolamento termoacustico idoneo alla normativa, pannellatura in legno e rivestimento esterno in legno o alluminio; completa di accessori, falso telaio, serratura di sicurezza, maniglia interna ed esterna Per qualsiasi tipo di legname Vedi voce n° 73 [m² 7.13]					7,13		
	SOMMANO m²					7,13	57,56	410,40
Sostituzione degli oscuranti (Cat 6) Persiane (SbCat 7)								
62 / 66 01.A02. C00.005	Rimozione di infissi di qualsiasi natura, in qualunque piano di fabbricato, comprese la discesa o la salita dei materiali, lo sgombrò dei detriti, il trasporto degli stessi ad impianto di trattamento autorizzato, compreso la rimozione e l'accatastamento dei vetri nel caso di serramenti, computando le superfici prima della demolizione Con una superficie di almeno m² 0,50							
	100x140	1,00	1,40		4,000	5,60		
	110x150	1,10	1,50		1,000	1,65		
	110x140	1,10	1,40		1,000	1,54		
	115x235	1,15	2,35		1,000	2,70		
	110x235	1,10	2,35		1,000	2,59		
	135x130	1,35	1,60		4,000	8,64		
	SOMMANO m²					22,72	13,81	313,76
63 / 67 CED GG005	Smaltimento di rifiuti derivanti da scavi, fresature e demolizioni varie escluso materiale contenente fibre di amianto, depositati in idonei siti autorizzati. Vedi voce n° 66 [m² 22.72]	0,08	1,50			2,73		
	SOMMANO t					2,73	15,00	40,95
64 / 68 01.P13. B50.005	Persiane ad una o due ante battenti e lamelle in alluminio UNI 6060 per finestre e/o porte finestre, a doppia battuta o battuta a muro, guarnizioni di battuta interna ed esterna, con telaio perimetrale o con i battenti ancorati direttamente alla muratura; completa di							

Num. Ord. TARFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI	
		par.ug	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE
	accessori di chiusura con agganci in alto e in basso e profilo che sormonta in altezza l'incontro dei pannelli a lamelle fisse Vedi voce n° 66 [m² 22.72]					22,72		
	SOMMANO m²					22,72	220,61	5'012,26
65 / 69 01.P13. B95.005	Maggiorazioni per persiane a lamelle in alluminio o in pannelli scuri in doghe di alluminio estruso per finestre e/o portefinestre, di cui alle voci 01.P13.B50, 01.P13.B60, 01.P13.B70, 01.P13.B80, 01.P13.B85, 01.P13.B90. Colori RAL (maggiorazione fissa)	1,00	12,00			12,00		
	SOMMANO cad					12,00	234,09	2'809,08
66 / 70 01.A18. H00.00 5	Posa in opera di persiane a lamelle ad ante in alluminio per serramenti esterni Ad ante battenti Vedi voce n° 68 [m² 22.72]					22,72		
	SOMMANO m²					22,72	35,52	807,01
	Pompa di calore ACS (Cat 7) Pompa di calore ACS (SbCat 19)							
67 / 103 01.P01. A05.005	Operaio 4° livello Ore normali Esecuzione di carotaggi per espulsione aria. Diametro 160 mm	1,00	1,00			1,00		
	SOMMANO h					1,00	41,50	41,50
68 / 104 03.P13. L15.005	Scalda acqua (boyler) a pompa di calore aria-acqua per la produzione di acqua calda sanitaria per installazione a basamento, con coibentazione in poliuretano (espanso o schiumato), funzionante con gas R134a, circuito frigorifero con compressore di tipo Scroll e ventilatore radiale; funzione di sbrinamento, alimentazione elettrica 230 V/1/50 Hz, resistenza elettrica supplementare da almeno 1,5kW: Secondo EN 16147 resa termica almeno 1820 W e COP > 3.10, volume di accumulo 200L Fornitura di bollitore in pompa di calore per	1,00	1,00			1,00		

Num. Ord. TARFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI	
		par.ug	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE
	produzione acqua calda sanitaria capacità 200l, comprese pompa di circolazione e tubazioni							
	SOMMANO cad					1,00	3'574,71	3'574,71
	Impianto termico (Cat 8) Pavimento radiante (SbCat 10)							
69 / 46 03.P13. C01.020	Sistema radiante a pavimento costituito da tubi flessibili in polietilene ad alta densità reticolato con barriera antiossigeno diametro 17x2 mm, alloggiati su pannelli isolanti in polistirene espanso sagomato spessore isolante 30 mm,inclusi graffe, strisce isolanti di bordo, additivo termofluidificante pari a circa 0,2 l/m ² , rete elettrosaldata antiritiro diametro filo 2 mm Interasse di posa dei tubi fino a 10 cm							
	PT	1,00	45,00			45,00		
	P1	1,00	73,00			73,00		
	SOMMANO m ²					118,00	45,17	5'330,06
70 / 47 03.A12. C01.005	Posa in opera di sistema a pavimento radiante con pannelli in polistirene: posa cornice perimetrale, posa, accoppiamento e taglio dei pannelli isolanti, stesura della tubazione, stesura e fissaggio della rete elettrosaldata antiritiro, addizionamento del fluido termofluidificante all'impasto di calcestruzzo per il massetto Aumento sui prezzi dell'art. 03.P13.C.01 (percentuale del 25 %) Vedi voce n° 46 [m ² 118.00]							
	SOMMANO					118,00		
						118,00	0,00	0,00
71 / 48 05.P67. A70.010	Collettori complanari simmetrici derivazione di entrata e uscita complanari con il medesimo numero di derivazioni sui due lati di rame attacchi colonna a manicotto. 12 derivaz. (6x6) 6 derivazioni su ciascun lato. Fornitura di collettore di distribuzione impianto di riscaldamento							
	SOMMANO cad	1,00	2,00			2,00		
						2,00	148,86	297,72
72 / 49 05.P67.	Cassette da incasso per collettori complanari di lamiera zincata sportello di lamiera verniciata							

Num. Ord. TARFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI	
		par.ug	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE
A40.010	bloccabile ad incastro e con chiave: 25x50 Vedi voce n° 48 [cad 2.00] SOMMANO cad					2,00		
						2,00	71,25	142,50
73 / 50 01.P08. L65.030	Tubazioni in metalplastico multistrato, per condotte a pressione (pressione d'esercizio 10 bar) d'acqua potabile, composte da tubo interno in polietilene reticolato, strato intermedio in alluminio e strato esterno in polietilene nero ad alta densità tubo diam. 26 mm in rotoli da m 50 Fornitura di tubo multistrato coibentato per collegamento da collettore in centrale termica a collettore di distribuzione SOMMANO m	2,00	6,00		2,000	24,00		
						24,00	13,92	334,08
74 / 51 01.A19. E12.005	Posa in opera di tubazione in metal-plastico multistrato, per condotte a pressione per acqua potabile, compresa la posa di raccordi e pezzi speciali occorrenti. il fissaggio dei tubi ai raccordi vari deve avvenire, previa sbavatura, tramite collegamento a pressione effettuato con idonea attrezzatura Per diametri esterni da mm 16 a mm 26 Vedi voce n° 50 [m 24.00] SOMMANO m					24,00		
						24,00	9,86	236,64
75 / 52 01.P01. A05.005	Operaio 4° livello Ore normali Opere murarie necessarie per l'installazione dei collettori di distribuzione per l'impianto di riscaldamento SOMMANO h	1,00	2,00			2,00		
						2,00	41,50	83,00
	Regolazione della temperatura (SbCat 20)							
76 / 105 06.A08. A08.010	F.O. Fornitura in opera di Termostato con sonda separata, con 1 o 2 contatti in scambio, portata fino a 16 A a 220 V, circuito di alimentazione in corrente continua o alternata e per qualsiasi tensione di funzionamento.compreso ogni accessorio per la posa ed i collegamenti elettrici. F.O. di cronotermostato programmabile Fornitura e posa di termostato di zona					2,00		

Num. Ord. TARFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI	
		par.ug	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE
	SOMMANO cad					2,00	241,50	483,00
	Centrale termica (SbCat 22)							
77 / 119 05.P57. G70.01 5	Tubi mannesmann neri UNI 8863 serie media, peso secondo tabelle uni Per diametro sino a 3/4"							
	Collettore in CT	1,00	3,00			3,00		
	SOMMANO kg					3,00	4,66	13,98
78 / 120 D IT DA000 d	Tubazione di distribuzione in acciaio nero senza saldatura, serie MEDIA secondo UNI EN 10255, fornita in opera a perfetta regola d'arte mediante saldatura ossiacetilenica, posata in vista o sotto traccia, compresa incidenza di due riprese di vernice antiruggine, taglio e preparazione superfici, raccorderia a saldare, materiale da saldatura, prova idraulica, spese generali, utili d'impresa ed ogni altro onere. (prezzo al m calcolato con un incidenza di un raccordo ogni 8 m e tre saldature (esclusi ancoraggi, staffe e opere murarie) ø 1" diametro nominale 25 Peso 2,20 kg/m Fornitura e posa di tubazioni di collegamento ad impianto termico in acciaio zincato, conteggiato sul diametro maggiore	2,00	10,00			20,00		
	SOMMANO m					20,00	12,30	246,00
79 / 121 05.P70. B40.005	Provvista e posa in opera di rivestimento isolante coibente di tubazioni eseguito con guaina tipo armaflext avente caratteristiche fisico tecniche e comportamento al fuoco di classe 1, certificate, e fasciatura in plastica rigida tipo isogenopax Diametro fino a mm 34 Vedi voce n° 120 [m 20.00]					20,00		
	SOMMANO m					20,00	17,77	355,40
80 / 122 01.P08. M65.00 5	Prese a staffa con rinforzo inox per tubazioni in polietilene PE nero, PN 6, PN 10 diam. ester. mm 32-accoppiamenti 1/2"-3/4"-1"	2,00	10,00			20,00		

Num. Ord. TARFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI	
		par.ug	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE
	SOMMANO cad					20,00	3,02	60,40
81 / 123 01.P22. C89.015	Valvole a sfera in ottone, sabbiate e cromate, con guarnizioni in p.t.f.e. Da 3/4" - mm 20	2,00	10,00			20,00		
	SOMMANO cad					20,00	10,44	208,80
82 / 124 12.P15. A48.005	Fornitura e posa in opera di circolatore singolo per impianti di acqua calda sanitaria, rotore bagnato, senza tenuta meccanica, cuscinetti lubrificati dal liquido pompato, attacchi filettati a sede piana per piccole volumetrie, con regolazione a tre velocità, 1 x 230 V, compreso di raccorderia, guarnizioni, valvole di intercettazione, smontaggio e demolizione del vecchio circolatore e delle saracinesche, oneri per la sicurezza. [Note: Incidenza della manodopera presunta: 6%] DN 20 Q=1-3,7 m ³ /h H=4,8-1,5 m P=90 W In=0,4 A	1,00	2,00			2,00		
	SOMMANO cad					2,00	474,17	948,34
83 / 134 05.P59. H40.01 5	Filtri a y in ghisa flangiati pn 16 Dn 25	1,00	1,00			1,00		
	SOMMANO cad					1,00	48,45	48,45
84 / 135 05.P59. F90.010	Termometro a quadrante a carica di mercurio con bulbo ad immersione, sia a gambo posteriore che radiale Diametro 100	1,00	2,00			2,00		
	SOMMANO cad					2,00	73,80	147,60
	Impianto elettrico (Cat 9) Impianto elettrico (SbCat 11)							
85 / 75 NP2	Impianto elettrico							

Num. Ord. TARFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI	
		par.ug	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE
	PT	1,00	98,40		2,750	270,60		
	P1	1,00	73,00		2,750	200,75		
	SOMMANO mc					471,35	18,00	8'484,30
	Impianto idraulico - bagni (Cat 10) Impianto idraulico (SbCat 12)							
86 / 84 01.P08. L65.030	Tubazioni in metalplastico multistrato, per condotte a pressione (pressione d'esercizio 10 bar) d'acqua potabile, composte da tubo interno in polietilene reticolato, strato intermedio in alluminio e strato esterno in polietilene nero ad alta densità tubo diam. 26 mm in rotoli da m 50 Fornitura di tubazione per collegamento impianto idrico-sanitario *(lung.=12+4*3+(4+3)*3)	1,00	45,00			45,00		
	SOMMANO m					45,00	13,92	626,40
87 / 85 01.A19. E12.005	Posa in opera di tubazione in metal-plastico multistrato, per condotte a pressione per acqua potabile, compresa la posa di raccordi e pezzi speciali occorrenti. il fissaggio dei tubi ai raccordi vari deve avvenire, previa sbavatura, tramite collegamento a pressione effettuato con idonea attrezzatura Per diametri esterni da mm 16 a mm 26 Vedi voce n° 84 [m 45.00]					45,00		
	SOMMANO m					45,00	9,86	443,70
88 / 86 01.A19. H05.00 5	Formazione di punto di adduzione acqua calda e/o fredda eseguito con impiego di tubazioni in metalplastico multistrato tipo geberit e raccorderia in ottone, per alimentazione punti acqua isolati o apparecchi igienico sanitari di qualsiasi natura e dimensione ivi compreso le vaschette di cacciata. Il prezzo considera uno sviluppo reale della tubazione di alimentazione del punto di adduzione non superiore a m 5 a partire dalla saracinesca posta a valle della tubazione principale ed inclusa nell'analisi, o dal boiler in caso di alimentazione diretta. Per distanze superiori a m 5 verra' compensato a parte il tratto di tubazione eccedente. L'impianto dovra' essere dato ultimato, perfettamente funzionante e pronto all'allacciamento all'apparecchiatura igienico							

Num. Ord. TARFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI	
		par.ug	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE
	sanitaria di riferimento. Il prezzo comprende le seguenti lavorazioni: esecuzione di tutte le opere murarie occorrenti ivi compreso le tracce a muro e relativi ripristini murari, incluse le provviste ed i mezzi d'opera occorrenti; opere da idraulico, incluse tutte le provviste ed i mezzi d'opera occorrenti; prova idraulica di tenuta prima del ripristino della muratura; sgombero e trasporto del materiale di risulta ad impianto di trattamento autorizzato . Bagni e Cucina	1,00	3,00			3,00		
	SOMMANO cad					3,00	274,93	824,79
89 / 87 05.P67. A70.010	Collettori complanari simmetrici derivazione di entrata e uscita complanari con il medesimo numero di derivazioni sui due lati di rame attacchi colonna a manicotto. 12 derivaz. (6x6) 6 derivazioni su ciascun lato.					2,00		
	SOMMANO cad					2,00	148,86	297,72
90 / 88 05.P67. A40.010	Cassette da incasso per collettori complanari di lamiera zincata sportello di lamiera verniciata bloccabile ad incastro e con chiave: 25x50 Fornitura di cassette da incasso per collettori complanari impianto ACS e AFS					2,00		
	SOMMANO cad					2,00	71,25	142,50
91 / 89 30.P35. L10.065	Tubi multistrato in plastica riciclata in polietilene alta densità (PEAD), per connessioni di scarico e collettori di fognatura non in pressione per applicazioni sia interne che esterne alla struttura dei fabbricati, conformi norma UNI EN 13476-2:2018 (materiali rispondenti al paragrafo 2.5.12 di cui al decreto MITE del 23 giugno 2022). Dotati di dichiarazione o certificazione ambientale di prodotto relativamente al contenuto di riciclato come richiesto dal decreto MITE 23 giugno 2022 paragrafo 2.5. [Note: Le tubazioni in PVC e polipropilene sono prodotte con un contenuto di materie riciclate, ovvero recuperate, ovvero di sottoprodotti di almeno il 20% sul peso del prodotto, inteso come somma delle tre frazioni. La percentuale indicata si intende come somma dei contributi dati dalle singole frazioni utilizzate ed è verificata secondo quanto previsto al paragrafo							

Num. Ord. TARFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI	
		par.ug	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE
	"2.5-Specifiche tecniche per i prodotti da costruzione-indicazioni alla stazione appaltante".] SN 16 (SDR 19.4) - diametro nominale DN 125 Fornitura e posa di tubazioni in polietilene per scarico acque nere					20,00		
	SOMMANO m					20,00	22,61	452,20
92 / 90 NP02_T	Limitatore di flusso, cromato; corpo in ottone cromato; Pmax 12 bar, pressione d'esercizio 1÷10 bar, Tmax 80°C-M-F 8 l/min.	1,00	5,00			5,00		
	SOMMANO cadauno					5,00	27,82	139,10
93 / 91 01.A19. H25.00 5	Formazione di rete di scarico per apparecchi igienico sanitari tipo lavelli, lavandini, lavabo, pilozzi, lavatoi, bidet e similari, comprensivo di tutte le forniture e i mezzi d'opera occorrenti sia relativamente alle opere da idraulico che quelle edili. la tubazione dovrà essere realizzata con impiego di manufatti tipo Geberit - PE diametri mm 40/46 - 50/56, incluse le occorrenti saldature ed i collari di fissaggio alla struttura di ancoraggio ed ogni prestazione d'opera occorrente per dare l'impianto perfettamente funzionante e pronto all'allacciamento all'apparecchio sanitario di riferimento. il prezzo comprende le seguenti lavorazioni: esecuzione di tutte le opere murarie occorrenti, ivi compreso le tracce a muro e relativi ripristini murari o il fissaggio delle tubazioni a pavimento, incluse le provviste ed i mezzi d'opera occorrenti; opere da idraulico, incluse tutte le provviste ed i mezzi d'opera occorrenti. Distanza massima tra il collegamento dell'apparecchio igienico sanitario e la colonna o rete principale di scarico non superiore a m 5. Per allacciamenti aventi distanza superiore si procederà a parte al compenso del tratto eccedente tale lunghezza. Prova idraulica di tenuta prima del ripristino della muratura; sgombero e trasporto del materiale di risulta ad impianto di trattamento autorizzato Formazione di rete di scarico					2,00		
	SOMMANO cad					2,00	235,04	470,08
94 / 92	Formazione di rete di scarico per vasi a sedile o							

Num. Ord. TARFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI	
		par.ug	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE
01.A19. H35.00 5	<p>alla turca,comprensivo di cucchiaino, braga, tubo, giunto a T con tappo a vite per ispezione, curva aperta per innesto nella colonna di discesa, manicotti, riduzioni, ecc., in polietilene tipo Geberit - PE, comprensivo di tutte le lavorazioni, forniture e mezzi d'opera occorrenti, sia relativi alle opere da muratore che da idraulico per dare l'impianto perfettamente funzionante e pronto alla posa del vaso a sedile. Il prezzo comprende le seguenti lavorazioni: esecuzione di tutte le opere murarie occorrenti, ivi compreso le rotture e relativi ripristini murari, incluse le provviste ed i mezzi d'opera occorrenti; opere da idraulico, incluse tutte le lavorazioni, provviste ed i mezzi d'opera occorrenti. distanza massima tra il collegamento dell'apparecchio igienico sanitario e la colonna o rete principale di scarico non superiore a m 3. per allacciamenti aventi distanza superiore si procederà a parte al compenso del tratto eccedente tale lunghezza. Prova idraulica di tenuta prima del ripristino della muratura; sgombero e trasporto del materiale di risulta ad impianto di trattamento autorizzato.</p> <p>Formazione di rete di scarico WC</p>					2,00		
	SOMMANO cad					2,00	289,59	579,18
Bagni (SbCat 13)								
95 / 76 30.P05.l 00.015	<p>Ceramica sanitaria costituita da lavabo piano, installabile ad appoggio, incasso e semincasso. Dotati di dichiarazione o certificazione ambientale di prodotto relativamente al contenuto di riciclato come richiesto dal D.M. 23 giugno 2022 paragrafo 2.5. dimensione 45x35 cm</p> <p>Fornitura lavabo</p>	1,00	2,00			2,00		
	SOMMANO cad					2,00	302,16	604,32
96 / 77 01.A19. G10.04 0	<p>Posa in opera di apparecchi igienico - sanitari completi di accessori, compreso l'allacciamento alle tubazioni di adduzione e lo scarico P.O. Lavabo completo di accessori, compresa la posa di batteria a miscela formato da due rubinetti, bocca di erogazione al centro, curvette di raccordo, piletta di scarico, sifone di scarico, curva tecnica di raccordo al muro e mensole</p> <p>Vedi voce n° 76 [cad 2.00]</p>					2,00		

Num. Ord. TARFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI	
		par.ug	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE
	SOMMANO cad					2,00	82,83	165,66
97 / 78 01.P22. A70.025	Piatti doccia in gres ceramico smaltato cm 78x78x11, installazione sopra pavimento					2,00		
	SOMMANO cad					2,00	166,21	332,42
98 / 79 01.A19. G10.11 0	Posa in opera di apparecchi igienico - sanitari completi di accessori, compreso l'allacciamento alle tubazioni di adduzione e lo scarico P.O.Piatto doccia completo di accessori, compreso gruppo miscelatore meccanico, rubinetti, braccio fisso e soffione, piletta di scarico e sifone di scarico Vedi voce n° 78 [cad 2.00]					2,00		
	SOMMANO cad					2,00	113,34	226,68
99 / 80 01.P22. A60.010	Vaso a sedile in vitreous-china a cacciata o ad aspirazione, con scarico a pavimento o a parete cm 50x36x39					2,00		
	SOMMANO cad					2,00	86,41	172,82
100 / 81 01.A19. G10.16 5	Posa in opera di apparecchi igienico - sanitari completi di accessori, compreso l'allacciamento alle tubazioni di adduzione e lo scarico P.O. vaso all'inglese o a sella di qualunque tipo, con scarico a pavimento o a parete, completa di accessori e scarico Vedi voce n° 80 [cad 2.00]					2,00		
	SOMMANO cad					2,00	71,86	143,72
101 / 82 01.P07. B45.005	Provvista di piastrelle per pavimenti e rivestimenti in gres ceramico fine porcellanato, ottenuto da impasto di argille nobili, di tipo omogeneo a tutto spessore, privo di trattamento superficiale, inassorbente, antigelivo, altamente resistente agli attacchi fisici e chimici, con superficie a vista tipo naturale o tipo antisdrucchiolo Nei formati cm 20X20 Pavimenti *(par.ug.=3,5+4,5)	8,00				8,00		

Num. Ord. TARFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI	
		par.ug	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE
	Pareti *(par.ug.=7,5+8,5)	16,00	1,80			28,80		
	SOMMANO m ²					36,80	28,62	1'053,22
102/83 01.A12. G00.00 5	Posa in opera di rivestimento di pareti con piastrelle rettangolari o quadrate, con o senza bisello dato in opera con malta cementizia, con giunti sigillati a cemento bianco; escluso il rinzafo In caolino, maiolica smaltata o gres ceramico, per superfici di almeno m ² 0,20 Vedi voce n° 82 [m ² 36.80]					36,80		
	SOMMANO m ²					36,80	37,84	1'392,51
	Fossa imhoff (SbCat 15)							
103/96 03.P19. A04.005	Vasche settiche tipo Imhoff per il trattamento dei liquami reflui urbani ad anelli in calcestruzzo armato con copertura idonea a sopportare carichi veicolari leggeri Per 5 abitanti equivalenti	1,00	1,00			1,00		
	SOMMANO cad					1,00	572,67	572,67
104/97 03.A16. A02.005	Posa in opera di vasche settiche tipo Imhoff per il trattamento dei liquami reflui urbani in polietilene ad alta densità, inclusi scavo, reinterro, collegamento tubazioni Dimensioni: per 5 abitanti equivalenti Vedi voce n° 96 [cad 1.00]					1,00		
	SOMMANO cad					1,00	233,40	233,40
	Porte interne (Cat 11) Porte interne (SbCat 14)							
105/93 01.A17. A80.010	Provista e posa in opera di falso telaio (controtelaio) per il fissaggio dei serramenti alla muratura, in legno di abete (Picea abies, Abies Alba), compresa la ferramenta occorrente, l'assistenza, il trasporto in cantiere, lo scarico dall'automezzo, l'accatastamento, il successivo spostamento sul luogo d'impiego nell'ambito del cantiere (comprese le eventuali salite o discese al piano), la pulizia finale e ogni onere per dare il lavoro compiuto a regola d'arte. Larghezza oltre 10 cm e spessore 2 cm. MISURATO AL METRO							

Num. Ord. TARFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI	
		par.ug	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE
	LINEARE (sullo sviluppo effettivo del falso telaio). porte *(larg.=0,8+2,1*2)	6,00		5,000		30,00		
	SOMMANO m					30,00	12,48	374,40
106/94 01.A17. B65.005	Porte interne tamburate spessore mm 35, specchiature piene, rivestimento in laminato plastico di spessore mm 1,5 su rivestimento in compensato di abete spessore mm 4, complete di robusta ferramenta, serratura adeguata, ottonami e imprimitura ad olio sulle parti di legno in vista Con ossatura in abete (Picea abies, Abies alba) a battente	6,00		0,800	2,100	10,08		
	SOMMANO m ²					10,08	359,11	3'619,83
107/95 01.A17. B70.005	Posa in opera di porte interne semplici o tamburate, a pannelli od a vetri, di qualunque forma, dimensione e numero di battenti, per qualsiasi spessore, montate su chianbrane o telarone In qualsiasi tipo di legname Vedi voce n° 94 [m ² 10.08]					10,08		
	SOMMANO m ²					10,08	47,76	481,42
	Tinteggiatura interna (Cat 12) Tinteggiatura interna (SbCat 17)							
108/32 03.A10. C02.005	Tinteggiatura ed imbiancatura. Di pareti, soffitti, volte, ecc, con pittura a base di silicati di potassio. Applicazione del prodotto a pennello o a rullo su fondo stabile, asciutto, pulito e privo di polvere. Compreso ogni mezzo d'opera ed ogni opera accessoria per dare il lavoro finito a regola d'arte, esclusa la preparazione delle pareti con stuccatura e rasatura. 2 mani per interni PT - Pareti *(par.ug.=30+31+7,5) PT - Soffitti P1 - Pareti *(par.ug.=+15+15+8,5+13+16+16) P1 - Soffitti a detrarre bagni piastrellati *(lung.=(7,5+8,5)*1,8)	68,50	2,75			188,38		
		1,00	98,40			98,40		
		83,50	2,75			229,63		
		1,00	73,00			73,00		
		-1,00	28,80			-28,80		
	Sommano positivi m ²					589,41		
	Sommano negativi m ²					-28,80		
	SOMMANO m ²					560,61	17,04	9'552,79

Num. Ord. TARFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI	
		par.ug	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE
109/98 03.P14. A06.005	<p>Impianto fotovoltaico (Cat 13) Impianto fotovoltaico (SbCat 16)</p> <p>Moduli fotovoltaici ad alta efficienza, celle di silicio monocristallino, tensione massima di sistema fino a 1500 V, scatola di connessione almeno IP 67 completa di diodi di by-pass, involucro in classe II con struttura sandwich: EVA, tedlar, cella, vetro temprato, cornice in alluminio anodizzato, certificazione IEC 61215, efficienza del modulo > 19% Potenza massima da 310 W a 400 W</p> <p>Fornitura e posa di impianto fotovoltaico di potenza pari a 3 kW comprese lattennerie, sovrapposizioni e gruppi di fissaggio.</p>	1,00	3000,00			3'000,00		
	SOMMANO W					3'000,00	0,82	2'460,00
110/99 03.P14. A12.025	<p>Inverter monofase per impianti connessi in rete senza trasformatore, conversione DC/AC realizzata con tecnica PWM e ponte a IGBT, sistema MPPT, tensione di uscita 230 V, frequenza 50 Hz e distorsione armonica < 3%, efficienza > 98%, conforme a norma CEI 11-20, grado di protezione minimo IP65. Potenza nominale in AC 3,5-3,7 kW</p> <p>Fornitura di inverter MONOFASE DA 3 kW</p>	1,00	1,00			1,00		
	SOMMANO cad					1,00	1'234,02	1'234,02
111/ 100 03.A13. A03.005	<p>Posa in opera di inverter per impianti fotovoltaici monofase o trifase per impianti connessi in rete o in isola incluso il fissaggio a parete, collegamenti elettrici ai circuiti continuo e alternato e messa in funzione Inverter monofase</p> <p>Posa inverter</p>	1,00	1,00			1,00		
	SOMMANO cad					1,00	287,46	287,46
112/ 101 01.P01. A10.005	<p>Operaio specializzato Ore normali</p> <p>Manodopera necessaria alla corretta</p>	2,00	2,00	8,000		32,00		

Num. Ord. TARFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI	
		par.ug	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE
	installazione dell'impianto fotovoltaico, compresi collegamenti, posa inverter e quanto necessario per dare l'opera completa a regola d'arte							
	SOMMANO h					32,00	36,91	1'181,12
113 / 102 01.P01. A45.005	Impiegato tecnico 3° livello Costo medio orario							
	Pratiche ENEL e GSE	1,00	2,00	8,000		16,00		
	SOMMANO h					16,00	32,55	520,80
	Linea Vita (SbCat 18)							
114 / 106 01.A40. A01.055	Dispositivi di ancoraggio puntuali (Tipo A) e flessibili (Tipo C) Linea di ancoraggio permanente tipo C (UNI 11578:2015) in alluminio su campata singola H25 cm. Fornitura di kit e posa in opera di supporti di dispositivo di ancoraggio contro le cadute dall'alto costituito da linea flessibile orizzontale, conforme e certificata tipo C nel rispetto della normativa vigente, utilizzabile da tre operatori contemporaneamente. Installazione conforme alle indicazioni del produttore, al progetto ed alla Relazione di calcolo del fissaggio, compresa apertura e chiusura del manto, ripristini dell'impermeabilizzazione e/o del manto di copertura, escluse opere di lattoneria ma compresa fornitura e posa di viti o tasselli per il fissaggio e quanto necessario a dare il lavoro finito, compreso rilascio di Dichiarazione di corretta installazione. Esclusa la fornitura di carpenterie specifiche o accessori di fissaggio ma compresi accessori per la linea. Escluso Cavo in acciaio INOX AISI 316. Linea costituita da: - N° 2 ancoraggi d'estremità in lega di alluminio con componenti montati in assenza di saldature. Profilo verticale estruso tondo Ø45 mm in lega di alluminio 6082, piastra orizzontale estrusa con sagoma in lega di alluminio 6063 preforata con base di dimensione 160x250 mm, spessore variabile 6-8 mm. Piatto di aggancio fune realizzato in lega di alluminio 6082 spessore 8 mm. Borchia di chiusura anodizzata con marcatura laser. Altezza totale ancoraggio 250 mm. - N°1 kit di serraggio costituito da N°1							

Num. Ord. TARFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI	
		par.ug	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE
	redance e N°1 morsetto serracavo in lega di alluminio idoneo per dimensioni e tipologia al cavo in acciaio sopra descritto. - N°1 Tenditore M14 chiuso con forcelle agli estremi in acciaio AISI 316. Spinotti in acciaio con perni e coppiglia di bloccaggio. - N°1 Dissipatore in acciaio INOX AISI 302. Molla elicoidale a trazione filo diametro 10 mm. lunghezza del corpo a riposo 220 mm con occhielli terminali. Forza massima trasmessa agli ancoraggi < 8,5 KN. fornitura e posa di ancoraggi all'estremità della linea vita (escluso cavo)	1,00	2,00			2,00		
	SOMMANO cad					2,00	661,52	1'323,04
115 / 107 01.A40. A01.040	Dispositivi di ancoraggio puntuali (Tipo A) e flessibili (Tipo C) Cavo per linea di ancoraggio permanente tipo C (UNI 11578:2015) Fornitura e posa in opera di Cavo in acciaio INOX AISI 316 diametro 8 mm formazione 7x19 = 133 fili crociata dx. Carico di rottura 42 KN, completo ad un estremo di capocorda a occhiello con redance e manicotto di serraggio in alluminio, lunghezza come da progetto. fornitura e posa di cavo linea vita	1,00	10,00			10,00		
	SOMMANO m					10,00	13,50	135,00
116 / 108 01.A40. A01.015	Dispositivi di ancoraggio puntuali (Tipo A) e flessibili (Tipo C) Punto fisso di ancoraggio tipo A (UNI 11578:2015) per manti metallici - Fornitura e posa in opera di punto di ancoraggio contro le cadute dall'alto conforme e certificato nel rispetto della normativa vigente, utilizzabile da max due operatori, specifico per fissaggio su manti di copertura metallici (pannelli coibentati, lamiere grecate) mediante l'uso di rivetti strutturali e passo foratura variabile da 280 a 400 mm con regolazione del dispositivo. Costituito da doppia piastra in Acciaio inox AISI 304 con taglio laser, preforata, presso-piegata per la creazione di anello di aggancio per DPI anticaduta integrato nella piastra stessa e ali superiori di irrigidimento. Dispositivo idoneo per operare in tutte le direzioni, fornito in kit con rivetti strutturali con corpo in alluminio dotati di guarnizione sotto corona. Installazione conforme alle indicazioni del produttore, al progetto ed alla Relazione di calcolo del fissaggio, compresi ripristini dell'impermeabilizzazione o del manto di							

Num. Ord. TARFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI	
		par.ug	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE
	copertura, escluse opere di lattomeria ma compresa fornitura e posa di rivetti strutturali (in kit con le piastre) ed eventuali rinforzi dei fissaggi del manto come da schede tecniche del produttore e quanto necessario a dare il lavoro finito, compreso rilascio di Dichiarazione di corretta installazione. fornitura e posa di ancoraggi puntuali	1,00	8,00			8,00		
	SOMMANO cad					8,00	126,34	1'010,72
	Scenario A - Pompa di calore geotermica (SpCat 2) Scavi (Cat 14) Scavo (SbCat 21)							
117 / 109 01.A01. A10.010	Scavo generale, di sbancamento o splateamento a sezione aperta, in terreni sciolti o compatti, fino a 4 m di profondità, eseguito con mezzi meccanici, esclusa la roccia da mina ma compresi i trovanti rocciosi ed i blocchi di muratura fino a 0,50 m ³ , misurato in sezione effettiva, compreso il carico sugli automezzi, trasporto e sistemazione entro l'area del cantiere Anche in presenza di acqua fino ad un battente massimo di 20 cm Scavo per posa sonde	200,00			1,800	360,00		
	SOMMANO m ³					360,00	4,79	1'724,40
118 / 110 01.A01. A65.010	Scavo a sezione obbligata o a sezione ristretta per posa tubazione e manufatti, in terreni sciolti o compatti, fino a 2 m di profondità rispetto al piano di sbancamento, eseguito con idonei mezzi meccanici, con eventuale intervento manuale ove occorra, esclusa la roccia da mina ma compresi i trovanti rocciosi ed i blocchi di muratura fino a 0,50 m ³ , misurato in sezione effettiva, con deposito dei materiali ai lati dello scavo stesso. Anche in presenza di acqua fino ad un battente massimo di 20 cm Scavo per tubazioni da collettore a CT	5,00			1,000	5,00		
	SOMMANO m ³					5,00	13,56	67,80
119 / 111 01.A01. B87.020	Reinterro degli scavi in genere, con le materie di scavo precedentemente estratte e depositate nell'ambito del cantiere, compreso carico, trasporto, scarico, costipazione e							

Num. Ord. TARFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI	
		par.ug	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE
	regolarizzazione Eseguito con mezzo meccanico Vedi voce n° 109 [m³ 360.00]					360,00		
	SOMMANO m³					360,00	9,95	3'582,00
120 / 112 01.A01. B87.010	Reinterro degli scavi in genere, con le materie di scavo precedentemente estratte e depositate nell'ambito del cantiere, compreso carico, trasporto, scarico, costipazione e regolarizzazione Eseguito a mano Vedi voce n° 110 [m³ 5.00]					5,00		
	SOMMANO m³					5,00	55,32	276,60
121 / 116 15.P05. A45.035	SCAVI ACCESSORI Formazione di pozzetto in cls come descritto dalle norme tecniche di capitolato, comprensivo dello scavo in qualsiasi tipo di terreno, della fornitura e posa del cls, (in casi particolari e su autorizzazione della stazione appaltante e consentita la costruzione del manufatto in mattoni), rinzaffatura delle pareti interne con malta di cemento. Completo di fornitura e posa del chiusino in ghisa sferoidale avente misura di luce interna del telaio pari a mm 500 x 500 di classe D400 costruito secondo quanto indicato dalla Norma UNI EN 124 completo di coperchio dotato di rilievi antisdrucchiolo e chiusura a tenuta ermetica. Dicitura "SERVIZIO SEMAFORI" riportata sul coperchio , ripristino provvisorio del suolo a contorno del chiusino. (FORNITURA E POSA) Scheda Tecnica Allegato 12					1,00		
	SOMMANO cad	1,00	1,00			1,00		
						1,00	295,37	295,37
	Sonde (Cat 15) Sonde (SbCat 24)							
122 / 113 01.DEI.0 83053c	Tube in PE-Xa SDR 11 reticolato ad alta pressione, per impianto geotermico orizzontale, a norma DIN 16892, stabilizzato ai raggi UV, colore naturale, con strato di protezione grigio, alta resistenza a crepe, intagli e carichi concentrati, temperature d'esercizio -40 °C ÷ 95 °C, delle seguenti dimensioni: Ø 32 mm, spessore 2,9 mm					240,00		
		1,00	240,00			240,00		

Num. Ord. TARFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI	
		par.ug	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE
	SOMMANO m					240,00	4,25	1'020,00
123 / 114 01.A19. E16.005	Posa in opera di tubazioni in polietilene alta densità PN10, PN6, per condotte a pressione per acqua potabile, compreso la posa dei raccordi e pezzi speciali occorrenti, escluso solo lo scavo ed il reinterro Per tubi di diametro esterno mm 20, 25 e 32 Vedi voce n° 113 [m 240.00]					240,00		
	SOMMANO m					240,00	9,34	2'241,60
124 / 115 25.P05. B55.010	Profilati in acciaio tipo corten Morsetti, bulloni e distanziatori Distanziatori per sonde geotermiche	10,00	3,00		0,100	3,00		
	SOMMANO kg					3,00	2,19	6,57
125 / 117 01.DEI.0 83055a	Collettore per impianto geotermico costituito da collettori di mandata e ritorno DN 50 con valvole di sfogo aria automatiche, termometri Ø 80 mm, due rubinetti di carico/scarico, zanche a muro in acciaio inox, pressione massima d'esercizio 6 bar, campo di temperatura d'esercizio -10 ÷ 60 °C, campo temperatura ambiente: -20 ÷ 60 °C, per fluido acqua con percentuale massima di glicole del 50%: n° 2 attacchi	1,00	1,00			1,00		
	SOMMANO cad					1,00	501,00	501,00
	Macchine (Cat 16) Pompa di calore (SbCat 23)							
126 / 118 03.P13. L03.010	Pompa di calore aria-acqua monoblocco ad alta temperatura, elettrica, ad alta efficienza, COP nominale non inferiore a 3,9 con aria esterna +7°C ed acqua in uscita +35°C, alimentazione monofase o trifase, con compressore rotativo scroll, da interno o esterno, temperature dell'acqua in uscita fino a 60-65°C, per riscaldamento, raffrescamento e produzione di acqua calda sanitaria. Potenza termica resa 9-11 kW	1,00	1,00			1,00		

Num. Ord. TARFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI	
		par.ug	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE
	SOMMANO cad					1,00	6'787,31	6'787,31
127 / 125 05.P59. A10.005	Boiler in lamiera zincata per pressione fino a 6 atm. Con fondo a flangia e serpentino in rame completo di attacchi filettati per acqua calda e fredda, mensole ecc. Per capacita' sino a 500 lt.	1,00	200,00			200,00		
	SOMMANO I					200,00	2,68	536,00
	Scenario B - Caldaia a condensazione - split (SpCat 3) Caldaia (SbCat 25)							
128 / 126 05.A01. A01.015	Caldaie. Fornitura in opera di caldaia murale a condensazione di qualunque tipo, forma e dimensione completa di tutti gli accessori per garantire il corretto funzionamento, con accensione elettronica, controllo della fiamma a ionizzazione, pannello di comando della caldaia integrato, rendimento 4 stelle, classe NOx 5, con esclusione del solo raccordo fumario. Compresa la verifica circolazione idraulica, impostazione parametri di funzionamento, analisi della combustione, compilazione di libretto di centrale. F.O. di caldaia murale a condensazione per riscaldamento, potenza al focolare fino a 34,9 kW	1,00	1,00			1,00		
	SOMMANO cad					1,00	2'646,04	2'646,04
129 / 127 05.P63. B20.015	Canna fumaria completamente in acciaio inox a sezione circolare a doppia parete con intercapedine di 25 mm di lana minerale di densita' superiore da 150 kg/m3, costituita da elementi modulari e da gomiti, giunti a t, scarichi di condensa, camere d'espansione, cappelle, supporti e staffaggi necessari alla sua installazione con accoppiamento maschio-femmina e bloccaggio mediante fascetta di fermo, adatta per qualsiasi tipo di combustibile resistente ad una temperatura superiore ai 500 gr.c. in esercizio continuo ed ai 700 gr. C. in esercizio intermittente conforme alla l. 615. Condotta semplice diam. int. mm. 178 Fornitura e posa di canna fumaria	1,00	7,50			7,50		

Num. Ord. TARFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI	
		par.ug	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE
	SOMMANO m					7,50	210,85	1'581,38
	Split (SbCat 26)							
130 / 128 03.P13. L06.005	Unità esterna di pompa di calore aria-aria sistema split ad altissima efficienza, elettrica, COP nominale non inferiore a 3,8, gas refrigerante R410A Potenza termica resa 18 kW	1,00	1,00			1,00		
	SOMMANO cad					1,00	4'557,92	4'557,92
131 / 129 03.P13. L07.005	Unità interna di pompa di calore aria-aria sistema split ad altissima efficienza, gas refrigerante R410A a parete, potenza termica resa 2,5 kW	1,00	5,00			5,00		
	SOMMANO cad					5,00	507,03	2'535,15
	Scenario C - Pompa di calore aria-acqua (SpCat 4)							
	Pompa di calore (SbCat 23)							
132 / 130 03.P13. L03.015	Pompa di calore aria-acqua monoblocco ad alta temperatura, elettrica, ad alta efficienza, COP nominale non inferiore a 3,9 con aria esterna +7°C ed acqua in uscita +35°C, alimentazione monofase o trifase, con compressore rotativo scroll, da interno o esterno, temperature dell'acqua in uscita fino a 60-65°C, per riscaldamento, raffrescamento e produzione di acqua calda sanitaria. Potenza termica resa 12-15 kW	1,00	1,00			1,00		
	SOMMANO cad					1,00	11'881,82	11'881,82
133 / 131 05.P59. A10.005	Boiler in lamiera zincata per pressione fino a 6 atm. Con fondo a flangia e serpentino in rame completo di attacchi filettati per acqua calda e fredda, mensole ecc. Per capacità sino a 500 lt.	1,00	200,00			200,00		

Num. Ord. TARFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	DIMENSIONI				Quantità	IMPORTI	
		par.ug	lung.	larg.	H/peso		unitario	TOTALE
	SOMMANO I					200,00	1,77	354,00
134 / 132 05.P59.l 97.010	Manometro per acqua, molla a tubo metallico, sistema bourdon, cassa di acciaio stampato, perno di ottone radiale, graduazione uni, 6 ate, conforme inail (ex ispesl). Diametro 80	1,00	1,00			1,00		
	SOMMANO cad					1,00	23,14	23,14
135 / 133 05.P59. D50.02 5	Vaso di espansione autopressurizzato Da litri 100	1,00	1,00			1,00		
	SOMMANO cad					1,00	218,05	218,05
136 / 136 01.P01. A05.005	Operaio 4° livello Ore normali	1,00	2,00	8,000		16,00		
	SOMMANO h					16,00	41,50	664,00
	Parziale LAVORI A CORPO euro							239'974,46
	TOTALE euro							239'974,46

Num.Ord. TARIFFA	DESIGNAZIONE DEI LAVORI	IMPORTI
		TOTALE
	<u>Riepilogo SUPER CATEGORIE</u>	
001	Interventi BASE	198'474,31
002	Scenario A - Pompa di calore geotermica	17'038,65
003	Scenario B - Caldaia a condensazione - split	11'320,49
004	Scenario C - Pompa di calore aria-acqua	13'141,01
	Totale SUPER CATEGORIE euro	239'974,46

Ringraziamenti

Con questo elaborato si conclude il mio percorso universitario presso il Politecnico di Torino.

Desidero esprimere la mia più sincera gratitudine a tutte le persone che mi hanno accompagnato durante questi anni di studio e di crescita personale.

Un sentito ringraziamento al Professor Papurello per la disponibilità che mi ha offerto, per aver saputo seguirmi a distanza e per avermi lasciato la serenità di completare questo lavoro con i tempi necessari, resi particolarmente lunghi dagli impegni professionali. La sua comprensione e la sua flessibilità sono state fondamentali per portare a termine questo percorso.

Alla mia famiglia, con cui ho condiviso ogni fase di questa esperienza. Grazie di cuore a mia mamma e a mio papà per avermi sempre sostenuto nelle scelte che mi hanno portato fino a qui. Grazie a mio fratello Matteo per l'intesa e la vicinanza che ci hanno uniti lungo questo cammino. Grazie a Maurizia e a Marta, sorrisi di ogni giorno.

A nonno Biagio, nonna Rina e nonna Rita: anche se l'università mi ha tenuto fisicamente un po' lontano, l'affetto per voi non è mai cambiato. So che vi è stato difficile vedermi andare avanti e indietro per così tanto tempo. *"Sah, ma quand'è che finisci?" – "Voglio vederti ingegnere!" – "Guarda che nonna è vecchia, se aspetti ancora un po'..."*. A nonno Giovanni, lassù da tanto tempo. Nonni, ce l'ho fatta.

A Zia Flora: mi hai sempre spronato in questo percorso. Grazie per il sostegno e per il cibo che fino ad oggi mi hai preparato. È stato fondamentale per sostenermi, soprattutto nei giorni più faticosi. Una menzione speciale per la tua giardiniera che è stata un orgoglio da condividere con colleghi e amici: nessuno ha mai trovato di meglio! Grazie a Zio Cesare per i confronti ed il supporto.

A mio cugino Lorenzo: è stato strano vederti di meno, ma è stato bello vederti crescere così tanto. Grazie per tutte le volte in cui passando da casa chiedevi a mimi *"C'è Mone?"* e quando lei ti diceva che ero in camera a studiare tu le rispondevi sempre *"Allora non lo disturbo"*, oppure *"Gli dico solo Ciao"*. Ho apprezzato tanto i tuoi gesti. Grazie!

A Zia Maddalena: abbiamo fatto tante cose belle noi due, ma per quest'ultima *sfida* non mi hai più aspettato. *"Giocheremo ancora insieme, in maniera diversa ma troveremo il modo per giocare insieme"*. Oggi, Zia, ci sei anche tu nella mia squadra.

Un grazie speciale va ai miei amici, compagni di studio e di vita, per il sostegno, le risate e l'intesa che ci ha legato. Un ringraziamento particolare ad Antonio, Andrea, Liliana, Simone, Andrea e Federico. La vostra presenza è ed è stata fondamentale. Alla mia Amica Sara per le passeggiate e le lunghe chiacchierate. Agli amici di sempre Denise, Jacopo, Stefano, Andrea, Anna, Chiara e Daisy per avermi accompagnato in ogni istante. A Bruna e Valter per le partite a carte, i funghi e i cicchettini. A Don Arnaldo e a tutti gli amici dell'Oratorio. Alle speciali Sofia, Simona, Chiara detta "Scura" e Michela detta "Shampoo" per aver reso le serate delle S un vero spasso.

Infine, non posso che ringraziare tutta la grande famiglia SpazioKu'bo che mi ha accolto per un breve tirocinio e non mi ha più lasciato andare. Grazie a Federico e Rossella per aver creduto in me e per avermi aiutato a crescere professionalmente. Grazie ad Arianna (*Archibella*, *Archibacci* e *Architrottola*) con cui ho costruito molto più di un semplice rapporto lavorativo. Grazie a tutti i colleghi per il loro supporto e la loro compagnia: Sarah, Silvia, Anahita, Pietro, Fabio, Gabriele, Alice e Francesca. Grazie a Flavia, Matteo, Giovanni, Daniela, Davide, Sandra, Mehdi, Rita, Francesco, Paul, Arianna, Kateryna, Alexandra e Dario.