



**Politecnico
di Torino**

Corso di laurea magistrale in Ingegneria Energetica e Nucleare

Applicazione di reti neurali artificiali a supporto della progettazione di muri energetici

A cura di

Alessandro Poveromo

292550

Relatori:

Prof. Marco Barla,

Prof. Davide Papurello,

Ing. Alessandra Insana

Politecnico di Torino

2023

Alla mia famiglia

Ringraziamenti

Prima di procedere con la trattazione, vorrei dedicare qualche riga a tutti coloro che mi sono stati vicini in questo percorso di crescita personale e professionale. Innanzitutto ringrazio i miei relatori per avermi guidato con competenza e professionalità nella conclusione del percorso di studi. Ringrazio il Professor Marco Barla, sempre presente e disponibile a darmi le giuste indicazioni in ogni fase della realizzazione dell'elaborato. Ringrazio il Professor Davide Papurello per le conoscenze ed il metodo di lavoro trasmessi durante il percorso di studi e l'Ingegnere Alessandra Insana per i suoi preziosi consigli che hanno consentito di condurre al meglio le mie ricerche. Inoltre ringrazio il Professor Alfonso Capozzoli per la sua disponibilità e per le competenze trasmesse. Ringrazio infinitamente i miei genitori Anna e Franco e mia sorella Laura per avermi sostenuto in ogni decisione e per esserci stati sempre, soprattutto nei momenti di sconforto. Senza il vostro affetto non ce l'avrei mai fatta. Grazie a mio nonno Vincenzo per aver sempre creduto in me ed a tutti gli amici per i bei momenti passati insieme.

Abstract

L'energia geotermica a bassa entalpia ricopre un ruolo fondamentale nel processo di decarbonizzazione dei servizi di riscaldamento e raffrescamento nel settore edifici. Tuttavia gli alti costi di realizzazione ed il consumo di suolo ne hanno ridotto la diffusione ed il contributo offerto al raggiungimento degli obiettivi climatici comunitari. In questo contesto si inserisce il sistema innovativo GeothermSkin ovvero un muro energetico dotato di una rete di tubazioni in grado di trasformare le strutture verticali interrato degli edifici in geoscambiatori, conferendo quindi all'elemento strutturale un'ulteriore funzione energetica. Il circuito idraulico è realizzato con tubi in polietilene reticolato fissati alla superficie esterna del muro a contatto con il terreno ed attraversati da un fluido termovettore. Questo brevetto consente di superare i tradizionali limiti delle applicazioni geotermiche perché è caratterizzato da bassi costi d'investimento, facilità di installazione ed è applicabile ad edifici esistenti nell'ambito delle opere di riqualificazione. Un prototipo di questo sistema è installato presso l'Energy Center di Torino ed è accoppiato ad una pompa di calore elettrica che, utilizzando il terreno come sorgente o pozzo termico per mezzo di GeothermSkin, alimenta con un fluido termovettore ad alta o bassa temperatura un ventilconvettore che consente di riscaldare o raffrescare l'ambiente di prova. Nell'ambito di questa tesi i dati del sistema geotermico raccolti durante le prove di riscaldamento condotte tra Ottobre 2019 e Febbraio 2020 sono stati processati per quantificare le prestazioni della pompa di calore e la potenza termica fornita per unità di superficie di GeothermSkin. Ciò ha consentito di vagliare gli effetti che le variabili climatiche come temperatura ambientale e del terreno hanno sulla dinamica di funzionamento del sistema, valutarne la dipendenza e sondare sia la stabilità delle prestazioni offerte dalla pompa di calore che la capacità di soddisfare il carico termico di riscaldamento. I risultati ottenuti celano la relazione tra la potenza termica fornita all'utenza e le variabili climatiche come la temperatura esterna, l'irraggiamento solare, la temperatura e l'umidità del terreno. Per apprendere questo

legame funzionale è stata impiegata una rete neurale artificiale multilayer perceptron che, realizzando un apprendimento supervisionato, ha acquisito la capacità di prevedere la potenza termica media erogata dal sistema geotermico in esame in diverse condizioni ambientali e del terreno e stimare la superficie di GeothermSkin necessaria a soddisfare il carico termico invernale in ogni provincia italiana. La finalità è di realizzare uno strumento a disposizione del progettista in grado di facilitare il dimensionamento di massima di GeothermSkin fornendo stime indicative della superficie da installare per soddisfare, completamente o parzialmente, il fabbisogno termico invernale con l'intento di favorire la diffusione della fonte geotermica a bassa entalpia e minimizzare l'impronta ecologica del settore residenziale.

Indice

Elenco delle figure	x
Elenco delle tabelle	xvi
1 Introduzione	1
1.1 Finalità, obiettivi e struttura della tesi	1
1.2 Il contesto energetico e geopolitico attuale	2
1.3 Settore energetico, proiezioni ed obiettivi futuri	4
1.4 Il settore edilizio	7
1.5 Pompe di calore: ruolo e prospettive future	10
2 La risorsa geotermica	12
2.1 Introduzione	12
2.2 La struttura interna della terra	13
2.3 Bilancio termico del terreno	20
2.4 Profilo di temperatura del terreno	22
2.5 Sistemi geotermici ad alta e media entalpia	26
2.6 Sistemi geotermici a bassa entalpia e geoscambiatori	28
2.6.1 Impianti open loop	31
2.6.2 Impianti closed loop	35
2.6.3 Geostrutture	41

2.7	Pompa di calore	46
2.7.1	Trasformazioni	49
2.7.2	Struttura impiantistica	51
3	Reti neurali artificiali	55
3.1	Il neurone formale	57
3.2	Reti multilayer perceptron	59
3.2.1	Architettura della rete	59
3.3	Algoritmo di backpropagation	62
4	Impianto sperimentale	67
4.1	GeothermSkin	67
4.2	Dati climatici e dell'edificio	69
4.2.1	Localizzazione impianto	70
4.2.2	La costruzione di GeothermSkin	71
4.3	Descrizione dell'impianto	72
4.3.1	Gruppi funzionali e componenti	73
4.3.2	Pompa di calore	74
4.3.3	Circuito primario	77
4.3.4	Circuito secondario	83
4.3.5	Circuito solare termico	84
4.3.6	Circuito irrigatori	86
4.3.7	Descrizione delle logiche di funzionamento	86
5	Analisi energetica e prestazionale del sistema	89
5.1	Ipotesi di lavoro	90
5.2	Strumenti di calcolo e database	91
5.3	Modello fisico-matematico dei componenti	91

5.3.1	Compressore	93
5.3.2	Condensatore	94
5.3.3	Valvola di laminazione	95
5.3.4	Evaporatore	95
5.4	Algoritmo per l'identificazione dei profili di pressione	97
5.5	Calcolo delle prestazioni	100
5.6	Discussione dei risultati	102
5.6.1	Funzionamento a regime	107
5.6.2	Transitorio di avviamento	119
5.6.3	Confronto dei risultati tra stagione di riscaldamento 2019 e 2020	123
6	Rete neurale artificiale per il dimensionamento di GeothermSkin	129
6.1	Codici di calcolo e fonti dati	131
6.2	Pre-processing	133
6.2.1	Visualizzazione del dato	134
6.2.2	Data cleaning	136
6.3	Architettura della rete neurale ed iperparametri	139
6.4	Discussione dei risultati	142
6.4.1	Potenza termica predetta	143
6.4.2	Dimensionamento dell'area di muro energetico	145
6.4.3	Area di muro energetico per i capoluoghi	148
7	Conclusioni	151
	Appendice A Risultati del dimensionamento ottenuti con rete neurale	155
	Appendice B Codici di calcolo	158

Indice	ix
<hr/>	
Nomenclatura	165
Bibliografia	166
Lista di pubblicazioni del candidato	168

Elenco delle figure

1.1	Emissioni di CO ₂ per settore e andamento nello scenario NZE, 2010-2050 (IEA, 2022)	5
1.2	Total energy supply da fonti fossili e risorse a basse emissioni in scenario NZE, 2010-2050, (IEA, 2022)	5
1.3	Total final consumption per risorsa nello scenario NZE, 2010-2050 (IEA, 2022)	6
1.4	Total final consumption degli usi finali negli edifici per risorsa nello scenario NZE, 2021-2050 (IEA, 2022)	6
1.5	Consumi di energia finale negli edifici per servizio energetico (UNEP, 2021)	7
1.6	Domanda globale di energia e area calpestabile nello scenario NZE (UNEP, 2022))	9
1.7	Indicatore Global Buildings Climate Tracker (UNEP, 2022)	9
1.8	Consumo globale di energia per riscaldamento e acqua calda sanitaria negli edifici (IEA, 2022)	10
1.9	Emissioni globali di CO ₂ per riscaldamento e acqua calda sanitaria negli edifici (IEA, 2022)	10
1.10	Installazione pompe di calore e risparmio di gas naturale (IEA, 2022)	11
2.1	Stuttura fisica e reologica del pianeta	14
2.2	Falde acquifere (a) (W.H. Freeman and Company, 2012) e stratigrafia del terreno (b) (Aeschbach-Hertig, University of Heidelberg)	16

2.3	Volume di controllo infinitesimo, $dx dy dz$, per analisi della conduzione in coordinate cartesiane (Incropera et al., 2011)	22
2.4	Profilo di temperatura con la profondità nei diversi mesi dell'anno (Taylor and Stefan, 2009)	24
2.5	Andamento del gradiente geotermico (Alfi et al., 2003)	25
2.6	Sistema geotermico (British Geological Survey)	26
2.7	Sistema geotermico a vapore dominante (a), geopressurizzato (b), hot dry rock(c) e magmatico (d) (Wikipedia, 2023)	28
2.8	Logica di funzionamento di un sistema geotermico a bassa entalpia (Viessmann, 2017)	30
2.9	Schema di un impianto geotermico a circuito aperto (a) (BRGM, 2018)e struttura dei pozzi (b) (Taddia, 2022)	32
2.10	Modalità di deflusso (Banks, 2009)	33
2.11	Tipologie di impianto open loop (Sanner, 2001)	34
2.12	Schema di un impianto geotermico a circuito chiuso con scambiatori orizzontali (a sinistra) e verticali (a destra) (Tecnosol Srl)	36
2.13	Configurazioni circuiti sonda in pianta. A:ad U, B:Doppia U, C:Coassiale (BRGM, 2018)	39
2.14	Dettaglio delle direzioni di deflusso nei diversi circuiti sonda (Isolportale)	39
2.15	Configurazioni delle sonde geotermiche orizzontali (Caleffi et al., 2020)	41
2.16	Fondazioni energetiche (Caleffi et al., 2020)	42
2.17	Progetto Enertun (Barla and Insana, 2018)	44
2.18	Muro energetico (a) (Barla and Insana, 2018) e dimensioni caratteristiche (b) (Di Donna et al., 2016)	46
2.19	Schema dei termostati e flussi di potenza (Masoero, 2022)	47
2.20	Andamento del COP al variare della temperatura dei termostati (Industrial heat pumps, 2023)	49

2.21	Ciclo di Carnot inverso sul diagramma pressione- entalpia (Chimica on-line)	50
2.22	Schema generico pompa di calore e termostati reali (IEA, 2022) . . .	52
2.23	Logica di funzionamento invernale (a) ed estiva (b) di una pompa di calore geotermica (BRGM, 2018)	54
3.1	Variabili di input ed output, suddivisione in dataset di allenamento e test	56
3.2	Piano che divide due insiemi linearmente separabili (Missinato, 2018)	59
3.3	Struttura delle connessioni a grafo diretto aciclico (Microsoft, 2015)	60
3.4	Architettura semplificata di una rete neurale MLP	63
3.5	Rappresentazione della logica di derivazione	64
4.1	Prototipo GeothermSkin (Baralis and Barla, 2021)	68
4.2	Energy Center Lab (Mattioda e Figli S.p.A) e posizione del prototipo GeothermSkin	69
4.3	Pianta dei locali	71
4.4	Fasi dell’installazione di GeothermSkin (Baralis and Barla, 2021) . .	72
4.5	Pompa di calore e accumulo 200l (a) e circuito R407 c a bordo macchina (b)	75
4.6	Schema sensori della pompa di calore	76
4.7	Collettori circuito primario GeothermSkin - Isola2 (Baralis, 2021) . .	78
4.8	Dimensioni del modulo GeothermSkin (a) e dettaglio misuratori (b)	79
4.9	Disposizione dei sensori sulla superficie del prototipo (Baralis, 2021)	80
4.10	Posizione dei piani di misura in sezione (a) e cella di pressione (b) (Baralis, 2021)	81
4.11	Posizione dei sensori di temperatura sul (a) Piano A, (b) Piano B, (c) Piano C, (d) Piano D (Baralis, 2021)	82
4.12	Volano termico da 100l (a) e ventilconvettore (b) (Sabiana S.p.a) . . .	84

4.13	Principali componenti del circuito solare	85
4.14	Collettore, partenza circuito irrigatori (a) ed irrigatori (b)	86
4.15	Schema funzionale dell'impianto	88
5.1	Profilo di pressione di un ciclo di funzionamento nel periodo 2019 .	99
5.2	Profilo di pressione di un ciclo di funzionamento nel periodo 2020 .	100
5.3	Andamento dei gradi minuto rispetto alla frequenza del compressore	104
5.4	Andamento della temperatura di mandata rispetto alla frequenza del compressore	104
5.5	Dettaglio gradi minuto- frequenza compressore per un generico ciclo di funzionamento	105
5.6	Profili di temperatura dell'R407c nelle sezioni d'ingresso ed uscita dal compressore	106
5.7	Profili di temperatura del termovettore primario nelle sezioni d'ingresso ed uscita da GeothermSkin	106
5.8	Profili di temperatura del termovettore primario nelle sezioni d'ingresso ed uscita dal ventilconvettore	107
5.9	Andamento delle portate di acqua e glicole ed R407c	108
5.10	Profili di potenza scambiati	109
5.11	Differenze di temperatura tra le sezioni di ingresso ed uscita per ogni fluido	110
5.12	Dettaglio dei profili di pressione	110
5.13	Andamento del COP nel tempo al variare della frequenza del compressore	111
5.14	Andamento del COP rispetto alla temperatura esterna	112
5.15	Andamento del COP rispetto alla temperatura media del terreno . .	112
5.16	Potenza termica media scambiata all'evaporatore in ogni ciclo di funzionamento al variare delle forzanti esterne	114

5.17	Potenza termica media scambiata al condensatore in ogni ciclo di funzionamento al variare delle forzanti esterne	114
5.18	Coefficiente di prestazione medio in ogni ciclo di funzionamento al variare delle forzanti esterne	115
5.19	Potenza tecnica media assorbita dal compressore in ogni ciclo di funzionamento al variare delle forzanti esterne	115
5.20	Profili di temperatura media del terreno per ogni piano di misura . .	116
5.21	Potenza termica media giornaliera scambiata al condensatore al variare delle forzanti esterne	117
5.22	Potenza termica media giornaliera scambiata all'evaporatore al variare delle forzanti esterne	117
5.23	Coefficiente di prestazione medio giornaliero al variare delle forzanti esterne	118
5.24	Potenza tecnica media giornaliera assorbita dal compressore al variare delle forzanti esterne	118
5.25	Potenze medie giornaliere a confronto	119
5.26	Andamento dei gradi minuto e della frequenza del compressore durante i primi avviamenti	120
5.27	Profili di pressione dei primi avviamenti	121
5.28	Profili di temperatura dei fluidi termovettori nei primi avviamenti . .	121
5.29	Profili di temperatura dell'R407c nei primi avviamenti	122
5.30	Potenza termica media giornaliera scambiata al condensatore al variare delle forzanti esterne	124
5.31	Potenza termica media giornaliera scambiata all'evaporatore al variare delle forzanti esterne	124
5.32	Coefficiente di prestazione medio giornaliero al variare delle forzanti esterne	125
5.33	Potenza tecnica media giornaliera assorbita dal compressore al variare delle forzanti esterne	125

5.34	Potenze medie giornaliere a confronto	126
5.35	Resa termica di GeothermSkin periodo 2019	127
5.36	Resa termica di GeothermSkin periodo 2020	127
6.1	Umidità relativa media del terreno periodo 2019 (a) e 2020 (b)	133
6.2	Temperatura media del terreno periodo 2019 (a) e 2020 (b)	133
6.3	Temperatura ed irraggiamento periodo 2019 (a) e 2020 (b)	135
6.4	Temperatura del terreno ed umidità relativa periodo 2019 (a) e 2020 (b)	135
6.5	Potenza termica al variare della temperatura esterna	136
6.6	Metodo dell'inter-quartile (Dodos, 2021)	137
6.7	Potenze termiche escluse (a) e dati privi di outlier (b)	138
6.8	Evoluzione dell'errore quadratico (a) e del errore medio assoluto percentuale (b) nel processo di allenamento	141
6.9	Schema logico del processo di realizzazione della rete neurale	142
6.10	Temperatura (a) (Scia-Ispra), irraggiamento globale orizzontale (b) (Global Solar Atlas), umidità relativa (c) e temperatura del terreno medie annuali in Italia	143
6.11	Potenza predetta dalla rete neurale per ogni località	144
6.12	Area di muro energetico per unità di superficie calpestabile dell'edificio	147
6.13	Area di muro energetico per unità di superficie calpestabile dell'edi- ficio dei capoluoghi di provincia	149
6.14	Istogramma area di muro energetico per unità di superficie dei capoluoghi al variare delle principali forzanti esterne	149

Elenco delle tabelle

2.1	Dimensioni caratteristiche e rese termiche	40
2.2	Accoppiamenti sorgente-pozzo e scambiatori	53
4.1	Definizioni operative	69
4.2	Dati di targa della pompa di calore (Nibe)	75
4.3	Dettaglio sensori della pompa di calore	76
4.4	Tabella riassuntiva caratteristiche circuito primario	78
4.5	Tabella riassuntiva caratteristiche GeothermSkin	79
4.6	Posizione estensimetri e celle di pressione sulla superficie del muro	80
4.7	Tabella riassuntiva caratteristiche circuito secondario	83
4.8	Dettagli tubi circuito solare termico	85
6.1	Origine dei dati	132
6.2	Struttura database	134
6.3	Numero di neuroni ed iperparametri	139
6.4	Metriche d'errore in allenamento	141
6.5	Metriche d'errore in test	142
6.6	Dettaglio dei risultati	150
A.1	Dettaglio dei risultati	155
A.2	Dettaglio dei risultati	156

A.3 Dettaglio dei risultati 157

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Finalità, obiettivi e struttura della tesi

Il cambiamento climatico costituisce un problema intergenerazionale e multidisciplinare la cui risoluzione richiede una rivoluzione delle modalità con cui l'essere umano interagisce con la biosfera. L'avanzamento tecnologico e la decarbonizzazione dei settori maggiormente emissivi come quello edilizio costituiscono una soluzione parziale ma determinante pertanto la finalità di questa tesi è approfondire la reale efficacia di un muro energetico innovativo e le potenzialità del sistema a pompa di calore geotermica che lo integra nel ridurre le emissioni dovute alla climatizzazione degli edifici. L'analisi delle grandezze termodinamiche che caratterizzano il funzionamento dell'impianto consentirà di valutare i flussi di potenza scambiati con l'esterno, il coefficiente di performance della pompa di calore e la resa termica effettiva del prototipo di muro energetico e vagliarne la dipendenza con le variabili climatiche come la temperatura dell'aria e del terreno. Con l'obiettivo di studiare l'applicabilità del prototipo ed agevolarne la progettazione in diversi contesti una rete neurale artificiale verrà allenata per acquisire la relazione funzionale tra le variabili climatiche e la potenza termica disponibile all'utenza e generalizzarla per stimare la superficie di geo-scambiatore necessaria a soddisfare i fabbisogni termici medi annuali in diverse località d'Italia. La tesi si articola in 7 capitoli, il Capitolo 1 è un'introduzione in cui verranno contestualizzati lo stato attuale e l'evoluzione del settore energetico nell'ottica del contrasto al cambiamento climatico ed in relazione ai recenti sviluppi geopolitici, con particolare attenzione al settore edifici ed alle

prospettive delle pompe di calore nel quadro normativo comunitario. Nel Capitolo 2 verranno introdotti i modelli teorici relativi alla struttura della terra, le grandezze fisiche che descrivono le proprietà del sottosuolo ed i modelli fisico-matematici che ne regolano il comportamento termico con l'obiettivo di inquadrare efficacemente lo stato dell'arte dei sistemi di geoscambio, segue una disamina dei fondamenti teorici relativi alla tecnologia delle pompe di calore. Nel Capitolo 3 verranno esposti i fondamenti teorici relativi alle reti neurali artificiali ed ai paradigmi di apprendimento, sarà introdotto il concetto di perceptrone ed i limiti che hanno condotto alle reti multilayer perceptron illustrando il modello matematico dell'algoritmo di retro-propagazione sui cui si basa l'apprendimento. Il Capitolo 4 verte sulla descrizione dettagliata dell'impianto sperimentale dal punto di vista impiantistico e delle logiche di funzionamento. Nel capitolo 5 verrà illustrato il modello fisico-matematico e l'algoritmo ideato per stimare i profili di pressione del refrigerante a bordo della pompa di calore necessari al calcolo delle potenze scambiate e dell'coefficiente di prestazione. Verranno quindi presentati i risultati dell'analisi energetica e prestazionale della pompa di calore geotermica soffermandosi sulla dinamica delle potenze scambiate durante i transitori di avviamento o il funzionamento a regime e dal confronto tra i risultati delle diverse stagioni di riscaldamento sarà possibile approfondire gli effetti indotti dalla variabilità delle forzanti climatiche a livello giornaliero e stagionale. Il capitolo 6 si fonda sui risultati del precedente e verte sul pre-processamento dei dati e sui dettagli relativi all'allenamento della rete neurale per giungere alla presentazione e discussione dei risultati ottenuti. Infine il Capitolo 7 raccoglie le conclusioni e suggerimenti per future ricerche derivanti sia dalle potenzialità e dal carattere innovativo dell'impianto esaminato che dalla generalizzabilità degli approcci basati sui dati.

1.2 Il contesto energetico e geopolitico attuale

Negli ultimi decenni il cambiamento climatico ha iniziato a manifestare in maniera inequivocabile i suoi effetti. Sebbene nel corso della storia si siano susseguiti mutamenti climatici, causati dalla naturale alterazione dei parametri che influenzano il clima, la rapidità delle modifiche rilevate a partire dal XX secolo evidenziano una correlazione diretta con l'attività antropica che sostenuta da crescenti disponibilità energetiche ha accelerato la crescita economica e lo sviluppo delle società, determinando un vertiginoso aumento della popolazione mondiale e della doman-

da di energia. Le attività umane, storicamente fondate sullo sfruttamento di fonti energetiche di origine fossile (ovvero derivanti dalla trasformazione di sostanza organica in forme molecolari ricche di carbonio), sono le principali responsabili dell'emissione di gas clima-alteranti ovvero sostanze la cui struttura molecolare è in grado di assorbire la radiazione a bassa lunghezza d'onda emessa dal pianeta e modificare la resistenza termica dell'atmosfera, inducendo un aumento della temperatura media terrestre. La gravità risiede nella capacità del riscaldamento globale di modificare gli equilibri biogeochimici e climatici ed interferire negativamente con le attività umane la cui crescente intensità, sospinta dall'aumento di popolazione e del consumo di energia pro-capite, peggiora progressivamente il fenomeno. La siccità, la riduzione della disponibilità di acqua dolce e gli eventi climatici estremi rischiano di inficiare la capacità di soddisfare i bisogni primari della crescente popolazione mondiale, innescando gravi crisi umanitarie e migrazioni climatiche. Essendo in grado di compromettere trasversalmente gli equilibri ambientali, sociali ed economici il cambiamento climatico rappresenta un problema multidisciplinare comune a tutte le nazioni la cui soluzione richiede di acquisire consapevolezza del problema ed operare scelte responsabili in maniera comunitaria con gli altri paesi del mondo. Appare quindi chiaro come il progresso tecnologico ed il passaggio allo sfruttamento di fonti energetiche sostenibili nei settori ad alto consumo di energia rappresenti un contributo determinante ma parziale per la risoluzione del problema, da affiancarsi a politiche sociali ed economiche in grado di colmare i divari sociali e promuovere abitudini di consumo più sostenibili. Al quadro complesso fin qui delineato si sovrappongono l'emergenza sanitaria e la grave crisi geopolitica derivante dall'invasione della Russia ai danni dell'Ucraina, i cui effetti combinati hanno condotto alla crisi energetica attuale. Dal punto di vista economico la pandemia ha scosso le economie globali conducendole alla recessione economica causata dalla contemporanea crisi finanziaria, di domanda e d'offerta. La rapida ripresa delle economie ha comportato un rapido aumento della domanda e dell'inflazione con conseguente incremento dei prezzi dell'energia che hanno raggiunto i massimi storici quando l'invasione Russa dell'Ucraina ha reso il mercato dell'energia instabile e l'export dei combustibili fossili uno strumento geopolitico per la Russia. L'attuale crisi energetica ha evidenziato la sostanziale dipendenza di tutti i settori (generazione, industria, trasporti, climatizzazione edifici) dai combustibili fossili che essendo importati da paesi terzi espongono ad una ridotta sicurezza degli approvvigionamenti e influenze politiche. Alla luce di quanto discusso appare fondamentale un piano d'azione

comunitario che coinvolga tutte le nazioni e che sia grado di stabilire e perseguire obiettivi precisi volti a trasformare il settore energetico e limitare il progredire del cambiamento climatico. La conferenza delle Nazioni Unite tenutasi a Glasgow nel 2021, nota come COP26, ha formalizzato un maggiore impegno per raggiungere uno scenario normativo caratterizzato da emissioni nette di CO_2 nulle entro il 2050 (NetZeroEmissionsby2050Scenario) per limitare l'aumento della temperatura media globale ad $1.5^{\circ}C$ rispetto all'epoca pre-industriale.

1.3 Settore energetico, proiezioni ed obiettivi futuri

Secondo le proiezioni in Figura 1.1 realizzate dall'International Energy Agency (IEA) nel World Energy Outlook 2022 tra il 2021 ed il 2030 le emissioni di CO_2 causate dai principali settori dovranno ridursi di un terzo passando dalle attuali 36.6 Gt a meno di 23 Gt al 2030. La generazione elettrica è il comparto che dovrà ridurre maggiormente le emissioni, dimezzandole tra il 2021 ed il 2030 per il raggiungimento della neutralità carbonica mentre nel 2050 tutti i settori dovranno ridurle del 90% rispetto ad i valori attuali e quelle residue verranno compensate con il sequestro della CO_2 in maniera naturale o artificiale. La generazione energetica dovrà rendersi protagonista di un cambiamento radicale che modificherà il paradigma di produzione dei flussi energetici attraverso la riduzione del consumo di carbone e gas naturale ed una crescente conversione dell'energia derivante da fonti rinnovabili. Confrontando la composizione delle fonti energetiche che sostengono la produzione totale di energia primaria tra 2010 e 2021 (Fig. 1.2) emergono gli effetti della crisi energetica ovvero una crescita dello sfruttamento di carbone i cui consumi appaiono in aumento in controtendenza rispetto agli anni precedenti ed agli obiettivi ambientali. La produzione totale di energia decrescerà del 10% tra il 2021 ed il 2030 (IEA 2022) in virtù di una maggiore efficienza energetica, dell'elettrificazione degli usi finali e dei cambiamenti nel comportamento ed abitudini di consumo dell'utente e sarà sostenuta in misura crescente dalle fonti rinnovabili, compresa la risorsa geotermica.

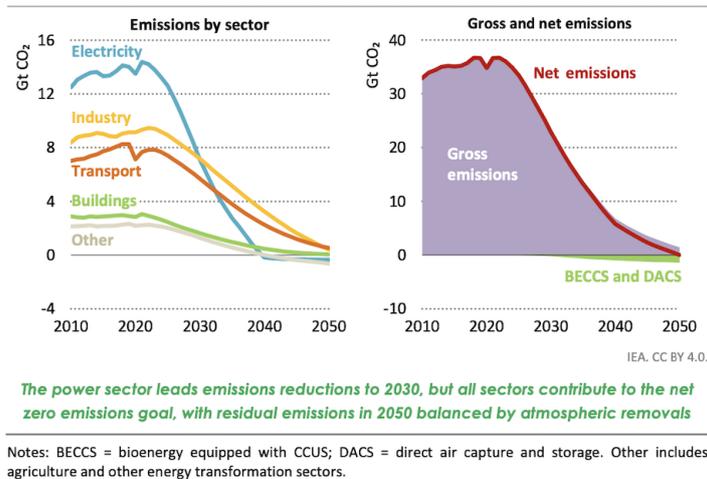


Figura 1.1 Emissioni di CO₂ per settore e andamento nello scenario NZE, 2010-2050 (IEA, 2022)

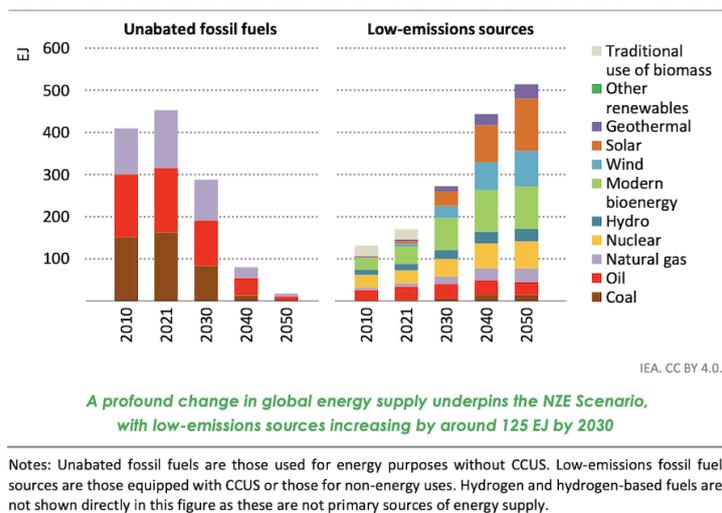


Figura 1.2 Total energy supply da fonti fossili e risorse a basse emissioni in scenario NZE, 2010-2050, (IEA, 2022)

L'analisi dell'approvvigionamento energetico complessivo in termini quantitativi e di rilevanza delle fonti primarie che lo sostengono consente di approfondire le modalità di consumo degli usi finali, in particolare quello di maggiore interesse nell'ambito di questa tesi ovvero gli edifici. Attualmente i combustibili fossili sostengono il 60% dei consumi finali ma la loro diffusione si ridurrà al 45% nel 2030 e fino al 5% nel 2050 (IEA 2022), favorendo quella dell'energia elettrica prodotta da

fonti rinnovabili che diventerà determinante, soddisfacendo fino al 50% dei consumi finali entro il 2050 (IEA 2022).

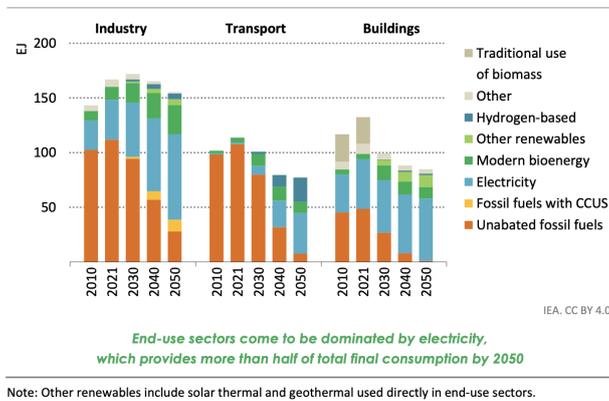


Figura 1.3 Total final consumption per risorsa nello scenario NZE, 2010-2050 (IEA, 2022)

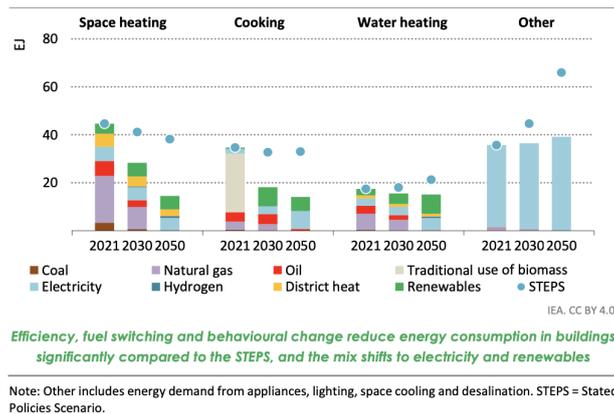


Figura 1.4 Total final consumption degli usi finali negli edifici per risorsa nello scenario NZE, 2021-2050 (IEA, 2022)

Secondo i dati riportati in Figura 1.3 il consumo finale di energia dei principali settori si ridurrà entro il 2030 del 10% rispetto al 2021 (IEA 2022) senza inficiare la crescita dell'indicatore economico GDP, in virtù nella maggiore efficienza energetica dei dispositivi utilizzatori e dei processi. E' interessante osservare come il settore edifici attualmente contribuisca per il 30% ai consumi che ammontano a 132 EJ nel 2021, destinati a decrescere fino al 2050 (IEA 2022) nonostante il futuro aumento della popolazione mondiale accrescerà il numero di immobili. L'efficientamento energetico, l'elettrificazione degli usi finali ed il comportamento dell'utente

rappresentano i principali approcci per la transizione degli edifici verso il minimo impatto ambientale. Analizzandoli nel dettaglio si osserva che la climatizzazione ed il riscaldamento degli ambienti costituiscono le principali quote di consumo, quest'ultimo maggiormente soddisfatto dalle fonti fossili ma soggetto ad elettrificazione che passerà dall'attuale 20% al 30% nel 2030 fino al 50% nel 2050. Successivamente verranno ulteriormente approfondite la potenzialità delle pompe di calore nel decarbonizzare i servizi di climatizzazione dell'edificio, ridurre la dipendenza dal gas naturale e proteggere il consumatore dall'aleatorietà dei prezzi dell'energia, in particolare quelle geotermiche in grado sfruttare il terreno come sorgente o pozzo termico valorizzando l'energia geotermica disponibile.

1.4 Il settore edilizio

Nel 2022 il settore edilizio globale ha influito per il 30% sui consumi finali globali richiedendo 132 EJ attraverso i principali vettori energetici quali energia elettrica, combustibili solidi e gassosi ed il teleriscaldamento. E' inoltre responsabile del 27% delle emissioni globali con una massa di CO_2 rilasciata pari a 10 Gt. In particolare 3 Gt derivano da emissioni dirette (8%) e 7 Gt da emissioni indirette per la generazione di elettricità e calore (19%). La seguente figura, sebbene riferita ad anni passati consente di sottolineare come il riscaldamento degli ambienti interni sia contraddistinto dalla maggior quota energia consumata e potenzialità di miglioramento.

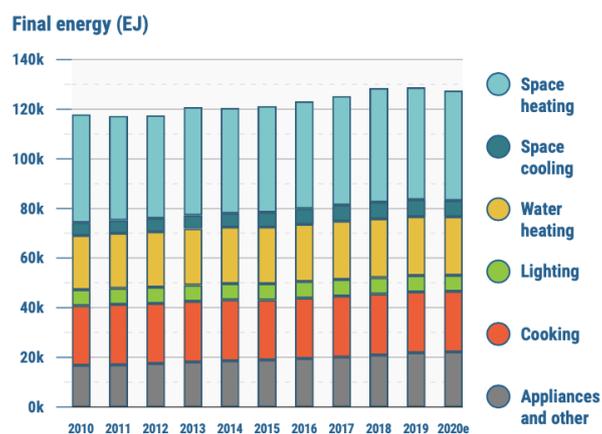


Figura 1.5 Consumi di energia finale negli edifici per servizio energetico (UNEP, 2021)

Pertanto la decarbonizzazione degli immobili è di fondamentale importanza per il raggiungimento degli obiettivi di neutralità climatica sanciti con il Green Deal Europeo e gli impegni sottoscritti con l'accordo di Parigi e recentemente rinnovati durante la United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC COP26). A tal proposito la linea programmatica dell'Unione Europea Fit for 55 condurrà alla revisione della direttiva Energy Performance Building Directive (Direttiva (UE) 2018/844), introdotta dal Clean Energy for All Europeans Package che promuove politiche che mirano ad annullare le emissioni del parco edilizio di nuova costruzione entro il 2030 e di quello esistente entro il 2050 favorendo la digitalizzazione dei sistemi energetici. Dal punto di vista tecnico la norma persegue:

- la progressiva sostituzione delle fonti energetiche fossili con le rinnovabili per soddisfare i fabbisogni di energia
- La crescente efficienza energetica dell'involucro edilizio attraverso il miglioramento delle prestazioni termiche e degli impianti con l'installazione di dispositivi con maggiore efficienza di conversione delle forme di energia
- La diffusione delle infrastrutture di monitoraggio degli impianti energetici che attraverso strategie di controllo tradizionali o avanzate abilitano ad una gestione ottimale degli impianti mediante l'integrazione degli impianti rinnovabili e l'interazione flessibile con la rete elettrica.
- Sensibilizzare l'utente riguardo gli effetti che il comportamento e le modalità di interazione con il sistema edificio-impianto possono avere sulla riduzione dei consumi.

Questa solida base normativa dovrebbe consentire di replicare lo scenario simulato dall'IEA (NZE scenario) ovvero riduzione della CO_2 emessa entro il 2050 nonostante la crescente superficie calpestabile degli edifici, sostenuta dall'aumento della popolazione mondiale (Fig.1.6).

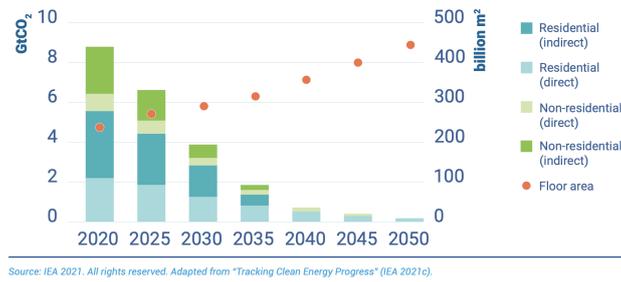


Figura 1.6 Domanda globale di energia e area calpestabile nello scenario NZE (UNEP, 2022)

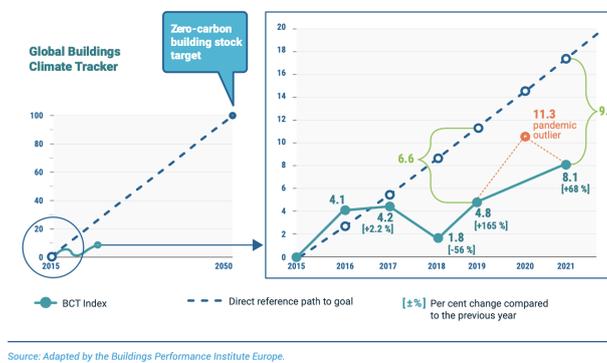


Figura 1.7 Indicatore Global Buildings Climate Tracker (UNEP, 2022)

Tuttavia i risultati del monitoraggio condotto nel Global Status Report for Buildings and Construction 2022 (Fig.1.7) evidenziano che l'indice aggregato del livello di decarbonizzazione degli edifici nel tempo realizza un andamento che devia dalla traiettoria necessaria a raggiungere la neutralità carbonica. In particolare l'indicatore subisce un netto miglioramento durante la pandemia principalmente per via del minor utilizzo degli edifici per poi ridursi nel 2021 incrementando ulteriormente il gap dalla traiettoria ideale. Alla luce delle considerazioni svolte emerge il ruolo delle pompe di calore nel riscaldare o raffrescare gli ambienti interni degli edifici in maniera sostenibile ed efficiente, mediante lo sfruttamento di energia elettrica da fonti rinnovabili e valorizzando il calore disponibile da sorgenti termiche a bassa temperatura.

1.5 Pompe di calore: ruolo e prospettive future

Le pompe di calore alimentate da energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili ricoprono un ruolo fondamentale nell'accelerare il processo di transizione del settore edile e raggiungere gli obiettivi comunitari contribuendo attivamente a ridurre l'utilizzo dei combustibili fossili per la climatizzazione degli ambienti interni e le conseguenti emissioni in virtù della loro maturità tecnologica e competitività economica. Se lo scenario normativo in vigore verrà rispettato nei tempi previsti l'IEA stima che le pompe di calore saranno globalmente responsabili di circa il 50% della riduzione d'impiego del gas naturale e prodotti petroliferi per il riscaldamento degli edifici (Fig.1.8). Il contributo alla riduzione delle emissioni legate al riscaldamento e produzione di acqua calda sanitaria negli edifici ammonta a 500 Mt, pari a circa il 40% della riduzione totale prevista per questi servizi e pari ad 1.2 Gt di CO_2 . (Fig.1.9).

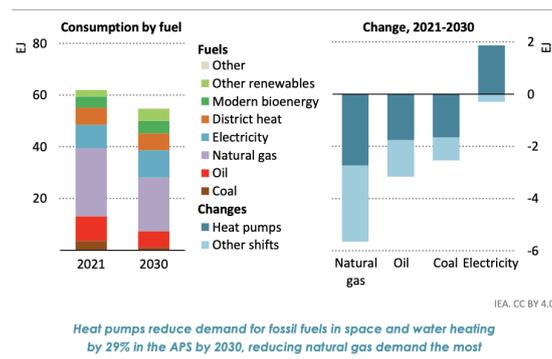


Figura 1.8 Consumo globale di energia per riscaldamento e acqua calda sanitaria negli edifici (IEA, 2022)

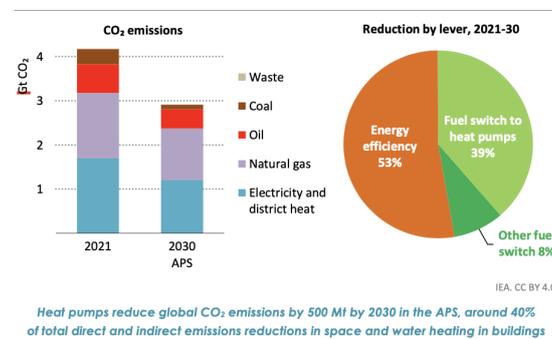


Figura 1.9 Emissioni globali di CO_2 per riscaldamento e acqua calda sanitaria negli edifici (IEA, 2022)

Tuttavia la loro diffusione comporterà un aumento della domanda di energia elettrica pari al 9% (IEA 2022) dell'incremento totale previsto nel periodo 2021-2030, pertanto in alcuni paesi potrebbe essere necessario aumentare la capacità degli impianti di generazione elettrica e delle infrastrutture di trasporto. Attuando parallelamente un processo di efficientamento degli involucri edilizi volto a limitare i fabbisogni termici è possibile contenere i picchi di assorbimento elettrico e la taglia delle pompe di calore installate. Occorre inoltre considerare i rischi derivanti dal potenziale rilascio dei gas frigoriferi necessari al funzionamento della macchina il cui elevato global warming potential potrebbe limitare i benefici apportati dalla tecnologia alla riduzione delle emissioni di sostanze clima-alteranti. Nel contesto europeo le pompe di calore rispondono efficacemente a molteplici esigenze dettate dal piano REPowerEU che introduce misure per accelerare la diffusione della tecnologia con l'obiettivo di raddoppiare il tasso di installazione e raggiungere i 30 milioni di unità installate ed una riduzione del consumo di gas per il riscaldamento pari a 21 milioni di m^3 entro il 2030 (Fig.1.10).

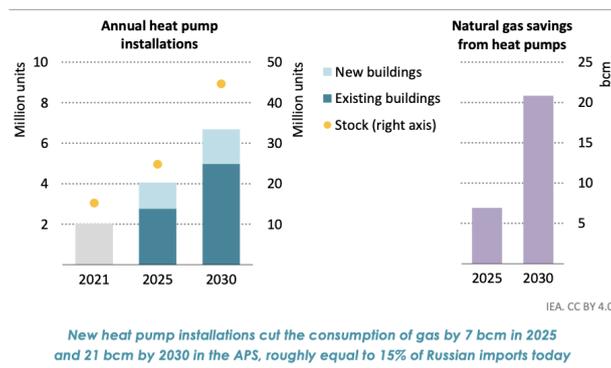


Figura 1.10 Installazione pompe di calore e risparmio di gas naturale (IEA, 2022)

Capitolo 2

La risorsa geotermica

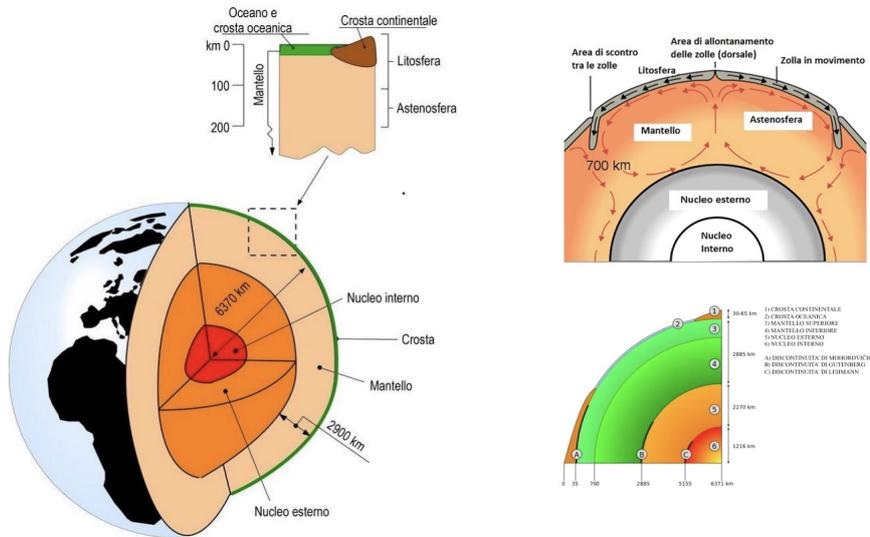
2.1 Introduzione

L'energia geotermica o geotermia (dal greco antico 'geo' terra e 'thermos' calore) rappresenta il calore naturale del pianeta derivante da quello primordiale generatosi durante il processo di formazione planetario e da quello di decadimento di alcuni isotopi radioattivi (K40 – Th232-U238-U235) contenuti nelle rocce presenti all'interno della Terra. La naturale tendenza all'equilibrio termico determina un progressivo aumento della temperatura con la profondità ed un flusso di calore verso la superficie mediamente pari a 0.0916 W/m^2 che rende disponibile una potenza termica di circa $47 \pm 2 \text{ TW}$ (Davies and Davies, 2010). Generalmente il trasferimento di calore verso la superficie avviene per conduzione negli strati solidi di roccia e convezione in fluidi termovettori, rappresentati dalle acque meteoriche o superficiali che infiltrandosi nelle profondità della crosta terrestre costituiscono le falde acquifere destinate a riscaldarsi a contatto con la roccia a maggiore temperatura. Gli acquiferi prendono il nome di serbatoi geotermici (reservoir) e sono parte essenziale del campo geotermico perché dalle differenti temperature e stati di aggregazione dell'acqua contenuta, che dipendono dalla tipologia di margini tettonici o dall'eventuale presenza di anomalie termiche, si distinguono i principali impieghi della fonte geotermica come la generazione elettrica o la climatizzazione degli edifici. La continua ricircolazione artificiale o naturale dei fluidi termovettori all'interno del reservoir ed il flusso geotermico costantemente disponibile rendono la fonte geotermica rinnovabile ed inesauribile con riferimento ad orizzonti temporali confrontabili con l'esistenza umana. Per meglio

comprendere le potenzialità della fonte è opportuno riferirsi all'energia geotermica disponibile, in particolare quella contenuta nel pianeta ammonta a circa 12 600 000 ZJ ed è tanto elevata che la sola quota tecnicamente utilizzabile, pari a circa 2000 ZJ (Massachusetts Institute of Technology, 2006), sarebbe sufficiente a soddisfare il fabbisogno mondiale di energia annuo (0.5 ZJ) per 4000 anni. Le potenzialità della risorsa nel rispondere efficacemente alle esigenze di decarbonizzazione dei settori maggiormente emissivi sono rimaste a lungo inesprese a causa dei maggiori costi d'investimento e quadri normativi talvolta carenti, difatti contribuisce per meno dell'1% (IEA, 2022) alla produzione mondiale di energia però il piano RePowerEU varato dalla Commissione Europea mira ad incentivare la diffusione della fonte geotermica e velocizzare il processo autorizzativo.

2.2 La struttura interna della terra

La struttura interna della terra è idealmente suddivisibile in superfici ellissoidali concentriche in relazione alle loro proprietà fisiche o reologiche. Differenziando gli stati secondo la loro composizione chimica è possibile distinguere la crosta ovvero lo strato più esterno il cui spessore risulta trascurabile rispetto al raggio terrestre e variabile tra aree continentali e oceaniche in cui la crosta è ulteriormente suddivisibile. La Crosta continentale ha spessore medio di 35 km e densità intermedia (2.9 kg/dm^3) essendo composta da rocce silicatiche (ricche di Al, Si) e la formazione delle zone più antiche risale a 3.8 miliardi di anni fa mentre quella oceanica ha spessore variabile tra 3-15 km ed elevata densità (3.2 kg/m^3) essendo composta da rocce ricche di ferro e magnesio, la sua formazione risale a 180 milioni di anni fa (Barbier, 1997). Vi è poi il mantello compreso tra la crosta (da cui è separato dalla discontinuità di Mohorovičić) ed il nucleo da cui è distinto idealmente dalla discontinuità di Gutenberg. Si estende per circa 2900 km e rappresenta l'82% del volume del pianeta, la sua composizione variabile consente di suddividerlo in mantello superiore ed inferiore. Il Mantello superiore, situato subito sotto la crosta, è prevalentemente allo stato solido e costituisce la litosfera pertanto prende il nome di mantello litosferico, a maggiore profondità presenta un comportamento viscoso riconducibile alla parziale fusione delle rocce per via delle elevate temperature. Nel mantello inferiore la roccia aumenta di densità a causa delle elevate pressioni ma mantiene un parziale comportamento fluido. Infine vi è il nucleo caratterizzato da alte densità e pressioni



(a) Stratigrafia fisica della terra (Dickson and Fanelli, 2004) (b) Struttura reologica della Terra (Focus, 2022)

Figura 2.1 Struttura fisica e reologica del pianeta

diviso per stato di aggregazione in nucleo interno, solido ad una temperatura di 5400° e pressione di 330-360 GPa, ed esterno che, ad una temperatura di 3000°C ed una pressione di 140 GPa, è composto da ferro e nichel allo stato liquido il cui movimento genera il campo magnetico terrestre (Barbier, 1997). Da un punto di vista fisico la terra è suddivisa in litosfera, astenosfera, mesosfera e nucleo. La litosfera è composta dalla crosta e dalla parte superiore del mantello ed è pertanto solida con uno spessore variabile tra 70 km al di sotto degli oceani e 125 km in corrispondenza dei continenti, è suddivisa in blocchi noti come placche o zolle il cui movimento è alla base della tettonica. L'astenosfera si estende fino ad una profondità di 200 km ed è composta da rocce prossime al punto di fusione e con comportamento di un liquido ad alta viscosità i cui moti convettivi contribuiscono alla trasmissione del calore geotermico dal nucleo verso l'esterno ed al movimento delle zolle litosferiche soprastanti. Dall'interazione dei blocchi litosferici attraverso i margini di contatto deriva la risalita di materiale magmatico e le conseguenti anomalie termiche fondamentali per l'esistenza dei campi geotermici, vi è quindi la mesosfera che comprende il mantello inferiore e presenta quindi analoghe proprietà in termini di densità e parziale comportamento liquido ed il nucleo.

Le geo-strutture degli impianti geotermici si sviluppano nel terreno a profondità non superiori ai 50-100m interessando quindi la porzione superiore della crosta

terrestre. Il terreno è un sistema costituito da fasi solide, liquide e gassose che derivano dagli eventi climatici, biologici ed antropici e rappresenta un sistema aperto in grado di scambiare massa ed energia. La sua composizione è variabile in relazione all'area geografica ed alla profondità determinando proprietà termiche e meccaniche differenti che influiscono in maniera determinante sulle scelte progettuali riguardanti la tipologia degli impianti geotermici, sulle modalità di posa e reali prestazioni. Nel sottosuolo coesistono quindi materiali lapidei porosi che ospitano la fase liquida ovvero l'acqua derivante dal processo di infiltrazione delle acque superficiali e meteoriche attraverso le fratture e porosità del terreno. In virtù del nesso tra terreno solido ed acqua per comprendere la stratigrafia del terreno è necessario introdurre la classificazione delle acque (Risorse idriche,2022).

Le acque nel terreno possono essere classificate in relazione alla mobilità negli strati di sottosuolo in acque di ritenzione, capillari e gravifiche.

- **Acque di ritenzione:** le acque di ritenzione non sono mobilizzabili per gravità o capillarità. Possono essere ulteriormente distinte in relazione allo spessore dello strato liquido in
 - *Acqua pellicolare:* è uno strato micrometrico composto da alcune decine di molecole d'acqua
 - *Acqua igroscopica:* è uno strato monomolecolare che si sposta solo in forma di vapore
- **Acque capillari:** le acque capillari sono quelle trattenute per capillarità nelle porosità del terreno. Possono essere:
 - *Sospese:* se trattenuta dalle porosità dell'acquifero
 - *Sostenute:* la frazione che costituisce la colonna di liquido al di sopra della superficie freatica
- **Acque gravifiche:** le acque gravifiche sono dette anche acque mobilizzabili perché percolano nel terreno per effetto dei carichi piezometrici

Il profilo stratigrafico del terreno è caratterizzato da zone con differente mobilità dell'acqua e grado di saturazione pertanto è possibile distinguere principalmente due regioni dette zona insatura e satura, separate dalla frangia capillare (Taddia,2022). Nella zona insatura le porosità del terreno presentano una frazione variabile di

aria ed acqua, la mobilità e lo spessore degli strati di quest'ultima consentono di suddividere ulteriormente la regione insatura in zona di evapotraspirazione e di ritenzione. Nella zona di evapotraspirazione le porosità sono occupate da aria e prevalentemente da acqua di ritenzione di tipo igroscopico perché quella gravifica percola verso lo strato inferiore. E' soggetta all'evapotraspirazione, ovvero l'azione congiunta dell'evapotraspirazione superficiale e della traspirazione delle piante, che consiste nell'evaporazione principalmente delle acque gravifiche e trasferimento del vapor d'acqua nell'aria esterna a contatto con la superficie. Seguono la zona di ritenzione che trattiene l'acqua di ritenzione ovvero l'insieme dell'acqua pellicolare ed igroscopica e la frangia capillare che separa la zona satura da quella insatura ospitando nelle porosità del terreno l'acqua gravifica, di ritenzione e acque capillari a pressione inferiore a quella atmosferica. Infine vi è la zona satura in cui le porosità del terreno sono completamente riempite di acqua e rappresenta la falda acquifera. Il livello in cui la pressione dell'acqua eguaglia quella atmosferica è detto superficie freatica (Risorse idriche,2022).

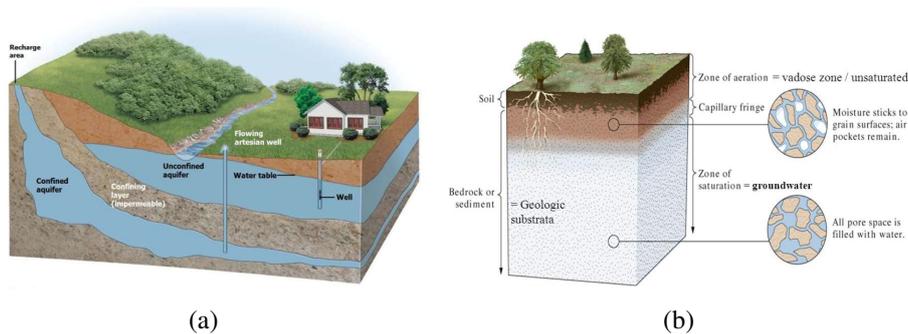


Figura 2.2 Falde acquifere (a) (W.H. Freeman and Company, 2012) e stratigrafia del terreno (b) (Aeschbach-Hertig, University of Heidelberg)

Pertanto il sottosuolo è caratterizzato dalla presenza di volumi idrici detti acque sotterranee o acquiferi cioè formazioni geologiche costituite da rocce porose e permeabili in grado di immagazzinare e consentire il deflusso dell'acqua. L'acquifero, per potersi definire tale, deve essere costituito da rocce o sedimenti caratterizzati da un'adeguata capacità di immagazzinamento che dipende dalla porosità e capacità di flusso che dipende dal grado di interconnessione tra pori. Per quantificare la capacità di deflusso dell'acquifero è necessario fare riferimento ad un campione di terreno per il quale la porosità è definita come il rapporto tra il volume dei pori vuoti V ed il

volume totale del campione

$$\varphi = \frac{V}{V_t} \quad (2.1)$$

da cui deriva il rapporto di vuoto (void ratio) ovvero il rapporto tra volume dei pori ed il solo volume solido

$$VR = \frac{\varphi}{1 - \varphi} \quad (2.2)$$

La porosità totale così definita include tutti i pori, anche quelli che non consentono il deflusso dell'acqua perché sono isolati dagli altri. Con l'intento di caratterizzare la propensione del campione di terreno a consentire il passaggio di acqua si fa riferimento alla porosità effettiva η_e riferita al sottoinsieme di pori in comunicazione tra loro che permettono il passaggio di fase liquida. Questa risente della granulometria, ovvero la dimensione dei grani espressa dal diametro equivalente, della disposizione nello spazio ed omogeneità dimensionale dei grani. In particolare la porosità è proporzionale in maniera inversa alla dimensione dei grani e diretta rispetto all'omogeneità della pezzatura ed alla simmetria della loro struttura. In base all'origine della porosità possiamo distinguere porosità primaria, che deriva dal processo di formazione della roccia, e secondaria quando i pori sono generati successivamente da eventi esterni (Taddia,2022). Saturando di acqua il campione considerato e lasciandolo drenare solo sotto l'azione della forza di gravità il materiale rilascerà solo la frazione di liquido contenuta nei pori e conterrà quella in superficie sotto l'azione della tensione superficiale. Il rapporto tra il volume di acqua gravifica che il terreno drena ed il volume del campione prende il nome di resa specifica S_y , mentre quello tra acqua di ritenzione e volume della roccia è chiamato ritenzione specifica S_r . La somma dei volumi di acqua drenata e ritenuta è pari al volume dei pori disponibile in grado di ospitarla, pertanto

$$\eta_e = S_y + S_r \quad (2.3)$$

Pertanto la porosità del terreno, il grado di interconnessione dei pori ed il tipo di liquido influiscono sulla conduttività idraulica K ovvero capacità del materiale costituente l'acquifero di consentire il flusso d'acqua ed espressa come

$$K = k \cdot \frac{\rho_w \cdot g}{\mu_w} \quad (2.4)$$

Dove k è la permeabilità intrinseca [m^2], ρ_w la densità del liquido a 20°C [kg/m^3], μ_w

la viscosità dinamica del fluido a 20°C [kg/ms] e g l'accelerazione di gravità [m/s^2]. La permeabilità intrinseca k rappresenta l'effetto delle caratteristiche del mezzo poroso sulla conduttività idraulica ed è infatti espressa dalla seguente equazione

$$k = C \cdot d^2 \quad (2.5)$$

Dove C è un fattore di forma e d il diametro medio dei pori. La conduttività idraulica K cresce all'aumentare del diametro dei pori perché offrono una minor superficie di contatto con l'acqua riducendo gli attriti fluidodinamici. La portata d'acqua che l'acquifero è in grado di trasportare deriva dalla legge di Darcy (Francani and Alberti)

$$Q = -K \cdot A \cdot \frac{dh}{dl} \quad (2.6)$$

in cui la portata è proporzionale attraverso la conduttività idraulica K [m/s] ed all'area della sezione di passaggio del mezzo poroso [m^2] al gradiente idraulico dh/dl . Quest'ultimo è il rapporto tra la variazione di carico idraulico dh e la lunghezza infinitesima della linea di corrente considerata dl , ovvero è la perdita di carico per unità di lunghezza. La legge di Darcy ha validità limitata a deflussi laminari in cui il numero di Reynold, calcolato considerando come dimensione caratteristica il diametro medio dei pori, assume valori compresi tra 1 e 10 (Taddia,2022). Nota la portata che attraversa l'acquifero e l'area di passaggio del mezzo poroso è possibile ricavare la velocità di Darcy, ovvero la velocità che il fluido avrebbe considerando l'intera sezione di passaggio dell'acquifero

$$v = \frac{Q}{A} = -K \cdot \frac{dh}{dl} \quad (2.7)$$

Tuttavia l'acqua fluisce solo attraverso le porosità quindi l'effettiva area di passaggio del fluido è limitata alla sola sezione trasversale delle porosità aperte. La reale velocità media di deflusso è nota come velocità di infiltrazione v_x definita come

$$v_x = \frac{Q}{\eta_e \cdot A} = -\frac{K}{\eta_e} \cdot \frac{dh}{dl} \quad (2.8)$$

Dove η_e è la porosità effettiva. Per descrivere la capacità di immagazzinamento dell'acquifero è necessario introdurre l'immagazzinamento specifico S_s che quantifica il volume d'acqua che viene immagazzinato o drenato dall'acquifero per una

variazione di carico o per compressione della struttura porosa. E' espresso dalla seguente equazione

$$S_s = \rho_w \cdot g \cdot (\alpha + \varphi \cdot \beta) \left[\frac{1}{m} \right] \quad (2.9)$$

In cui ρ_w [kg/m^3] è la densità e β la comprimibilità dell'acqua [m^2/N], g l'accelerazione di gravità [m^2/s], α la comprimibilità della struttura [m^2/N] ed φ la porosità totale. La pressione degli strati di terreno soprastanti la zona satura deformano la struttura porosa del terreno modificando la comprimibilità α e la densità dell'acqua. La differente permeabilità degli strati terreno di soprastanti e sottostanti la falda consentono di distinguere falde libere, confinate e semi-confinate (Francani and Alberti). Le falde libere anche note come freatiche o non confinate sono limitate solo inferiormente da uno strato impermeabile e presentano una superficie esposta all'atmosfera detta superficie freatica libera di oscillare in relazione ai flussi idrici uscenti ed entranti nella falda. Il volume di acqua rilasciata per unità di superficie della falda freatica sottoposta ad una variazione unitaria di carico idraulico è espressa dal coefficiente di stoccaggio S come segue

$$S = \frac{dV_w}{dh} \cdot \frac{1}{A} = S_y + b \cdot S_s \quad (2.10)$$

Il volume d'acqua rilasciata per unità di superficie e carico idraulico è pari alla somma del contributo dell'acqua gravifica, espressa dalla resa specifica S_y , e di quella espulsa per variazione di carico e deformazione dell'acquifero espressa dal prodotto tra l'immagazzinamento specifico S_s e lo spessore dell'acquifero b [m]. La falda Confinata o Artesiana è limitata superiormente ed inferiormente da strati impermeabili e l'acqua si trova a pressione superiore a quella atmosferica pertanto esiste una superficie piezometrica che rappresenta il livello a cui l'acqua si porterebbe se la falda fosse messa in comunicazione con l'ambiente esterno a pressione atmosferica mediante un pozzo. Il coefficiente di stoccaggio assume la forma

$$S = b \cdot S_s \quad (2.11)$$

Da cui si evince che tutto il volume d'acqua rilasciato è imputabile alla compressione della falda. Le considerazioni fin qui svolte consentono di valutare il volume di acqua drenata dall'acquifero ovvero di fluido termovettore disponibile per lo stoccaggio o il trasporto verso la superficie del calore geotermico. In particolare il volume d'acqua disponibile V_w [m^3] è proporzionale al coefficiente di stoccaggio, alla superficie

soprastante la falda S [m²] ed alla variazione del battente d'acqua Δh [m]

$$V_w = S \cdot A \cdot \Delta h \quad (2.12)$$

2.3 Bilancio termico del terreno

Il terreno può essere modellato come un sistema termodinamico aperto che scambia massa ed energia con l'esterno. Come analizzato in precedenza è un mezzo poroso in cui il trasferimento di calore verso la superficie avviene per conduzione nella fase solida del terreno e per convezione nell'acqua contenuta all'interno delle porosità. Si consideri una porzione infinitesima ed isotropa di terreno in cui siano trascurabili sia le dissipazioni viscosi che il calore scambiato radiativamente ed in cui la temperatura del terreno T_g e quella dell'acqua T_w siano uguali e pari a T. Applicando l'equazione del calore 2.13 separatamente alla fase solida e liquida contenuta nel volume di controllo otterremo

$$\rho \cdot c \cdot \left(\frac{dT}{dt} + \vec{v} \cdot \nabla T \right) = k \cdot \nabla^2 T + \mu \cdot q + q''' + q_{irr} \quad (2.13)$$

Per la fase solida

$$(1 - \varphi) \cdot (\rho \cdot c)_g \cdot \left(\frac{dT_g}{dt} \right) = (1 - \varphi) \cdot \nabla (k_g \cdot \nabla T_g) + (1 - \varphi) \cdot q_g''' \quad (2.14)$$

e per quella liquida

$$\varphi \cdot (\rho \cdot c_p)_w \cdot \left(\frac{dT_w}{dt} \right) + (\rho \cdot c_p)_w \cdot \vec{v} \cdot \nabla T_w = \varphi \cdot \nabla (k_w \cdot \nabla T_w) + \varphi \cdot q_w''' \quad (2.15)$$

Dove c è il calore specifico [J/kgK], k la conducibilità termica [W/m²K], q la generazione volumetrica di potenza [W/m³] distinti per il terreno ed acqua con i pedici g e w e φ è la porosità. Entrambe le fasi scambiano calore per conduzione mentre solo quella liquida presenta il termine che esprime la densità di potenza termica scambiata per trasporto di massa. Il profilo di velocità dell'acqua è ottenuto applicando la legge di Darcy (2.7) noto il gradiente idraulico $\frac{dh}{dl}$ e la conduttività idraulica K. Ipotizzando nulla la generazione volumetrica di potenza e l'uguaglianza delle temperature del solido e del liquido $T_g = T_w = T$ è possibile ottenere l'equazione

del mezzo poroso

$$\rho \cdot c \cdot \frac{dT}{dt} + (\rho \cdot c)_w \cdot \vec{v} \cdot \nabla T = \nabla(k \cdot \nabla T) \quad (2.16)$$

in cui il termine $\rho \cdot c \cdot \frac{dT}{dt}$ modella la variazione di energia termica accumulata nel tempo del terreno attraverso la capacità termica volumetrica ovvero il rapporto fra la quantità di calore assorbita (dQ) e la variazione di temperatura subita (dT) per unità di volume. Il termine $(\rho \cdot c)_w \cdot \vec{v} \cdot \nabla T$ rappresenta la variazione della densità di potenza dovuta al movimento del liquido con un certo profilo di velocità ed infine $\nabla(k \cdot \nabla T)$ modella la trasmissione per conduzione dell'energia termica per unità di volume (Incropera et al., 2011). La conducibilità termica k [W/mk], ovvero la potenza termica che attraversa perpendicolarmente una superficie unitaria sottoposta ad una differenza di temperatura unitaria, e la capacità termica [J/kgK], definita come il rapporto fra la quantità di calore assorbita (dQ) e la variazione di temperatura subita (dT) per unità di volume di terreno, sono una media pesata rispetto alla porosità totale delle proprietà della fase solida e di quella liquida.

$$\rho \cdot c = (1 - \varphi) \cdot \rho_g \cdot c_g + \varphi \cdot \rho_w \cdot c_w \quad (2.17)$$

$$k = (1 - \varphi) \cdot k_g + \varphi \cdot k_w \quad (2.18)$$

Ipotizzando un deflusso della falda stazionario quasi-monodimensionale in cui siano trascurabili le componenti della velocità normali alla direzione principale e costanti le proprietà termiche si ottiene

$$U \cdot \frac{dT}{dx} = \alpha \cdot \nabla^2 T \quad (2.19)$$

In cui $V = v \cdot \frac{(\rho c)_w}{\rho c}$ è la velocità effettiva ed $\alpha = \frac{k}{\rho c}$ la diffusività termica. Appare chiaro come l'attitudine del terreno a trasmettere ed accumulare calore dipenda essenzialmente dalla tipologia e dall'aggregazione delle rocce che lo compongono e soprattutto dal tenore d'acqua presente, dal momento che sue elevate proprietà termiche contribuiscono fortemente a determinare quelle complessive del suolo. Il test di risposta termica del terreno consente di quantificare queste grandezze fondamentali rilevando la variazione di temperatura tra la condizione indisturbata e quella successiva all'applicazione di una forzante termica.

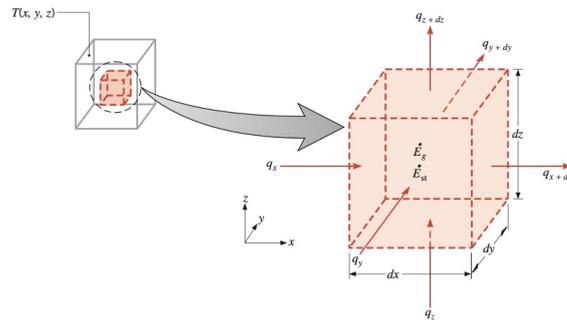


Figura 2.3 Volume di controllo infinitesimo, $dx \, dy \, dz$, per analisi della conduzione in coordinate cartesiane (Incropera et al., 2011)

2.4 Profilo di temperatura del terreno

Il terreno rappresenta una sorgente di calore o un pozzo termico caratterizzato da una temperatura superficiale variabile con la temperatura dell'aria e progressivamente più stabile con la profondità per via del trasferimento di calore verso la superficie. Riferendosi nuovamente ad un volume di controllo coincidente con una porzione cubica infinitesima di terreno idealmente prelevata dalla superficie questo interagirà con l'ambiente esterno scambiando flussi di massa ed energia attraverso le sue facce. In particolare quella superiore sarà attraversata da un flusso termico radiativo di origine solare ed uno convettivo scambiato con l'aria esterna, quelle laterali sono caratterizzate da flussi di energia veicolati dalle portate in massa di acqua sotterranea entranti ed uscenti dal volume di controllo, infine quella inferiore sarebbe interessata dal flusso di calore geotermico e dai flussi associati alle portate di acqua che percolano in profondità. La risoluzione del bilancio termico nelle tre dimensioni in regime transitorio e la stima dei flussi termici elencati risulta particolarmente complessa, pertanto la norma UNI 11466 propone un approccio semplificato basato sulle seguenti ipotesi:

- Terreno monodimensionale, infinitamente esteso nella direzione delle z positive e limitato superiormente dalla superficie
- Materiale omogeneo ed isotropo
- Trasmissione del calore per sola conduzione

- Flusso geotermico trascurabile

L'equazione di diffusione del calore nella forma più generale risulta essere

$$k \cdot \nabla^2 T + q''' = \rho \cdot c \cdot \frac{dT}{dt} \quad (2.20)$$

la cui risoluzione richiede di formulare due condizioni al contorno ed una iniziale

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

In particolare la prima condizione impone che la temperatura superficiale del terreno abbia un andamento nel tempo uguale a quello della temperatura ambientale esterna, approssimata con una sinusoide di ampiezza media A_s che oscilla attorno al valor medio T_m con pulsazione ω . La seconda impone che la temperatura a profondità elevata tenda asintoticamente ad un valore costante, infine la condizione iniziale stabilisce il profilo di temperatura nello spazio all'istante iniziale. Pertanto l'andamento della temperatura del terreno con la profondità e nel tempo è espressa dalla seguente equazione

$$T(z, t) = T_m + A_s \cdot e^{-\beta_s \cdot z} \cdot \sin(\omega \cdot t - \beta_s \cdot z) \quad (2.21)$$

dove T_m è la temperatura media del terreno, A_s è l'ampiezza, $\beta_s = \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}$ è la costante di smorzamento ed infine $e^{-\beta_s \cdot z}$ è il fattore di smorzamento.

Dal comportamento termico del terreno possiamo distinguere tre zone:

- **zona superficiale:** compresa tra 1-3 m di profondità in cui la temperatura del terreno risulta fortemente influenzata dalla variazione giornaliera e stagionale della temperatura esterna
- **zona intermedia:** a profondità compresa tra i 3-15 m in cui la temperatura non dipende dalle variazioni giornaliere ma solo da quelle stagionali.
- **zona profonda:** per distanze dalla superficie superiori a 15m la temperatura del terreno è indipendente dalle condizioni climatiche esterne. Tuttavia all'aumentare della profondità il flusso geotermico assume valori non più trascurabili che determinano un aumento di temperatura noto come gradiente geotermico.

Il gradiente geotermico rappresenta la variazione positiva di temperatura all'aumentare della profondità all'interno della crosta terrestre. Essendo solida il trasporto di calore per conduzione in condizioni monodimensionali e stazionarie è descritto dall'equazione di Fourier

$$q = -k \cdot \frac{dT}{dz} \quad (2.22)$$

Dove q è il flusso termico [W/m^2], k la conducibilità termica del solido e dT/dz rispettivamente le variazioni di temperatura e profondità. Pertanto il gradiente geotermico [K/m] è esprimibile come (Taddia,2022)

$$\nabla T = \frac{dT}{dz} = \frac{q}{k} = 0.03 \frac{W}{m} \quad (2.23)$$

Sebbene il valore del gradiente geotermico non sia costante (Fig.2.5) con la profondità può essere assunto mediamente pari a $3^\circ C/100 m$ all'interno della crosta terrestre a profondità tipiche delle applicazioni geotermiche. Dalle considerazioni fin qui svolte emerge come la temperatura del terreno assuma valori variabili con la profondità ma costanti nel tempo e non influenzati dalle condizioni climatiche esterne per profondità superiori a circa 25 m. Sebbene la temperatura del terreno risulti variabile a livello giornaliero e stagionale per profondità minori di 25 m assume valori superiori alla temperatura media dell'aria in inverno ed inferiori d'estate consentendo di sfruttare la risorsa geotermica con l'ausilio di geo-strutture in grado di prelevare o cedere calore al terreno e pompe di calore elettriche per innalzarne il livello termico.

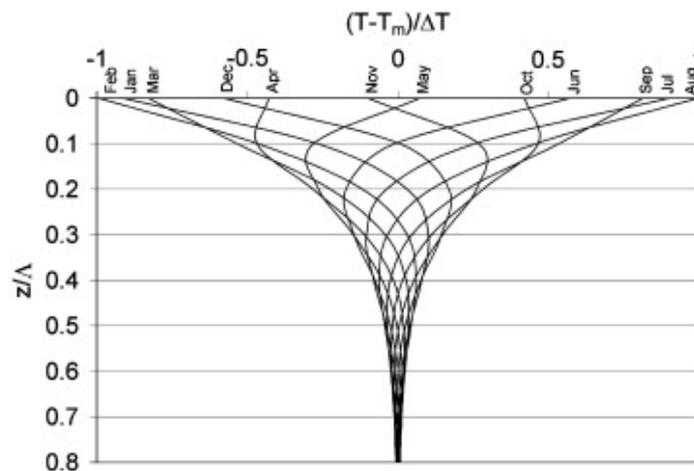


Figura 2.4 Profilo di temperatura con la profondità nei diversi mesi dell'anno (Taylor and Stefan, 2009)

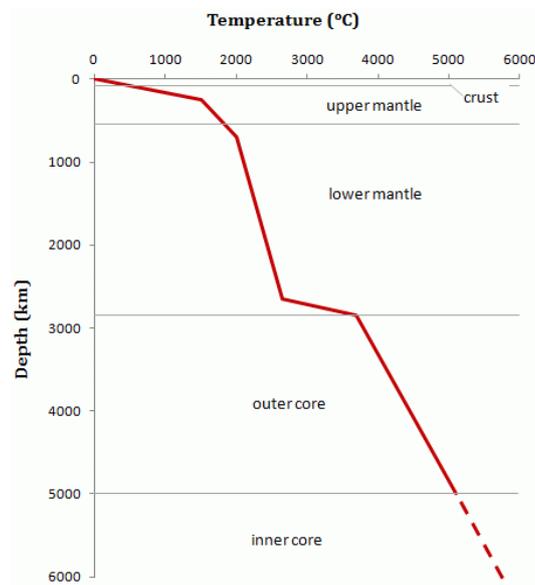


Figura 2.5 Andamento del gradiente geotermico (Alfi et al., 2003)

Un sistema geotermico è schematicamente composto da tre elementi principali: la sorgente termica, il serbatoio termico ed il fluido termovettore (Barbier, 1997). La sorgente termica è il calore endogeno terrestre la cui trasmissione verso la superficie dipende dalla dinamica della struttura interna del pianeta. Il serbatoio è rappresentato dal terreno e dalle falde acquifere con la struttura e proprietà idrogeologiche esaminate nei capitoli precedenti ed il fluido termovettore, che trasferisce il calore dalla profondità alla superficie, può essere acqua direttamente prelevata dalla falda acquifera superiore o un fluido secondario in relazione alla tipologia di impianto. Occorre fare una distinzione tra risorse e riserve geotermiche in quanto un sistema geotermico rappresenta una risorsa in caso di comprovata presenza a seguito di analisi geologiche che ne caratterizzano la profondità, temperatura, porosità e permeabilità idraulica della roccia oltre all'estensione degli acquiferi e la salinità delle acque sotterranee. Una riserva geotermica invece è frazione della risorsa che secondo i risultati delle analisi geologiche è tecnicamente ed economicamente sfruttabile. Il *D.Lgs. 22/2010* (all'art.1 comma 2) classifica le risorse geotermiche proprio in relazione alla temperatura del fluido termovettore reperito in

- **Alta Entalpia:** quelle caratterizzate da una temperatura del fluido reperito superiore a 150 °C

- **Media entalpia:** quelle caratterizzate da una temperatura del fluido reperito compresa tra 90 °C e 150 °C
- **Bassa entalpia:** quelle caratterizzate da una temperatura del fluido reperito inferiore a 90 °C

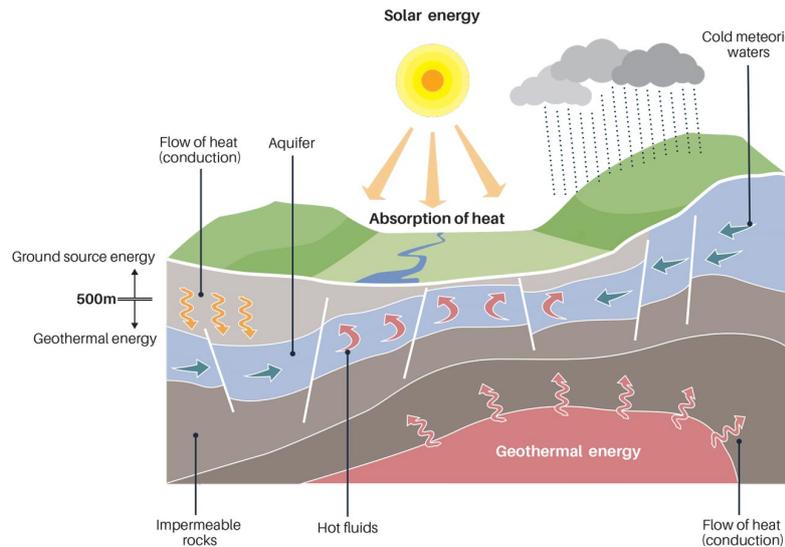


Figura 2.6 Sistema geotermico (British Geological Survey)

2.5 Sistemi geotermici ad alta e media entalpia

Le risorse ad alta e media entalpia derivano dalla risalita di materiale magmatico che in prossimità di bacini idrici sotterranei scalda l'acqua fino a vaporizzarla oppure cede calore a rocce porose sotterranee. Nel primo caso i moti convettivi favoriscono la risalita del termovettore verso la superficie rendendolo disponibile a profondità di poche centinaia di metri. La diversa stratigrafia del sottosuolo e modalità di trasferimento del calore consentono di distinguere diversi campi geotermici ad alta entalpia come quelli a vapore dominante, acqua calda, geo-pressurizzati, hot dry rock e magmatici (Taddia, 2022). L'esistenza dei campi a vapore dominante è resa possibile dalla compresenza di un serbatoio termico con superfici impermeabili verso il terreno circostante per contenere il termovettore, elevata porosità effettiva per consentirne la circolazione e di risalite di magma ad alcuni chilometri dalla superficie che scaldano l'acqua del serbatoio termico generando grandi quantità di vapore saturo

umido o surriscaldato (Barbier, 1997). I campi geotermici ad acqua calda coincidono con un sistema di acque sotterranee a profondità nell'ordine dei 1000-3000 km (Taddia,2022) in cui l'acqua è scaldata in maniera analoga ai campi a vapore ma non oltre i 100 °C. I sistemi geo-pressurizzati sono caratterizzati dalla presenza di acque sotterranee ad elevata pressione e soggette ad un ingente gradiente geotermico perché contenute in rocce permeabili situate ad elevata profondità. Queste caratteristiche offrono la possibilità di sfruttare sia l'energia termica che piezometrica. Le risorse classificate come hot dry rock invece non dispongono del fluido termovettore ed il calore è accumulato in roccia scarsamente porosa situata vicino alla superficie ed originata dalla solidificazione del magma che non riuscendo a giungere in superficie rimane intrappolato nella crosta terrestre. L'assenza del termovettore complica lo sfruttamento della risorsa che richiede l'esecuzione del processo di frattura idraulica (fracking) in cui getti d'acqua ad alta pressione fessurano la roccia, la raffreddano e veicolano il calore in superficie. Infine i campi magmatici derivano dalla risalita di magma in corrispondenza dei confini tra placche che rimanendo intrappolato a circa 5 km di profondità forma rocce ignee a temperature variabili tra 600-1200°C (Taddia, 2022) che costituiscono il serbatoio termico. L'estrazione di energia termica dal magma presenta difficoltà tecniche ed economiche principalmente imputabili al processo di perforazione. Il calore estratto dai precedenti campi geotermici ad alta e media entalpia può essere direttamente utilizzato in processi industriali o indirettamente in impianti a vapore per la generazione elettrica.

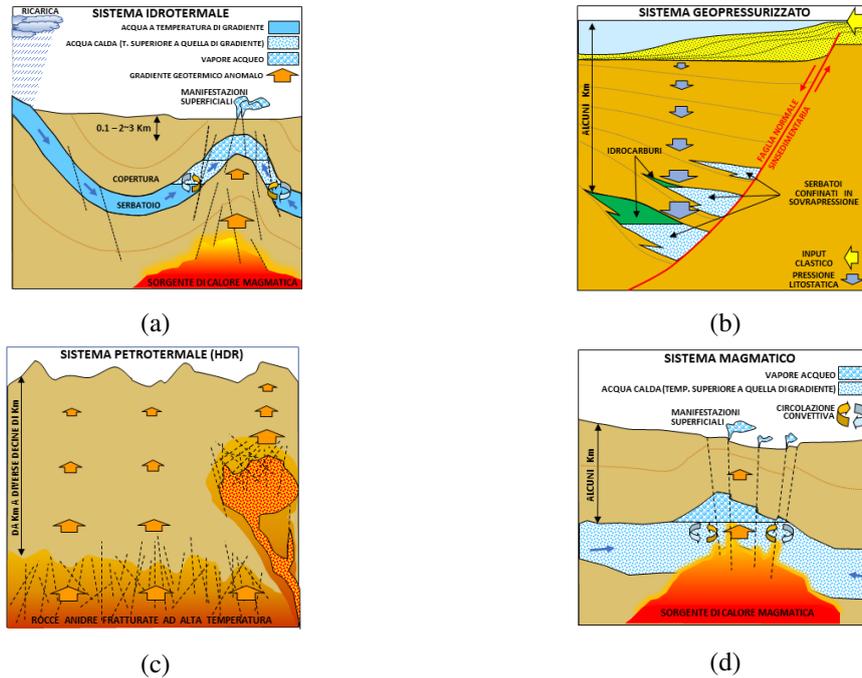


Figura 2.7 Sistema geotermico a vapore dominante (a), geopressurizzato (b), hot dry rock(c) e magmatico (d) (Wikipedia, 2023)

2.6 Sistemi geotermici a bassa entalpia e geoscambiatori

I sistemi geotermici a bassa entalpia sono caratterizzati da una temperatura del serbatoio geotermico inferiore a 90°C e consentono l'uso diretto del calore in una vasta gamma di applicazioni come la climatizzazione degli ambienti, la produzione di acqua calda sanitaria o l'attuazione di processi afferenti al settore industriale e agricolo (riscaldamento serre, essiccazione e pastorizzazione dei prodotti). A differenza dei sistemi ad alta e media entalpia che sfruttano anomalie termiche presenti solo in alcune località quelli a bassa entalpia sono realizzabili ovunque perché sfruttano il gradiente geotermico naturalmente presente negli strati più superficiali della crosta terrestre. Esistono diversi schemi impiantistici (Fracastoro, 2018):

- **Impianti diretti:** in cui la risorsa geotermica viene utilizzata senza innalzarne il livello termico prelevando il fluido geotermico direttamente o trasferendone il calore, con l'ausilio di uno scambiatore interrato, ad un fluido secondario

che alimenta l'utenza. Vengono utilizzati per il pre-riscaldamento invernale o pre-raffrescamento estivo dei termovettori (aria di rinnovo o acqua) degli impianti di climatizzazione

- **Impianti indiretti:** in cui il livello termico della risorsa viene innalzato con l'ausilio di una pompa di calore elettrica.

Dal momento che l'impianto sperimentale oggetto di questa tesi appartiene a quest'ultima tipologia, che peraltro è di maggior interesse per la climatizzazione degli edifici, la successiva trattazione si concentrerà sulla disamina degli impianti indiretti. Nei mesi invernali il terreno è caratterizzato da una temperatura superiore rispetto a quella dell'aria esterna quindi il calore in esso contenuto può essere estratto e, dopo averne innalzato il livello termico, scambiato con l'ambiente interno da riscaldare. Al contrario nei mesi estivi la temperatura del terreno è inferiore rispetto a quella dell'aria quindi il calore sottratto dall'ambiente raffrescato può essere ceduto al terreno o all'acque sotterranee in esso presenti. Il funzionamento di un impianto geotermico è quindi garantito dalla disponibilità di calore geotermico e dalla contenuta variabilità della temperatura negli strati superficiali di terreno (Cap.2.4). Questi impianti si fondano sulla tecnologia della pompa di calore elettrica che è in grado di prelevare calore da una sorgente a temperatura inferiore e cederlo ad un pozzo a temperatura superiore, termicamente accoppiati da un fluido frigorifero che sottoposto ad un ciclo termodinamico inverso subisce l'evaporazione a bassa temperatura e la condensazione ad alta temperatura. Fornendo al fluido frigorifero lavoro esterno è possibile diversificare le pressioni e le temperature di transizione di fase affinché la condensazione possa avvenire a temperatura superiore e l'evaporazione a temperatura inferiore. I ruoli di sorgente e pozzo termico sono reversibilmente esercitati dal terreno e dall'utenza termica con cui la pompa di calore scambia calore rispettivamente per mezzo di geoscambiatori e terminali degli impianti di climatizzazione percorsi da fluidi termovettori.

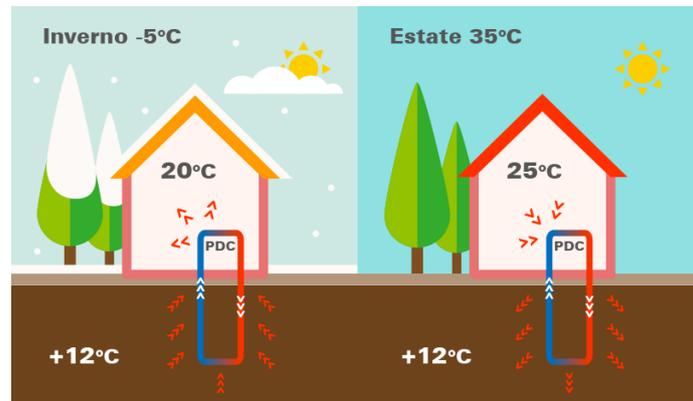


Figura 2.8 Logica di funzionamento di un sistema geotermico a bassa entalpia (Viessmann, 2017)

La classificazione dei geoscambiatori dipende dalla configurazione impiantistica e dalla tipologia di fluido termovettore utilizzato. Distinguiamo quindi sistemi (Ashrae, 2014):

- **A circuito aperto o open loop** : in cui il fluido termovettore è acqua prelevata direttamente da corpi idrici sotterranei , bacini idrici o corsi d'acqua superficiali. L'origine delle acque consente di distinguere le pompe di calore in:
 - *GWHP: "Groundwater heat pump"*: in cui il fluido termovettore che consente il trasferimento del calore geotermico è l'acqua di falda. Viene estratta da un pozzo di prelievo e reimessa mediante pozzo di re-immissione ma lo scarico può anche avvenire in corsi d'acqua superficiali.
 - *SWHP: "Surface water heat pump"*: in cui il fluido termovettore è acqua superficiale direttamente prelevata e re-immessa in corsi d'acqua o bacini idrici
- **A circuito chiuso o closed loop**
 - *GCHP: "Ground coupled heat pump"*: in cui il termovettore circola in sonde geotermiche orizzontali o verticali a circuito chiuso poste a contatto con il terreno affinché scambino calore con esso

La scelta della tipologia dipende principalmente dai requisiti progettuali e dalle caratteristiche idrogeologiche del territorio in cui verrà realizzata.

2.6.1 Impianti open loop

Nei sistemi a circuito aperto l'acqua viene prelevata dalle falde o da bacini idrici superficiali mediante pozzi di prelievo affinché assolva la funzione di fluido termovettore interagendo direttamente con la pompa di calore. Viene quindi scaricata mediante un pozzo di re-immissione in un corpo idrico la cui natura determina diverse tipologie impiantistiche in seguito analizzate. Il principale requisito per realizzare un impianto a ciclo aperto è la disponibilità di una falda acquifera primaria caratterizzata sufficienti capacità di deflusso ed accumulo. Le analisi idrogeologiche consentono di determinare la profondità, la portata utile, le caratteristiche idrauliche e litologiche del sito che rappresentano informazioni determinanti per la progettazione del pozzo, per la selezione della tecnica di trivellazione e dei materiali. Il pozzo, ovvero la struttura artificiale che consente l'estrazione ed il deflusso dell'acqua dalle falde, è costituito principalmente da un foro realizzato per trivellazione ed incamiciato con un tubo in PVC o acciaio zincato. L'intercapedine tra le pareti del pozzo ed il tubo viene cementata con malta di cemento ed additivi che conferiscono resistenza strutturale e protezione. Il tubo si estende fino alla zona satura e nella parte terminale la superficie è fessurata realizzando una struttura a filtro che consente il passaggio dell'acqua. La parte superiore del pozzo ospita la testata del pozzo ovvero l'impianto idraulico per l'adduzione dell'acqua e la pompa sommersa per il prelievo. Le interazioni con la risorsa idrica rappresentano la principale criticità di questi impianti perché modificano l'equilibrio termico e fluidodinamico dell'acquifero. In particolare il prelievo riduce la portata d'acqua disponibile ed induce un cono di depressione che modifica il livello statico della falda, pertanto la normativa impone dei limiti alle portate emunte per salvaguardare il deflusso minimo vitale (Taddia, 2022). La re-immissione dell'acqua a temperatura differente nel bacino idrico ne modifica l'equilibrio termico inducendo disturbi che potrebbero inficiare l'efficienza dell'impianto stesso o di quelli che prelevano acqua dalla falda successivamente in ordine spaziale. Occorre quindi realizzare modelli termo-fluidodinamici transitori con il metodo degli elementi finiti per analizzare l'orientamento e l'estensione della plume termica nell'acquifero e valutare l'insorgenza di corto-circuitazioni termiche tra il pozzo di prelievo e re-immissione. Il rispetto delle temperature limite e dei requisiti composizionali del fluido reiniettato previsti dalla normativa sul trattamento e scarico delle acque (*D. Lgs. n. 152/2006*) consentono di sfruttare in maniera sostenibile le risorse, salvaguardandone l'equilibrio.

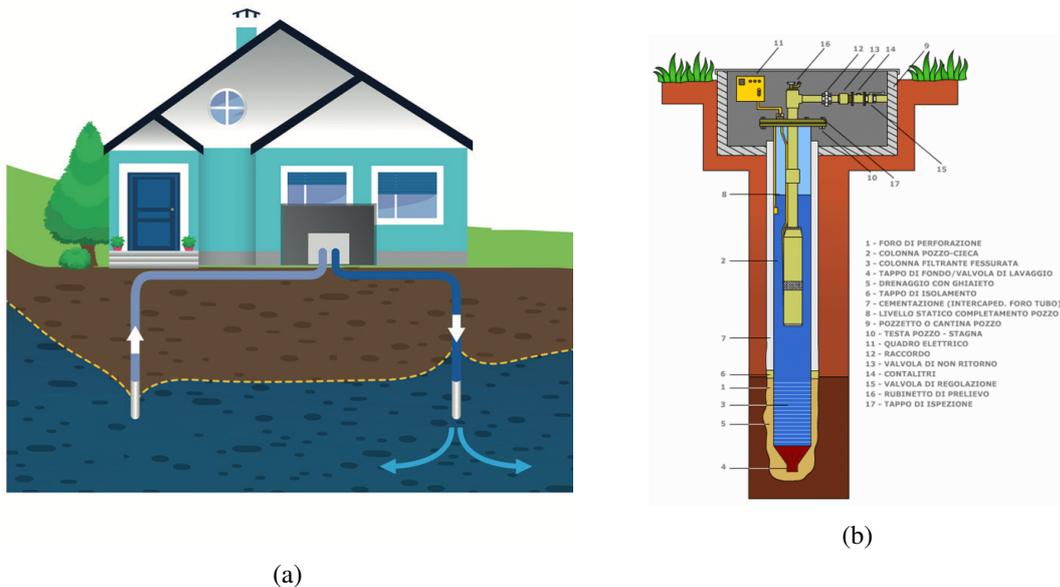


Figura 2.9 Schema di un impianto geotermico a circuito aperto (a) (BRGM, 2018) e struttura dei pozzi (b) (Taddia, 2022)

Impianto well doublet

Sono impianti in cui il pozzo di emungimento e restituzione sono distinti, l'acqua prelevata può essere scaricata nello stesso acquifero di provenienza o in uno differente. Nel primo caso la falda non risulta impoverita e si evitano deformazioni ed assestamenti del terreno causati da variazioni di carico idraulico. Nel secondo caso, non consentito in Italia, si realizza uno spostamento di acqua tra acquiferi diversi ed indipendenti quindi occorre verificare che non venga compromessa la fruibilità dell'acquifero di prelievo o variato eccessivamente il livello statico di quello ricevente. Infine è necessaria la verifica della compatibilità termica e chimica delle acque. La distanza dei pozzi deve essere tale da evitare che l'acqua estratta dal pozzo di prelievo risenta del disturbo termico causato da quello di re-immissione, a tal proposito Clyde and Madabhushi (1983) hanno verificato che l'insorgenza del corto-circuito termico si verifica quando il parametro di cortocircuito idraulico X è inferiore all'unità

$$X = \frac{2 \cdot Q}{\pi \cdot i \cdot L \cdot b \cdot K} < 1 \quad (2.24)$$

Dove Q è la portata della falda [m^3/s], b lo spessore [m], K la conduttività idraulica [m/s], L la distanza tra pozzi [m] ed i il gradiente idraulico dh/dl [-]. Dall'equazione è

possibile ricavare la distanza minima tra pozzi affinché il disturbo termico si diffonda nella direzione del deflusso senza perturbare il campo termico nel punto di prelievo (Fig.2.10). Tuttavia l'entità ed estensione della plume termica variano nel tempo perché dipendono dall'andamento variabile nel tempo della portata d'acqua, dalla potenza termica scambiata con la falda e dal gradiente idraulico.

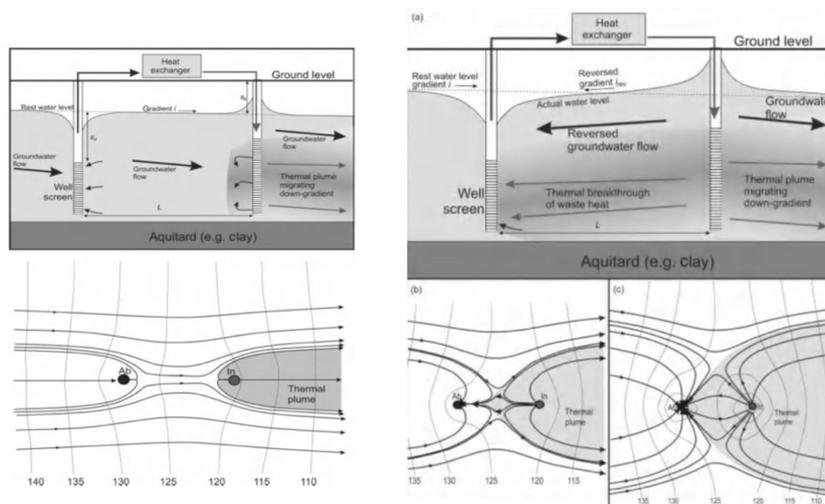


Figura 2.10 Modalità di deflusso (Banks, 2009)

Impianto Standing column well

Prevede un unico pozzo per il prelievo e la restituzione in cui la re-immissione dell'acqua avviene nella parte superiore del pozzo ed il prelievo da quella inferiore. L'acqua di scarico fluendo nella frazione superiore del pozzo scambia progressivamente calore con le pareti a contatto con la falda e la sua temperatura raggiunge valori prossimi a quella dell'acqua di prelievo, infine la miscelazione in falda uniforma completamente la temperatura.

Single well

E' caratterizzato dal solo pozzo di prelievo perché la re-immissione avviene in bacini idrici superficiali. Questa modalità di scarico è semplice ed economica ed evita l'insorgere di disturbi termici tuttavia impoverisce la risorsa idrica sotterranea e potrebbe danneggiare quella superficiale. E' consentita dalle autorità previa verifica delle temperature di scarico e composizione dell'acqua affinché sia compatibile

dal punto di vista termico e chimico con la risorsa superficiale. L'alternativa è rappresentata dallo scarico nei condotti fognari con il consenso dell'ente proprietario e la verifica della sufficiente capacità di smaltimento dei sistemi di drenaggio urbano. In ogni caso le procedure di scarico dell'acqua devono essere condotte nel rispetto della normativa sul trattamento e scarico delle acque (*D. Lgs. n. 152/2006*)

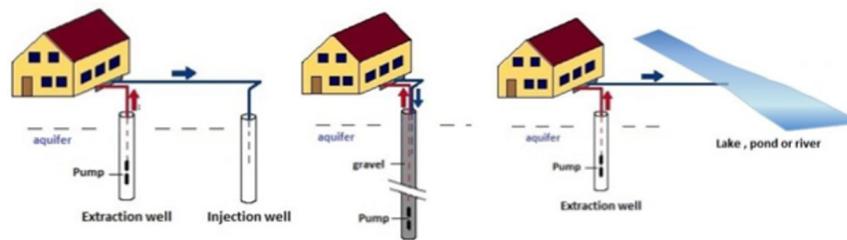


Figura 2.11 Tipologie di impianto open loop (Sanner, 2001)

Vantaggi e svantaggi

Il rendimento della pompa di calore negli impianti a circuito aperto è superiore rispetto al circuito chiuso perché la temperatura dell'acqua, in virtù l'elevata capacità termica, è circa costante invece quella del terreno è variabile con le condizioni climatiche esterne. Inoltre sono caratterizzati da minor ingombro e costo di installazione a pari potenza. Tuttavia il contatto diretto tra l'acqua di falda e gli scambiatori della pompa di calore provoca degli inconvenienti tecnici legati alla presenza nel fluido di residui solidi che possono occludere i tubi, sali e gas disciolti la cui precipitazione può causare incrostazioni o corrosione dello scambiatore della pompa di calore. Se le analisi chimico-fisiche dell'acqua evidenziassero caratteristiche sfavorevoli allo scambio diretto è possibile interporre un ulteriore scambiatore tra l'acqua di falda e la pompa di calore realizzando un ciclo aperto indiretto (Taddia, 2022). Ulteriori svantaggi risiedono nella necessità di una falda acquifera primaria non potabile da caratterizzare con accurati studi idrogeologici e termici affinché l'impianto non incorra in drastiche riduzioni di efficienza. In ultima istanza le procedure autorizzative sono lunghe e complesse a causa dei rischi legati alla contaminazione o messa in comunicazione degli acquiferi e per via della legislazione diversificata a livello regionale.

2.6.2 Impianti closed loop

In questi impianti un fluido termovettore fluisce all'interno di un circuito chiuso costituito da uno o più tubi di mandata e ritorno che formano le sonde geotermiche (geo-scambiatori), in grado di accoppiare termicamente fluido e terreno consentendo il trasferimento di calore. La realizzazione non richiede particolari requisiti geologici perché questi impianti non interagiscono con le acque sotterranee e sono quindi caratterizzati da un processo autorizzativo più rapido. Tuttavia la pompa di calore opera con efficienza inferiore a causa delle condizioni ambientali esterne che influenzano la temperatura del terreno tanto più le sonde geotermiche sono vicine alla superficie. I geo-scambiatori sono quindi strutture artificiali interrato la cui unica funzione è scambiare calore con il terreno realizzando il deflusso a circuito chiuso di un fluido termovettore, vengono realizzati mediante scavo o trivellazione a profondità variabili comprese tra 2-200 m (Casasso and Sethi, 2013) in relazione al loro posizionamento che può essere orizzontale o verticale. Tuttavia esiste la possibilità di attribuire la funzione di geo-scambiatore ad una struttura edilizia la cui funzione principale è sostenere i carichi strutturali e che prende il nome di geostruttura energetica. Quest'ultime, che siano realizzate appositamente o convertendo costruzioni esistenti, conciliano la funzione strutturale e termica ottimizzano i costi di realizzazione ma richiedono una progettazione più accurata volta a selezionare accuratamente i materiali con proprietà meccaniche e termiche adeguate ed individuare il posizionamento delle tubazioni affinché possano resistere alle inevitabili sollecitazioni che la struttura deve sostenere. Gli impianti closed loop possono realizzare uno schema di circolazione diretto o indiretto (Taddia, 2022), nella prima tipologia il refrigerante che viene sottoposto al ciclo termodinamico inverso fluisce direttamente nel geoscambiatore interagendo termicamente con il terreno senza la necessità di un fluido intermedio quindi la sonda geotermica rappresenta reversibilmente il condensatore o l'evaporatore della pompa di calore. Sebbene questo approccio consenta di massimizzare la differenza di temperatura fluido-terreno e l'efficienza dello scambio termico espone al rischio di contaminazione del terreno in caso di dispersione e oltretutto rende la circolazione difficoltosa nelle sonde verticali. Nella circolazione indiretta invece una miscela di acqua e sostanze antigelo fluisce nel geo-scambiatore realizzando l'accoppiamento termico indiretto tra il terreno ed il refrigerante ed ovviando ai problemi legati alla circolazione ed alla dispersione tossica.

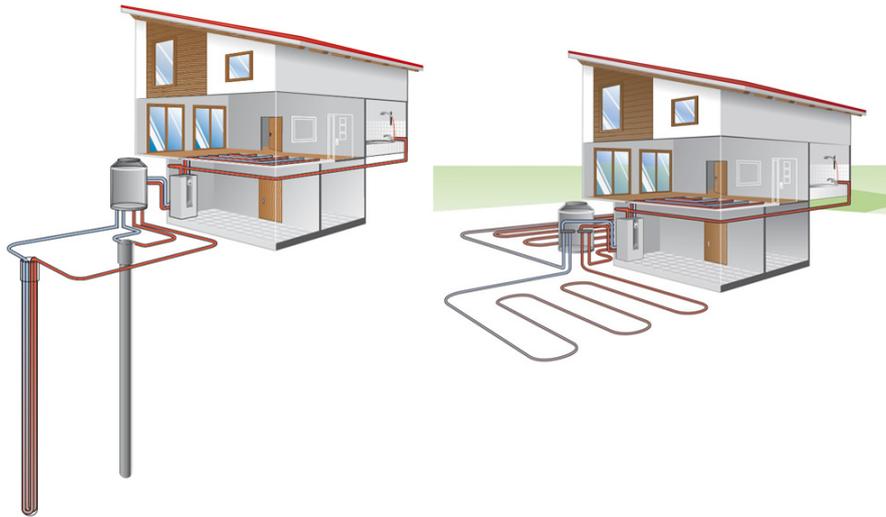


Figura 2.12 Schema di un impianto geotermico a circuito chiuso con scambiatori orizzontali (a sinistra) e verticali (a destra) (Tecnosol Srl)

Sonde geotermiche verticali

Note come borehole heat exchanger (BHE), rappresentano la tipologia più diffusa e sono costituite da tubazioni inserite all'interno di una perforazione verticale di diametro compreso tra 10-20 cm e profondità nell'ordine dei 50-200 m (Casasso and Sethi, 2013). Le tubazioni che trasportano il termovettore a pressioni di 2-3 bar (Taddia, 2022) sono realizzate in polietilene o polipropilene con diametro esterno compreso tra 20-25-32-40 mm (Masoero, 2022) affinché offrano adeguata resistenza alla corrosione ed alle sollecitazioni meccaniche.

La realizzazione del perforo si articola in una prima fase di trivellazione realizzata, in funzione della litologia del terreno, con una delle seguenti tecniche:

- **Percussion drilling:** in cui la caduta di una massa battente da elevata altezza scava il suolo per percussione realizzando tipicamente fori di grande diametro e profondità limitate a poche decine di metri. Non necessita di fluido di perforazione tuttavia propaga intense vibrazioni nel terreno.
- **Down the hole hammer (DTH):** è un metodo a roto-percussione in cui una perforatrice idraulica con massa battente a fondo foro alterna al movimento rotatorio e percussivo una fase di ritorno in cui viene iniettata aria compressa che favorisce la risalita dei detriti verso la superficie. Il sollevamento dei

detriti può avvenire con aria in terreni rocciosi (a secco) o con l'ausilio di schiumogeni per terreni umidi.

- **Conventional rotary drilling:** prevede la rotazione dell'utensile di perforazione senza percussione e l'iniezione di fanghi che consentono il raffreddamento delle aste di perforazione, dell'utensile e l'estrazione dei detriti. La circolazione dei fanghi può essere di tipo diretto se la fase di discesa avviene all'interno della cavità della batteria d'aste e la risalita della miscela di fango e detriti avviene nell'intercapedine tra la batteria d'aste e le pareti del pozzo. Al contrario nella circolazione indiretta il moto discendente del fango avviene nell'intercapedine del pozzo e la risalita nelle cavità della batteria di aste.

Effettuato lo scavo le sonde geotermiche vengono calate nel perforo e distanziate con spaziatori per ridurre gli effetti di cortocircuito termico, si procede quindi alla cementazione della perforazione. Il volume d'intercapedine tra i tubi e le pareti del perforo può essere riempito con acqua che sottoposta a gradienti verticali di temperatura innesca moti convettivi naturali che riducono la resistenza termica tra sonde e terreno. Il metodo è adatto per terreni rocciosi e scarsamente permeabili, in alternativa l'intercapedine può essere riempita con materiale di risulta purché presenti granulometria tale da realizzare adeguata coesione con i tubi e proprietà termiche favorevoli. Tuttavia il metodo più diffuso è il getto di calcestruzzo contenente bentonite ed additivi che fluidificano e conferiscono conducibilità termica prossima a quella del terreno consentendo uno scambio termico ottimale. Il riempitivo deve essere iniettato dalla parte inferiore del pozzo per evitare la formazione di vuoti che incrementerebbero la resistenza termica, inoltre deve essere debolmente espansivo per isolare idraulicamente il perforo dalle falde ed evitare la contaminazione o la messa in comunicazione di acque sotterranee distinte oltre che elastico per subire deformazioni in campo elastico derivanti dalle sollecitazioni esterne (Taddia, 2022). Il circuito chiuso viene quindi riempito con una soluzione antigelo composta da acqua e sostanze che conferiscono un basso punto di congelamento e adeguate caratteristiche termiche ma che determinano una maggiore viscosità e potenziale tossicità o infiammabilità della miscela. Le soluzioni più diffuse sono il glicole etilenico e propilenico, l'etanolo ed il cloruro di sodio miscelati all'acqua in concentrazioni differenti in relazione alle temperature minime del terreno. Sebbene il glicole etilenico, l'etanolo ed il cloruro di sodio conferiscono una viscosità contenuta ed adeguati coefficienti di scambio termico sono rispettivamente tossico, infiammabile e corrosivo pertanto il

glicole propilenico, essendo atossico, è la soluzione più diffusa in applicazioni di questo tipo perché riduce i danni ambientali in caso di dispersione nonostante sia più viscoso e costoso. Il circuito sonde può avere le seguenti configurazioni:

- **U:** è la configurazione più semplice in cui i tubi di mandata e ritorno posati verticalmente sono uniti nella parte inferiore della perforazione. Alla facilità di installazione si contrappongono gli svantaggi derivanti dalla presenza di un unico circuito costituito da tubi di maggior diametro e spessore che realizzano una ridotta superficie di scambio termico ed offrono una maggiore resistenza termica conduttiva e minore affidabilità perché in caso di ostruzione o rottura dell'unico circuito presente il funzionamento della pompa di calore sarebbe compromesso. Sono tipicamente realizzati con tubi in polietilene ad alta densità di diametro esterno compreso tra 25-40 mm e distanziati di 50-70 mm. (Taddia,2022)
- **Doppia U – 4 tubi:** prevede l'installazione di due circuiti ad 'U' affiancati con diametro e spessore dei tubi inferiore ed adeguatamente distanziati dagli spaziatori. Questa soluzione offre una maggior superficie di scambio termico ed una ridotta resistenza termica conduttiva in virtù dello spessore ridotto, inoltre aumenta l'affidabilità in quanto in due circuiti sono ridondati e ciascuno in grado di assicurare il funzionamento della pompa di calore in caso di indisponibilità dell'altro. Nonostante l'adeguato distanziamento l'interazione termica tra i condotti espone al rischio di cortocircuito termico che potrebbe ridurre l'efficienza della pompa di calore.
- **Coassiale:** in questa configurazione i condotti di mandata e ritorno sono coassiali, in particolare il fluido fluisce nella sezione anulare in fase di discesa e nel tubo interno durante la risalita. Siccome risulta massimizzata la superficie di scambio termico e ridotta la sezione trasversale sono adatti per l'installazione in perforazioni di diametro inferiore tuttavia sono soggetti a cortocircuitazione termica che può essere contenuta ma non eliminata aumentando lo spessore dei tubi o predisponendo un'intercapedine tra condotto interno ed esterno.
- **Coassiale a setti:** in cui la sezione anulare è ulteriormente suddivisa in setti attraversati alternativamente da flussi in controcorrente.

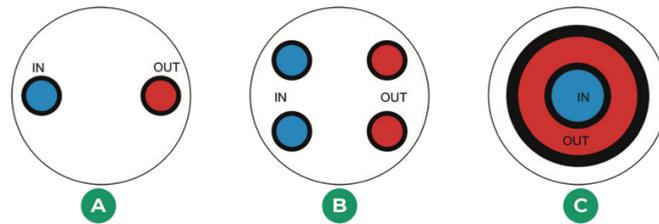


Figura 2.13 Configurazioni circuiti sonda in pianta. A: ad U, B: Doppia U, C: Coassiale (BRGM, 2018)

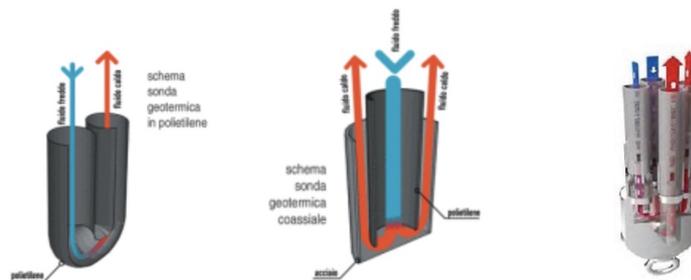


Figura 2.14 Dettaglio delle direzioni di deflusso nei diversi circuiti sonda (Isolportale)

Le sonde verticali sviluppandosi in profondità necessitano di una superficie di terreno ridotta e sono sottoposte a temperature del terreno scarsamente variabili a livello giornaliero e stagionale garantendo efficienze della pompa di calore elevate e stabili. Tuttavia la realizzazione richiede opere di trivellazione sofisticate e onerose e la scarsa accessibilità alle sonde rende le attività manutentive meno agevoli. Il funzionamento continuativo solo come pompa di calore o refrigeratore potrebbero causare fenomeni di deriva termica dovuti ad uno sbilanciamento dei carichi termici scambiati con il terreno, determinando una riduzione o l'annullamento dell'effetto geotermico ed un conseguente malfunzionamento della macchina. Invece il funzionamento intermittente a livello stagionale consente di alternare al prelievo anche la cessione di calore al terreno mantenendo stabili le condizioni termiche e scongiurando l'insorgenza del fenomeno sopracitato.

Sonde geotermiche orizzontali

Sono la tipologia più economica e tecnicamente accessibile in quanto consistono in un circuito chiuso posato orizzontalmente in uno sbancamento o trincea di profondità

ridotta compresa tra 1 e 4m (Caleffi et al., 2020) e realizzati con macchine movimento terra. La posa in trincea è preferibile perché realizzabile in maniera più semplice ed a costi inferiori, inoltre consente una maggiore profondità di posa e resa dell'impianto. I tubi che costituiscono il circuito chiuso sono in polietilene o polipropilene ed assumono diverse configurazioni: a serpentini o a chiocciola, ad anelli, a spirale ed a canestri (Caleffi et al., 2020). Quella a serpentini e chiocciola inducono nel terreno un campo di temperatura più omogeneo che tende a ridurre i fenomeni di sotto-raffreddamento locale del terreno e di inibizione della crescita della vegetazione. Gli anelli sono posati in trincea anche sovrapposti per ridurre l'area di terreno necessaria ad ottenere la superficie di scambio richiesta tuttavia la vicinanza dei circuiti origina interferenze termiche che abbassano la resa. I circuiti a spirale sono formati da cerchi di diametro costante e parzialmente sovrapposti mentre quelli a canestro possono essere cilindrici o conici e sono stati progressivamente adottati negli ultimi anni perché maggiormente compatti. La scelta della configurazione dipende essenzialmente dalla natura del terreno e dalla sua granulometria da cui dipende il grado di adesione del terreno alle sonde. Per terreni particolarmente eterogenei può rendersi necessario annegare le sonde con un getto di malta cementizia e richiudere lo scavo con materiale di risulta. A profondità ridotte la temperatura del terreno è variabile sia a livello giornaliero che stagionale a causa degli scambi termici che insorgono con l'aria esterna a diversa temperatura e dell'incidenza della radiazione solare, pertanto l'efficienza energetica è limitata.

Dunque le sonde geotermiche orizzontali hanno una resa termica inferiore rispetto a quelle verticali e peraltro dipendente dal clima e dalla composizione ed umidità del terreno quindi per soddisfare i fabbisogni termici richiedono ingenti aree di scambio e di terreno su cui peraltro non è possibile realizzare costruzioni o piantumazioni. Di seguito riassunti i parametri costruttivi e le rese termiche in condizioni di riferimento per le varie configurazioni (Caleffi et al., 2020)

Tabella 2.1 Dimensioni caratteristiche e rese termiche

<i>Configurazione</i>	<i>Diametro</i>	<i>Profondità</i>	<i>Resa termica</i>
Serpentini e chiocciola	16-26mm	0.8-1.2m	15-40 W/m ²
Anelli	16-22mm	0.8-2m	4-16 W/m
Spirale	16-22mm	1-2.5m	7-40 W/m ²
Canestri	32mm	1.5m	

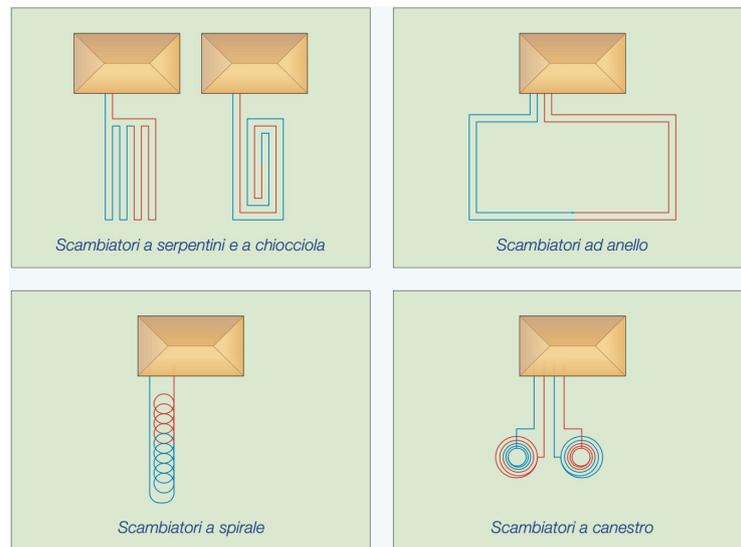


Figura 2.15 Configurazioni delle sonde geotermiche orizzontali (Caleffi et al., 2020)

2.6.3 Geostrutture

Le geostrutture energetiche nascono dall'opportunità di aggregare ad un elemento strutturale a contatto con il terreno o con l'acqua di falda la funzione di scambiare calore con il sottosuolo predisponendo all'interno o all'esterno dell'elemento un impianto a circuito chiuso percorso da un fluido termovettore che costituisce il circuito primario di un sistema a pompa di calore. Questo approccio si declina in soluzioni tecniche come i pali di fondazione o i muri energetici realizzabili in edifici di nuova costruzione che permettono di ottimizzare i costi di installazione sfruttando le operazioni di scavo già previste per la costruzione dell'edificio.

Pali energetici

Sono elementi verticali portanti in cemento armato gettati dalla base del plinto o della piastra di fondazione, la cui funzione principale è trasferire il carico della sovrastruttura alle strutture sottostanti preposte a riceverlo. Le tubazioni che realizzano il circuito chiuso di scambio sono posate in direzione longitudinale all'interno delle armature metalliche e fissate ad esse quindi annegate dal getto di calcestruzzo che contenuto dai casseri conferisce forma al palo di fondazione ed aderendo ai tubi assicura il contatto termico con il terreno. I tubi sono posati in configurazione ad

U multiple o spirale e distanziati lungo la circonferenza per evitare interferenze reciproche, vengono quindi collegati ai collettori e sottoposti a prova idraulica di tenuta prima e dopo il getto di calcestruzzo. Questa geostruttura richiede un'adeguata progettazione perché l'attivazione termica del pilastro potrebbe interferire con uno dei principali meccanismi di trasferimento del carico. Se il pilastro fosse sottoposto a dilatazioni o contrazioni termiche eccessive subirebbe un distacco del fianco dal terreno con conseguente riduzione dell'attrito laterale offerto (Giannoli and Vacca, 2017). La perdita della capacità di trasferimento dei carichi al sottosuolo induce un sovraccarico del pilastro ed espone al rischio di cedimento.

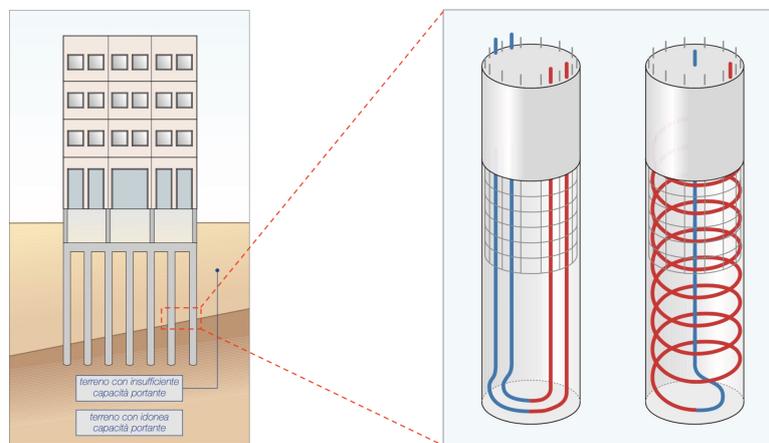


Figura 2.16 Fondazioni energetiche (Caleffi et al., 2020)

Gallerie energetiche

Le gallerie sono perforazioni del suolo che nascono per consentire il transito di veicoli, convogli ferroviari o metropolitani. Offrono un'ampia superficie esterna esposta al terreno su cui si possono predisporre circuiti chiusi che percorsi da un fluido realizzano il trasferimento del calore geotermico. La galleria sotterranea della linea metropolitana 1 di Torino è stata realizzata con una fresa meccanica a piena sezione (TBM) che permette di automatizzare lo scavo delle gallerie ed il posizionamento dei conci in cemento armato per il rivestimento della stessa. Il Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica del Politecnico di Torino ha brevettato un particolare concio energetico che oltre ad adempiere alle funzioni strutturali consente

di sfruttare il calore del sottosuolo. I conci ENERTUN sono anelli di rivestimento prefabbricati in cemento armato di spessore compreso tra 30 e 50 cm dotati di un circuito idraulico in polietilene reticolato che installato all'interno dell'armatura metallica consente il deflusso di un fluido termovettore. I tubi, di diametro esterno variabile tra 15 e 35 mm e con spessori pari a 1.5-3 mm, possono essere posizionati sia in prossimità dell'estradosso interno a contatto con l'aria della galleria (Enertun-air) che con l'intradosso esterno esposto al terreno (enertun-ground) per valorizzare il calore geotermico e quello prodotto all'interno della galleria dalle infrastrutture metropolitane e dagli impianti ausiliari, ciò permette di ridurre i consumi per la climatizzazione della galleria stessa o degli edifici. Dai risultati delle simulazioni termo-fluidodinamiche (Barla and Di Donna, 2018) emerge che orientando il circuito idraulico affinché la dimensione maggiore sia parallela alla circonferenza del cono si ha una riduzione delle perdite di carico ed un aumento della potenza termica scambiata rispetto ai conci energetici tradizionali. Con l'obiettivo di testare il prototipo 12 conci ENERTUN sono stati utilizzati per rivestire il nuovo tratto di galleria della linea metropolitana 1 di Torino tra le stazioni Lingotto e Bengasi costituendo un prototipo di galleria energetica con circuito idraulico di diametro 20mm, spessore 2mm e configurazione ground&air. Durante le prove sperimentali di attivazione della galleria in modalità riscaldamento un sistema di monitoraggio ha rilevato temperature, sollecitazioni e deformazioni della struttura e le temperature dei termovettori. Dalle analisi condotte emerge che con una portata di 0.22 kg/s nel circuito idraulico la potenza totale estratta ammonta a 1.59 kW che equivalgono a 48.70 W/m^2 o 1132.25 W/m di galleria, consentendo alla pompa di calore annessa di operare con COP pari a 2.73 (Barla and Insana, 2018). I risultati hanno confermato i valori di potenza termica areica estratta stimati dai modelli computazionali e dimostrato la maggior efficacia del prototipo rispetto alle precedenti tecnologie, inoltre le deformazioni termiche indotte sulla galleria permangono in campo elastico e non ne inficiano la resistenza strutturale. Sia le simulazioni che l'attività sperimentale evidenziano l'efficacia di ENERTUN nello sfruttare la stabilità termica del terreno per climatizzare gli edifici o raffrescare le gallerie con conseguente riduzione delle emissioni e dei costi legati alla ventilazione. L'affinità con un cono tradizionale e la relativa semplicità del sistema di scambio interno facilitano l'installazione e minimizzano i costi aggiuntivi infatti sono in corso studi di fattibilità sull'attivazione geotermica della Linea 2 della Metropolitana di Torino e di altre gallerie in Italia ed Europa. Infine l'utilizzo del prototipo è estendibile ad applicazioni differenti come

gallerie superficiali, acquedotti e fognature.

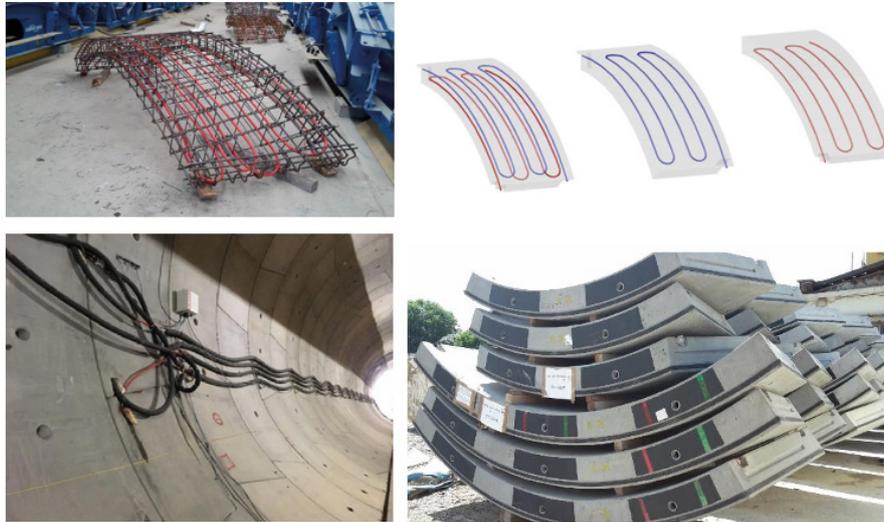


Figura 2.17 Progetto Enertun (Barla and Insana, 2018)

Muri energetici

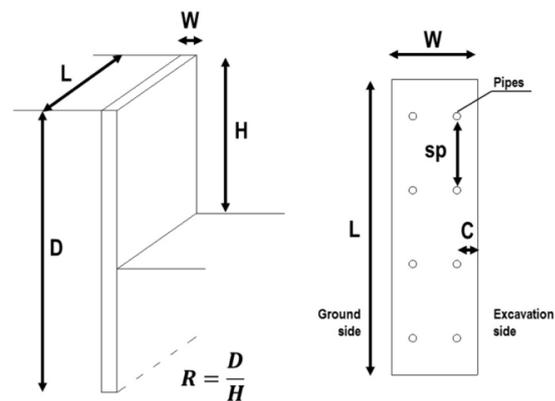
Un diaframma è una struttura in calcestruzzo prefabbricata o gettata in opera utilizzata per impedire lo scivolamento del terreno all'interno dello scavo. I diaframmi energetici, anche noti come muri energetici, derivano dall'inserimento di un circuito idraulico chiuso all'interno delle armature che sostengono le strutture edilizie verticali a contatto con il terreno ed integrano quindi la funzione strutturale e di geoscambiatore. La costruzione di diaframmi molto estesi è modulare e prevede di vincolare i tubi adeguatamente distanziati tra loro ad una porzione della gabbia d'acciaio del diaframma e calare la struttura nello scavo. Una volta in posizione l'armatura successiva viene sovrapposta e collegata alla precedente estendendo il circuito idraulico, quando l'intera armatura è interrata le estremità dei circuiti idraulici vengono collegate ai rispettivi collettori. I tubi vengono sottoposti a controllo visivo e ad una prova idraulica, in caso di esito positivo si procede al getto di calcestruzzo. Questa geostruttura necessita di una progettazione ottimizzata per garantire adeguate efficienze di funzionamento perché diverse grandezze caratteristiche influenzano l'entità dello scambio termico. Infatti tra le dimensioni caratteristiche oltre larghezza L , altezza D e spessore W rientrano anche la lunghezza esposta sia all'aria che al terreno H e quella affacciata solo al terreno $D-H$ (Fig.2.18a) perché una frazione

di diaframma ha entrambe le superfici affacciate al terreno mentre l'altra esposta da un lato al terreno e dall'altro all'aria dell'ambiente che delimita, pertanto sono sottoposte a differenti meccanismi di scambio termico che influenzano l'efficienza della geostruttura. Ulteriori fattori geometrici che influiscono sulla potenza termica scambiata dal muro energetico sono il numero di tubi del circuito idraulico, la loro distanza reciproca S_p e quella dalle estremità del muro c (Fig.2.18a). Dai risultati ottenuti da Di Donna et. al nel 2016 emerge che la grandezza fisica che influisce maggiormente sullo scambio termico nel breve periodo è la distanza tra i tubi quindi è possibile ottimizzare le prestazioni della geostruttura massimizzandone il numero tuttavia gli effetti positivi si ridono nel tempo e la scelta progettuale impatta sui costi fissi e variabili. Per attività di scambio termico prolungate a fronte di crescenti temperature dell'ambiente che il muro delimita si osserva un aumento della potenza estratta, ciò ispira la possibilità di installare un circuito idraulico anche sulla superficie interna del muro e conferma l'efficacia dell'applicazione in contesti come stazioni e tunnel metropolitani (Di Donna et. al,2016). L'aumento della conducibilità e diffusività del cemento ha effetti positivi quindi si raccomanda l'utilizzo di calcestruzzo ad alto contenuto di silice e con additivi specifici ove possibile, infine anche l'accrescimento delle proprietà termiche e della temperatura indisturbata del terreno hanno effetti positivi tuttavia quest'ultime non sono ingegnerizzabili (Di Donna et. al,2016). Questa geostruttura può essere realizzata anche successivamente alla costruzione dell'edificio realizzando uno scavo adiacente al muro per riportarne alla luce la superficie esterna su cui installare il circuito idraulico. Inoltre lo spazio sotterraneo che il muro divide dal terreno può avere diverse funzioni come un parcheggio sotterraneo, stazione metropolitana o piani interrati delle abitazioni. Le molteplici applicazioni rendono i muri energetici tecnologie promettenti per soddisfare i fabbisogni legati alla climatizzazione degli ambienti valorizzando una risorsa energetica sostenibile. Presso il Politecnico di Torino è in costruzione un nuovo parcheggio interrato sostenuto da ben 170 diaframmi che raggiungono profondità massime di 17.65 m, ognuno dei quali dotato di due circuiti idraulici ad U distanziati di 60 cm e realizzati con tubi in polietilene Pe-Xa di diametro 32 mm all'interno dei quali fluisce un fluido termovettore. Le prove idrauliche eseguite sottoponendo i circuiti ad una pressione di 4 bar per 12 ore consecutive hanno dato esito positivo con una perdita di pressione inferiore a 0.1 bar. A lavori completati questa rappresenterà la più grande applicazione di pareti energetiche in Italia. Successivamente verrà descritto in dettaglio GeothermSkin ovvero un prototipo di muro energetico innovativo che,

costituendo parte dell'impianto sperimentale, verrà studiato nell'ambito di questa tesi. A differenza delle applicazioni precedenti il circuito idraulico è installato sulla superficie esterna esposta al terreno e ciò consente di convertire diaframmi esistenti in geoscambiatori con bassi costi d'investimento, facilità di installazione ed estendere l'applicabilità ad edifici esistenti nell'ambito delle opere di riqualificazione.



(a)



(b)

Figura 2.18 Muro energetico (a) (Barla and Insana, 2018) e dimensioni caratteristiche (b) (Di Donna et al., 2016)

2.7 Pompa di calore

Le pompe di calore o macchine frigorifere basano il loro funzionamento sulla realizzazione di un ciclo inverso il cui scopo è l'ottenimento di un effetto termico, scaldare cedendo calore oppure raffreddare sottraendo calore ai termostati. La formulazione di Clausius del secondo principio della termodinamica afferma che *'È impossibile realizzare una trasformazione il cui unico risultato sia quello di trasferire calore da un corpo più freddo a uno più caldo senza l'apporto di lavoro esterno'* evidenziando la naturale direzionalità dei flussi termici che si trasferiscono dai corpi a temperatura maggiore verso quelli a temperatura inferiore. E' possibile invertire il verso di trasferimento di calore, quindi dal corpo a temperatura inferiore verso quello a temperatura maggiore, fornendo lavoro esterno e realizzando quindi un

ciclo termodinamico inverso. A differenza dai cicli diretti il ciclo inverso è percorso in senso antiorario pertanto l'area racchiusa dal ciclo sul piano p-v rappresenta un lavoro negativo, ovvero fornito dall'esterno ed applicato sul fluido di ciclo che tipicamente è un frigorifero. Il ciclo di riferimento è il ciclo inverso di Carnot realizzato dall'omonima macchina ideale che opera reversibilmente tra due termostati a temperatura differente, uno che fornisce energia termica sotto forma di calore detto sorgente ed uno che la riceve denominato pozzo.

I pedici 1 e 2 identificano rispettivamente il pozzo e la sorgente, Q_1 il calore scambiato dalla macchina con il pozzo, Q_2 calore scambiato dalla macchina con la sorgente infine T_1 e T_2 sono rispettivamente le temperature di sorgente e pozzo. La macchina preleva il calore Q_2 dal termostato a temperatura inferiore T_2 (sorgente) e cede il calore Q_1 al pozzo avente temperatura superiore T_1 in virtù del lavoro meccanico immesso nel sistema che consente il trasferimento l'energia.

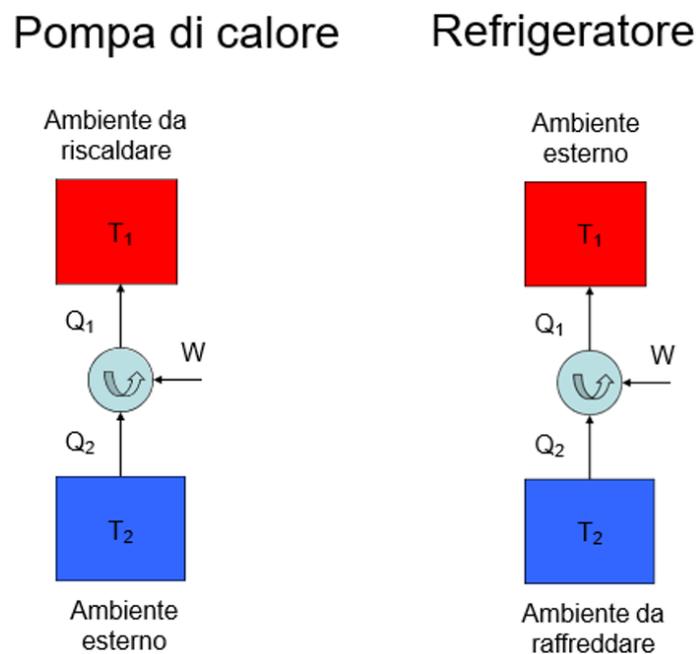


Figura 2.19 Schema dei termostati e flussi di potenza (Masoero, 2022)

Una macchina termica inversa può funzionare secondo le modalità stabilite dalla definizione di beneficio come

- **pompa di calore:** quando il beneficio è rappresentato dal calore ceduto al pozzo Q_1 con maggiore temperatura T_1

- **macchina frigorifera/refrigeratore:** quando il beneficio è rappresentato dal calore sottratto alla sorgente Q_2 a temperatura inferiore T_2 .

Pertanto è necessario definire due efficienze distinte, ovvero il *coefficiente di prestazione* COP e l'*Energy Efficiency Ratio* EER.

$$COP = \frac{Q_1}{W} = \frac{Q_1}{Q_1 - Q_2} \quad (2.25)$$

$$EER = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} \quad (2.26)$$

Dove Q_1 è il calore ceduto al condensatore dal refrigerante, Q_2 quello assorbito all'evaporatore dal refrigerante e W il lavoro fornito al fluido di ciclo. Dal momento che per la macchina di Carnot il rapporto tra le quantità di calore scambiate con i termostati coincide con il rapporto delle temperature dei termostati è possibile esprimere le efficienze in funzione delle temperature degli stessi come:

$$COP = \frac{T_1}{T_1 - T_2} \quad (2.27)$$

$$EER = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \quad (2.28)$$

Dove T_1 è la temperatura del pozzo o condensatore e T_2 quella della sorgente o evaporatore. E' possibile osservare che il COP e l'EER aumentano all'aumentare della temperatura T_2 della sorgente ed al diminuire della temperatura T_1 del pozzo, in altre parole le efficienze aumentano al ridursi della differenza di temperatura tra i termostati.

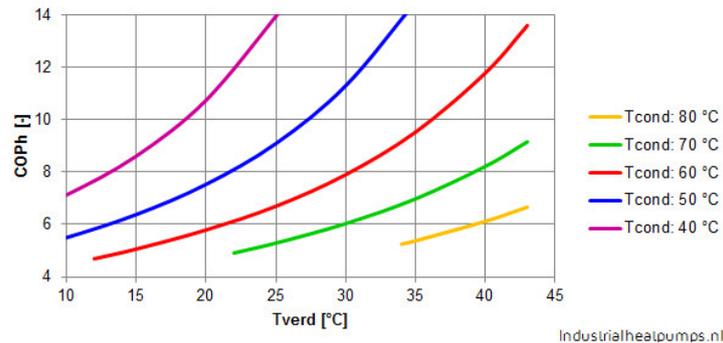


Figura 2.20 Andamento del COP al variare della temperatura dei termostati (Industrial heat pumps, 2023)

2.7.1 Trasformazioni

E' importante discutere dal punto di vista termodinamico le trasformazioni che compongono il ciclo compiuto da un generico refrigerante partendo dal riferimento teorico rappresentato dal ciclo di Carnot inverso. Le trasformazioni che lo caratterizzano sono:

- **2-3) Assorbimento di calore isoterma:** il fluido a contatto con la sorgente termica riceve calore a temperatura e pressione costante evaporando fino alle condizioni di inizio compressione. La temperatura e pressione minima di ciclo a cui avviene sono note come temperatura e pressione di evaporazione.
- **3-4) Compressione isoentropica:** Il fluido in condizioni bifase subisce una compressione isoentropica raggiungendo lo stato di vapore saturo alla pressione massima di ciclo. Pertanto è possibile distinguere il ciclo in una zona di alta e di bassa pressione.
- **4-1) Cessione di calore isoterma:** in cui il fluido posto a contatto con il pozzo termico cede calore in condizioni isoterme ed isobare alla pressione massima del ciclo condensando. La temperatura e la pressione prendono rispettivamente il nome di temperatura di condensazione e pressione di condensazione.
- **1-2) Espansione isoentropica:** il fluido subisce un'espansione in zona bifase raggiungendo la pressione e temperatura minime di ciclo. E' realizzata con una laminazione irreversibile che dissipa per attrito fluidodinamico il lavoro di compressione senza produzione di lavoro.

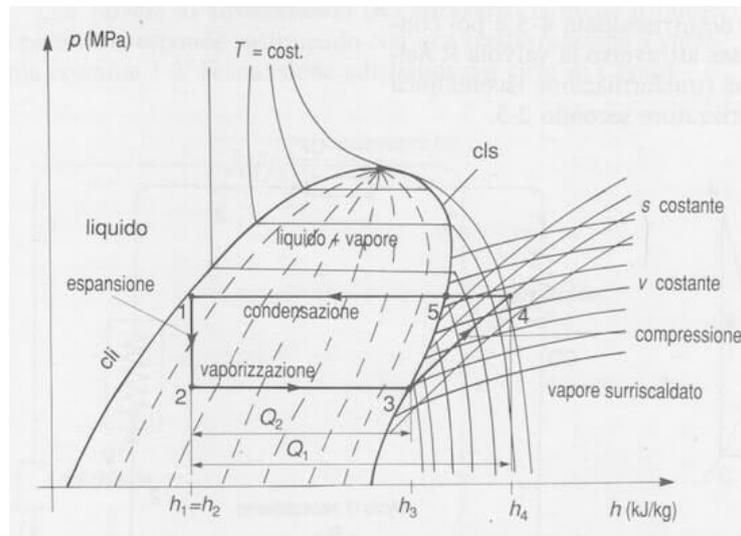


Figura 2.21 Ciclo di Carnot inverso sul diagramma pressione- entalpia (Chimica on-line)

Tuttavia la realizzazione pratica del ciclo di Carnot inverso presenta delle difficoltà tecniche. La prima riguarda la compressione del fluido in zona bifase che determina una scarsa efficienza ed il rischio di cedimenti meccanici della girante del compressore a causa del colpo di liquido mentre la seconda gli effetti della cavitazione che origina nella fase liquida durante l'espansione del fluido bifase. Il ciclo inverso a compressione di vapore è il risultato delle modifiche tecniche e termodinamiche attuate alle fasi di compressione ed espansione del ciclo di Carnot inverso per ovviare agli inconvenienti tecnici. In particolare con riferimento al diagramma p-h l'assorbimento di calore isobaro 2-3 non termina in corrispondenza della curva limite superiore (c.l.s) ma viene prolungato realizzando un surriscaldamento del fluido affinché la successiva trasformazione eseguita dal compressore avvenga in totale assenza di liquido. La cessione di calore isobara 4-1 viene idealmente distinta nella fase di desurriscaldamento a sinistra della curva limite superiore 4-5, condensazione quando compresa tra le curve limite 5-1 e sotto-raffreddamento quando si protrae oltre la curva limite inferiore per garantire la completa condensazione del refrigerante. E' interessante osservare che diversificare le pressioni del refrigerante a cui avvengono le trasformazioni isobare consente di modificare le temperature di transizione di fase affinché il fluido possa subire l'evaporazione a bassa temperatura e la condensazione ad alta temperatura. Inoltre le trasformazioni isobare coincidono con le isoterme solo se il fluido refrigerante è una sostanza pura invece se fosse una miscela azeotropica, ovvero composta da sostanze con diversa temperatura di ebollizione, il passaggio di

fase non sarebbe contemporaneo per tutte le specie chimiche e la trasformazione non sarebbe perfettamente isoterma. Infine le cessioni di calore non sono rigorosamente isobare a causa delle perdite di carico imposte dagli scambiatori al fluido frigorifero.

2.7.2 Struttura impiantistica

Appare fondamentale il ruolo esercitato dalla pompa di calore elettrica ovvero interporre tra due ambienti a temperatura diversa un fluido frigorifero che subendo un ciclo termodinamico inverso sia in grado di realizzare, in virtù dei diversi livelli di pressione, le transizioni di fase a temperature tali rendere possibile il trasferimento di calore dall'ambiente a temperatura inferiore verso quella a temperatura maggiore. Questo può avvenire in maniera diretta o indiretta mediante appositi scambiatori di calore, nel primo caso il frigorifero realizza l'interazione termica direttamente con il termostato invece nel secondo caso un fluido termovettore veicola il calore interponendosi tra il frigorifero ed il termostato. Ciò è reso tecnicamente possibile dal circuito chiuso composto dai seguenti componenti:

- **Evaporatore:** è uno scambiatore di calore percorso al primario da fluido frigorifero ed a secondario dal fluido termovettore usato per sottrarre calore dalla sorgente a minor temperatura. Il calore del termovettore a secondario viene ceduto a pressione costante al frigorifero per consentirne l'evaporazione quindi realizza la trasformazione 2-3 con riferimento al diagramma p-h.
- **Compressore:** è una macchina operatrice pneumofora in cui avviene la compressione adiabatica del frigorifero ed il passaggio dalla pressione di evaporazione a quella di condensazione.
- **Condensatore:** è uno scambiatore di calore in cui il fluido frigorifero che fluisce al primario condensa cedendo calore al termovettore secondario che a sua volta lo cederà alla sorgente a maggior temperatura (trasformazione 4-1).
- **Valvola di laminazione:** realizza l'espansione adiabatica reversibile che induce la condensazione ed il passaggio dalla pressione di condensazione a quella di evaporazione. Il grado di chiusura della valvola e la conseguente caduta di pressione imposta è controllata in retro-azione in funzione della temperatura misurata a fondo evaporatore per modificare l'entità del surriscaldamento

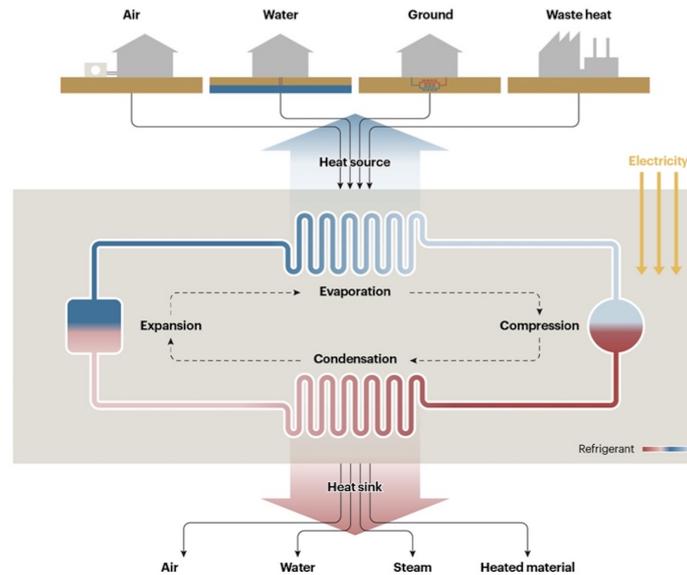


Figura 2.22 Schema generico pompa di calore e termostati reali (IEA, 2022)

Declinando il concetto teorico in termini pratici i termostati tra cui opera la pompa di calore sono l'ambiente interno dell'edificio da climatizzare e le sorgenti termiche naturali come l'aria ambientale, bacini idrici superficiali o sotterranei ed il sottosuolo. Le pompe di calore vengono classificate proprio rispetto alla tipologia di fluidi con cui scambiano calore che differiscono al variare delle sorgenti termiche e delle tipologie d'impianto, vi sono quindi pompe di calore che estraggono calore dall'aria esterna per scaldare l'acqua dell'impianto d'utenza (aria-acqua) o direttamente l'aria interna (aria-aria) o ancora quelle che estraggono calore dal terreno (terreno-acqua) o dall'acqua di falda (acqua-acqua) per cederlo al termovettore del circuito d'utenza. Il prelievo o la cessione di calore all'aria dell'ambiente interno da climatizzare avviene per mezzo di terminali d'impianto idraulici (pannelli radianti) o aeraulici (ventilconvettori) alimentati dal fluido termovettore ad alta o bassa temperatura mentre quella con i mezzi naturali ad opera di appositi scambiatori, di tipologia differente in relazione alle caratteristiche e stato fisico del termostato sinteticamente riportati nella tabella seguente

Tabella 2.2 Accoppiamenti sorgente-pozzo e scambiatori

<i>Mezzo</i>	<i>Scambiatore</i>
Aria-Aria	Batterie alettate
Aria-acqua	Batterie alettate
Acqua-Acqua	<ol style="list-style-type: none"> 1. Scambiatori a piastre 2. Scambiatori a fascio tubiero
Acqua-Terreno	Geoscambiatori

La pompa di calore geotermico, di particolare interesse nell'ambito di questa tesi, si interpone tra il terreno che funge da sorgente di calore o pozzo a cui cederlo e l'ambiente interno da climatizzare. Come analizzato in precedenza (Capitolo 2) il calore derivante dal nucleo del pianeta si trasmette per conduzione e convezione fino alla superficie conferendo al sottosuolo una temperatura tanto più costante quanto maggiore è la distanza dalla superficie. Durante le stagioni in cui è necessario riscaldare gli ambienti interni il terreno e le acque sotterranee saranno caratterizzate da una temperatura superiore a quella dell'ambiente esterno quindi è possibile sfruttare il calore geotermico per riscaldare gli edifici. Al contrario nei periodi dell'anno in cui si rende necessaria la climatizzazione la temperatura del sottosuolo sarà inferiore a quella ambientale esterna pertanto il calore sottratto agli ambienti raffrescati verrà ceduto al terreno. In entrambi i casi i livelli termici del terreno e degli ambienti interni sono incompatibili e non consentirebbero il trasferimento di calore diretto quindi la pompa di calore elettrica si interpone tra i termostati per modificarne i livelli termici e stabilirne la compatibilità.

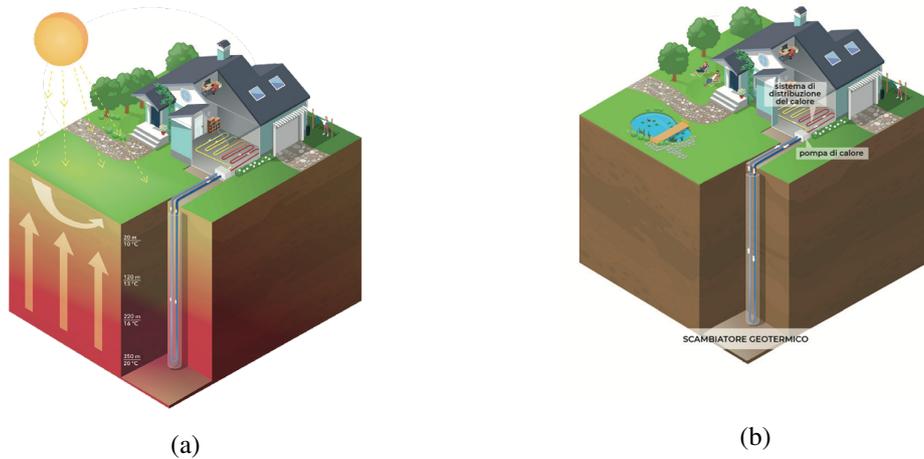


Figura 2.23 Logica di funzionamento invernale (a) ed estiva (b) di una pompa di calore geotermica (BRGM, 2018)

Nel funzionamento come pompa di calore un fluido termovettore fluisce attraverso un geo-scambiatore posto a contatto con il terreno sottraendogli calore e subendo un aumento di temperatura, viene quindi veicolato al secondario dell'evaporatore dove lo cederà al fluido frigorifero inizialmente in fase liquida. Questo, essendo caratterizzato da una pressione tale da conferirgli una temperatura di evaporazione più bassa di quella del fluido secondario, acquista calore ed evapora fino alle condizioni di vapore saturo secco. Il compressore alimentato elettricamente ne innalza la pressione e lo rende termicamente compatibile conferendogli una temperatura di condensazione superiore a quella del fluido termovettore a cui cederà calore durante la condensazione. Il fluido frigorifero in condizioni di liquido saturo attraversa la valvola di laminazione che impone una caduta di pressione tale da ripristinare il valore della pressione di evaporazione. In conclusione il fluido termovettore dell'utenza termica è stato adeguatamente scaldato e può alimentare i terminali d'impianto. Differente è il funzionamento come refrigeratore in cui il termovettore a bassa temperatura dell'utenza attraversando i terminali d'impianto sottrae calore agli ambienti da climatizzare e aumenta la sua temperatura. Per ridurla nuovamente fluisce al secondario dell'evaporatore dove il fluido frigorifero liquido, caratterizzato da una bassa temperatura di evaporazione, ne acquisisce il calore per attuare la transizione alla fase vapore. Il frigorifero compresso ha una temperatura di condensazione sufficientemente elevata da poter cedere il calore latente al termovettore del sistema di geoscambio che fluendo nel circuito chiuso del geoscambiatore ridurrà la sua temperatura trasferendolo al terreno.

Capitolo 3

Reti neurali artificiali

Una rete neurale artificiale è un modello computazionale vagamente ispirato ai principi di funzionamento del sistema nervoso di organismi evoluti costituito dall'interconnessione di unità computazionali elementari detti neuroni che provvisti di capacità d'elaborazione rappresentano i nodi della rete. Caratteristica fondamentale è la sua capacità di apprendimento che è resa possibile dall'attivazione consequenziale di neuroni e da un'ottimizzazione iterativa dei pesi che quantificano la significatività delle connessioni sinaptiche. La rete neurale consente di approssimare la relazione esistente o presupposta tra i dati in ingresso e quelli in uscita risolvendo due principali categorie di problemi: classificativi o regressivi (Capozzoli, 2021). Nei problemi di classificazione l'obiettivo è apprendere una funzione o regole per prevedere l'appartenenza di un nuovo elemento non classificato alla classe di appartenenza e descrivere le caratteristiche comuni degli elementi appartenenti allo stesso gruppo. Il problema di regressione invece consiste nell'identificare il legame funzionale tra le variabili numeriche indipendenti. Le reti neurali sono classificate come modelli black box pertanto la relazione che identificano non è consistente dal punto di vista fisico e dipende:

- Dalla funzione di attivazione
- Dall'architettura della rete ovvero dal numero di neuroni
- Dagli iper-parametri ovvero parametri interni relativi al processo di apprendimento

L'apprendimento è basato sulla disponibilità di un insieme di dati (training set) distinto in variabili di input, dalle quali il modello estrae la relazione per stimare l'output, e quelle rispettive di output. Questo insieme di dati, che costituisce per il modello un esempio della relazione che si vuole caratterizzare, viene diviso in un database di training direttamente usato nel processo di allenamento ed uno di test sul quale saggiare l'accuratezza delle relazioni identificate smistando i dati affinché entrambi i database siano rappresentativi del fenomeno indagato. La rete neurale addestrata sui dati di allenamento deve essere in grado di generalizzare la conoscenza ovvero prevedere output corretti quando riceve in ingresso dati diversi da quelli dell'insieme di training.

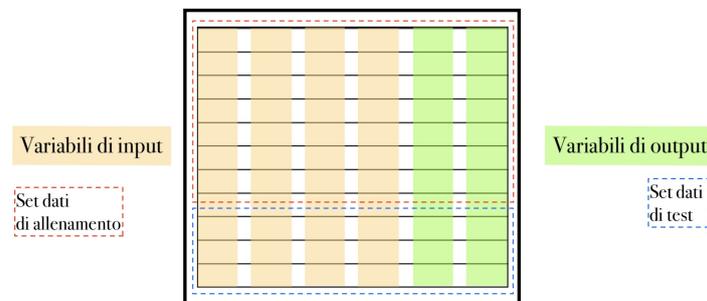


Figura 3.1 Variabili di input ed output, suddivisione in dataset di allenamento e test

Si possono distinguere due principali paradigmi di apprendimento:

- **Apprendimento non supervisionato:** in cui gli output non sono noti ed i parametri della rete vengono identificati con tecniche di clustering applicate sui dati di input
- **Apprendimento supervisionato:** in cui gli output sono noti e l'algoritmo può usarli come riferimento per valutare la correttezza delle previsioni e modificare di conseguenza i parametri della rete (pesi) durante l'allenamento

Con riferimento ai metodi di apprendimento è necessario distinguere il modo in cui i dati di input vengono acquisiti ed utilizzati durante l'apprendimento (and Sciandrone, 2017):

- **Apprendimento on-line:** i dati vengono prelevati progressivamente dal training set
- **Apprendimento batch o fuori linea:** in cui tutti i dati del training set sono disponibili prima che l'addestramento inizi

Nell'ambito di questa tesi è stata addestrata una rete neurale artificiale di tipo multilayer-perceptron afferente alla tipologia feedforwards, in cui la struttura delle connessioni può essere rappresentata mediante un grafo aciclico diretto e che realizza un apprendimento supervisionato fuori linea.

3.1 Il neurone formale

In una rete neurale l'unità di calcolo elementare è il neurone anche noto come neurone formale che applica alla variabile vettoriale in ingresso x una trasformazione per mezzo della funzione di attivazione ottenendo un valore scalare in uscita $a(x)$. Le variabili in ingresso sono moltiplicate per i relativi pesi ovvero coefficienti che rappresentano la robustezza delle connessioni sinaptiche e quantificano la rilevanza di ogni variabile nel determinare l'output corretto. La sommatoria delle variabili in ingresso pesate viene confrontata con un valore soglia ed il neurone fornisce in uscita il valore 1 se la somma pesata degli ingressi è superiore alla soglia altrimenti -1. Il bias rappresenta il valore soglia per la somma ponderata oltre il quale il neurone diventa attivo e sotto il quale rimane inattivo (Grippio and Sciandrone, 2017). Quindi sia $x_i \in \mathbb{R}^n$ il vettore di numeri reali in ingresso al neurone, $w_i \in \mathbb{R}^n$ il vettore di pesi e $b \in \mathbb{R}^n$ il bias o valore soglia tutti appartenenti allo spazio vettoriale \mathbb{R}^n , l'attivazione del neurone (output) può essere espressa come

$$a(x) = \sigma\left(\sum_{i=1}^N x_i \cdot w_i - b\right) \equiv \sigma(x \cdot w^T - b) \equiv \sigma(t) \quad (3.1)$$

Dove σ è la funzione di attivazione del neurone la cui definizione è, per esempio, coincidente con la funzione segno

$$\sigma = \begin{cases} 1, & \text{se } t \geq 0 \\ -1, & \text{se } t < 0 \end{cases} \quad (3.2)$$

Frank Rosenblatt propose una nuova interpretazione del neurone formale considerandolo come un classificatore lineare che realizza una suddivisione binaria attribuendo $a(x) = 1$ o $a(x) = -1$ in base al segno assunto dall'argomento della funzione. L'importanza risiede nel fatto che sia il valore dei pesi w_i che il bias b vengono determinati mediante un processo di apprendimento eseguito su un insieme di allentamento o training set così definibile

$$T_s = \{(x^p, y^p), x^p \in R^n, y^p \in \{-1, +1\}, p = 1, \dots, P\} \quad (3.3)$$

costituito da coppie ognuna formata dall'input x^p a cui è associato l'output corretto y^p . Il neurone allenato con i dati del training set ad identificare un output prossimo a quello corretto può generalizzare la conoscenza acquisita e classificare diversi valori in ingresso x . Il neurone interpretato come un classificatore binario da Frank Rosenblatt nel 1958 prende il nome di Percettrone (Perceptron) ed è uno strumento per il riconoscimento automatico delle configurazioni in grado di costituire il più semplice modello di una rete neurale feed-forward. I dati di input dell'insieme di addestramento sono correttamente classificati se i pesi ed il bias assumono valori tali che risulti

$$\sigma = \begin{cases} x^p \cdot w^T - b \geq 0, & \text{se } y^p = 1 \\ x^p \cdot w^T - b < 0, & \text{se } y^p = -1 \end{cases} \quad (3.4)$$

L'attività svolta dal percettrone durante l'allenamento espressa dall'equazione 3.4 può essere interpretata da un punto di vista geometrico come la ricerca di un iperpiano $H = \{x \in R^n : x \cdot w^T = b\}$, cioè un sottospazio lineare dello spazio vettoriale R^n , che separi i seguenti semispazi $A = \{x^p : (x^p, y^p) \in T_s, y^p = 1\}$ e $B = \{x^p : (x^p, y^p) \in T_s, y^p = -1\}$ e di w_i e b che risolvono il sistema (Grippio and Sciandrone, 2017). Questi parametri esistono se e solo se i due insiemi sono linearmente separabili come mostrato nella figura seguente

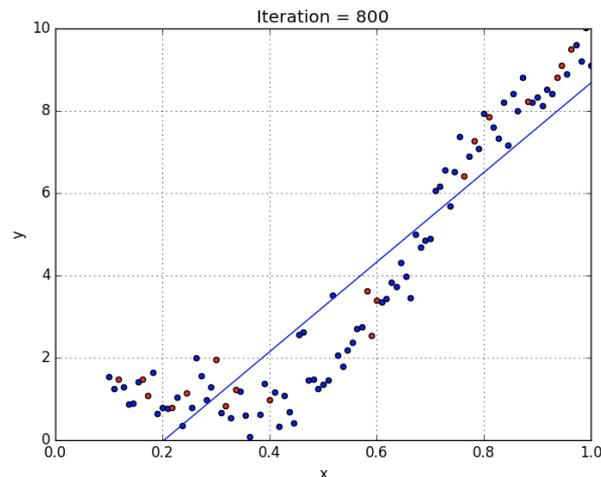


Figura 3.2 Piano che divide due insiemi linearmente separabili (Missinato, 2018)

Tuttavia il classificatore basato sul neurone formale non è efficace per problemi di classificazione in cui il set di dati di allenamento non sia linearmente separabile in insiemi distinti e ciò limita fortemente le applicazioni.

3.2 Reti multilayer perceptron

I limiti del Perceptron, ovvero di reti costituite da un solo strato di neuroni, hanno condotto allo studio di strutture più complesse costituite da più strati di neuroni consecuzionali note come reti multistrato (multilayer feed-forward o multilayer perceptron). Questo tipo di reti consente in linea di principio di approssimare una qualunque funzione continua e di risolvere problemi di classificazione e regressione su insiemi di dati anche non linearmente separabili però la determinazione dei parametri w_i e b durante l'addestramento diventa un problema complesso che richiede di applicare metodi di ottimizzazione non lineare (Grippio and Sciandrone, 2017).

3.2.1 Architettura della rete

La struttura di una rete neurale multistrato presenta:

- Un insieme di nodi di ingresso o nodi di input senza capacità di elaborazione in numero pari alle variabili in ingresso $x_i \in R, i = 1, \dots, N$ e che ne assumono il valore
- Un insieme di neuroni formali organizzati in minimo $L \geq 2$ strati di cui
 - $L - 1$ sono strati nascosti (hidden layer) ognuno costituito da un numero variabile di neuroni le cui uscite rappresentano l'informazione in ingresso per il neurone successivo
 - Uno strato di uscita costituito da un numero di neuroni $K \geq 1$ e pari al numero di output richiesti $y_i \in R, i = 1, \dots, K$
- Un insieme di interconnessioni con i nodi di ingresso e tra neuroni ognuna caratterizzata da un peso ed un bias. Si suppone non esistano connessioni tra neuroni appartenenti allo stesso strato né connessioni in feedback tra le uscite dei neuroni di uno strato e quelle dello strato precedente, per tal motivo vengono denominate reti feed-forward e l'architettura delle connessioni può essere rappresentata come un grafo diretto aciclico come quello mostrato in figura

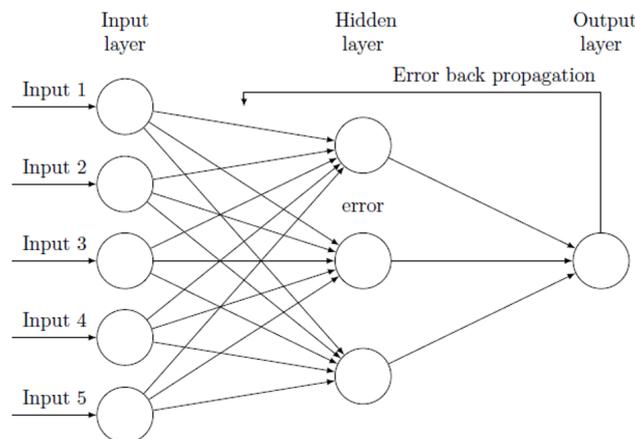


Figura 3.3 Struttura delle connessioni a grafo diretto aciclico (Microsoft, 2015)

A ciascuna connessione entrante nel neurone j dello strato L ed uscente da neurone k dello strato precedente $L-1$ è associato un peso w_{jk} cioè un numero reale che quantifica la rilevanza della connessione. Ogni neurone formale applica la funzione di attivazione $\sigma_j^l : R \rightarrow R$ alla differenza tra combinazione lineare pesata

degli ingressi ed il valore soglia b_{j0}^l . Il generico neurone dello strato 1 esegue la somma pesata degli ingressi meno il bias che indicheremo con z_j^1 a cui applica la funzione di attivazione σ_j^l e fornisce in uscita l'attivazione a_j^1 .

$$z_j^1 = \sum_{i=1}^N x_k \cdot w_{jk}^1 - b_{j0}^1 \quad (3.5)$$

$$a_j^1 = \sigma_g^1(z_j^1) \quad (3.6)$$

Il valore in uscita rappresenta il dato in ingresso al neurone j dello strato successivo l . Pertanto il generico neurone j di un qualsiasi strato $l > 1$ a partire dal risultato del neurone precedente a_k^{l-1} calcola a_j^l a cui applica la sua funzione di trasferimento per ottenere un nuovo output z_j^l .

$$z_j^l = \sum_{i=1}^N a_k^{l-1} \cdot w_{jk}^l - b_{j0}^l \quad (3.7)$$

$$a_j^l = \sigma_g^l(z_j^l) \quad (3.8)$$

Le funzioni di attivazione σ usualmente utilizzate sono la funzione logistica, la tangente iperbolica e la rectified linear unit (r.e.l.u)

$$\sigma(t) = \frac{1}{1 + e^{-t}} \quad (3.9a)$$

$$\sigma(t) = \frac{e^t - e^{-t}}{e^t + e^{-t}} \quad (3.9b)$$

$$\sigma(t) = \begin{cases} 0, & \text{se } t < 0 \\ t, & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (3.9c)$$

L'addestramento della rete ha come obiettivo modellare il fenomeno che ha generato i dati e ciò richiede di determinare il vettore dei parametri incogniti cioè i pesi e i valori soglia di ogni connessione per ogni strato risolvendo sul set di dati di allenamento

$$T_s = \{(x^p, y^p), x^p \in R^n, y^p \in R^k, p = 1, \dots, P\} \quad (3.10)$$

Un problema di ottimizzazione formalizzabile come

$$\min[E(w)]_{w \in R^m} = \sum_{p=1}^P E_p(w) \quad (3.11)$$

In cui E_p è l'errore relativo tra l'uscita corretta y^p e quella predetta dalla rete $y(x^p, w)$ spesso calcolato come errore quadratico medio

$$E_p(w) = \frac{1}{2} \cdot \|y(x^p, w) - y^p\|^2 \quad (3.12)$$

Quindi l'addestramento della rete neurale è volto ad identificare i parametri incogniti che minimizzano l'errore commesso sull'output predetto rispetto a quello reale che si verifica in corrispondenza degli stessi valori di input. La minimizzazione della funzione errore durante il processo di allenamento è un problema di ottimizzazione non lineare caratterizzato dalle seguenti difficoltà computazionali (Grippio and Sciandrone, 2017):

- Presenza di minimi locali non globali della funzione errore
- Forti non linearità della funzione errore
- Funzione definita in un dominio dello spazio R^n

Il principale algoritmo per l'addestramento è la retropropagazione dell'errore che usato in combinazione con la discesa del gradiente identifica quali pesi modificare e di quanto per minimizzare in maniera efficiente la funzione errore.

3.3 Algoritmo di backpropagation

La retro-propagazione è un algoritmo numerico per l'addestramento delle reti neurali artificiali che coadiuvato dalla discesa del gradiente consente di aggiornare iterativamente i pesi delle connessioni perseguendo il massimo decremento del gradiente della funzione errore. Per comprenderne la logica si consideri un modello semplifi-

cato della rete composto da un solo neurone per layer e si immagini di concentrarsi solo sull'ultimo neurone dello strato nascosto e quello di output (Nielsen,2015).

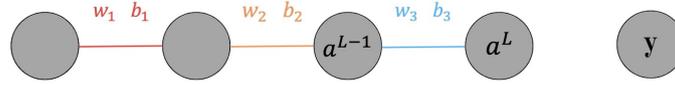


Figura 3.4 Architettura semplificata di una rete neurale MLP

L'attivazione del neurone dello strato L dipende, attraverso la funzione di trasferimento, da quella pervenuta da quello precedente a^{L-1} , dal peso e bias attribuiti alla loro connessione

$$a^L = \sigma(w^L \cdot a^{L-1} + b^L) = \sigma(z^L) \quad (3.13)$$

Questa viene confrontata con l'output corretto y e contenuto nei dati di allenamento per stimare la funzione errore con l'espressione dell'errore quadratico seguente

$$E_0(\dots) = (a^L - y)^2 = [\sigma(w^L \cdot a^{L-1} + b^L) - y]^2 \quad (3.14)$$

Per valutare la sensibilità della funzione errore (o costo) al variare dei parametri della connessione w e b e come modificarli per ridurre efficientemente l'errore è necessario derivare la funzione costo (Eq.3.14), nell'ipotesi che sia completamente derivabile, rispetto a queste due grandezze mediante la regola di derivazione della catena

$$\frac{\partial E_0}{\partial w^L} = \frac{\partial z^L}{\partial w^L} \cdot \frac{\partial a^L}{\partial z^L} \cdot \frac{\partial E_0}{\partial a^L} \quad (3.15)$$

In cui le derivate parziali assumono la seguente forma

$$\frac{\partial E_0}{\partial a^L} = \frac{\partial (a^L - y)^2}{\partial a^L} = 2 \cdot (a^L - y) \quad (3.16a)$$

$$\frac{\partial a^L}{\partial z^L} = \frac{\partial \sigma(z^L)}{\partial z^L} = \sigma'(z^L) \quad (3.16b)$$

$$\frac{\partial z^L}{\partial w^L} = \frac{\partial (w^L \cdot a^{L-1} + b^L)}{\partial w^L} = a^{L-1} \quad (3.16c)$$

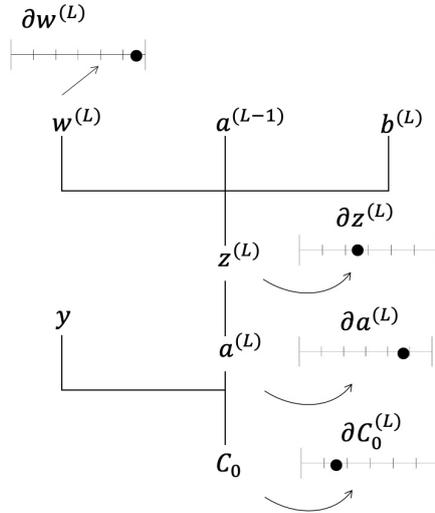


Figura 3.5 Rappresentazione della logica di derivazione

In cui l'equazione 3.16a indica che la variazione della funzione errore rispetto all'attivazione è proporzionale al doppio dello scostamento tra output reale e predetto. L'equazione 3.16b indica invece che la variazione di z^L rispetto al peso della connessione sinaptica dipende dall'attivazione del neurone precedente ed esprime sinteticamente, in analogia ai sistemi biologici, i concetti introdotti con da D. Hebb con la teoria dell'assemblaggio cellulare, riassumibili con una sua citazione *'i neuroni che si attivano insieme si collegano insieme'*. Pertanto si ottiene l'espressione riferita ad un singolo allenamento condotto con un qualsiasi set di variabili di input

$$\frac{\partial E_0}{\partial w^L} = a^{L-1} \cdot \sigma'(z^L) \cdot 2 \cdot (a^L - y) \quad (3.17)$$

Volendo generalizzare per i K allenamenti condotti si ottiene

$$\frac{\partial E}{\partial w^L} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} \frac{\partial E_k}{\partial w^L} \quad (3.18)$$

Lo stesso vale per la derivata della funzione errore rispetto al bias per un singolo allenamento e set di variabili espressa come segue

$$\frac{\partial E_0}{\partial b^L} = \frac{\partial z^L}{\partial b^L} \cdot \frac{\partial a^L}{\partial z^L} \cdot \frac{\partial E_0}{\partial a^L} = \sigma'(z^L) \cdot 2 \cdot (a^L - y) \quad (3.19)$$

Le equazioni 3.17 e 3.19 rappresentano le componenti del gradiente della funzione

errore $\nabla E(w^k)$ riferite ad ogni connessione tra uno strato ed un neurone successivo. Il valore assoluto delle componenti è proporzionale all'influenza che il cambiamento sul peso o bias ha sull'errore commesso mentre il segno indica se il parametro deve aumentare o diminuire. Abbandonando la struttura semplificata ed introducendo a ritroso un ulteriore neurone emerge l'idea della retro-propagazione ovvero valutare la sensitività della funzione errore anche rispetto all'attivazione degli strati precedenti

$$\frac{\partial E_0}{\partial a^{L-1}} = \frac{\partial z^L}{\partial a^{L-1}} \cdot \frac{\partial a^L}{\partial z^L} \cdot \frac{\partial E_0}{\partial a^L} = w^L \cdot \sigma'(z^L) \cdot 2 \cdot (a^L - y) \quad (3.20)$$

Introducendo una nuova notazione in cui j rappresenta il numero dei neuroni del layer L , k il numero di quelli del layer $L-1$ ed i pesi delle connessioni saranno identificati w_{jk}^L con riferimento ai neuroni collegati è possibile ripetere il processo logico precedente. La funzione errore valutata su tutti i neuroni del layer L assume la forma

$$E_0 = \sum_{j=0}^{N_L-1} (a_j^L - y_j)^2 \quad (3.21)$$

Dove $a_j^L = \sigma(z_j^L)$ ma stavolta z_j^L tiene conto anche delle attivazioni in arrivo dai neuroni dello strato precedente

$$z_j^L = w_{j0}^L \cdot a_0^{L-1} + w_{j1}^L \cdot a_1^{L-1} + w_{j2}^L \cdot a_2^{L-1} + b_j^L \quad (3.22)$$

Ora la forma della derivata della funzione errore rispetto ai pesi è identica a prima ma generalizzata

$$\frac{\partial E_0}{\partial w_{jk}^L} = \frac{\partial z_j^L}{\partial w_{jk}^L} \cdot \frac{\partial a_j^L}{\partial z_j^L} \cdot \frac{\partial E_0}{\partial a_j^L} \quad (3.23)$$

Invece cambia la derivata parziale rispetto all'attivazione del layer precedente $L-1$ perché nella sommatoria convergono gli effetti provocati dalle attivazioni di tutti le connessioni che il neurone k dello strato $L-1$ ha stabilito con quelli successivi

$$\frac{\partial E_0}{\partial a_k^{L-1}} = \sum_{j=0}^{N_L-1} \frac{\partial z_j^L}{\partial a_k^{L-1}} \cdot \frac{\partial a_j^L}{\partial z_j^L} \cdot \frac{\partial E_0}{\partial a_j^L} \quad (3.24)$$

In conclusione la forma generale delle componenti del gradiente della funzione

errore è

$$\frac{\partial E}{\partial w_{jk}^l} = a_k^{l-1} \cdot \sigma'(z_j^l) \cdot 2 \cdot (a^L - y) \cdot \frac{\partial E}{\partial a_j^L} \quad (3.25)$$

dove

$$\frac{\partial E}{\partial a_j^l} = \sum_{j=0}^{N_{L+1}-1} w_{jk}^{l+1} \cdot \sigma'(z_j^{l+1}) \cdot \frac{\partial E}{\partial a_j^{L+1}} \quad (3.26)$$

Ad ogni allenamento i pesi di ciascuna connessione vengono modificati nella direzione del gradiente negativo (antigradiente) della funzione errore per attivare maggiormente i neuroni che consentono di ottenere risultati corretti all'output layer ed inibire gli altri affinché sia minimizzato l'errore commesso globalmente da tutti i neuroni. Ciò avviene per mezzo dell'algoritmo di discesa del gradiente in cui il peso dell'allenamento successivo $k+1$ è pari a

$$w^{k+1} = w^k - \eta \cdot \nabla E(w^k) \quad (3.27)$$

Dove η è l'ampiezza del passo lungo la direzione gradiente negativo o tasso di apprendimento.

Capitolo 4

Impianto sperimentale

4.1 GeothermSkin

Sebbene i geoscambiatori tradizionali e le geostrutture siano tecnologie consolidate presentano alcuni limiti tecnici ed economici che ne limitano la diffusione. L'installazione delle sonde geotermiche verticali necessita di un lungo processo autorizzativo e di attività di scavo onerose mentre prerogativa fondamentale per la posa di quelle orizzontali è la disponibilità di ampie superfici di terreno successivamente interdette ad altri usi che possano coprirne la superficie, inoltre le geostrutture devono essere realizzate simultaneamente alla costruzione dell'edificio affinché siano incluse in un processo di progettazione integrata. L'applicazione difficoltosa di queste soluzioni tecniche in contesti di riqualificazione energetica degli edifici modera il contributo offerto della tecnologia alla decarbonizzazione dei servizi di climatizzazione. Per superare queste limitazioni è stato brevettato, presso il Politecnico di Torino, un muro energetico innovativo chiamato GeothermSkin®. Può essere classificato come una geostruttura idealmente affine al muro energetico perché costituito da un'infrastruttura aggiuntiva che interponendosi tra la superficie esterna di un muro ed il terreno conferisce all'elemento strutturale una funzione energetica. GeothermSkin è costituito da un circuito idraulico realizzato con tubi in polietilene reticolato perossidico Pe-Xa ad alta densità installati sulla superficie esterna del muro a formare dei moduli che percorsi da un fluido termovettore scambiano calore con il terreno quindi convertono le superfici dell'edificio a contatto con il terreno in geoscambiatori di calore integrati con la pompa di calore. I diversi moduli possono essere collegati in

parallelo per operare in maniera indipendente oppure in serie e ciascuno può essere installato in direzione verticale o orizzontale. Le estremità delle sonde convergono sui collettori generali che mediante i circuiti idraulici di collegamento alimentano la pompa di calore. La struttura modulare garantisce la scalabilità del sistema in fase di progetto e la massima affidabilità durante l'esercizio perché la ridondanza dei moduli consente, in caso di occlusione o perdita, di escludere idraulicamente quelli guasti assicurando la continuità di funzionamento (Baralis and Barla, 2021). I vantaggi di questa geostruttura innovativa risiedono nella possibilità di installarla sia in contesti di riqualificazione che in fasi di costruzione degli edifici, inoltre l'installazione a profondità ridotte richiede opere di scavo più semplici ed economiche perché volte ad esporre solo la parte di muro interessata pertanto ne risulta snellito il processo autorizzativo. Queste caratteristiche facilitano l'espressione del potenziale di questa tecnologia nel contribuire alla riduzione delle emissioni per la climatizzazione estiva ed invernale degli edifici, oltre a favorire la diffusione degli impianti geotermici.

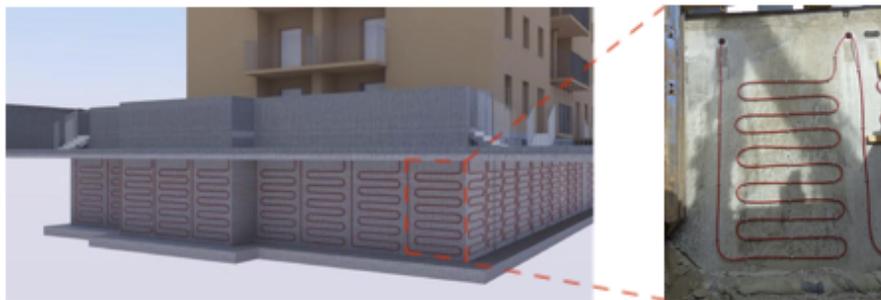


Figura 4.1 Prototipo GeothermSkin (Baralis and Barla, 2021)

Il Politecnico di Torino ha realizzato presso l'Energy Center di Torino un prototipo di GeothermSkin che integrato con una pompa di calore elettrica costituisce l'impianto sperimentale. L'impianto a pompa di calore geotermica è stato costruito con lo scopo di analizzare la resa termica di GeothermSkin in qualità di scambiatore acqua-terreno nelle reali condizioni di funzionamento, l'attivazione termica del muro di sostegno dell'Energy Center su cui è installato e le conseguenti deformazioni indotte. Consente inoltre di condurre analisi energetiche per valutare il coefficiente di performance della pompa di calore e le potenze scambiate dal sistema durante riscaldamento invernale o il raffrescamento estivo al variare delle condizioni climatiche. Le diverse infrastrutture di monitoraggio consentono di acquisire i parametri di funzionamento della pompa di calore, dell'impianto termotecnico e le condizioni

termo-igrometriche del terreno antistante GeothermSkin con l'obiettivo di indagare gli effetti derivanti dalla reciproca interazione termica che intercorre tra il prototipo ed il sottosuolo.

4.2 Dati climatici e dell'edificio

Località	Torino
Provincia	Torino
Indirizzo	Via Paolo Borsellino, 38 int. 16, 10138
Altitudine s.l.m	239 m
Latitudine nord	45° 07'
Longitudine est	7° 65'
Gradi giorno	2617
Zona climatica	E

Dati generali edificio

Destinazione d'uso prevalente (DPR 412/93)	E.2 Edifici adibiti a uffici e assimilabili
Superficie riscaldata	5000 m²

Tabella 4.1 Definizioni operative

Provincia	Comune	Altitudine [m]	Zona climatica	GG	Te [°C]	Tm,e [°C]
TO	Torino	239	E	2617	-8	12.4



Figura 4.2 Energy Center Lab (Mattioda e Figli S.p.A) e posizione del prototipo Geotherm-Skin

4.2.1 Localizzazione impianto

L'impianto sperimentale è situato nel seminterrato dell'edificio. E' necessario distinguere due zone di interesse e le rispettive sottozone, riportate nella pianta in Figura 4.3, come segue:

- **Piano interrato**

- Isola1: è il locale che ospita la pompa di calore, l'utenza termica (ventilconvettore) e gli accumuli che regolano il funzionamento dell'impianto sperimentale e ne consentono l'integrazione con l'impianto solare termico. Coincide con il locale unità trattamento aria, alla destra della centrale termica
- Isola2: zona dell'intercapedine che divide il seminterrato dal terreno circostante. Sulla superficie esterna del muro è installato GeothermSkin mentre su quella interna sorgono i collettori generali su cui si attestano i circuiti dei moduli
- Centrale termica: ospita gli impianti termici che integrano l'impianto solare termico con quelli della pompa di calore

L'accesso a queste zone avviene dall'intercapedine perimetrale interrata sui cui si affacciano le porte REI di ogni locale.

- **Terrazza**

- Copertura vano scala A e B: in corrispondenza della copertura dei vani scala A e B sono installati i moduli solari termici a tubi sottovuoto

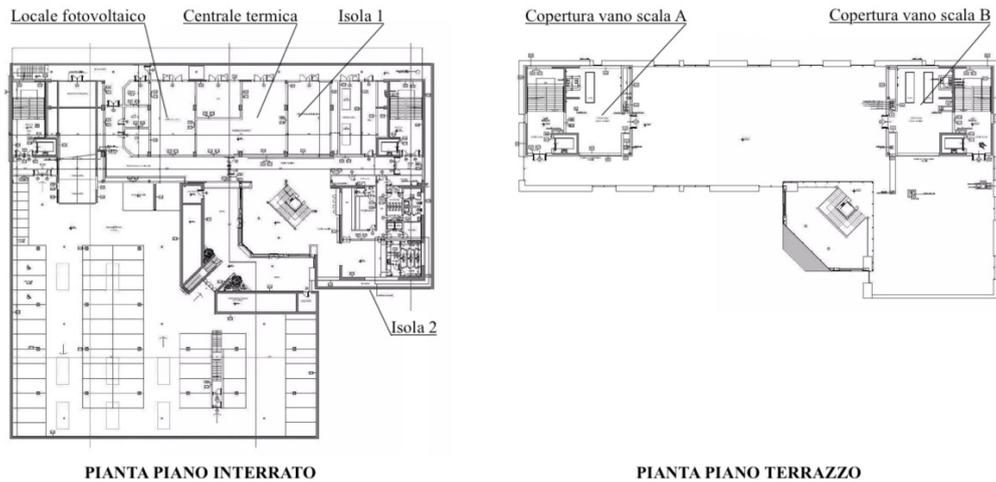


Figura 4.3 Pianta dei locali

4.2.2 La costruzione di GeothermSkin

Per la costruzione di GeothermSkin è stato realizzato uno scavo di profondità 80-120 cm in corrispondenza dell'isola 2 ed in posizione adiacente al muro perimetrale dell'edificio. Per proseguire fino ad una profondità di 4.7 m sono stati installati per infissione i montati dell'armatura di sostegno per i pannelli di contenimento disposti lungo il perimetro interno dello scavo e rinforzati con puntoni di contrasto per consolidarne le pareti ed evitare smottamenti del terreno circostante. E' stato quindi realizzato un getto di calcestruzzo magro sul fondo dello scavo per realizzare un basamento piano e stabile su cui posizionare i trabattelli e lavorare agevolmente all'installazione di GeothermSkin. Sul muro perimetrale dell'edificio sono stati praticati con carotatrice ad acqua i fori che mettono in comunicazione l'intercapedine perimetrale interrata dell'edificio con il terreno e consentono il passaggio delle estremità dei tubi che costituiscono il circuito idraulico del prototipo ed i cavi del sistema di monitoraggio. Quindi i moduli GethermSkin sono stati assicurati al muro perimetrale con morsetti metallici e sono stati predisposti nel terreno i sensori disposti su piani a diversa profondità per monitorare gli effetti meccanici e termici indotti nel muro e nel terreno. Il riempimento dello scavo è stato realizzato in più fasi in cui si alternano la deposizione del materiale di risulta, lo spianamento del terreno

e la posa dei sensori adeguatamente protetti con uno strato di sabbia dall'impatto dei detriti causati dal successivo rinterro.



Figura 4.4 Fasi dell'installazione di GeothermSkin (Baralis and Barla, 2021)

4.3 Descrizione dell'impianto

L'impianto sperimentale è stato costruito con lo scopo di analizzare la dinamica di funzionamento di GeothermSkin in reali condizioni di operative e l'effettiva potenza termica scambiata con il terreno. Inoltre permette di vagliare gli effetti delle interazioni termiche con il terreno e con il muro di sostegno dell'Energy Center su cui è installato che subisce deformazioni e fenomeni di attivazione termica. Infine costituendo lo scambiatore acqua-terreno della pompa di calore offre la possibilità di condurre analisi energetiche per valutare il coefficiente di performance e le potenze scambiate dal sistema durante riscaldamento invernale o il raffrescamento estivo. L'impianto è costituito da una pompa di calore elettrica di tipo acqua-terreno che sottoponendo un fluido frigorigeno ad un ciclo termodinamico inverso consente il trasferimento di calore tra il terreno e l'aria interna sfruttando una miscela di acqua e glicole come termovettore. Lo scambio termico con il terreno è realizzato per mezzo di GeotherSkin installato sul muro perimetrale interrato mentre l'interazione termica con l'aria dell'ambiente interno è condotta con un ventilconvettore. Pertanto l'impianto è in grado di realizzare il servizio di riscaldamento invernale e raffrescamento

estivo dell'ambiente interno in maniera attiva o passiva, lo scarico termico del calore di origine solare in virtù dell'integrazione idraulica con l'impianto solare termico dell'Energy Center e modificare l'umidità del terreno mediante l'apposito circuito di irrigazione.

4.3.1 Gruppi funzionali e componenti

Per comprendere la struttura dell'impianto sperimentale è necessario distinguere le diverse sezioni nei seguenti gruppi funzionali con i rispettivi componenti:

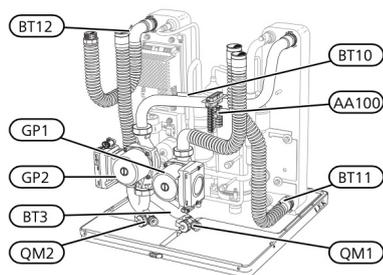
- **Pompa di calore:** è la macchina che interponendosi tra il circuito primario e secondario attua il trasferimento dei flussi termici e l'interazione tra i termostati.
- **Circuito primario:** è quella sezione di impianto percorsa dal termovettore costituito da una miscela di acqua e glicole che consente lo scambio termico con il terreno e comprende i moduli di GeothermSkin installati sulla parete perimetrale dell'edificio.
- **Circuito secondario:** è quella porzione d'impianto che realizzando il deflusso di una miscela di acqua e glicole alimenta il ventilconvettore che rappresenta il terminale d'utenza, il quale scambia calore con l'aria interna e climatizza l'ambiente.
- **Impianto solare termico:** è costituito da moduli a tubi sottovuoto installati sulla copertura dell'edificio ed integrati termicamente con l'impianto sperimentale mediante accumuli collegati in serie con serpentino interno e che consentono quindi la separazione idraulica dei fluidi termovettori.
- **Circuito irrigatori:** è composto da 9 file ciascuna con 5 irrigatori installati sulla superficie soprastante GeothermSkin, sono alimentati dalla linea dell'acqua potabile e consentono di modificare l'umidità relativa e quindi la conducibilità termica del terreno sottostante.

4.3.2 Pompa di calore

La pompa di calore elettrica modello Nibe F1155 di potenza termica nominale pari a 3.15 kW è situata nel seminterrato/isola 1, ha alimentazione monofase a 230 V e 50 hZ derivata dal quadro locale di bassa tensione installato sul muro retrostante ed assorbe 0.67 kW elettrici. Il quadro è munito di interruttore automatico con logica magnetotermica e differenziale di tipo bipolare (L+N) ed è alimentato dal quadro elettrico di zona di GeothermkSkin situato nel locale fotovoltaico a sua volta derivato dal quadro generale di distribuzione. La pompa di calore utilizza come fluido frigorifero di ciclo 1.16 Kg di R407C (miscela zeotropica composta da 23% R32 difluorometano, 25% R125 pentafluoroetano, 52% R134A tetrafluoroetano) sottoposto internamente ad un ciclo termodinamico inverso. A bordo macchina una portata di 0.08 l/s di R407C scorre nel circuito chiuso dove viene compressa nel compressore scroll ermetico con inverter e scambia calore con l'esterno fluendo al primario degli scambiatori a piastre che rappresentano il condensatore e l'evaporatore. Al secondario di questi scorre una miscela di acqua e glicole al 25% in volume che consente, grazie ai circuiti idraulici primario e secondario, di trasferire il calore al circuito sonde ed al ventilconvettore che li scambieranno rispettivamente con il terreno e l'aria. La circolazione del termovettore nei circuiti primario e secondario è garantita dai circolatori GP1 e GP2 presenti a bordo macchina, quest'ultima è collegata al circuito primario con tubazioni di mandata e ritorno \varnothing 28mm ed al secondario con tubi \varnothing 22 mm tutti in acciaio zincato e coibentati. Affinché la pompa di calore possa operare correttamente la temperatura massima di ingresso al condensatore non può superare i 58°C mentre quella all'evaporatore deve essere inferiore a 30°C. La massima temperatura dell'acqua e glicole in uscita dal condensatore è pari a 65°C con il solo compressore attivo incrementabile fino a 70°C attivando la resistenza elettrica integrata da 7 kW, sempre inattiva durante le campagne sperimentali.

Tabella 4.2 Dati di targa della pompa di calore (Nibe)

Modello	NIBE F1155	
Targa	Potenza termica nominale	3.15 kW
	Alimentazione	Elettrica monofase
	Potenza elettrica assorbita	0.67 kW
	Tensione nominale	230V ~ 50 hZ
Refrigerante	R407C	
	Massa refrigerante	1.16 kg
	Composizione	23% R32 difluorometano 25% R125 pentafluoroetano 52% R134A tetrafluoroetano
	Portata	0.08 l/s
Componenti a bordo macchina	Scambiatore a piastre	Condensatore Evaporatore
	Compressore con inverter	
	Valvola di laminazione	
	Circolatore acqua-glicole	circuito primario GP2 circuito secondario GP1
	Pressostato glicole	di alta pressione: tarato a 32 bar di bassa pressione: tarato a 1.5 bar



(a)



(b)

Figura 4.5 Pompa di calore e accumulo 200l (a) e circuito R407 c a bordo macchina (b)

Tabella 4.3 Dettaglio sensori della pompa di calore

Provincia	Comune
BT1	temperatura ambientale esterna
BT2	temperatura mandata secondario (utenza termica) dopo la resistenza
BT3	temperatura ritorno secondario (utenza termica)
BT10	temperatura ritorno primario (sonde)
BT11	temperatura mandata primario (sonde)
BT12	temperatura mandata secondario (utenza termica)
BT14	temperatura frigorifero uscita compressore
BT17	temperatura frigorifero ingresso compressore
BT25	temperatura mandata secondario esterno per controllo in retroazione
Degree Minutes	gradi minuto
compr. freq. act.	frequenza di alimentazione del compressore
GP1-speed	regime di rotazione circolatore acqua-glicole secondario
GP2-speed	regime di rotazione circolatore acqua-glicole primario

La macchina è equipaggiata con diversi sensori posti sul circuito chiuso dell'R407C che misurano le temperature del frigorifero in corrispondenza dei capisaldi del ciclo termodinamico e dei termovettori dei circuiti idraulici primario e secondario ed ulteriori parametri riportati in tabella 4.3. Le grandezze vengono rilevate con frequenza di campionamento pari ad una misura al minuto e memorizzate su supporto memoria fisico o in cloud. Siccome il passaggio dalla funzione di riscaldamento a quella di raffrescamento richiede un'inversione dei fluidi che attraversano gli scambiatori ma la posizione dei sensori rimane invariata durante il raffrescamento quelli posti sul circuito primario e secondario misureranno temperature invertire come mostrato nella figura 4.6.

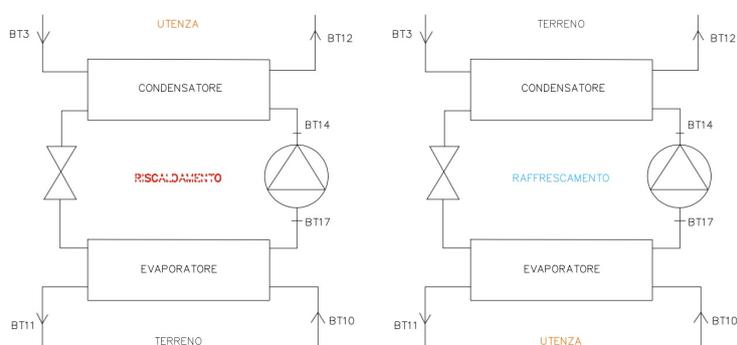


Figura 4.6 Schema sensori della pompa di calore

4.3.3 Circuito primario

E' percorso da una portata di acqua e glicole al 25% in volume mediamente pari a $0.65 \text{ m}^3/\text{h}$ sostenuta dal circolatore GP2 installato sul ritorno a bordo macchina, questo impianto verrà distinto in tre diverse sezioni in relazione al materiale che costituisce i tubi. L'impianto idraulico è la sezione di impianto compresa tra i collegamenti con le valvole 3 vie deviatrici e la valvola generale dei collettori su cui si attestano i tubi di mandata e ritorno del terreno. E' realizzato con tubi $\varnothing 28$ mm in acciaio zincato e coibentati, giuntati a pressare e staffati alla parte interna del muro che delimita l'intercapedine. Si estendono per 65m lungo il perimetro dell'edificio perché le sonde, situate nell'Isola 2, sono distanti rispetto all'Isola 1 in cui è situata la pompa di calore. Sul condotto di mandata è installata una valvola di sicurezza a molla con scarico convogliato tarata a 3 bar, una valvola a sfera compresa tra le due valvole a sfera poste sulle derivazioni filettate che consentono il reintegro manuale dell'acqua e glicole nell'impianto ed una valvola generale per chiudere la mandata. Sul tubo di ritorno è presente il vaso d'espansione chiuso ed un filtro ad Y (con cestello metallico) intercettato da due valvole a sfera per consentire l'estrazione e pulizia/sostituzione del cestello metallico ed ulteriori valvole per chiudere il ritorno e le derivazioni di collegamento con il circuito solare. Inoltre è predisposta una valvola 3 vie miscelatrice affinché la temperatura dell'acqua calda, in arrivo dall'impianto solare termico ed immessa sul ritorno del circuito secondario per alimentare la pompa di calore, sia inferiore ai 30°C . Nei pressi dell'Isola2 sono presenti i collettori di mandata e ritorno del circuito sonde interrato, realizzati in polietilene ad alta densità da $\varnothing 32$ mm giuntato con collari elettrosaldabili e poggiati su sostegni tassellati al muro. Sui collettori si attestano tre circuiti di mandata e tre di ritorno in polietilene dei moduli GeothermSkin, ognuno dei quali munito di contabilizzatore termico, misuratore di portata e valvola a sfera. Due contabilizzatori termici ad ultrasuoni (SITRANS FUE950 Energy Calculator) sono installati su due partenze differenti e misurano l'energia termica trasferita verso le due sonde a terreno mentre il terzo (SITRANS FUE950 Energy Calculator) è disposto sul collettore generale di mandata per misurare l'energia termica totale trasferita verso le sonde a terreno infine l'energia termica verso il terzo modulo sonda è stimata misuratore compatto installato successivamente.



Figura 4.7 Collettori circuito primario GeothermSkin - Isola2 (Baralis, 2021)

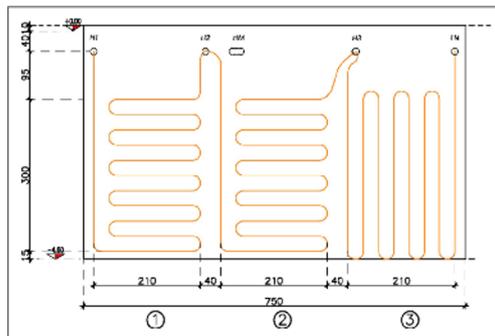
Tabella 4.4 Tabella riassuntiva caratteristiche circuito primario

Circuito	Idraulico	Sonde
Modello	Viega Prestabo DN28	PE100 PN16
Materiale	Acciaio zincato	Polietilene
Diametro nominale	ø28mm	ø32mm
Pressione nominale	-	16 bar a 20°C
Isolante	elastomerico a cellule chiuse	"
Giunti	A pressare	collari elettrosaldabili

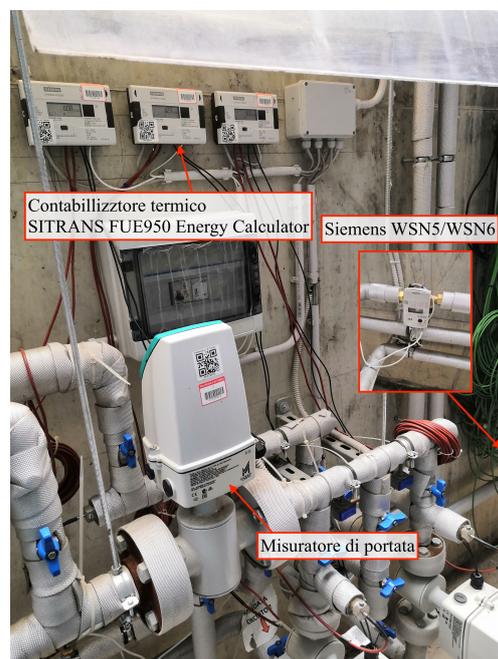
GeothermSkin è costituito da 3 moduli, due dei quali disposti in verticale ed uno in orizzontale, ciascuno di altezza 4.6 m e larghezza 2.5 m realizzati con tubo in polietilene reticolato perossidico di diametro interno 20 mm e spessore 2 mm che realizzano complessivamente un'area di scambio di 6.3 m^2 ed una lunghezza 84.9 m. L'adeguata apertura e chiusura delle valvole presenti sulle derivazioni e sulle interconnessioni tra moduli consente di collegare le sonde a terreno idraulicamente in serie o in parallelo. Durante le prove di riscaldamento sono stati alimentati tutti i moduli connessi in parallelo tra loro.

Tabella 4.5 Tabella riassuntiva caratteristiche GeothermSkin

Dimensioni		Tubo	
Altezza	460 mm	Modello	Rehau Rautherm
Larghezza singolo modulo	250 mm	Materiale	Polietilene PE-Xa
Lunghezza totale tubi	sonde 84.9 m	Diametro int.	ø20 mm
Area scambio termico	6.3 m ²	Spessore	2 mm



(a)



(b)

Figura 4.8 Dimensioni del modulo GeothermSkin (a) e dettaglio misuratori (b)

In virtù della natura sperimentale dell'impianto un esteso sistema di monitoraggio è stato installato nel volume di terreno antistante a GeothermSkin e sul muro che lo sostiene con l'obiettivo di caratterizzare lo scambio di calore, analizzare gli effetti termo-meccanici indotti dall'attivazione del muro retrostante la geostruttura e monitorare come l'evoluzione delle condizioni fisiche del terreno influiscano sull'interazione con GeothermSkin. Il terreno in condizioni indisturbate presenta una temperatura e umidità relativa che dipendono dalle condizioni climatiche esterne tuttavia il fluido termovettore attraversando il geoscambiatore sottrae calore nel funzionamento invernale e lo cede in quello estivo modificando sia campo di

temperatura che il tenore di umidità del terreno, inoltre le variazioni di temperatura inducono nel muro deformazioni e tensioni termiche aggiuntive dipendenti dalle condizioni di vincolo. Le tensioni e deformazioni indotte lungo l'asse Verticale V, normale N, orizzontale H e orizzontale ruotato accidentalmente di $15^\circ H^*$ vengono monitorate da diverse celle di pressione ed estensimetri riportati in dettaglio nella Tabella 4.6 e disposti sulla superficie esterna del muro come riportato in Figura 4.9

Tabella 4.6 Posizione estensimetri e celle di pressione sulla superficie del muro

Loop	Strumento	Profondità	Asse	Codice
1	Estensimetro	170	H	Be1
1	Cella di pressione	200	N	Cp2
1	Estensimetro	260	V	Be4
1	Estensimetro	350	H	Be7
1	Cella di pressione	410	V	Cp3
2	Estensimetro	170	V	Be2
2	Estensimetro	260	H	Be5
2	Estensimetro	350	V	Be8
2	Cella di pressione	410	H	Cp4
3	Estensimetro	170	H	Be3
3	Cella di pressione	170	V	Cp1
3	Estensimetro	260	V	Be6
3	Cella di pressione	350	H*	Cp5
3	Estensimetro	350	H	Be9

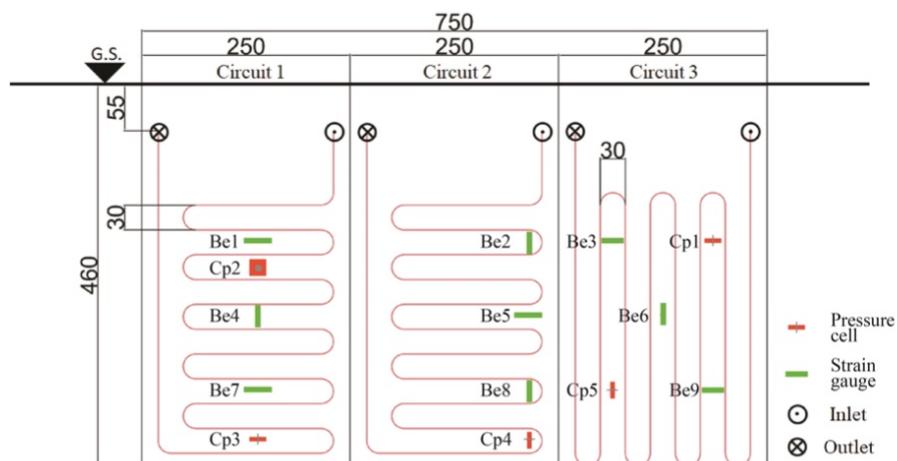


Figura 4.9 Disposizione dei sensori sulla superficie del prototipo (Baralis, 2021)

La misura delle temperature nel terreno è condotta con diverse termoresistenze PT-100 (sigla C) posizionate su quattro piani a profondità crescente (Fig.4.10a) in numero progressivamente più basso tanto maggiore è la profondità di installazione. Infatti all'aumentare della profondità è attesa una maggior stabilità termica e gradienti termici inferiori caratterizzabili con un numero inferiore di termoresistenze invece a profondità ridotte le condizioni climatiche esterne inducono maggiori gradienti termici apprezzabili con un numero superiore di sensori. Inoltre sono stati predisposti alcuni igrometri (sigla S) per la valutazione dell'umidità. La posizione degli igrometri e delle termoresistenze sui diversi piani è riportata in figura 4.11 e realizza un rete di misura tridimensionale che monitora adeguatamente l'umidità relativa ed il campo di temperatura del terreno.

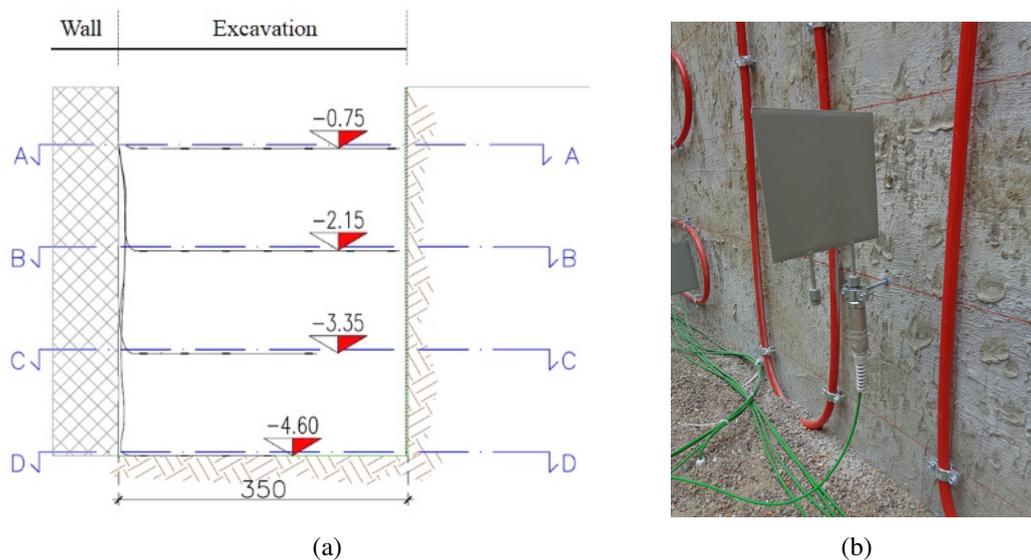
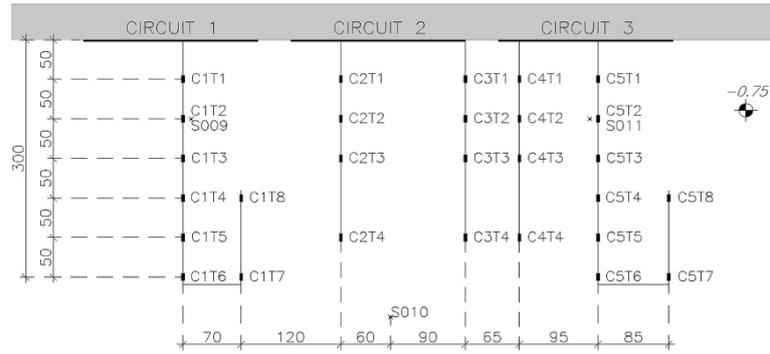
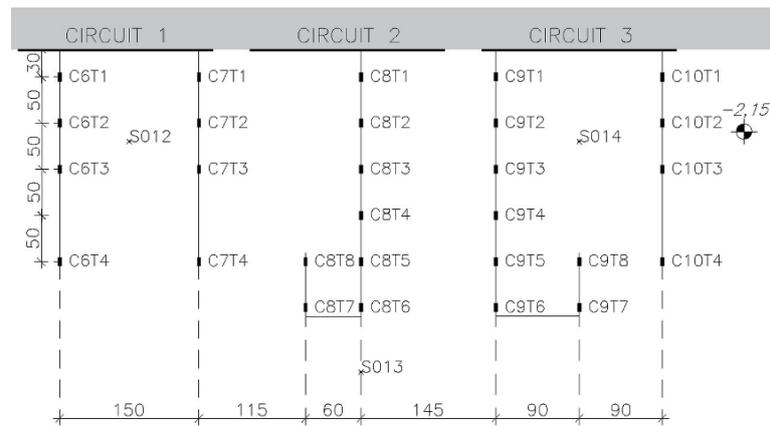


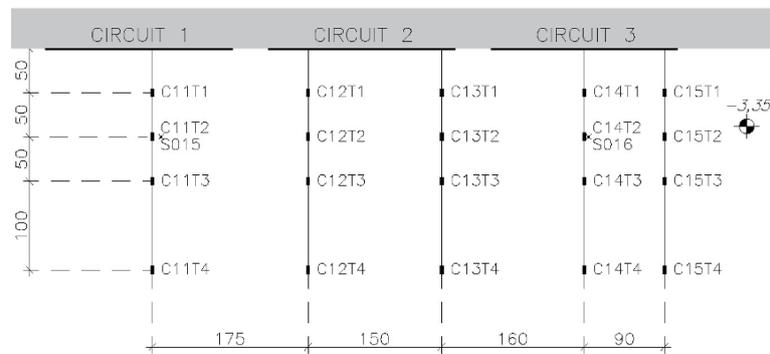
Figura 4.10 Posizione dei piani di misura in sezione (a) e cella di pressione (b) (Baralis, 2021)



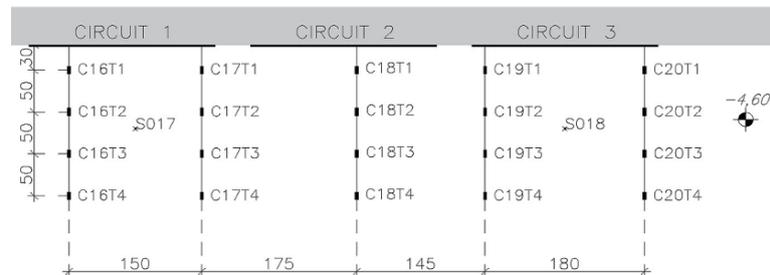
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.11 Posizione dei sensori di temperatura sul (a) Piano A, (b) Piano B, (c) Piano C, (d) Piano D (Baralis, 2021)

4.3.4 Circuito secondario

Il circuito secondario è percorso da una portata di acqua e glicole al 25% in volume variabile tra 0.29-0.34 m^3/h , sostenuta dal circolatore GP1 installato sul ritorno. La mandata ed il ritorno, realizzati con tubi in acciaio zincato da $\varnothing 22mm$ coibentati e giuntati mediante pressfitting, collegano in serie la pompa di calore, il ventilconvettore e l'accumulo Pacetti da 100 l. L'accumulo pacetti funge da volano termico consentendo di ridurre la frequenza di accensione del compressore ed aumentando la vita utile della pompa di calore. E' dotato di una predisposizione con portagomma sul corpo cilindrico che consente il reintegro del termovettore e di un vaso di espansione da 8 litri. Il terminale d'utenza è costituito da un ventilconvettore Sabiana modello CR23 in cui il fluido termovettore con temperatura limitata tra 5 ed 85°C attraversa lato tubi una batteria di scambio termico alettata e lambita esternamente da una portata d'aria ambiente massima di 340 m^3/h movimentata dal ventilatore elettrico. Infine sul tubo di ritorno sono installati un contabilizzatore termico compatto, il filtro ad Y con cestello metallico intercettato da valvole a sfera e la valvola di sicurezza a molla con scarico convogliato tarata alla pressione di 3 bar.

Tabella 4.7 Tabella riassuntiva caratteristiche circuito secondario

Tubi		Ventilconvettore	
Modello	Viega Prestabo DN22	Modello	Sabiana CRC24
Materiale	acciaio zincato	N° ranghi batteria	4
Dn	$\varnothing 22mm$	T alimentazione	5-85°C
Isolante	elastomerico	Portata ventilatore	340 m ³ /h
		Resa max riscaldamento	2.2 kW
		Portata max	750 l/h
		Portata min	100 l/h

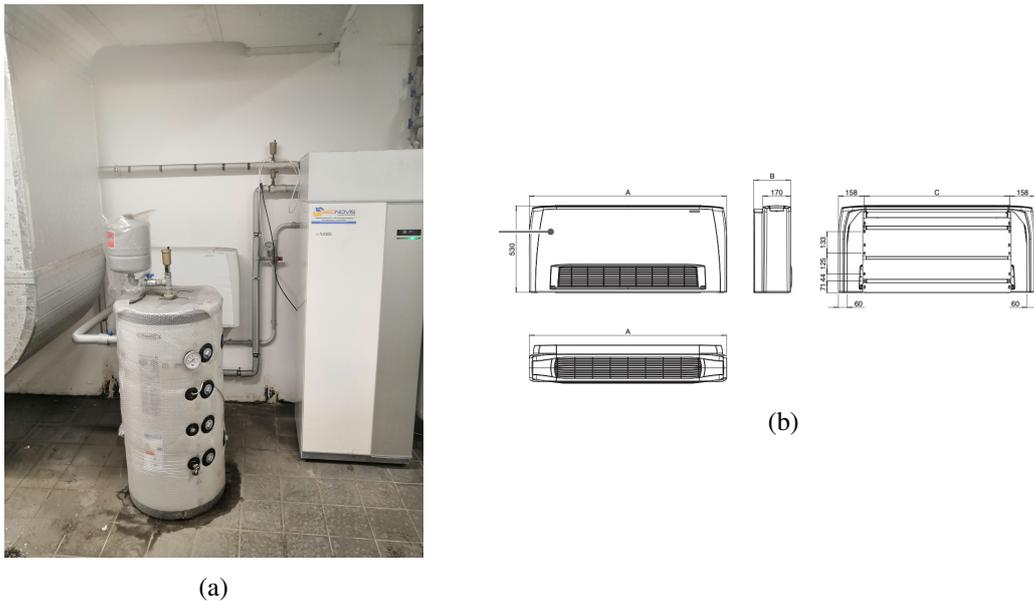


Figura 4.12 Volano termico da 100l (a) e ventilconvettore (b) (Sabiana S.p.a)

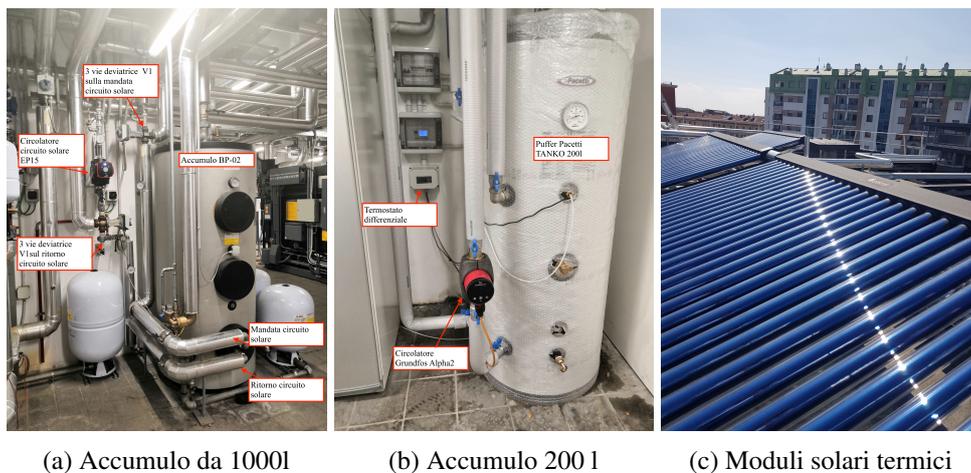
4.3.5 Circuito solare termico

Sulla copertura dell'edificio sono presenti i collettori solari termici a tubi sottovuoto che, per mezzo del fluido termovettore dedicato, cedono calore all'accumulo *BP – 02* da 1000 l preesistente la cui funzione è collegare ed integrare l'impianto solare termico con quello termotecnico dell'Energy Center. Il circolatore *EP15* movimenta il termovettore dei collettori solari se la temperatura del fluido nei moduli supera di 5°C quella del serbatoio e si ferma raggiunta la temperatura di set-point, qualora la temperatura di produzione dei collettori solari termici superasse quella di set-point la valvola di regolazione a tre vie devierebbe il fluido nel serbatoio d'accumulo *ACC – 01* dell'impianto termotecnico a servizio dell'edificio. Dall'accumulo *BP – 02* partono i tubi di mandata e ritorno in acciaio zincato da $\varnothing 28$ mm che collegano l'accumulo Pacetti da 200 l posizionato nel locale UTA (Isola1) accanto alla pompa di calore. Sul tubo di ritorno tra l'accumulo 1000 l e 200 l il circolatore Grundfoss consente la circolazione tra i due serbatoi secondo le logiche imposte dalla centralina Nibe Solar42 che mediante due sensori acquisisce le temperature *BT53* e *BT54* rilevate rispettivamente nell'accumulo *BP – 02* e ed in quello da 200 l. Se la temperatura nell'accumulo *BP – 02* (*BT53*) supera quella del serbatoio da 200 l (*BT54*) di un valore dT il circolatore si attiva facendo circolare l'acqua nel serpentino

affinché ceda calore all'acqua e glicole contenuta nell'accumulo Pacetti da 200 l. Quest'ultimo si atterra sui condotti di mandata e ritorno del circuito sonde con un tubo di mandata munito di contabilizzatore termico compatto ed uno di ritorno su cui è installato il vaso d'espansione da 24 l precaricato a 0.7 bar. La valvola miscelatrice posta sul ritorno del circuito sonde consente di ridurre la temperatura dell'acqua all'ingresso della pompa di calore qualora la temperatura di quella derivante dal solare termico sia superiore a 30°C, evitando che la macchina si arresti automaticamente. Il termostato differenziale *STC1000* interviene durante la procedura di scarico termico volta a cedere l'energia termica accumulata nel serbatoio da 200 l dell'impianto solare termico nel terreno quando la pompa di calore non è in funzione per l'assenza di carico termico richiesto. A tal proposito quando la temperatura dell'accumulo supera $T_{set} + dT$ °C il termostato comanda l'accensione del circolatore GP2 integrato nella pompa di calore tenendo inattivo il compressore e dando inizio il processo di scarico termico che si conclude quando la temperatura dell'accumulo diventa inferiore a $T_{set} - dT$ °C.

Tabella 4.8 Dettagli tubi circuito solare termico

Tubi	
Modello	Viega Prestabo DN28
Materiale	acciaio zincato
Diametro nominale	ø28mm
Isolante	elastomerico



(a) Accumulo da 1000l

(b) Accumulo 200 l

(c) Moduli solari termici

Figura 4.13 Principali componenti del circuito solare

4.3.6 Circuito irrigatori

Gli irrigatori superficiali sono alimentati da 3 circuiti in parallelo di polietilene che dal semi- interrato giungono in superficie attraverso un pozzetto in cemento. I circuiti, ciascuno dotato di una pompa, si attestano su un piccolo collettore in polietilene alimentato da una derivazione del collettore generale dei servizi d'irrigazione in acciaio zincato. Su questa derivazione sono installate un'ulteriore pompa che preleva l'acqua dal collettore generale per alimentare quello locale in polietilene ed un contaltri. Le pompe sono alimentate da un quadro elettrico locale derivato dal quadro elettrico generale 'acque piovane e irrigazione QP-AP'.



(a)



(b)

Figura 4.14 Collettore, partenza circuito irrigatori (a) ed irrigatori (b)

4.3.7 Descrizione delle logiche di funzionamento

L'impianto è in grado realizzare il servizio di riscaldamento e raffrescamento in maniera attiva e passiva e valorizzare, solo per il funzionamento invernale, il calore del terreno o quello derivante dall'impianto solare termico. In riscaldamento la miscela di acqua e glicole attraversando le sonde geotermiche sottrae calore al terreno ed aumenta la sua temperatura, fluisce all'evaporatore dove si raffredda cedendo calore al fluido frigorifero per poi essere reimmessa nelle sonde a terreno. Il fluido frigorifero, in condizioni bifase dopo la laminazione, attraversa l'evaporatore ed assorbendo il calore dal fluido primario evapora fino a surriscaldarsi, viene quindi compresso nel compressore e raggiunge la pressione massima di ciclo in condizio-

ni di vapore saturo. Attraversa il condensatore dove si desurriscalda, condensa e sottoraffredda cedendo calore all'acqua e glicole del circuito secondario d'utenza, quest'ultima attraversando il condensatore aumenta la sua temperatura ed alimenta la batteria alettata del ventilconvettore che cede calore all'aria ambientale. L'acqua a temperatura inferiore in uscita dall'utenza viene immessa nell'accumulo e successivamente prelevata dall'accumulo per ripetere il ciclo. Per operare in regime di raffrescamento occorre commutare la posizione delle valvole d'inversione stagionale affinché si invertano i fluidi che scorrono al secondario degli scambiatori a piastre. In questa modalità di funzionamento il ciclo del refrigerante rimane invariato ma l'acqua e glicole dell'utenza termica fluisce all'evaporatore da cui uscirà a temperatura inferiore per alimentare il ventilconvettore e sottrarre calore all'ambiente interno mentre il termovettore del circuito primario riceve calore dal condensatore e lo cede al terreno fluendo nel geoscambiatore. Qualora la temperatura del terreno sia sufficientemente alta da scaldare l'acqua e glicole a valori di temperatura adeguati a soddisfare il carico termico invernale o bassa da raffreddarla a valori di temperatura adeguati a soddisfare il carico frigorifero e contestualmente i carichi termici estivi ed invernali siano particolarmente contenuti in virtù delle temperature esterne favorevoli l'impianto può operare in maniera passiva. Le modalità di funzionamento passivo consentono di climatizzare l'ambiente interno mantenendo il compressore della pompa di calore spento ed alimentando solo i circolatori dei circuiti acqua e glicole con conseguente riduzione dell'assorbimento di energia elettrica. La scheda accessoria NIBE AXC50 al verificarsi di condizioni favorevoli al funzionamento passivo attiva entrambi i circolatori senza accendere il compressore ed agisce sul gruppo valvole 3 vie deviatrici collegando il circuito primario e secondario in serie affinché l'acqua e glicole circolino in maniera termicamente passiva sia nell'evaporatore che nel condensatore. Se la radiazione solare incidente sui moduli solari termici è adeguata il termovettore dell'impianto solare termico può scaldare indirettamente l'acqua contenuta nell'accumulo da 1000 l la quale, movimentata dal circolatore Grundfos Alpha 25-80, fluisce nel serpentino dell'accumulo da 200 l cedendo calore all'acqua e glicole in esso contenuta. Quest'ultimo serbatoio di accumulo alimenta il ritorno del circuito sonde su cui è posta la valvola 3 vie miscelatrice che, qualora la temperatura dell'acqua e glicole ingresso alla macchina sia maggiore di 30°C, la limita ad un valore inferiore miscelandola con la mandata e consente di evitare l'arresto della macchina come previsto dal programma di protezione installato. La regolazione della temperatura del termovettore in mandata all'utenza termica può

avvenire con logica a punto fisso in cui la temperatura di mandata dell'acqua è costante e pari al valore di setpoint impostato dall'utente oppure mediante curva di compensazione climatica, una logica di controllo open loop che imponendo una relazione univoca tra la temperatura di mandata dell'acqua calda ed un parametro climatico consente di regolare indirettamente la temperatura dell'ambiente. In tutti i periodi di funzionamento la regolazione è a punto fisso pertanto l'accensione e lo spegnimento del compressore sono gestite rispetto ai gradi minuto.

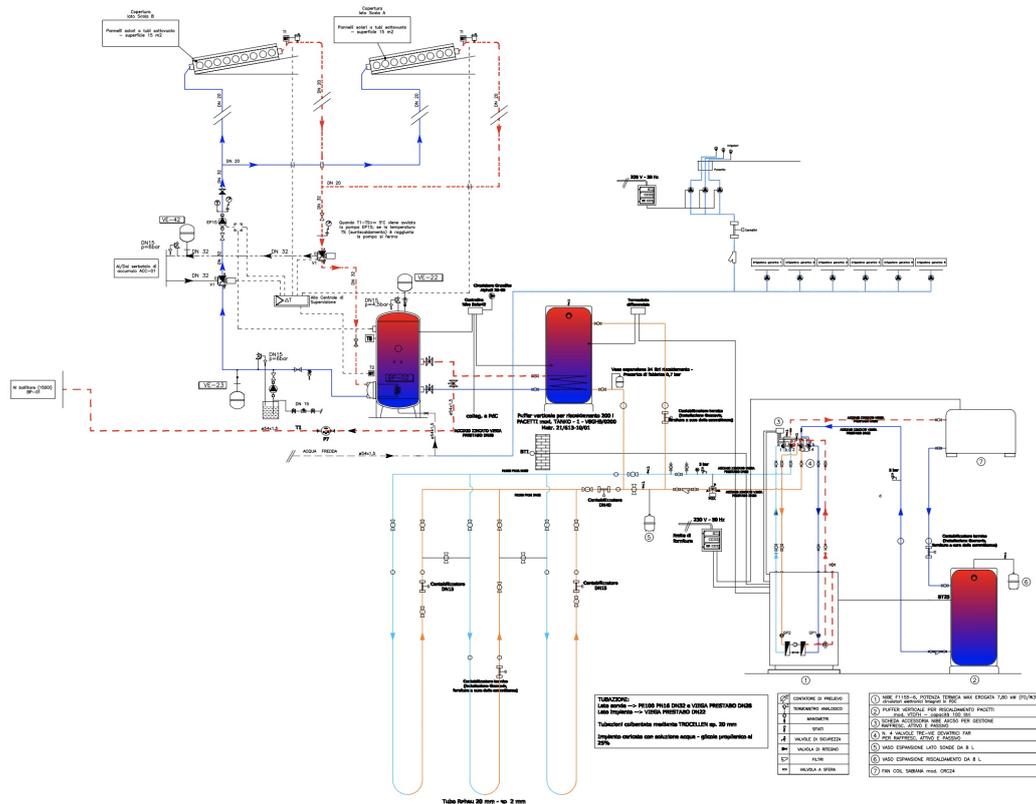


Figura 4.15 Schema funzionale dell'impianto

Capitolo 5

Analisi energetica e prestazionale del sistema

L'analisi energetica della pompa di calore geotermica equipaggiata con GeothermSkin operante in riscaldamento rappresenta il primo tema affrontato nell'ambito di questa tesi con l'obiettivo di valutare la reale efficienza dell'impianto, le potenze termiche scambiate in un periodo di funzionamento continuo ed approfondirne la dipendenza dalle condizioni climatiche esterne e del terreno. Nel periodo compreso tra il 23/10/2019 - 31/10/2019 e 06/02/2020 – 14/02/2020 è stata avviata la pompa di calore per realizzare le prove di riscaldamento ed acquisire contestualmente i parametri fisici che caratterizzano il funzionamento dell'impianto, quelli che descrivono le condizioni termo-igrometriche del terreno e le variabili climatiche; in entrambi i periodi tutti e tre i moduli di GeothermSkin erano attivi e collegati in parallelo tra loro. Per condurre l'analisi energetica e risolvere i bilanci di potenza è necessario caratterizzare la pressione e la temperatura dei punti estremi del ciclo termodinamico inverso condotto dall'R407C in ogni istante di tempo, le temperature vengono misurate da appositi sensori tuttavia non sono presenti sensori di pressione. Pertanto è stato sviluppato un algoritmo iterativo in grado di identificare, in ogni istante di tempo, la coppia di pressioni massima e minima di ciclo che, alle reali temperature di funzionamento, minimizzano lo scostamento tra il lavoro tecnico realmente assorbito dal compressore e quello che assorbirebbe se operasse nello stato termodinamico ipotizzato. Identificato l'andamento della pressione di condensazione ed evaporazione nel tempo segue la risoluzione delle equazioni di bilancio ed il calcolo delle potenze scambiate dall'evaporatore e condensatore e delle portate di

termovettore nel circuito secondario e di fluido frigorifero.

5.1 Ipotesi di lavoro

La formulazione di ipotesi semplificative è necessaria per sopperire alla mancanza di alcuni dati di funzionamento o per semplificare fenomeni fisici reali non modellabili nel dettaglio. La temperatura del fluido frigorifero in uscita dal condensatore non viene misurata a causa del malfunzionamento del sensore preposto pertanto è necessario supporre che non vi sia sotto-raffreddamento dell'R407C durante la condensazione e che la sua temperatura sia pari a quella di saturazione sulla curva limite inferiore del diagramma p-h in corrispondenza della pressione massima di ciclo. Come precedentemente accennato gli scambiatori a piastre della pompa di calore impongono una caduta di pressione sul fluido frigorifero difficilmente stimabile perché dipendente dalla conformazione interna dello scambiatore e dalla velocità di deflusso del frigorifero pertanto le trasformazioni di condensazione ed evaporazione vengono considerate isobare. Considerando la caduta di pressione nell'evaporatore la reale pressione dello stato termodinamico in ingresso al compressore sarebbe tale da garantire la condizione di vapore saturo secco dell'R407C invece trascurando le perdite di carico lo stato termodinamico che ne deriva potrebbe essere compreso all'interno delle curve limite in cui l'R407C si trova in condizioni bi-fase. Tutti gli stati di funzionamento che a causa dell'ipotesi semplificativa prevederebbero la condizione bi-fase del fluido frigorifero sono esclusi dall'analisi essendo difficile stimare con adeguata precisione titolo ed entalpia della miscela. Inoltre si ipotizza che le fasi di condensazione ed evaporazione siano isoterme sebbene le transizioni di fase dell'R407C non lo siano rigorosamente. Le equazioni di conservazione dell'energia attribuite ad ogni componente fanno riferimento a flussi di massa in regime stazionario in cui le variazioni di energia cinetica e potenziale siano trascurabili, il compressore e la valvola di laminazione sono considerati adiabatici, la trasformazione di laminazione è ipotizzata isoentalpica e le dispersioni termiche negli scambiatori e nei tubi verranno trascurate. Il calore specifico della miscela di acqua e glicole viene calcolato come combinazione lineare delle composizioni in volume del calore specifico dell'acqua e di quello del glicole. Quello dell'acqua è valutato istante per istante con riferimento alla temperatura media del fluido tra l'ingresso e l'uscita del circuito considerato ed alla pressione media di funzionamento assunta pari 1.45

bar nel circuito secondario e 1.65 bar in quello primario invece quello del glicole è valutato istantaneamente con riferimento alla temperatura media della miscela alla pressione ambientale. La portata di fluido termovettore nel circuito primario viene stimata da appositi misuratori posti su ogni partenza che dal collettore alimenta i moduli di GeothermSkin, tuttavia forniscono un valore di portata cumulato nel tempo e ciò consente di ottenere esclusivamente un valore medio di portata nel periodo di riscaldamento. Infine il calcolo del coefficiente di prestazione riporta a denominatore unicamente il lavoro tecnico assorbito dal compressore non riferendosi quindi ai consumi elettrici effettivi per mancanza del rendimento elettrico del compressore e trascurando gli assorbimenti elettrici dei circolatori a bordo macchina.

5.2 Strumenti di calcolo e database

Il principale strumento di calcolo per l'analisi energetica è il software MATLAB mediante il quale è stato realizzato lo script in grado di automatizzare il processo di import dei file in formato LOG e la loro unione in un unico database in formato csv contenente i parametri raccolti dai sensori installati a bordo della pompa di calore con frequenza di campionamento pari ad una misura al minuto. Il codice comprende l'algoritmo iterativo di ricerca delle pressioni di funzionamento e quello dedicato al calcolo delle prestazioni del sistema nel tempo. Quest'ultimo trae le principali proprietà, come entalpia e calore specifico dell'acqua o dell'R407c, dalla libreria CoolProp che a sua volta attinge ai database NIST REFPROP. Per automatizzare il processo di estrazione delle proprietà dei fluidi CoolProp è stato connesso a Matlab per mezzo di un interprete in linguaggio Python che si interfaccia direttamente con il database REFPROP e consente di utilizzare i comandi di CoolProp in Matlab.

5.3 Modello fisico-matematico dei componenti

La rappresentazione concettuale dell'impianto in esame richiede la formulazione di un modello fisico che formalizzato in termini matematici è in grado di descriverne il funzionamento reale e derivare risultati numerici. A tal proposito è necessario considerare lo schema semplificato di una pompa di calore a compressione in cui per ogni componente viene definito un volume di controllo distinto la cui superficie

è attraversata da flussi di massa e di potenza. Le variabili di stato scelte sono la pressione e la temperatura rispetto alle quali verranno stimate le entalpie dei fluidi con l'ausilio delle equazioni di stato per la miscela acqua e glicole e degli applicativi descritti in precedenza per il fluido frigorifero. Per ogni componente vengono imposte le variabili di stato e le grandezze fisiche costanti a cui è sottoposto e formulate le equazioni di conservazione della massa (Eq. 5.2), energia (Eq. 5.1) e momento (Eq. 5.3). Si riporta di seguito la formulazione generale del primo principio della termodinamica per sistemi aperti, la legge di conservazione della portata in regime stazionario e dell'energia meccanica che verranno in seguito applicate ad ogni componente con dovute ipotesi semplificative.

$$\sum_{i=1}^N \phi_i - \sum_{j=1}^N W_j - W_0 = \frac{dU^T}{dt} \Big|_{V_c} + \sum_{k=1}^N G_k \cdot h_k^T \quad (5.1)$$

Dove

- $\sum_{i=1}^N \phi_i$ è la somma dei flussi termici positivi se entranti e negativi se uscenti dal volume di controllo
- $\sum_{j=1}^N W_j$ è la somma delle potenze tecniche positive quando uscenti e negative quando entranti nel volume di controllo
- $W_0 = \frac{d}{dt} \cdot (U + E_c + E_g)$ è la variazione del lavoro di deformazione nel tempo
- $\frac{dU^T}{dt} \Big|_{V_c} = \frac{d}{dt} \cdot (U + E_c + E_g)$ è la variazione nel tempo dell'energia interna totale del sistema
- $\sum_{k=1}^N G_k \cdot h_k^T$ è la somma delle potenze veicolate dai flussi di massa aventi entalpia specifica totale $h_k^T = h_k + e_c + e_g$. Il contributo è considerato positivo se il flusso di massa è uscente dal sistema e negativo se entrante

In un sistema fisso con volume di controllo non deformabile e deflusso stazionario la variazione nel tempo della massa contenuta nel volume di controllo è nulla pertanto la somma delle portate in massa entranti eguaglia quelle uscenti.

$$\sum_{i=1}^N \dot{G}_{out} - \sum_{j=1}^N \dot{G}_{in} = 0 \quad (5.2)$$

Per deflussi mediamente stazionari di fluidi incomprimibili l'equazione dell'energia meccanica o equazione di Bernulli estesa scritta in energie per unità di peso assume la forma seguente

$$\frac{p_{out}}{\gamma} + \frac{v_{out}^2}{2g} + z_{out} = \frac{p_{in}}{\gamma} + \frac{v_{in}^2}{2g} + z_{in} + h_s - h_L \quad (5.3)$$

dove $H_{in} = \frac{p_{in}}{\gamma} + \frac{v_{in}^2}{2g} + z_{in}$ e $H_{out} = \frac{p_{out}}{\gamma} + \frac{v_{out}^2}{2g} + z_{out}$ rappresentano rispettivamente il carico totale del fluido in ingresso ed uscita dal volume di controllo come somma dei corrispondenti carichi piezometrici, cinetici e geodetici, $h_s = \frac{W_{shaft\ net\ in}}{g}$ è il carico piezometrico imposto dall'ipotetica pompa o circolatore calcolato come il rapporto tra il lavoro massico fornito dall'esterno e l'accelerazione di gravità g ed h_L la perdita di carico che si verifica nel componente esaminato. Nell'ipotesi che negli scambiatori siano nulle le perdite di carico e che le variazioni di energia cinetica e potenziale siano trascurabili per tali componenti l'equazione 5.3 ricade in un'uguaglianza tra la pressione in ingresso e quella di uscita

5.3.1 Compressore

Le variabili di stato del refrigerante nelle sezioni d'ingresso ed uscita del compressore sono note pertanto il refrigerante R407C è stato modellato come un fluido reale e le proprietà caratterizzate in funzione della pressione e della temperatura con l'ausilio degli applicativi introdotti nella sezione precedente. Il compressore in ogni istante di tempo esercita un lavoro di compressione L_c sul refrigerante modificandone lo stato termodinamico che, inizialmente caratterizzato dalla pressione minima di evaporazione p_{lp} e la temperatura misurata all'ingresso del compressore T_{TB17} , raggiunge la pressione di condensazione massima di ciclo p_{hp} e la temperatura di fine compressione T_{TB14} .

$$\begin{cases} p_{hp}(t_0) = p_{hp}(t = t_0) \\ p_{lp}(t_0) = p_{lp}(t = t_0) \\ T_{TB14}(t_0) = T_{TB14}(t = t_0) \\ T_{TB17}(t_0) = T_{TB17}(t = t_0) \end{cases}$$

Nell'ipotesi che attraversando il compressore idealmente adiabatico il deflusso sia stazionario e che le variazioni di energia cinetica e potenziale che subisce siano

trascurabili il primo principio della termodinamica assume la seguente forma

$$L_c = G_{R407c} \cdot (h_{BT14} - h_{BT17}) \quad (5.4)$$

Esprimendo l'entalpia dell'R407c come

$$h = h_0 + c \cdot (T - T_0) \quad (5.5)$$

la potenza tecnica assorbita del compressore risulta pari a

$$L_c = G_{R407c} \cdot c_{PR407c} \cdot (T_{BT14} - T_{BT17}) \quad (5.6)$$

5.3.2 Condensatore

Il termovettore del circuito secondario che fluisce al secondario del condensatore attraversa la sezione di ingresso alla temperatura T_{BT3} e raggiunge la temperatura T_{BT12} in quella d'uscita in virtù dell'assorbimento isobaro ad una pressione media costante della potenza termica Q_c . Le temperature del fluido nella sezione di ingresso ed uscita dallo scambiatore assumono il valore all'istante considerato dei profili di temperatura nel tempo misurati dagli appositi sensori

$$\begin{cases} p_{2,H_2O+g} = 1.45 \text{ bar} \\ T_{BT12}(t_0) = T_{BT12}(t = t_0) \\ T_{BT3}(t_0) = T_{BT3}(t = t_0) \end{cases}$$

Note le temperature è possibile valutare l'entalpia della miscela acqua e glicole nei punti di interesse con l'equazione di stato seguente, assimilando il fluido ad un liquido incomprimibile

$$h = h_0 + c \cdot (T - T_0) + v \cdot (p - p_0) \quad (5.7)$$

dove

$$c_{2,H_2O+g} = 0.75 \cdot c_{H_2O} \cdot (T_m, p_{2,H_2O+g}) + 0.25 \cdot c_g \cdot (T_m, p_{amb}) \quad (5.8)$$

In cui il calore specifico della miscela è valutato come combinazione lineare rispetto alle frazioni volumiche dei calori specifici dell'acqua c_{H_2O} e del glicole c_g valutati alla temperatura media del fluido e rispettivamente alla pressione del secondario ed a

quella ambientale. Nell'ipotesi che nel condensatore idealmente adiabatico il flusso sia stazionario e che le variazioni di energia cinetica e potenziale che subisce siano trascurabili il primo principio della termodinamica assume la seguente forma

$$Q_c = G_{2,H_2O+g} \cdot (h_{BT12} - h_{BT3}) = G_{2,H_2O+g} \cdot c_{2,H_2O+g} \cdot (T_{BT12} - T_{BT3}) \quad (5.9)$$

In cui il pedice 2 identifica le proprietà riferite al termovettore del circuito secondario. Con riferimento al primario del condensatore il refrigerante R407c entra nello scambiatore con entalpia h_{BT14} e cede la potenza termica Q_c in condizioni isobare alla pressione di condensazione p_{hp} fino a ad assumere l'entalpia di saturazione $h_{s,c.l.i}$ in corrispondenza della curva limite inferiore.

$$\begin{cases} p_{hp}(t_0) = p_{hp}(t = t_0) \\ T_{BT14}(t_0) = T_{BT14}(t = t_0) \\ h_{s,c.l.i} = h(p_{hp}(t_0), T_{s,c.l.i}) \end{cases}$$

Di conseguenza il primo principio della termodinamica è formulato come segue

$$-Q_c = G_{R407c} \cdot (h_{s,c.l.i} - h_{BT14}) \quad (5.10)$$

5.3.3 Valvola di laminazione

Questo componente impone una laminazione ipotizzata isoentalpica che riduce la pressione dell'R407 dalla pressione massima p_{hp} a quella minima di ciclo p_{lp} . Pertanto l'equazione di conservazione dell'energia si riduce a

$$h_4 = h_{s,c.l.i} \quad (5.11)$$

5.3.4 Evaporatore

Il termovettore del circuito primario fluisce al secondario del condensatore con una portata in massa pari, per ipotesi, al valor medio relativo al periodo di riscaldamento. Attraversa la sezione di ingresso dell'evaporatore alla temperatura T_{BT10} e riduce la temperatura in quella d'uscita al valore T_{BT11} in virtù della cessione isobara ad una pressione media costante della potenza termica Q_{ev} . Le temperature del fluido nella sezione di ingresso ed uscita dallo scambiatore rappresentano il valore istantaneo dei

profili di temperatura nel tempo misurati dagli appositi sensori

$$\begin{cases} p_{1,H_2O+g} = 1.65 \text{ bar} \\ T_{BT11}(t_0) = T_{BT11}(t = t_0) \\ T_{BT10}(t_0) = T_{BT10}(t = t_0) \\ G_{H_2O+g}^1 = \text{cost} \end{cases}$$

La portata di acqua e glicole media del circuito primario è pari a 460 l/h nel periodo di Ottobre e 925.81 l/h in quello di Febbraio ed è assimilabile ad un liquido incomprimibile caratterizzato dall'equazione di stato seguente che consente di valutare l'entalpia nella sezione di ingresso ed uscita dall'evaporatore

$$h = h_0 + c \cdot (T - T_0) + v(p - p_0) \quad (5.12)$$

dove

$$c_{1,H_2O+g} = 0.75 \cdot c_{H_2O} \cdot (T_m, p_{1,H_2O+g}) + 0.25 \cdot c_g(T_m, p_{amb}) \quad (5.13)$$

In cui c_{H_2O} e c_g vengono valutati alla temperatura media del fluido e rispettivamente alla pressione del primario ed a quella ambientale. Nell'ipotesi che nell'evaporatore idealmente adiabatico il flusso sia stazionario e che le variazioni di energia cinetica e potenziale che subisce siano trascurabili il primo principio della termodinamica assume la seguente forma

$$-Q_{ev} = G_{H_2O+g}^1 \cdot (h_{BT11} - h_{BT10}) = G_{H_2O+g}^1 \cdot c_{H_2O+g}^1 (T_{BT10} - T_{BT11}) \quad (5.14)$$

In cui il pedice 1 identifica le proprietà riferite al termovettore del circuito primario. Con riferimento al primario dell'evaporatore l'R407c entra nello scambiatore con entalpia h_4 e riceve la potenza termica Q_{ev} in condizioni isobare alla pressione di evaporazione p_{lp} fino a ad assumere l'entalpia h_{BT17}

$$\begin{cases} p_{lp}(t_0) = p_{lp}(t = t_0) \\ T_{BT17}(t_0) = T_{BT17}(t = t_0) \\ h_4 = h_{s,c.l.i} \end{cases}$$

Pertanto il primo principio della termodinamica è formulato come segue

$$Q_{ev} = G_{R407c} \cdot (h_{BT17} - h_4) \quad (5.15)$$

Le considerazioni fin qui svolte sono riferite ad un singolo istante di tempo ma i bilanci vengono ripetuti per ogni istante del periodo di funzionamento della macchina a partire dai valori di entalpia e pressione ricavati dalle temperature istantaneamente misurate, pertanto fatta eccezione per i valori assunti costanti tutte le grandezze assumono profili variabili nel tempo.

5.4 Algoritmo per l'identificazione dei profili di pressione

Il sistema di monitoraggio dei parametri di funzionamento della pompa di calore è sprovvisto di manometri digitali pertanto i profili della pressione di condensazione ed evaporazione del fluido frigorigeno sono inizialmente incogniti. Per un'accurata analisi prestazionale condotta con i bilanci di potenza occorre conoscere sia la temperatura che la pressione dei capisaldi del ciclo nel tempo per valutarne lo stato termodinamico. Nel ciclo termodinamico inverso il compressore instaura due differenti livelli di pressione affinché la trasformazione di condensazione avvenga alla pressione massima di ciclo p_{hp} e quella di evaporazione alla pressione minima p_{lp} e questi valori variano istantaneamente nel tempo in funzione del regime di funzionamento del compressore gestito dalla pompa di calore in base alla logica di regolazione. Il numero di variabili termodinamiche necessarie alla completa definizione degli stati termodinamici GL o gradi di libertà è stabilito dalla regola delle fasi di Gibbs secondo cui

$$GL = NC - NF + 2 \quad (5.16)$$

dove NC è il numero di componenti ed NF il numero di fasi presenti. Nell'ipotesi che l'R407c sia una sostanza pura con numero di componenti unitario $NC = 1$ la regola di Gibbs assume la forma

$$GL = 3 - NF \quad (5.17)$$

Applicando l'equazione 5.17 all'R407c in condizioni di vapore saturo ($NF=1$) le variabili da fissare per definire univocamente lo stato termodinamico del refrigerante sono due cioè la pressione e la temperatura tuttavia dai dati di funzionamento è

possibile ricavare solo quest'ultima, di conseguenza esistono infiniti punti sul diagramma p-h caratterizzati dalla temperatura fissata ma aventi diversa pressione ed entalpia. Per poter caratterizzare le reali pressioni di funzionamento conoscendo solo le temperature del frigorifero a monte e valle del compressore è stato realizzato un algoritmo di ricerca esaustiva (di forza bruta) basato sulla pura potenza computazionale che, con alcuni accorgimenti per migliorarne l'efficienza, analizza tutte le possibili coppie di pressioni che causano un assorbimento di lavoro del compressore proprio pari a quello reale calcolato per ciascun istante di funzionamento. In una prima fase si identificano gli intervalli di valori in cui presumibilmente variano la pressione di condensazione e quella di evaporazione con passo di discretizzazione che dipende dalla precisione richiesta e dal tempo computazionale. L'algoritmo per ogni istante di tempo a cui corrisponde un preciso punto di funzionamento seleziona una pressione massima $p_{hp_{guess}}$ ed una minima $p_{lp_{guess}}$ verificando che la prima sia superiore alla seconda e che il compressore sia acceso per evitare di analizzare combinazioni fisicamente inconsistenti e ridurre il tempo di calcolo. In caso di esito positivo valuta se i capisaldi del ciclo posti agli estremi del compressore siano caratterizzati dalla presenza di fluido frigorifero in condizioni monofase di vapore surriscaldato confrontando le temperature dell'R407c nei due punti con quelle che avrebbe se fosse sulla curva limite superiore alle pressioni considerate. In caso positivo le seguenti disuguaglianze sono verificate

$$\begin{cases} T_{BT14} > T_{sat,14} \\ T_{BT17} > T_{sat,17} \end{cases}$$

quindi l'algoritmo valuta i calori specifici e le entalpie dei capisaldi alle reali temperature di funzionamento ed alle pressioni presunte e procede al calcolo del lavoro reale assorbito dal compressore per unità di massa (Eq. 5.18) e quello che assorbirebbe se lavorasse con il rapporto di compressione ipotizzato (Eq. 5.19)

$$l_{c,REALE} = c_{p,14} \cdot T_{BT14} - c_{p,17} \cdot T_{BT17} \quad (5.18)$$

$$l_{c,GUESS} = h_{BT14} - h_{BT17} \quad (5.19)$$

Valuta infine lo scostamento relativo tra il lavoro reale e quello presunto

$$scost_{rel} = \frac{|l_{c,GUESS} - l_{c,REALE}|}{l_{c,REALE}} \quad (5.20)$$

e compila una matrice di riepilogo che sulle righe riporta ogni coppia di pressioni ipotizzata e lo scostamento relativo tra i lavori. Le pressioni che realizzano il minimo scostamento relativo tra lavoro reale e presunto rappresentano i valori di reale funzionamento nell'istante considerato e vengono salvate in due vettori separati. Il processo, iterato per ogni istante di tempo provando tutte le combinazioni di pressioni plausibili, consente di ottenere i reali profili di pressione di evaporazione e condensazione dell'R407 con passo di discretizzazione pari a 0.1 bar utilizzati nella prossima sezione per caratterizzare in ogni istante le proprietà termodinamiche e risolvere le equazioni di bilancio. Nel codice in Appendice B è possibile approfondire la struttura dell'algoritmo e le logiche di gestione delle casistiche. Di seguito sono riportati i profili di pressione per un singolo ciclo di funzionamento per entrambi i periodi di riscaldamento analizzati. Con riferimento alla figura 5.1 è possibile osservare che la pressione di condensazione oscilla tra i 7 bar ed i 13 bar mentre quella di evaporazione assume valori compresi tra 6 ed 8.5 bar invece in figura 5.2 si riscontra una minor variabilità.

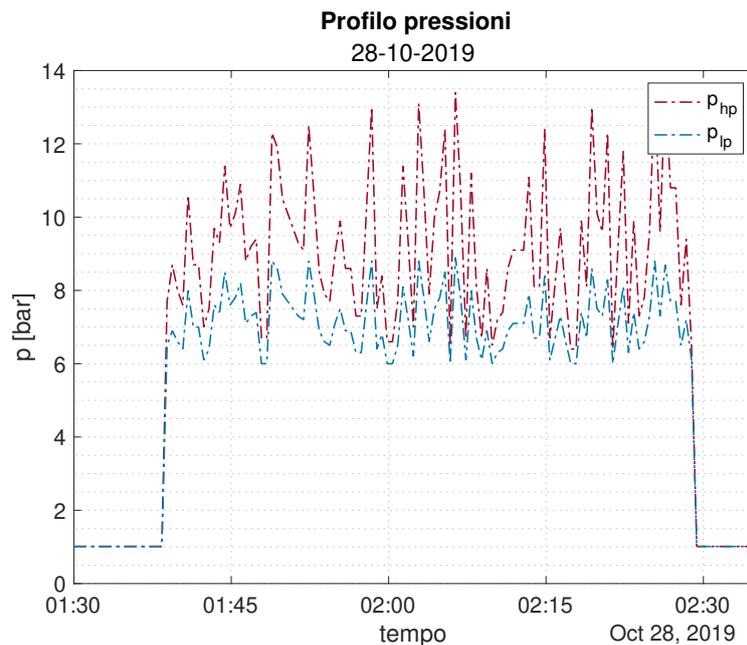


Figura 5.1 Profilo di pressione di un ciclo di funzionamento nel periodo 2019

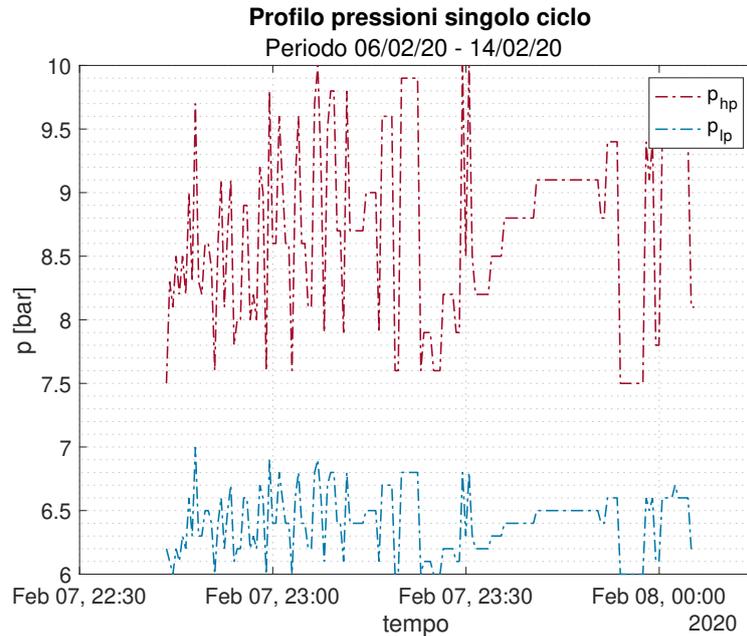


Figura 5.2 Profilo di pressione di un ciclo di funzionamento nel periodo 2020

5.5 Calcolo delle prestazioni

Il sistema di equazioni che modellano il funzionamento dei componenti e le pressioni reali di funzionamento consentono di stimare i valori di portata dei fluidi di lavoro, le potenze termiche erogate dal condensatore ed assorbite dall'evaporatore ed infine la potenza tecnica assorbita dal compressore. A tal proposito l'algoritmo risolve le equazioni in tutti gli istanti di funzionamento che verificano le seguenti condizioni

- la frequenza di alimentazione del compressore è diversa da zero
- il regime di rotazione dei circolatori è diverso da zero
- Siano state identificate le reali pressioni di funzionamento
- La temperatura di mandata del circuito secondario T_{BT12} è superiore a quella del ritorno T_{BT3}

In altre parole sono quegli istanti in cui l'impianto è realmente in funzione e lo stato dell'R407c è quello di vapore surriscaldato sia all'ingresso che all'uscita dal compressore. L'efficienza di funzionamento della macchina operante come pompa

di calore è espressa del coefficiente di prestazione COP valutato come il rapporto tra il beneficio che in regime di riscaldamento è rappresentato dalla potenza termica ceduta dal condensatore e la spesa energetica ovvero la potenza meccanica assorbita dal compressore.

$$COP = \frac{Q_c}{L_C} = \frac{q_{cond,R407C}}{l_{comp,R407c}} \quad (5.21)$$

Il COP verrà valutato in termini specifici con riferimento alle energie per unità di massa in quanto le portate massiche di R407c e della miscela acqua e glicole del circuito secondario sono inizialmente incognite e ricavate successivamente dalle equazioni di bilancio. Pertanto occorre stimare il calore per unità di massa scambiato al condensatore lato R407c come

$$q_c = h_{BT14} - h_{s,s.c.l.i} \quad (5.22)$$

ed il lavoro massico del compressore

$$l_c = c_{pR407c} \cdot (T_{BT14} - T_{BT17}) \quad (5.23)$$

Sostituendo il numeratore dell'equazione 5.21 con l'equazione 5.22 ed il denominatore con l'equazione 5.23 si ottiene

$$COP = \frac{h_{BT14} - h_{s,s.c.l.i}}{c_{pR407c} \cdot (T_{BT14} - T_{BT17})} \quad (5.24)$$

Con l'obiettivo di calcolare le potenze termiche scambiate, la potenza tecnica assorbita dal compressore e le portate in massa dei fluidi di lavoro occorre applicare il primo principio della termodinamica all'intero sistema nell'ipotesi di condizioni stazionare ed assenza di flussi termici dispersi

$$Q_c = Q_{ev} + L_C \quad (5.25)$$

Sostituendo i termini con le equazioni 5.10, 5.14,5.4 si ottiene

$$G_{R407c} \cdot (h_{BT17} - h_4) = G_{H_2O+g}^1 \cdot c_{H_2O+g}^1 \cdot (T_{BT10} - T_{BT11}) + G_{R407c} \cdot (h_{BT14} - h_{BT17}) \quad (5.26)$$

Che ulteriormente sottoposta ad elementari operazioni algebriche permette di valutare

la portata di fluido refrigerante noto il valore di portata di acqua e glicole nel circuito primario G_{1,H_2O+g} , mediamente pari a 0.128 kg/s (2019) oppure 0.257 kg/s (2020)

$$G_{R407c} = \frac{G_{H_2O+g}^1 \cdot c_{H_2O+g}^1 \cdot (T_{BT10} - T_{BT11})}{q_c - l_c} \quad (5.27)$$

Nota la portata di R407c è possibile stimare la potenza termica ceduta dal condensatore,

$$Q_c = G_{R407c} \cdot (h_{BT14} - h_{s,c.l.i}) \quad (5.28)$$

quella assorbita dall'evaporatore

$$Q_{ev} = G_{R407c} \cdot (h_{BT17} - h_4) \quad (5.29)$$

e la potenza tecnica assorbita dal compressore

$$L_C = G_{R407c} \cdot l_c \quad (5.30)$$

Infine l'equazione 5.9 consente di ricavare la portata di termovettore secondario come

$$G_{H_2O+g}^2 = \frac{Q_c}{c_{H_2O+g}^2 \cdot (T_{BT12} - T_{BT3})} \quad (5.31)$$

Tutte le grandezze calcolate sono forzate al valore zero in tutti gli istanti in cui l'impianto non è in funzione e non vengono stimate qualora il presunto stato del fluido frigorigeno sia bifase. Il fatto che in alcuni istanti l'R407c presumibilmente assuma uno stato bifase è un limite che deriva dall'ipotesi che le trasformazioni negli scambiatori siano isobare perché esenti da cadute di pressione. Probabilmente la caduta di pressione nell'evaporatore è tale da garantire che l'R407c alla temperatura T_{BT12} e pressione $p_{lp} - \Delta p$ sia in condizioni di vapore saturo secco anche quando l'algoritmo non lo considera tale.

5.6 Discussione dei risultati

L'operatività del sistema verrà descritta con riferimento al periodo di riscaldamento compreso tra 23/10/19 ed il 31/10/19, analoghe considerazioni valgono per l'altro periodo di riscaldamento sebbene sia caratterizzato da valori differenti. Il compressore è gestito da una logica di controllo tradizionale di tipo reattivo a loop chiuso

in cui la variabile di controllo è rappresentata dalla frequenza di alimentazione del compressore modificabile con inverter mentre la variabile controllata è la temperatura di mandata del circuito secondario T_{BT12} . Il cambiamento effettivo di quest'ultima viene stimato attraverso i gradi minuto ovvero la cumulata dello scostamento tra la temperatura di mandata effettiva T_{BT12} (In realtà i gradi minuto sono valutati rispetto alla temperatura misurata dal sensore BT25 posto esternamente alla macchina sul tubo di mandata verso l'utenza. Per semplicità ci si riferisce alle misure praticamente identiche rilevate da BT12 a meno delle dispersioni termiche) e quella richiesta di setpoint il cui valore decreta un'azione di controllo sul compressore per mezzo della variazione di frequenza di alimentazione.

$$DM = \sum_{i=1}^N (T_{BT12} - T_{BT12,setpoint}) \cdot t_i \quad (5.32)$$

Quando la temperatura T_{BT12} è inferiore al setpoint i gradi minuto scendono fino a diventare negativi, quando assumono il valore limite inferiore pari a -60 °Cmin (Fig. 5.3) il compressore si avvia aumentando la temperatura del frigorifero e dell'acqua di mandata del circuito d'utenza oltre il valore di setpoint (Fig. 5.4). Pertanto i gradi minuto aumentano fino a raggiungere il limite superiore di -10 °Cmin in cui il compressore si disattiva nuovamente e la temperatura di mandata decresce. È interessante osservare come per ovviare ai fenomeni di instabilità del loop chiuso e ridurre lo scostamento tra il differenziale di controllo e quello operativo riferiti ai gradi minuto l'accensione e lo spegnimento del compressore avvengono in anticipo rispetto al verificarsi di $DM=-100$ °Cmin o $DM=+100$ °Cmin (Fig. 5.3), ciò evita che i ritardi nell'attuazione del controllo causino un'ampiezza di variazione dei DM maggiore rispetto a quella preventivata. I cicli di funzionamento della pompa di calore si estendono mediamente per 51 minuti ed il tempo di inattività tra cicli successivi è di 3 ore e 25 minuti sufficientemente elevato grazie al Puffer da 100l. Alla partenza della prova di riscaldamento corrisponde l'avviamento dei circolatori del circuito primario e secondario ad un regime costante pari al 100% anche nei periodi di inattività del compressore per consentire ai fluidi di scambiare potenza con i relativi termostati.

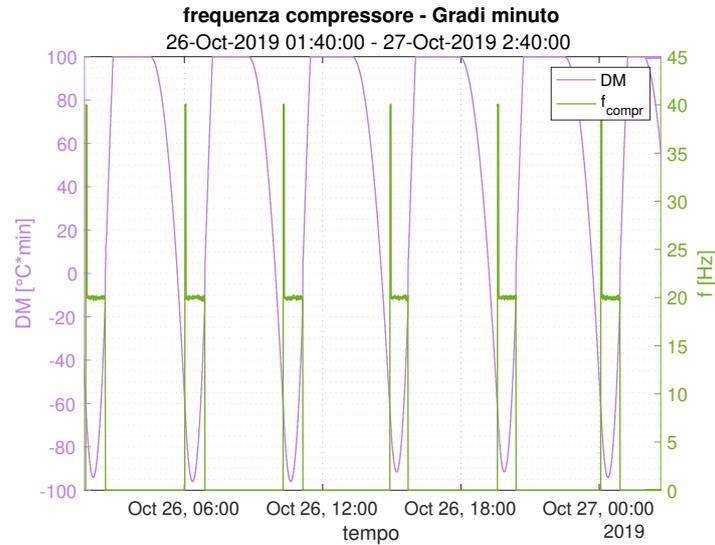


Figura 5.3 Andamento dei gradi minuto rispetto alla frequenza del compressore

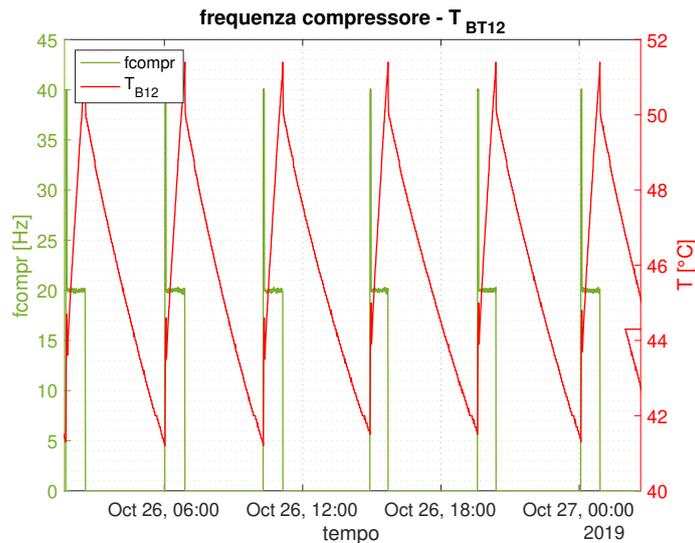


Figura 5.4 Andamento della temperatura di mandata rispetto alla frequenza del compressore

Con riferimento al singolo ciclo di funzionamento figura (Fig. 5.5) emerge che nell'istante che precede l'attivazione della pompa di calore le temperature del termovettore primario all'ingresso ed all'uscita di GeothermSkin sono circa uguali e costanti nel tempo perché prossime alla temperatura indisturbata del terreno (Fig. 5.7). Il compressore non è attivo pertanto anche le temperature dell'R407c ai suoi capi sono quasi equivalenti e tendono all'equilibrio dopo aver concluso il ciclo di lavoro precedente (Fig. 5.6). Analogamente le temperature di mandata e ritorno

del termovettore che alimenta l'utenza termica sono prossime e decrescenti a causa delle dispersioni termiche dovute al costante deflusso attraverso i tubi isolati e la batteria di scambio del ventilconvettore (Fig. 5.8). All'avviamento del compressore la temperatura del R407c in uscita aumenta rapidamente a causa della compressione reale mentre quella in ingresso subisce un subitaneo decremento all'evaporazione dell'R407c indotta dalla brusca riduzione di pressione imposta dalla valvola di laminazione (Fig.5.6). La temperatura del termovettore primario in arrivo da GeothermSkin si riduce rapidamente interagendo termicamente nell'evaporatore con l'R407c la cui temperatura si stabilizza a quella costante di vaporizzazione consentendo al fluido primario di instaurare una differenza di temperatura di regime. Quest'ultimo attraversando GeothermSkin sottrae calore al terreno ed instaura una differenza di temperatura tra l'ingresso e l'uscita circa costante ma riferita a valori di temperature decrescenti in virtù della cessione di calore realizzata all'evaporatore. Il termovettore d'utenza in mandata si scalda progressivamente fino a $51.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ e subisce un salto termico di $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ attraversando il ventilconvettore. Concluso il ciclo di funzionamento prosegue lo scambio termico con i termostati e tutte le temperature si riducono tendendo progressivamente all'equilibrio.

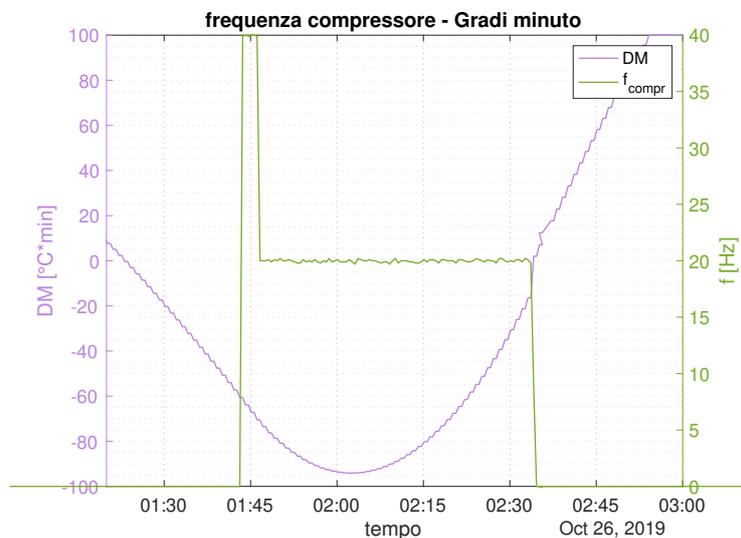


Figura 5.5 Dettaglio gradi minuto- frequenza compressore per un generico ciclo di funzionamento

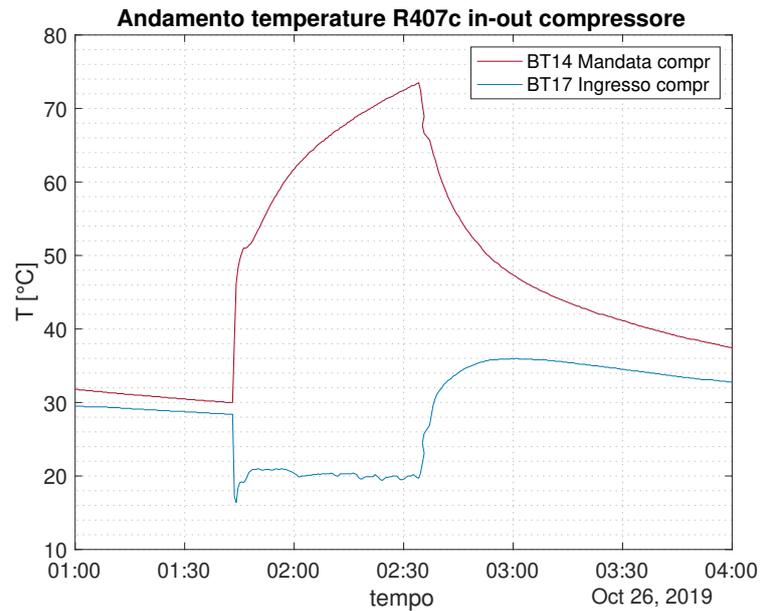


Figura 5.6 Profili di temperatura dell'R407c nelle sezioni d'ingresso ed uscita dal compressore

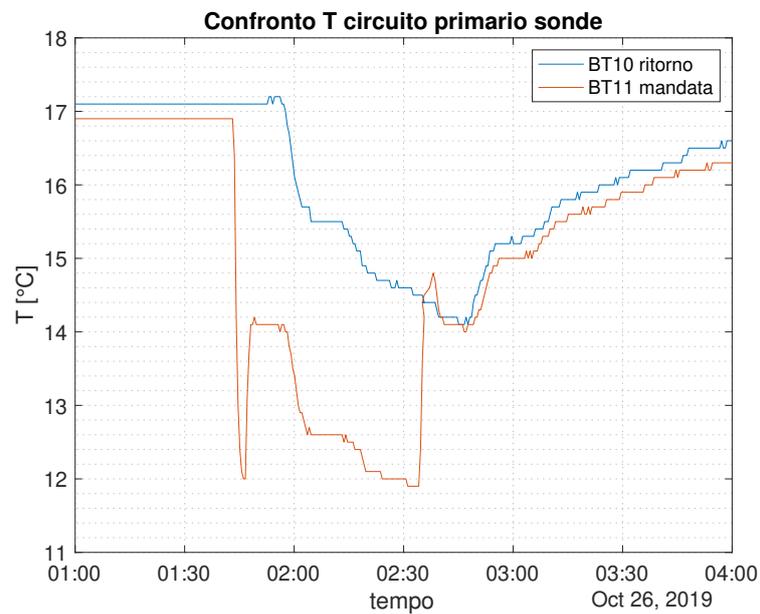


Figura 5.7 Profili di temperatura del termovettore primario nelle sezioni d'ingresso ed uscita da GeothermSkin

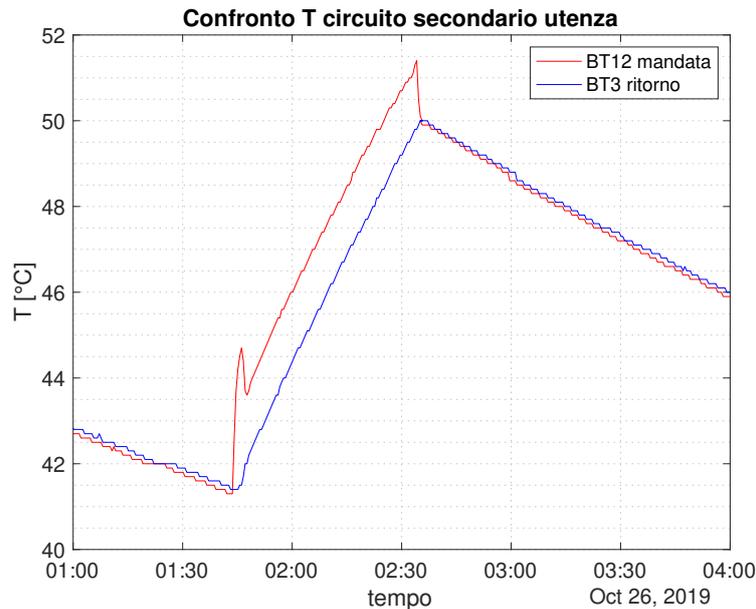


Figura 5.8 Profili di temperatura del termovettore primario nelle sezioni d'ingresso ed uscita dal ventilconvettore

La risoluzione del modello fisico matematico del sistema in esame permette di ottenere i profili nel tempo delle principali grandezze fisiche che consentono di caratterizzarne in maniera accurata in reale funzionamento, queste valutate anche su base media offrono un resoconto aggregato che facilita la comprensione e la comunicazione dei risultati. In particolare noti gli andamenti delle potenze termiche e meccaniche rispettivamente riferite agli scambiatori ed al compressore, i profili di portata sia del termovettore primario e secondario che del refrigerante è possibile valutare l'operatività dell'impianto in condizioni di regime e transitorie ed indagare l'influenza delle variabili climatiche sulle prestazioni.

5.6.1 Funzionamento a regime

Con riferimento ai profili di portata del singolo ciclo di funzionamento (Fig. 5.9) è possibile osservare che alla partenza del compressore la portata di R407c subisce un rapido incremento ed oscilla a causa della variabilità delle frequenze di alimentazione tra valori compresi tra 0.17 l/s e 0.27 l/s, la portata di acqua e glicole che alimenta il ventilconvettore dopo il picco iniziale pari a 0.35 l/s raggiunge un minimo pari 0.23 l/s e si stabilizza agli effettivi valori di regime, invece la portata di termovettore primario è assunta mediamente costante per ipotesi e pari a 0.128 l/s per il periodo

in esame. Le portate di acqua e glicole non si annullano con lo spegnimento del compressore perché i circolatori rimangono attivi ed assumono per ipotesi un valore medio costante che consenta la cessione della potenza termica con i relativi termostati anche a compressore spento. L'andamento instabile dei profili di potenza e portata è riconducibile alla variazione delle differenze di temperatura dei fluidi, pressioni e dei calori specifici che da essi dipendono. Osservando i profili di potenza (Fig. 5.10) emerge come in concomitanza del transitorio di avviamento del compressore le potenze termiche scambiate assumano valori di picco molto superiori alle potenze termiche scambiate a regime per poi stabilizzarsi e ridursi progressivamente nel tempo. In particolare la potenza termica fornita dall'evaporatore dopo aver raggiunto istantaneamente 2.5 kW tende a ridursi nel tempo passando da 1.5 kW a 1.3 kW mentre quella relativa al condensatore inizialmente supera i 2.8 kW per poi variare da 1.8 kW a 1.5 kW. Questo risultato è riconducibile all'elevata variazione delle differenze di temperatura tra fluidi termovettori che si verifica passando dall'equilibrio termico al transitorio di funzionamento in cui i fluidi instaurano l'interazione termica. La potenza tecnica assorbita dal compressore dopo il picco iniziale aumenta progressivamente fino a 0.35 kW per via dell'aumento della temperatura del frigorigeno causata dagli effetti dissipativi durante il processo di compressione reale.

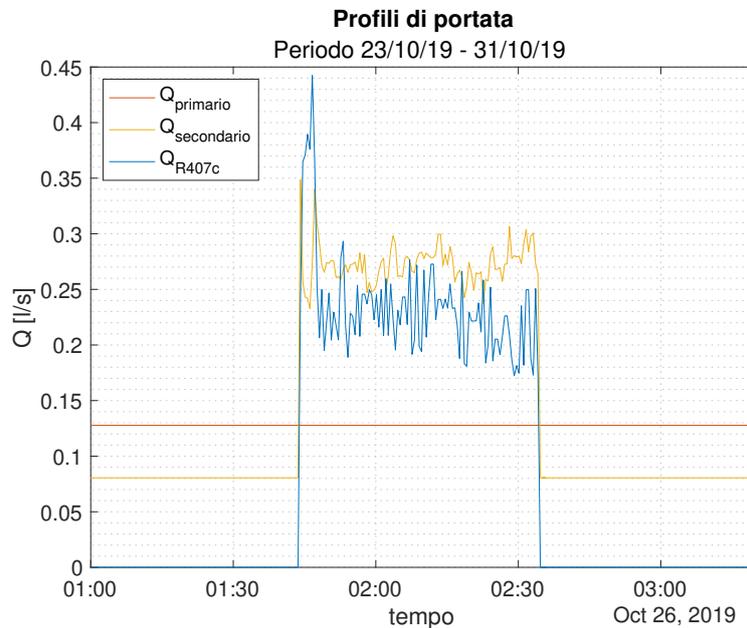


Figura 5.9 Andamento delle portate di acqua e glicole ed R407c

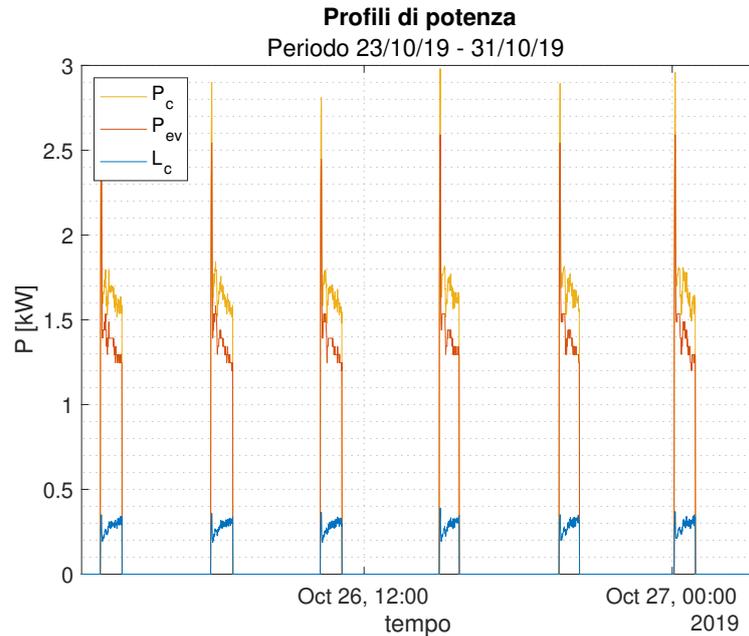


Figura 5.10 Profili di potenza scambiati

Le differenze di temperatura tra le sezioni di ingresso ed uscita dei diversi circuiti mostrate nella figura 5.11 confermano quanto sostenuto, infatti le miscele di acqua e glicole sperimentano un picco della differenza di temperatura negli istanti iniziali del funzionamento che diviene poi costante. Il termovettore primario mandato verso GeothermSkin riduce rapidamente la sua temperatura scambiando calore con l'R407c caratterizzato anch'esso da una temperatura istantaneamente inferiore e pari a quella di vaporizzazione, quindi la potenza termica fornita da GeothermSkin al fluido consente di stabilizzarne la differenza la temperatura. Il termovettore secondario subisce un immediato aumento della temperatura in mandata ravvisabile sul ritorno qualche attimo dopo, successivamente la differenza di temperatura assume un valore quasi costante. Sebbene la temperatura di evaporazione dell'R407c sia praticamente costante la differenza di temperatura dell'R407c ai capi del compressore aumenta progressivamente per via della crescente temperatura dell'R407c compresso affinché sia compatibile lo scambio termico con il termovettore secondario a temperatura progressivamente crescente (Fig. 5.8). Ciò implica un aumento dell'assorbimento della potenza tecnica assorbita dal compressore (Fig. 5.10) durante il funzionamento ed un trend crescente delle pressioni di condensazione dell'R407c (Fig. 5.12)

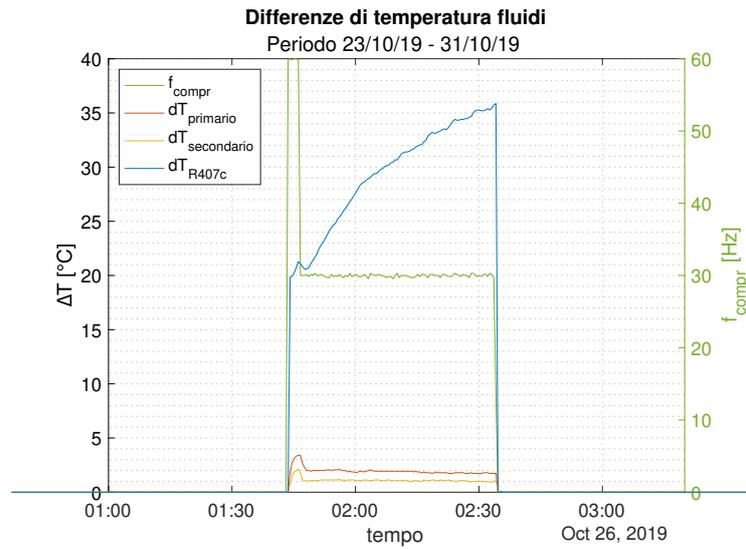


Figura 5.11 Differenze di temperatura tra le sezioni di ingresso ed uscita per ogni fluido

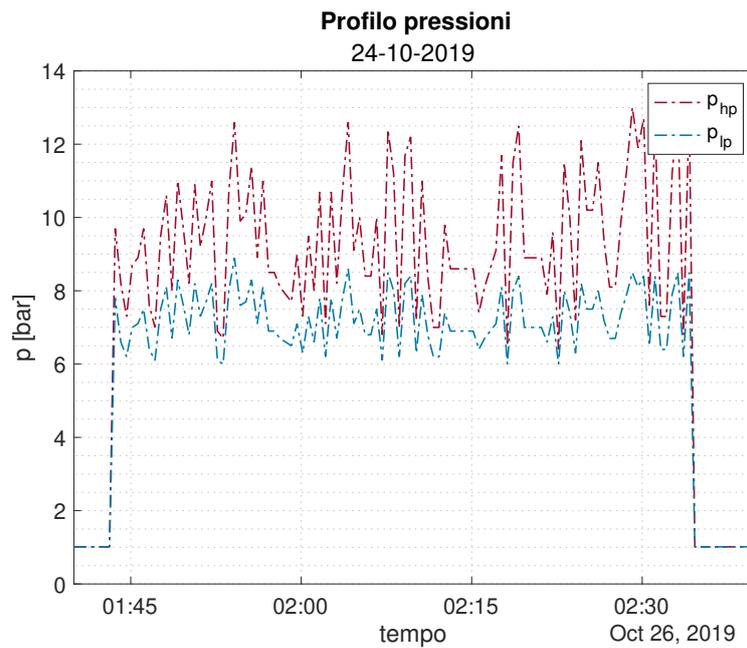


Figura 5.12 Dettaglio dei profili di pressione

I picchi di potenza che si verificano nei transitori di avviamento si riflettono sull'andamento del coefficiente di prestazione che alla partenza del compressore assume valori elevati e poi decresce fino a valori più coerenti e tipici degli impianti geotermici superficiali. Prolungando il tempo di funzionamento del singolo ciclo è

ragionevole supporre che l'andamento del COP si stabilizzi ad un valore prossimo a 5.

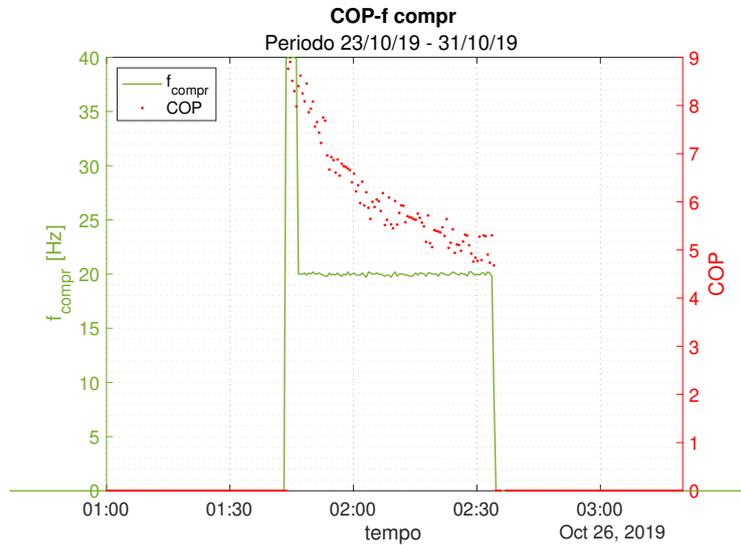


Figura 5.13 Andamento del COP nel tempo al variare della frequenza del compressore

E' interessante osservare come nel periodo considerato i valori assunti dal coefficiente di prestazione suggeriscano una scarsa dipendenza dalla temperatura esterna nonostante quest'ultima influisca sulla temperatura degli strati superficiali di terreno e sulla potenza termica estratta da GeothermSkin. Il terreno essendo caratterizzato da elevata inerzia termica se sottoposto per un periodo limitato a variazioni così frequenti e poco ampie di temperatura esterna riconducibili all'alternanza giorno-notte non subisce variazioni altrettanto rapide della sua temperatura la quale, valutata a 50 cm dal muro energetico ad una profondità di 50 cm, decresce durante il periodo di funzionamento come mostrato in figura 5.15. GeothermSkin è installato a profondità tale da beneficiare di maggior stabilità termica rispetto alla superficie pertanto il COP della pompa di calore risente in misura minore delle variazioni di temperatura esterna per orizzonti temporali brevi (Fig. 5.14) ma probabilmente alterazioni a livello stagionale anziché giornaliero sarebbero in grado di modificare il livello termico del sottosuolo ed influire in misura più marcata sulla prestazione. Ciò sarà più evidente nella sezione 5.6.3 in cui verrà condotto un confronto tra i risultati della stagioni di riscaldamento 2019 più mite e quella 2020 caratterizzate da temperature più rigide. L'andamento del COP sembra essere maggiormente correlato alla temperatura del terreno (Fig. 5.15) tuttavia le modalità di rappresentazione riportate non consentono di coglierne visivamente il legame a causa della variabilità

del COP indotta dalle dinamiche di funzionamento della pompa di calore descritte in precedenza.

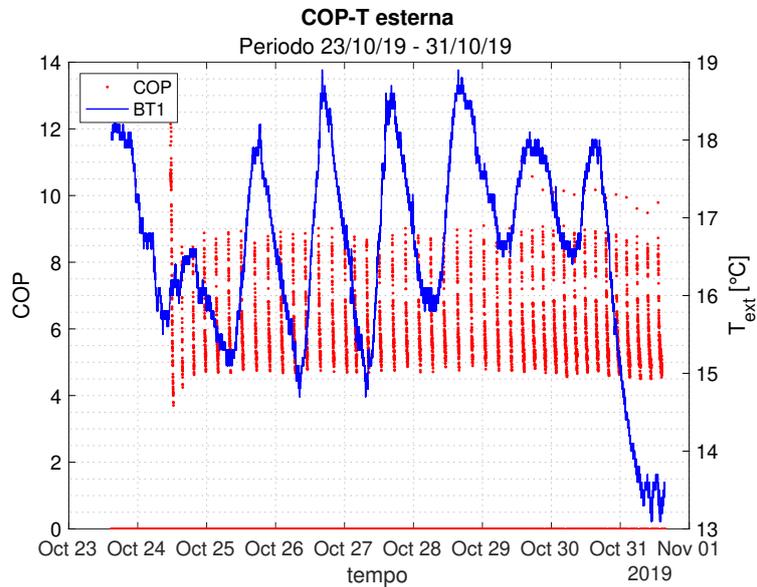


Figura 5.14 Andamento del COP rispetto alla temperatura esterna

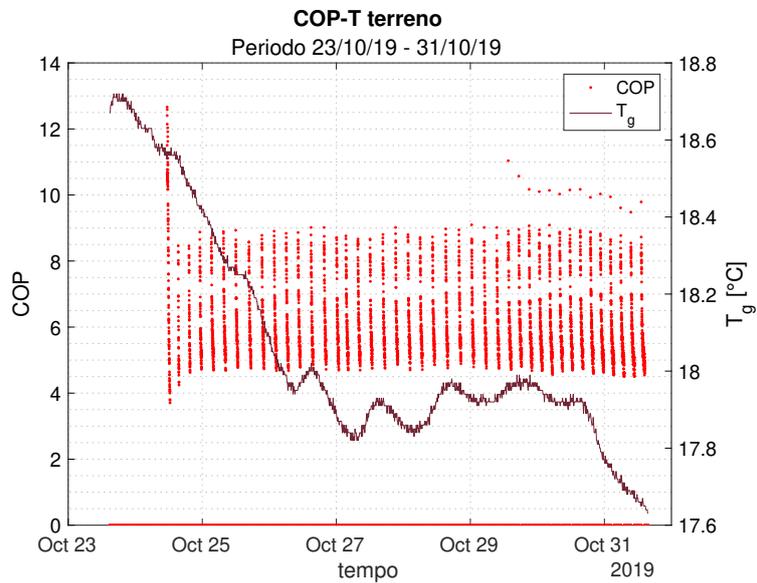


Figura 5.15 Andamento del COP rispetto alla temperatura media del terreno

Per comprendere meglio queste relazioni è opportuno valutare i risultati medi riferiti ad ogni ciclo di funzionamento perché consentono di visualizzare in maniera

aggregata le potenze termiche scambiate dal sistema al variare della temperatura ambientale e del terreno. In figura 5.16 è possibile osservare che la temperatura del terreno media riferita ad ogni ciclo di funzionamento assume globalmente un andamento che non asseconda fedelmente quello della temperatura esterna, tuttavia presenta variazioni locali in aumento che seppur contenute e smorzate replicano i picchi di quest'ultima. Osservando gli andamenti assunti dalle potenze termiche emerge che queste sono subordinate in maniera indiretta alla temperatura esterna e dipendono maggiormente da quella del terreno infatti, tralasciando momentaneamente i primi 10 cicli di funzionamento, la potenza termica estratta da GeothermSkin e disponibile all'evaporatore assume valori stabili pari a 1.4 kW e decresce nel tempo analogamente alla temperatura del terreno assecondando localmente le variazioni di quest'ultima con modesti aumenti di potenza termica estratta fino a 1.5 kW. E' ragionevole pensare che anche la potenza termica al condensatore (Fig. 5.17) che assume valori prossimi ad 1.7 kW sia soggetta alle condizioni climatiche sebbene in maniera meno diretta perché, pur essendo legata alla potenza estratta all'evaporatore, è il risultato dei processi di scambio termico avvenuti in condizioni termodinamiche differenti. Il coefficiente di prestazione COP in figura 5.18 presenta un andamento globalmente decrescente con punti di massimo e minimo locale contemporanei a quelli della temperatura del terreno e nel funzionamento a regime assume valori compresi tra 5.9 e 6.25. La figura 5.20 mostra come la riduzione di temperatura media del terreno sui diversi piani di misura avvenga con pendenze simili e nonostante le condizioni climatiche siano caratterizzate da elevati irraggiamenti solari e temperature medie esterne, pertanto è probabile che i profili di temperatura in figura 5.20 testimonino la manifestazione del fenomeno di deriva termica indotto dal funzionamento di GeothermSkin. Ciò si ripercuote sulla progressiva diminuzione delle potenze termiche scambiate e quindi del COP che tuttavia varia in misura contenuta dimostrando la stabilità delle prestazioni garantite dal sistema al variare delle forzanti climatiche.

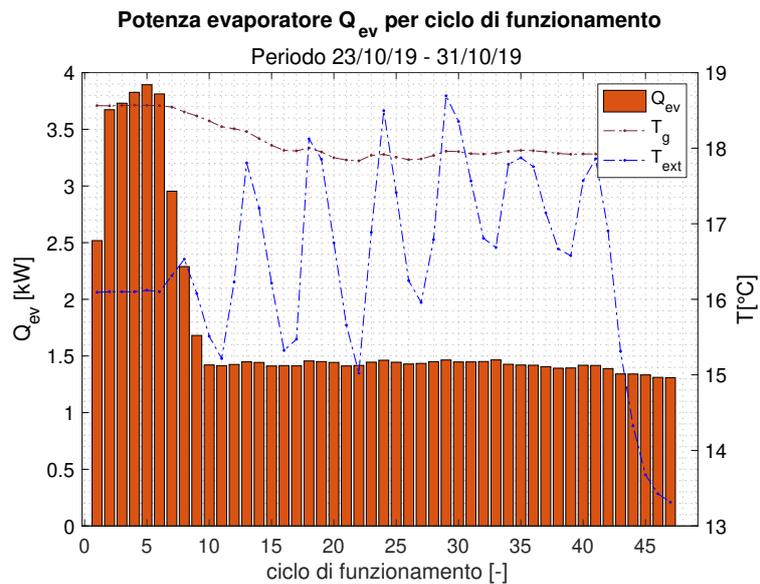


Figura 5.16 Potenza termica media scambiata all'evaporatore in ogni ciclo di funzionamento al variare delle forzanti esterne

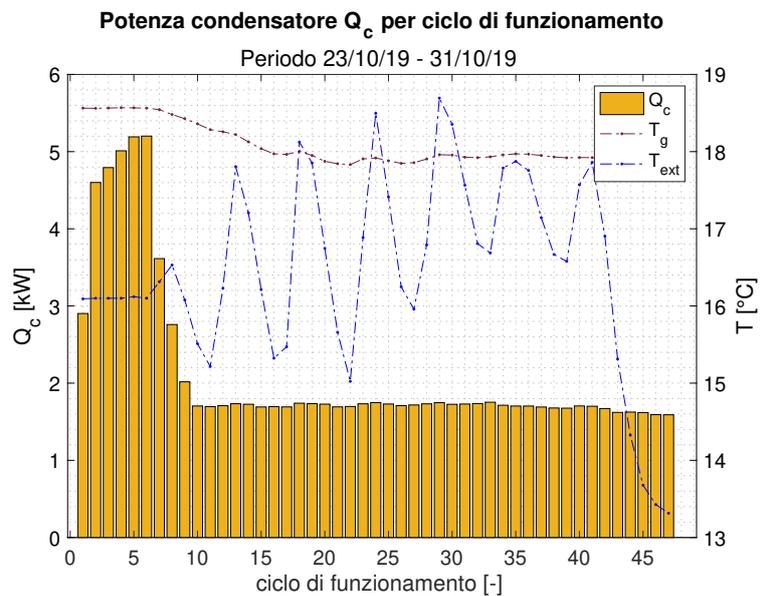


Figura 5.17 Potenza termica media scambiata al condensatore in ogni ciclo di funzionamento al variare delle forzanti esterne

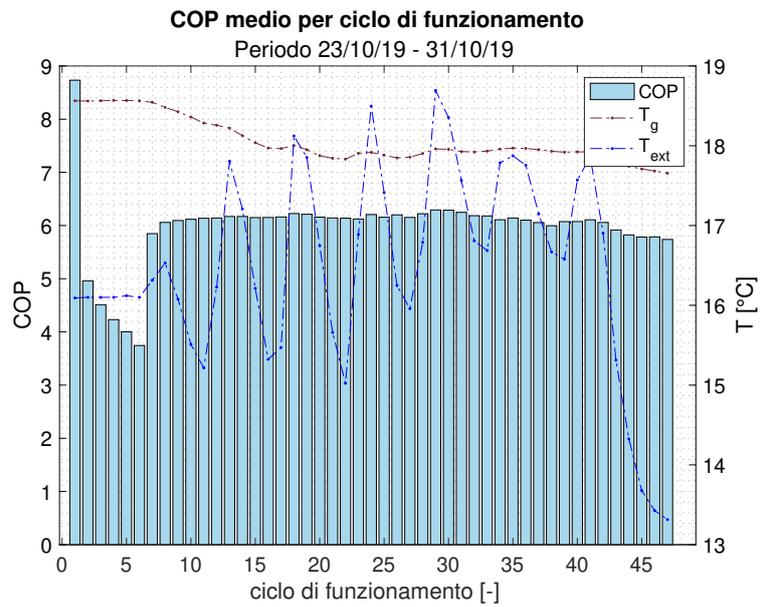


Figura 5.18 Coefficiente di prestazione medio in ogni ciclo di funzionamento al variare delle forzanti esterne

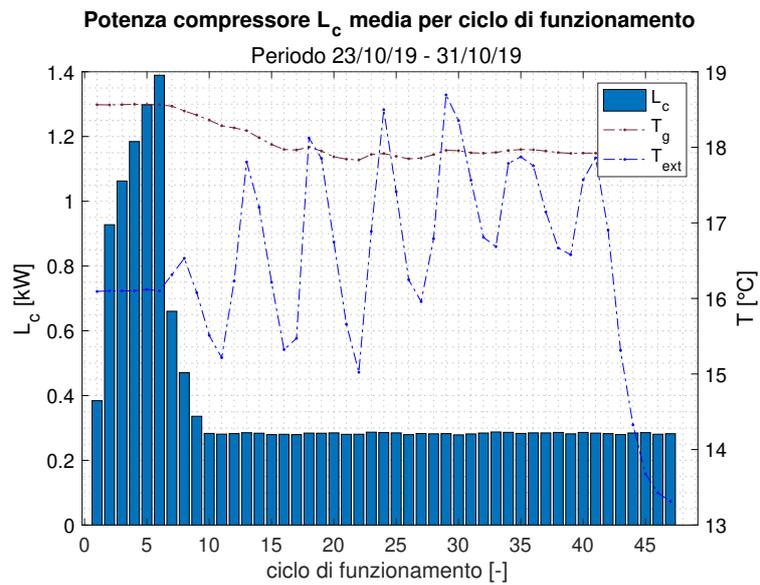


Figura 5.19 Potenza tecnica media assorbita dal compressore in ogni ciclo di funzionamento al variare delle forzanti esterne

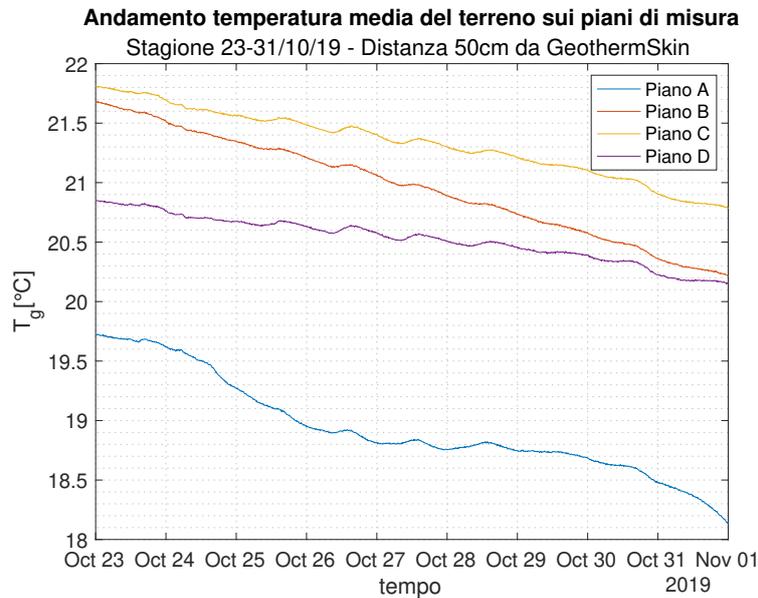


Figura 5.20 Profili di temperatura media del terreno per ogni piano di misura

Con riferimento ai risultati su base media giornaliera è possibile osservare che la potenza ceduta al termovettore secondario (Fig. 5.21) è compresa tra 1.6-1.73 kW che, ridotta delle inevitabili perdite termiche lungo i tubi, è completamente erogabile dal ventilconvettore a velocità di rotazione del ventilatore sia media che massima. Dopo il transitorio iniziale assume un andamento complessivamente decrescente simile a quello della temperatura del terreno media giornaliera attestandosi a valori medi di 1.7 kW con variazioni massime in aumento pari a +1.76% e -5.8% in riduzione. La potenza termica estratta da GeothermSkin e ceduta al termovettore primario (Fig. 5.22) varia tra 1.32 – 1.44 kW e si riduce a causa della riduzione della temperatura media degli strati di terreno vicini al muro energetico. Mediamente pari ad 1.41 kW presenta variazioni massime in aumento del +2.13% e in decremento pari a -6.38%. Il coefficiente di prestazione medio giornaliero (Fig. 5.23) subisce una progressiva diminuzione passando da 6.2 a 5.8 ed assume valori medi pari a 6.1 variabili tra +1.64% e - 4.92% ed in linea con quelli che caratterizzano i sistemi geotermici superficiali dimostrando una sufficiente stabilità al variare della temperatura del terreno. Infine la potenza tecnica media assorbita dal compressore (Fig. 5.24) è quasi invariata ed ammonta a 0.28 kW costituendo almeno il 50% dell'assorbimento elettrico nominale (assumendo un rendimento elettrico 0.9). Anche i risultati su base media giornaliera evidenziano come il terreno interponendosi tra il sistema e la forzante temperatura esterna ne smorza e sfasa gli effetti che si

concretizzano in una contenuta variazione di temperatura del terreno. Pertanto quest'ultima influisce in maniera più diretta sulle potenze termiche ed il coefficiente di prestazione rispetto alla temperatura esterna costituendo quindi la principale variabile influenzante.

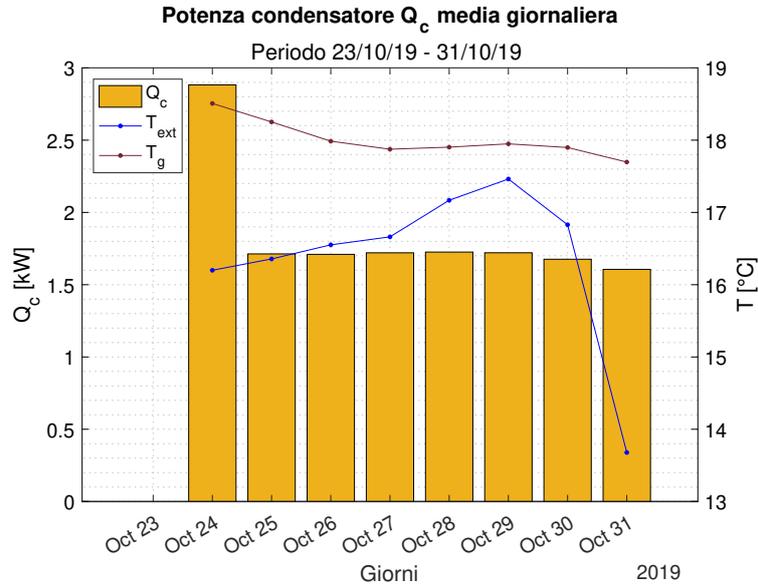


Figura 5.21 Potenza termica media giornaliera scambiata al condensatore al variare delle forzanti esterne

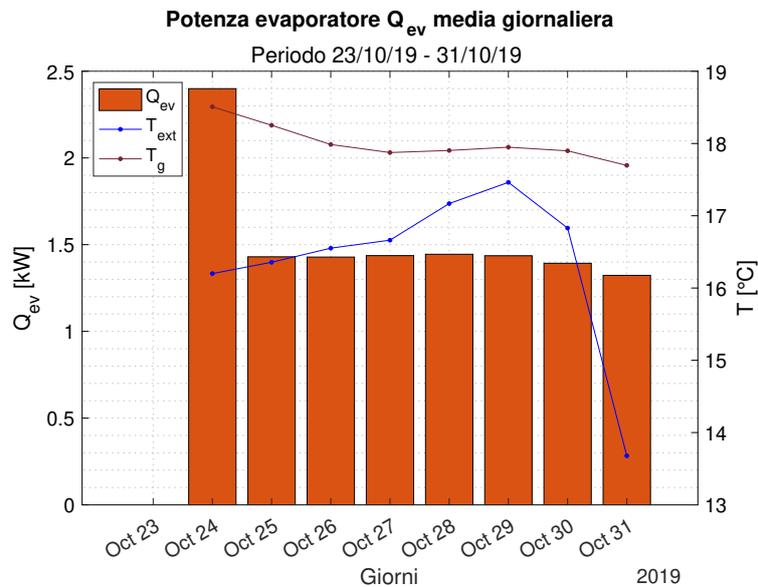


Figura 5.22 Potenza termica media giornaliera scambiata all'evaporatore al variare delle forzanti esterne

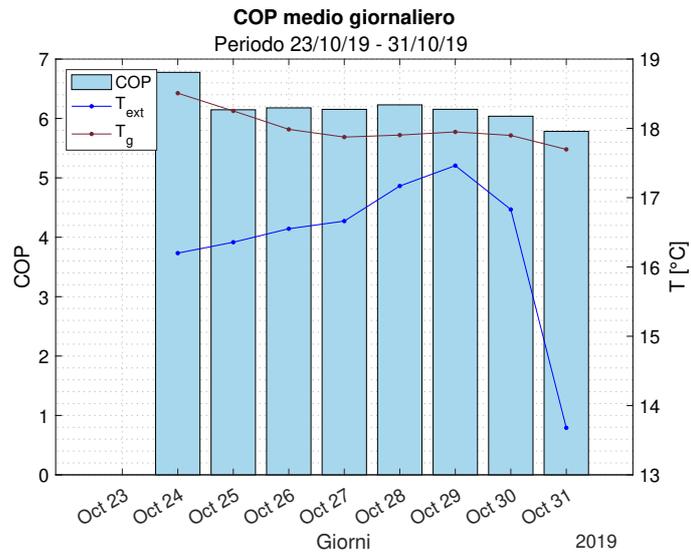


Figura 5.23 Coefficiente di prestazione medio giornaliero al variare delle forzanti esterne

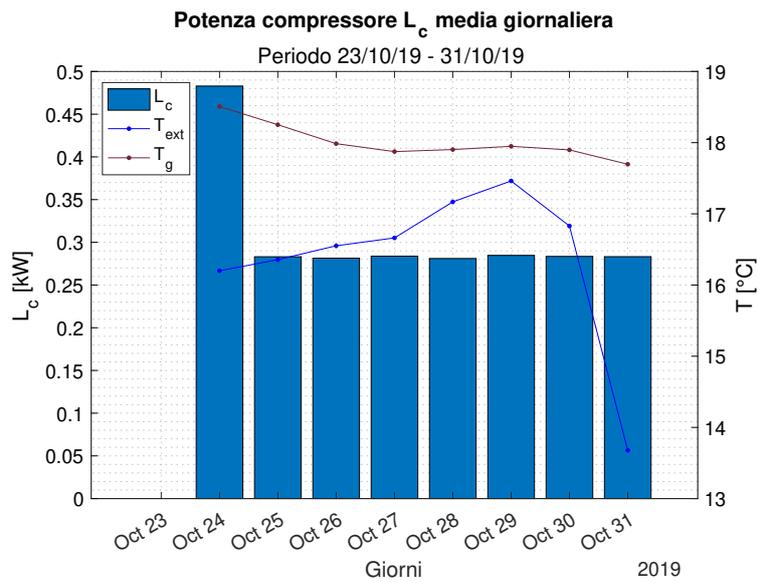


Figura 5.24 Potenza tecnica media giornaliera assorbita dal compressore al variare delle forzanti esterne

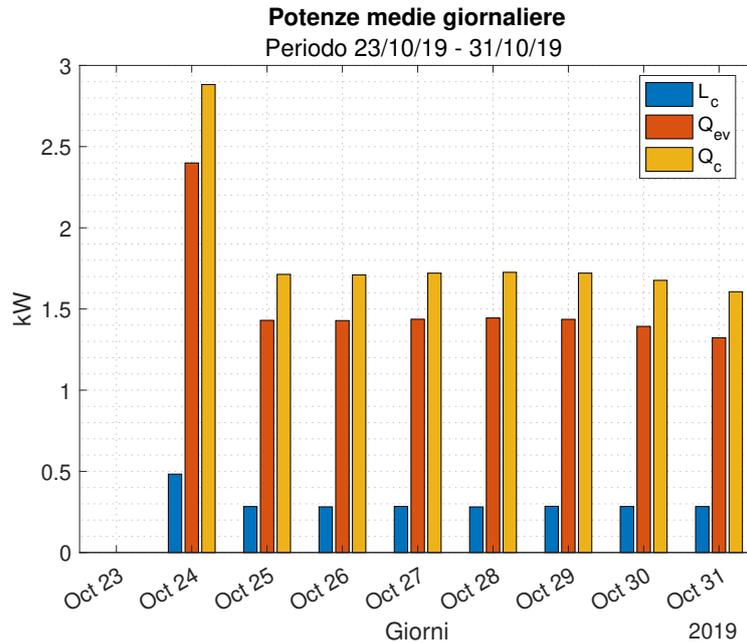


Figura 5.25 Potenze medie giornaliere a confronto

5.6.2 Transitorio di avviamento

Le considerazioni fin qui svolte risultano valide quando il sistema ha raggiunto condizioni di funzionamento stabili tuttavia i primi cicli di funzionamento realizzati a seguito dell'avviamento a freddo presentano valori di potenze termiche e tecniche anomale che si ripercuotono sul coefficiente di prestazione che risulta insolitamente aleatorio. Analizzando i risultati medi relativi al primo giorno (24/10) emerge un funzionamento anomalo caratterizzato da valori di potenza tecnica richiesta dal compressore e potenze termiche erogate al condensatore ed all'evaporatore che eccedono del 70% quelli che caratterizzano i giorni successivi (Fig. 5.25). Aumentando il grado di dettaglio è possibile osservare che le potenze termiche subiscono una crescita importante all'avviamento quindi si riducono progressivamente stabilizzandosi ai valori di regime, in dettaglio quella erogata al secondario supera i 4 kW per 5 cicli consecutivi (Fig. 5.17) in corrispondenza dei quali quella disponibile all'evaporatore supera i 3.5 kW (Fig. 5.16). Il COP invece si riduce fortemente a causa dell'elevata potenza tecnica assorbita dal compressore che presenta picchi superiori ad 1 kW. Il transitorio ed i suoi effetti sono limitati ai primi 10 cicli di funzionamento dopo i quali le dinamiche di funzionamento ed i parametri medi si stabilizzano, tuttavia per comprenderne meglio le cause è necessario osservare i profili delle grandezze di

funzionamento relative ai primi cicli successivi all'avviamento. Come si evince dalla figura 5.26 in corrispondenza del primo avviamento il valore dei gradi minuto è molto basso perché il fluido termovettore primario è in equilibrio termico con l'ambiente pertanto la differenza cumulata tra la sua temperatura e quella di set-point nei primi minuti è sempre negativa. Quindi il compressore viene alimentato dall'inverter con correnti sinusoidali con frequenze fino ad 80 hZ ed assorbe quindi una maggiore potenza tecnica (Fig. 5.24) che induce un rapido aumento della temperatura dell'R407c che assume valori di picco superiori rispetto a quelli raggiunti normalmente a regime (Fig. 5.29). I valori di pressione massima raggiunti ed il rapporto di compressione espresso sono tra i più alti del periodo di funzionamento (Fig. 5.27) in accordo con il cospicuo assorbimento di potenza tecnica. Infine gli ingenti valori delle potenze termiche sono imputabili alle maggiori differenze di temperatura che entrambi i fluidi termovettori assumono (Fig. 5.28) specialmente nel primo ciclo di funzionamento ed alla temperatura dell'acqua e glicole in mandata che risulta sensibilmente superiore al normale.

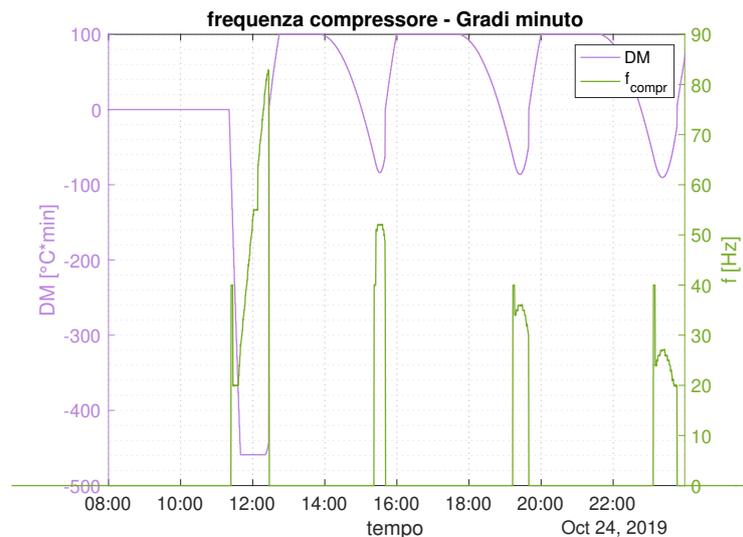


Figura 5.26 Andamento dei gradi minuto e della frequenza del compressore durante i primi avviamenti

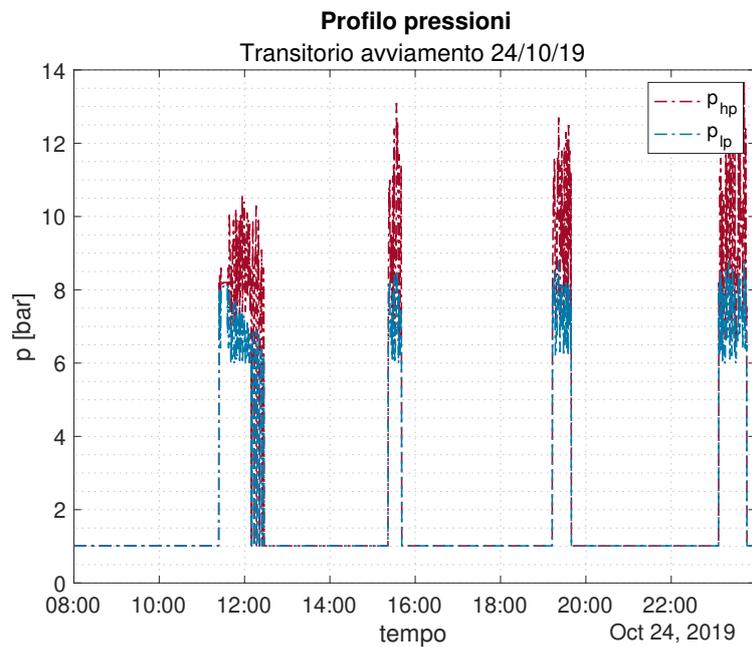


Figura 5.27 Profili di pressione dei primi avviamenti

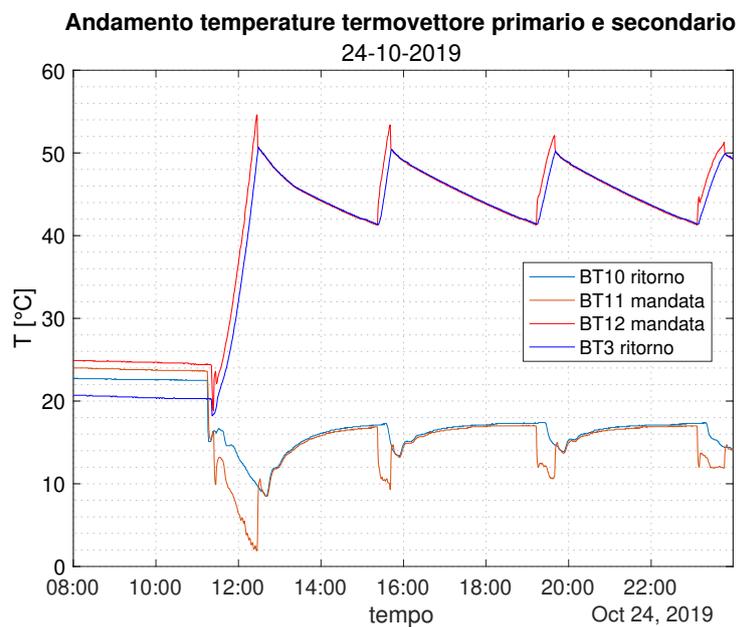


Figura 5.28 Profili di temperatura dei fluidi termovettori nei primi avviamenti

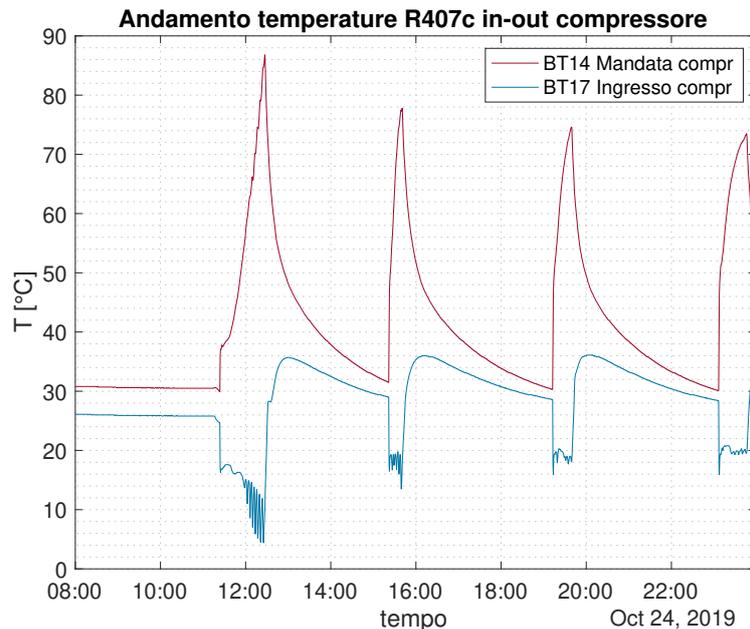


Figura 5.29 Profili di temperatura dell'R407c nei primi avviamenti

Dalle analisi condotte emerge che il sistema durante il funzionamento incorre in due tipologie di transitori: il transitorio d'avviamento 'a freddo' che si verifica solo all'inizio della prova di riscaldamento e quello d'avviamento 'a caldo' che ricorre invece ad ogni ciclo di funzionamento. Il primo induce valori di potenze termiche e tecniche elevate a tal punto da risultare inconsistenti, causa un abbattimento del coefficiente di prestazione e si esaurisce nell'arco dei primi 10 cicli. Il secondo invece ricorre ad ogni avviamento inducendo picchi di potenza contenuti rispetto al precedente ma comunque con valori superiori a quelli di regime e causando un locale aumento del coefficiente di prestazione. Il sistema in esame una volta raggiunte le condizioni di regime presenta un funzionamento stabile nel tempo ed è in grado di erogare al secondario potenza termica sufficiente a soddisfare l'utenza con coefficienti di prestazione elevati e scarsamente variabili in virtù della stabilità termica del terreno e della profondità di installazione di GeothermSkin. Il fenomeno di deriva termica indotto dal muro energetico sono tangibili e causano una riduzione della potenza termica disponibile all'evaporatore e del coefficiente di performance ma nel periodo di tempo considerato gli effetti non sono tali da inibire il corretto funzionamento del sistema o indurre efficienze di funzionamento troppo basse. Tuttavia non è da escludere che un funzionamento esteso all'intera stagione di riscaldamento induca una riduzione della temperatura del terreno tale da rendere

insufficiente la potenza termica estratta da GeothermSkin con conseguente blocco della pompa di calore.

5.6.3 Confronto dei risultati tra stagione di riscaldamento 2019 e 2020

L'attività di analisi svolta per la stagione di riscaldamento 2019 è stata replicata con i dati relativi al 2020 con l'obiettivo di comprendere se le variazioni di temperatura esterna a livello stagionale siano in grado di alterare le potenze scambiate e l'efficienza di funzionamento. Anche la prova di riscaldamento condotta a Febbraio manifesta gli effetti del transitorio di avviamento a freddo che si concretizzano nuovamente in coefficienti di performance e potenze sensibilmente superiori rispetto al funzionamento a regime. Durante questa prova la temperatura ambientale media giornaliera inizialmente pari a 9.2 °C decresce fino a 7.2°C assumendo quindi valori decisamente inferiori rispetto al mese di Ottobre in cui oscilla al più tra 13.6 °C e 17.4 °C. Le temperature del terreno assumono valori decrescenti prossimi a quelli della temperatura esterna del periodo corrispondente ma meno variabili. Dal confronto tra i risultati di Ottobre e Febbraio è evidente che la riduzione della temperatura esterna a livello stagionale provoca un decremento della potenza termica estratta dal terreno (Fig. 5.31) che ammonta a circa 1 kW ed una conseguente riduzione della potenza disponibile all'utenza termica che è scesa a 1.35 kW (Fig. 5.30). La potenza tecnica richiesta dal compressore (Fig. 5.33) è anch'essa inferiore e pari a 0.24 kW. Tuttavia il decremento della potenza al condensatore è superiore rispetto a quello della potenza assorbita pertanto anche il coefficiente di prestazione si riduce passando da una media di 6.1 ad Ottobre ad una di 5.2 Febbraio (Fig. 5.32). La figura 5.34 sintetizza graficamente gli andamenti evidenziando che le riduzioni di temperatura ambientale e quindi del terreno a livello stagionale influiscono negativamente sulla disponibilità di potenza termica e sul coefficiente di prestazione del sistema. La riduzione del COP trova spiegazione nei fondamenti teorici alla base del ciclo di Carnot inverso secondo i quali a fronte di un aumento della differenza di temperatura tra i termostati della pompa di calore è inevitabile una riduzione del coefficiente di performance.

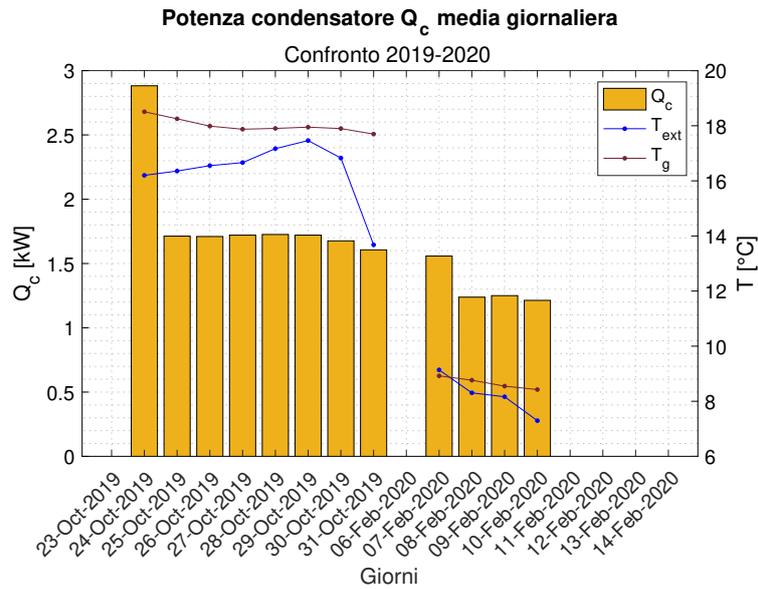


Figura 5.30 Potenza termica media giornaliera scambiata al condensatore al variare delle forzanti esterne

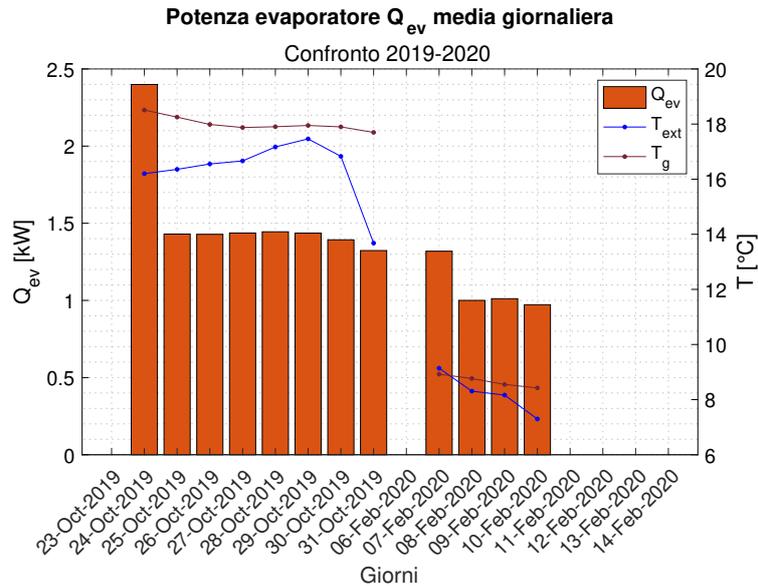


Figura 5.31 Potenza termica media giornaliera scambiata all'evaporatore al variare delle forzanti esterne

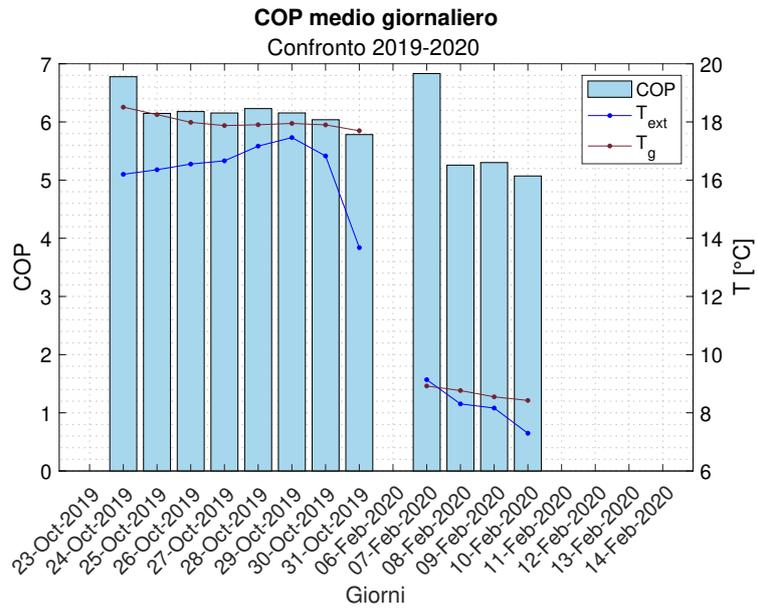


Figura 5.32 Coefficiente di prestazione medio giornaliero al variare delle forzanti esterne

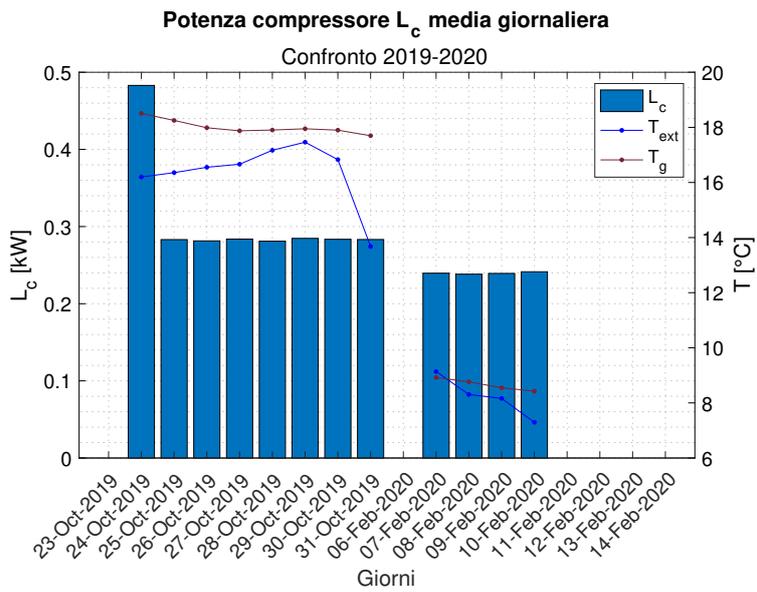


Figura 5.33 Potenza tecnica media giornaliera assorbita dal compressore al variare delle forzanti esterne

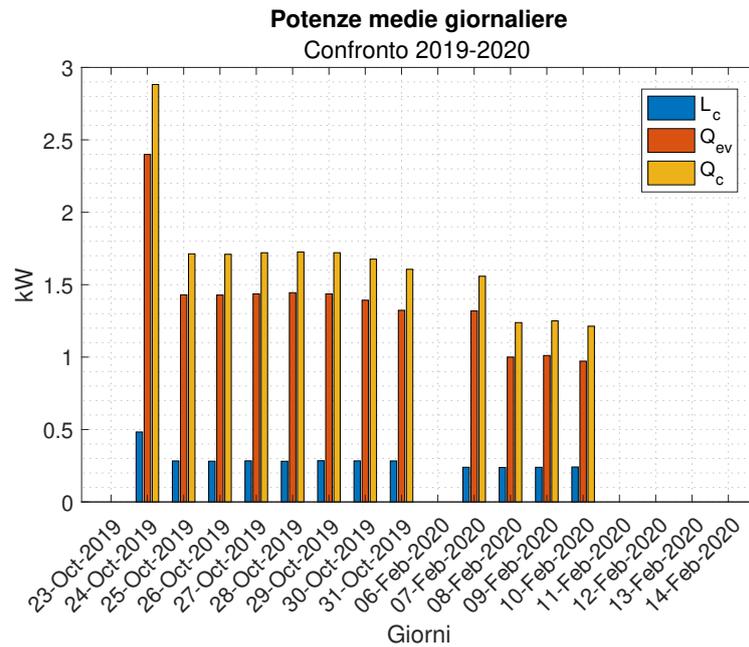


Figura 5.34 Potenze medie giornaliere a confronto

Con l'obiettivo di quantificare la reale efficienza di GeothermSkin in termini di potenza termica estraibile dal terreno per unità di area è stata valutata la resa termica specifica espressa come il rapporto tra la potenza termica all'evaporatore Q_{ev} e l'area complessiva di GeothermSkin pari a 34.5 m^2 .

$$Q_{ev,spec} = \frac{Q_{ev}}{A_{GeothermSkin}} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (5.33)$$

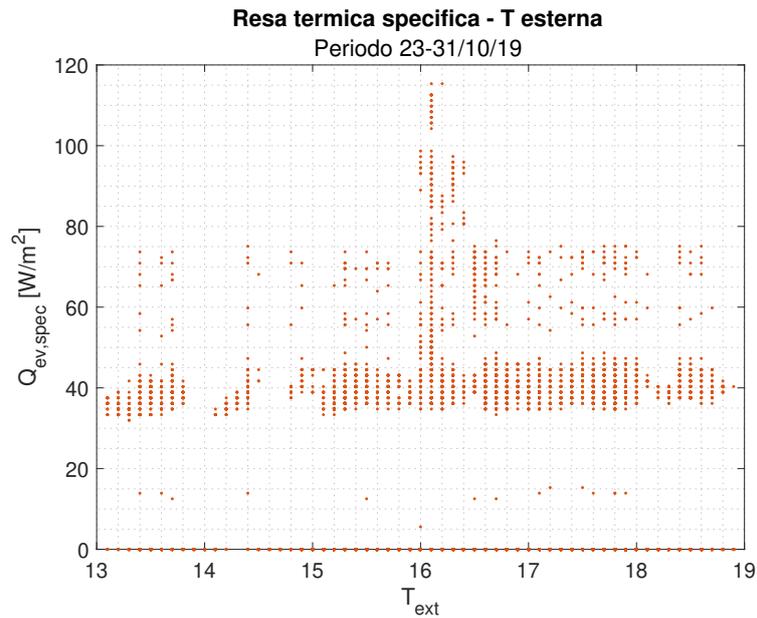


Figura 5.35 Resa termica di GeothermSkin periodo 2019

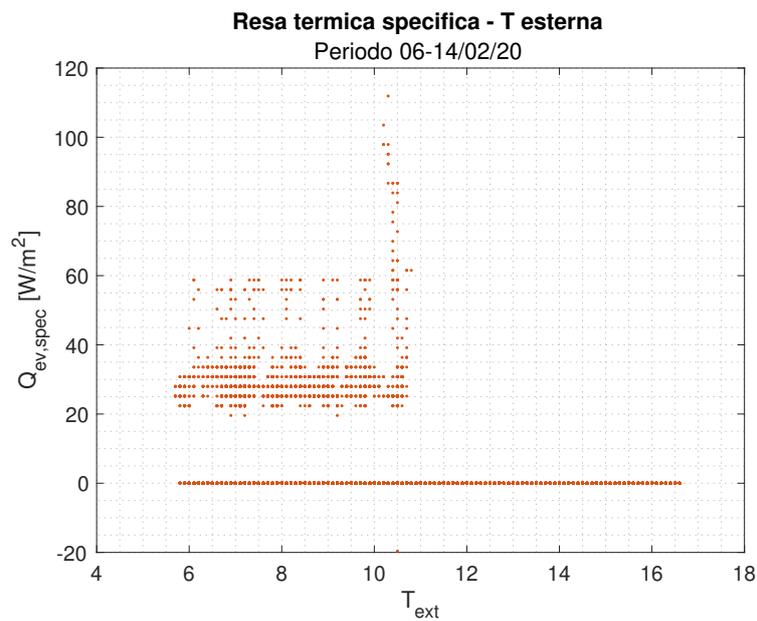


Figura 5.36 Resa termica di GeothermSkin periodo 2020

La resa termica nel periodo 23-31/10/19 in figura 5.35 assume un valore di picco pari a $115 W/m^2$ in corrispondenza del transitorio di avviamento a freddo ed una serie di ulteriori massimi locali superiori ad $70 W/m^2$ dovuti ai transitori di avviamento di ogni ciclo di funzionamento. I valori effettivi di potenza areica

sono quelli corrispondenti al funzionamento nominale e variano tra i 30 ed i 45 W/m^2 mentre quelli nulli sono relativi agli istanti in cui il compressore è spento. Osservando il periodo 06-14/02/20 in figura 5.36 la resa termica effettiva assume valori compresi tra 20 e 35 W/m^2 pertanto è inferiore rispetto al periodo precedente a causa delle temperature esterne più rigide del mese di Febbraio. In conclusione la variazione della temperatura esterna su orizzonti temporali estesi (in questo caso a livello stagionale) modifica il valore di potenza termica estratta da terreno e disponibile all'utenza evidenziando quindi una relazione inversa. Invece oscillazioni della temperatura esterna caratterizzate da elevata escursione e frequenze tipiche dell'alternanza giorno-notte o dell'evoluzione stocastica del clima non influenzano in maniera determinante le potenze termiche erogate, la resa specifica di GeothermSkin ed il COP della pompa di calore in virtù dell'inerzia termica del termostato costituito dal terreno che tende a calmierare l'entità delle forzanti garantendo al sistema in esame notevole stabilità di funzionamento. I risultati ottenuti e le considerazioni fin qui svolte rappresentano il punto di partenza per la seconda parte della tesi ovvero lo sviluppo di uno strumento in grado di agevolare il dimensionamento di massima di GeothermSkin.

Capitolo 6

Rete neurale artificiale per il dimensionamento di GeothermSkin

Il dimensionamento dei muri energetici necessita di accurate analisi termiche affinché le scelte tecniche operate in fase di progetto consentano alla geo-struttura di scambiare le potenze termiche preventivate con elevata efficienza e garantire il soddisfacimento del fabbisogno termico dell'edificio. Questi studi di fattibilità spesso sono lunghi ed onerosi e potrebbero indurre il potenziale committente ad abbandonare il progetto limitando la diffusione della tecnologia. In questo contesto sorge la necessità di sviluppare uno strumento in grado di fornire al progettista informazioni indicative riguardo il dimensionamento di massima del muro energetico con l'obiettivo di indirizzarne le scelte e comunicare efficacemente con il committente. Le grandezze fisiche relative al funzionamento del sistema geotermico e le contestuali variabili climatiche e del terreno monitorate dai diversi sistemi di sensori detengono informazioni riguardo il funzionamento del sistema in esame nelle reali condizioni operative, tenendo quindi conto degli effetti derivanti da fenomeni imprevedibili e non modellabili in maniera deterministica. Il volume di dati disponibili cela inoltre delle relazioni funzionali non lineari e sconosciute che possono essere caratterizzate attraverso processi di estrazione della conoscenza basati sull'analisi dati. Una particolare tecnica di analisi dati è il data mining ovvero l'insieme di tecniche e metodi che consentono l'estrazione di informazioni utili da grandi volumi di dati attraverso l'apprendimento automatico o machine learning. Il machine learning è una branca dell'intelligenza artificiale che utilizza metodi statistici e teorie della probabilità per migliorare le capacità di un algoritmo nell'identificare le relazioni causali tra

dati. Nonostante lo stretto legame con la statistica computazionale l'analisi dei dati può essere efficacemente impiegata in ambito scientifico per cogliere le relazioni causali tra i parametri fisici e modellare il fenomeno esaminato, tuttavia espone al rischio di rivelare relazioni causali inesistenti e produrre risultati tecnicamente inconsistenti. Per utilizzare efficacemente l'analisi dati in campo ingegneristico è necessario conoscere gli algoritmi di apprendimento ed i loro fondamenti matematici ma anche possedere competenza tecnica per poter interpretare e verificare la correttezza dei risultati ottenuti. Dai risultati dell'attività di analisi delle prestazioni condotta nel capitolo 5 emerge che in ogni istante di tempo la pompa di calore eroga una potenza termica al condensatore per riscaldare l'ambiente interno a cui corrispondono contestualmente particolari condizioni fisiche ambientali e del terreno. Le equazioni di bilancio sanciscono una comprovata relazione fisica tra il valore di potenza termica al condensatore e gli stati termodinamici dell'R407c variabili in relazione alla potenza cedutagli dall'evaporatore e derivata dal terreno mediante il muro energetico. Come analizzato in precedenza gli strati superficiali di terreno assumono una temperatura ed umidità relativa variabili a livello giornaliero in funzione alla temperatura ambientale esterna ed alla piovosità e ciò influisce sulla resa termica di GeothermSkin e ovviamente sulla temperatura di mandata del termovettore primario. Pertanto è ragionevole presumere che esista una relazione empirica tra la potenza termica ceduta all'utenza, le forzanti climatiche e lo stato termo-igrometrico del terreno che se estratta consentirebbe di stimare la potenza termica per il riscaldamento prodotta dalla pompa di calore geotermica per una generica combinazione di variabili influenzanti. A tal proposito è stato realizzato un modello computazionale del tipo rete neurale artificiale multilayer perceptron in grado di apprendere il nesso e generalizzarlo acquisendo capacità previsionale con un certo margine di errore per qualunque combinazione di variabili di input, purché comprese nei range di allenamento. Affinché l'algoritmo possa acquisire una funzione consistente e valevole in un'ampia gamma di condizioni gli verranno forniti i risultati delle analisi energetiche ripetute per tutte le prove di riscaldamento eseguite in passato che comprendono i valori contemporanei di temperatura dell'aria, temperatura ed umidità relativa del terreno, irraggiamento e potenza termica disponibile all'utenza per ogni istante di tempo. Somministrandogli le variabili di input, ovvero la temperatura dell'aria e del terreno, l'umidità relativa del terreno e l'irraggiamento medi annuali delle province italiane, è possibile ottenere una stima della potenza termica che questa pompa di calore equipaggiata con GeothermSkin sarebbe in grado di realizzare se installata

nel luogo selezionato. La rete neurale avendo acquisito capacità previsionale può rappresentare uno strumento utile al progettista per conoscere a priori la potenza termica disponibile in ogni località e valutare, noto il fabbisogno termico invernale dell'edificio, l'area di GeothermSkin necessaria a soddisfarlo. Occorre precisare che in entrambe le stagioni di riscaldamento tutti e tre i moduli di GeothermSkin erano attivi e collegati in parallelo quindi i risultati sono riferiti a questa configurazione.

6.1 Codici di calcolo e fonti dati

I dati a disposizione per la creazione del modello computazionale sono relativi alla stagione di riscaldamento compresa tra il 23/10/2019 ed il 31/10/2019 e quella condotta tra il 06/02/2020 ed il 14/02/2020 consistono nel profilo di potenza termica al condensatore risultante dall'analisi condotta nel capitolo 5, nelle temperature ed umidità relative del volume di terreno antistante GeothermSkin misurate a diverse profondità e distanze con l'infrastruttura di monitoraggio descritta nel capitolo 4 e la radiazione solare globale del luogo acquisita dalla centralina meteo presente in copertura dell'Energy Center. I profili delle forzanti esterne presentano frequenze di campionamento differenti ed inferiori rispetto a quella dei profili di potenza termica in entrambe le stagioni di riscaldamento. La conseguenza è che solo per alcuni valori di potenza è presente un contestuale valore delle forzanti esterne e ciò rappresenta un ostacolo all'allenamento della rete neurale. Per evitare di ridurre il volume di dati ai soli istanti in cui vi è compresenza di tutti i dati è stato realizzato un algoritmo in Matlab in grado di aumentare la frequenza di campionamento delle forzanti esterne eguagliandola a quella della potenza termica e garantirne la compatibilità. Nel dettaglio il codice importa i dati e trascrive tutti i valori riferiti al medesimo istante di tempo cioè ogni qualvolta sia verificata la corrispondenza tra data e ora delle differenti linee temporali mentre in caso di mancata corrispondenza viene lasciato il dato mancante colmato successivamente con interpolazione lineare. Il risultato è il database di allenamento della rete neurale. Il database dei dati regionali comprende per ogni provincia d'Italia la zonizzazione climatica ed il numero di gradi giorno estratti dal *DPR 412/93*, le temperature medie annuali desunte dalla norma *UNI 10349* ed i valori medi annuali della temperatura del terreno, dell'umidità relativa e di irraggiamento derivati dal database ERA5 -LAND con riferimento all'anno solare 2022. Con l'intento di stimare la potenza specifica media annua di

riscaldamento [W/m^2] per ogni località in funzione della zona climatica e range di gradi giorno sono stati assunti i valori limite dell'indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale prescritti dal *D.Lgs N.192, articolo 4, comma 2* espressi in kWh/m^2y e convertiti in potenze medie istantanee. Infine per programmare la rete neurale artificiale è stato realizzato un ulteriore codice in linguaggio R, sviluppato nell'ambiente di sviluppo RStudio utilizzando come riferimento i metodi ed i codici ideati dal Prof. Alfonso Capozzoli e dal laboratorio di ricerca BAEDA afferente al gruppo TEBE presso il Dipartimento di Energia del Politecnico di Torino. Nella tabella seguente un resoconto dell'origine dei dati e della loro frequenza di campionamento

Tabella 6.1 Origine dei dati

<i>Dato</i>	<i>Codice</i>	<i>Origine</i>	<i>Frequenza</i>
Profili potenza termica	Q_c	Risultati capitolo 5	1/1 minuto
Temperatura esterna	T_{ext} (BT1)	Sensori pdc	1/1 minuto
Temperature terreno	T_g	Termoresistenze PT-100 sistema Winet	1/15 minuti
Umidità relative	U_r	Igrometri sistema Winet	1/10 minuti
Radiazione globale	Irr	Centralina meteo	1/15 minuti

Il campo di temperatura del volume di terreno antistante GeothermSkin è tridimensionale (Fig. 4.11) perché monitorato da diverse termoresistenze disposte a distanza crescente lungo un asse longitudinale ed uno trasversale al muro energetico per ciascuno dei quattro piani di misura. Con l'obiettivo di ottenere un'unica temperatura del terreno che fosse rappresentativa dell'intero campo di temperatura a cui il muro energetico è sottoposto si è fatto riferimento ai valori misurati dalle termoresistenze di tutti i piani a profondità variabile. Così facendo è possibile considerare gli effetti indotti sulla potenza termica scambiata dalla variazione di temperatura degli strati più vicini al muro energetico, causati dalla reciproca interazione. Per ogni istante di tempo è stata calcolata una temperatura media per ogni piano di misura riferendosi alle termoresistenze in figura 4.11a-4.11d che rappresenti complessivamente il profilo medio in direzione orizzontale. Le temperature medie di ogni piano sono state ulteriormente mediate istante per istante ottenendo un unico profilo di temperatura medio globale rappresentativo dell'andamento di temperatura nel volume di terreno (Fig. 6.2a e Fig. 6.2b). Analogamente è stata calcolata l'umidità relativa del terreno facendo cioè una media nel tempo delle grandezze rilevate dagli

igrometri (Fig. 6.1a e Fig. 6.1b).

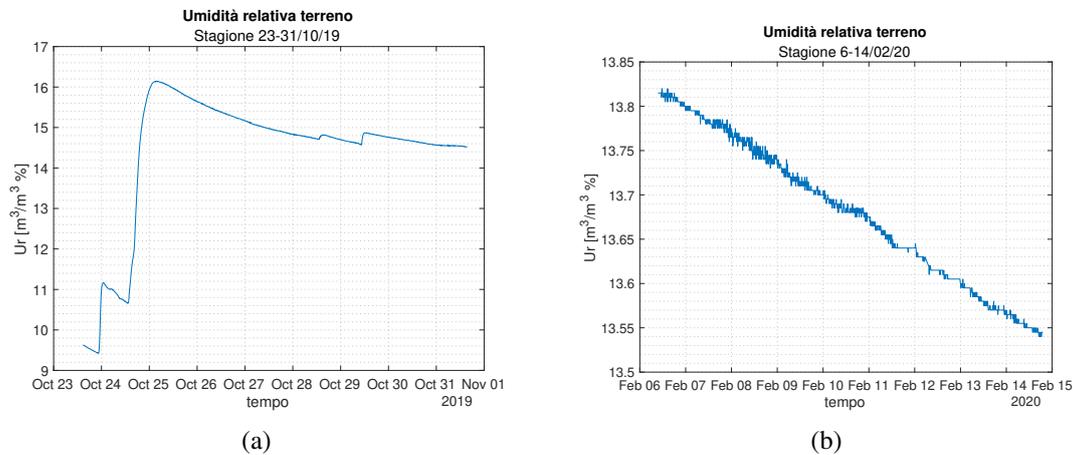


Figura 6.1 Umidità relativa media del terreno periodo 2019 (a) e 2020 (b)

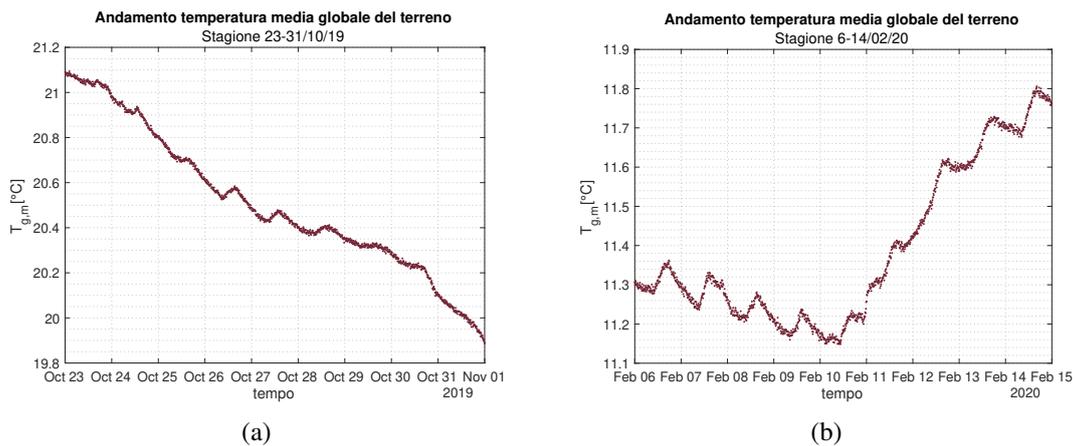


Figura 6.2 Temperatura media del terreno periodo 2019 (a) e 2020 (b)

6.2 Pre-processing

La struttura dati che la rete neurale utilizzerà per apprendere le relazioni che intercorrono tra le variabili climatiche e la potenza disponibile al condensatore è un database con struttura

Tabella 6.2 Struttura database

Input				Output
T_{ext}	T_g	Irr	U_r	Q_c

Le prime colonne contengono i dati di input ovvero le variabili indipendenti e l'ultima l'output cioè la variabile dipendente. Il database di allentamento rispecchia il funzionamento della pompa di calore in reali condizioni operative e presenta valori di potenza termica inconsistenti in corrispondenza dei transitori di avviamento della pompa di calore sia a caldo che a freddo, valori nulli in quelli di non funzionamento e valori mancanti delle variabili climatiche inseriti dall'algoritmo di modifica della frequenza di campionamento. Poiché l'accuratezza del modello sviluppato dipende dalla qualità dei dati usati per l'apprendimento occorre sottoporre il database di training ad un pre-processamento distinto in una prima fase di caratterizzazione del dato che consente di esplorare il database e prendere coscienza dei dati a disposizione e delle relazioni qualitative che li legano e la preparazione in cui eventuali dati mancanti o statisticamente inconsistenti vengono identificati e sostituiti con valori ricostruiti attraverso diverse tecniche.

6.2.1 Visualizzazione del dato

Osservando l'andamento della temperatura esterna e dell'irraggiamento globale orizzontale (GHI) per il periodo 23-31/10/19 e 06/14/02/20 è evidente che al verificarsi dei picchi di irraggiamento giornalieri corrispondono le massime temperature sfasate nel tempo di qualche ora. Il 24 e 25 Ottobre la copertura nuvolosa e gli eventi piovosi hanno determinato un irraggiamento ridotto (Fig. 6.3a) ed un ingente aumento dell'umidità relativa del terreno. Esauritasi l'instabilità climatica l'irraggiamento assume valori tipici del periodo e l'umidità del terreno decresce salvo risalire nei pressi del 30/10 a causa di limitati rovesci. A febbraio (Fig. 6.4b) l'assenza di precipitazioni determina la progressiva riduzione dell'umidità relativa del terreno e valori di irraggiamento elevati per il periodo inducono un aumento limitato della temperatura del terreno.

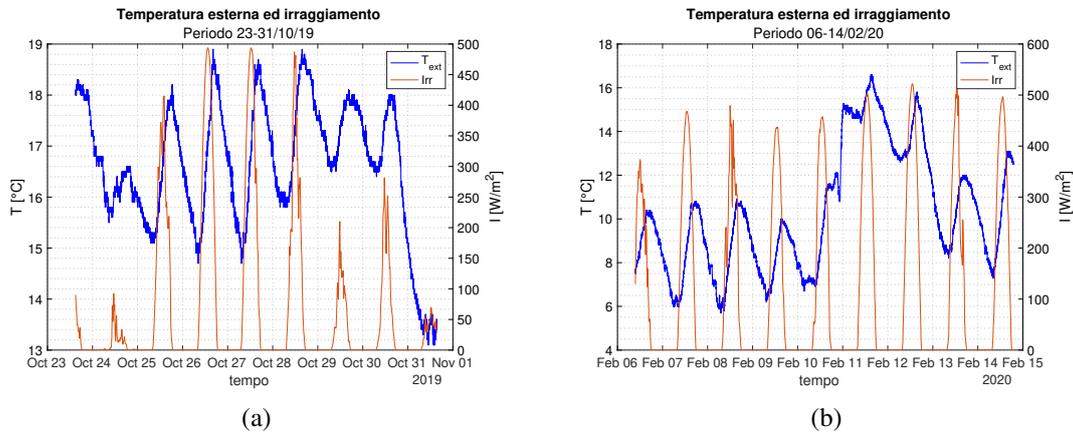


Figura 6.3 Temperatura ed irraggiamento periodo 2019 (a) e 2020 (b)

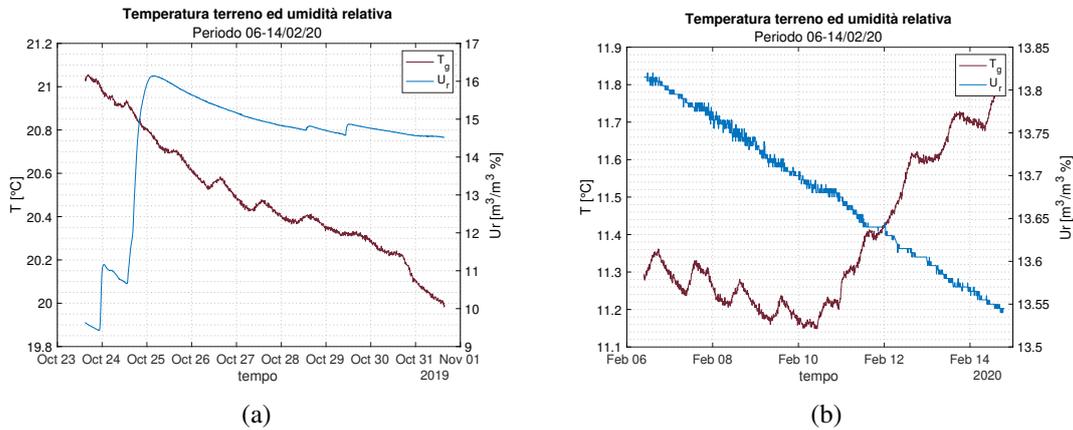


Figura 6.4 Temperatura del terreno ed umidità relativa periodo 2019 (a) e 2020 (b)

La potenza termica disponibile al condensatore è inferiore per le temperature esterne più rigide relative al mese di Febbraio invece assume valori superiori in Ottobre. Nuovamente sono visibili le potenze erogate nei transitori di avviamento a caldo e freddo e quelle nulle degli istanti di non funzionamento tuttavia quelle rappresentative sono le più frequenti che assumono i valori medi del funzionamento a regime descritto nel capitolo (Cap.5.6.1)

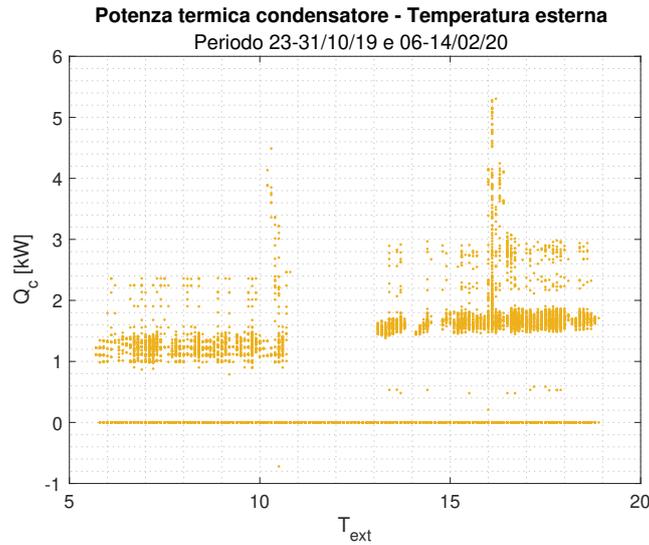


Figura 6.5 Potenza termica al variare della temperatura esterna

6.2.2 Data cleaning

In questa fase entrambi i database sono stati analizzati per identificare eventuali dati mancanti (missing values) derivanti da errori di misura o trasmissione causati dalla rete di monitoraggio oppure quelli volutamente inseriti durante il processo di modifica della frequenza di campionamento. L'identificazione è basata sul fatto che questi dati non assumono valore numerico finito e la ricostruzione è stata realizzata con una prima interpolazione lineare in cui tutti i valori identificati come mancanti o inconsistenti in entrambi i database analizzati sono stati sostituiti con il valore che deriva dall'interpolazione lineare tra la misura precedente $[x_0 ; y_0]$ e successiva $[x_1 ; y_1]$ all'outlier stesso. Pertanto l'interpolazione ha consentito di ricostruire il database in maniera coerente, senza snaturare il contenuto e modificarne l'andamento prevalente.

$$\frac{y - y_0}{y_1 - y_0} = \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} \quad (6.1)$$

Le potenze erogate al condensatore assumono ciclicamente valori nulli indipendentemente dalle variabili climatiche bensì a causa delle logiche di funzionamento, se non venissero rimossi i modelli apprenderebbero questa correlazione che comprometterebbe l'efficacia previsionale. Pertanto sono stati selezionati i soli istanti di funzionamento caratterizzati da potenze termiche diverse da zero e le variabili climatiche ad esse corrispondenti. Come analizzato in precedenza i valori di potenza

termica disponibili al condensatore durante i transitori di avviamento a caldo ed a freddo assumono valori statisticamente inconsistenti che seppur finiti deviano dalla distribuzione di dati, cosa che non si verifica per tutte le altre variabili climatiche. Con l'obiettivo di escludere dal processo di apprendimento i valori di potenza non realistici è stata condotta una ricerca degli outlier con riferimento alle potenze termiche erogate al condensatore. L'identificazione degli outlier statistici è condotta con il metodo della differenza interquartile che richiede di stimare i quartili della distribuzione di dati, ovvero quei valori che la dividono in quattro zone tutte caratterizzate dalla presenza del 25% dei dati. Il primo quartile Q_1 è il valore al di sotto del quale risiedono il 25% delle misure, il terzo quartile Q_3 è il valore sotto il quale risiedono il 75% delle misure. Calcolando il range di interquartile IQR è possibile definire il limite superiore e quello inferiore per cui tutti i dati con valore eccedente il limite superiore e sottostanti al limite inferiore sono considerati inconsistenti. K_{IQR} è un coefficiente che modifica la sensibilità del metodo nell'identificare gli outlier.

$$\text{Lower bound} = Q_1 - K_{IQR} \cdot IQR \quad (6.2)$$

$$\text{Upper bound} = Q_3 + K_{IQR} \cdot IQR \quad (6.3)$$

con $IQR = Q_3 - Q_1$ e $K = 1.5$

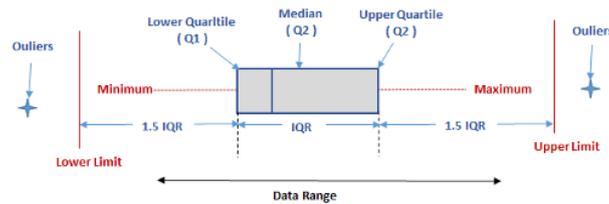


Figura 6.6 Metodo dell'inter-quartile (Dodos, 2021)

Questo metodo identifica come inconsistenti anche valori in realtà corretti ma semplicemente esterni ai limiti stabiliti pertanto solitamente la ricerca è condotta su sottoinsiemi di dati raggruppati secondo opportuni criteri come le variabili temporali (giorno della settimana, mese). In questo caso non c'è stato alcun raggruppamento perché il funzionamento del sistema, essendo sperimentale, è continuativo e non assoggettato a logiche dipendenti dalle variabili temporali (spegnimento nei week

end, avviamenti). La figura 6.7a mostra i dati identificati come inconsistenti e che sono stati rimossi ai fini del processo di apprendimento ottenendo la distribuzione rappresentata in figura 6.7b

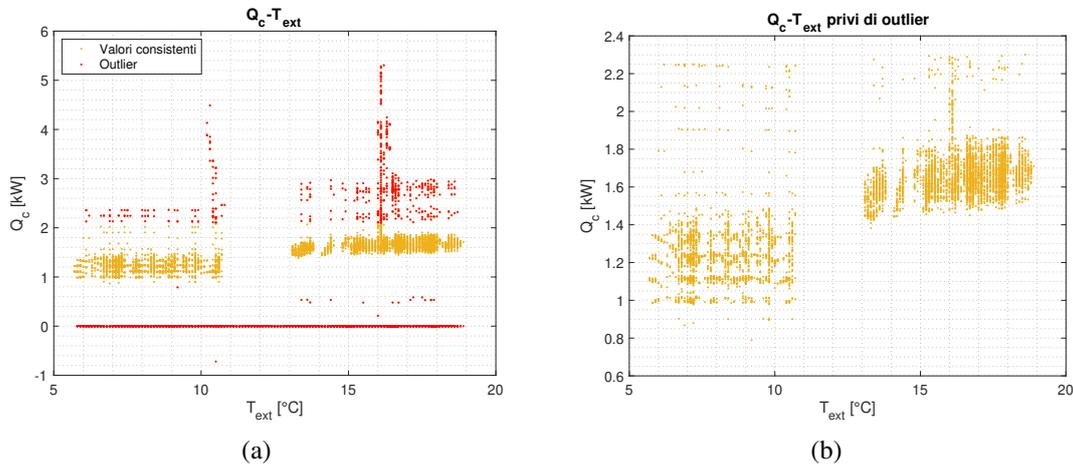


Figura 6.7 Potenze termiche escluse (a) e dati privi di outlier (b)

Il database risultante dalle attività di preparazione costituisce la base dati che la rete neurale utilizzerà per apprendere le relazioni che intercorrono tra le variabili climatiche e la potenza disponibile al condensatore tuttavia i dati, siccome quantificando grandezze fisiche variegiate, presentano valori assoluti molto diversi in grado indurre l'algoritmo ad attribuire diversa importanza alle variabili di input in relazione all'entità del loro valore assoluto fuorviando il processo di apprendimento. Con l'obiettivo di attribuire alle variabili un valore rappresentativo compreso tra zero ed uno le temperature esterne e del terreno sono state scalate rispetto al valore massimo e minimo (Eq. 6.4) garantendo che non assumano valori negativi invece l'umidità relativa, l'irraggiamento e la potenza termica rispetto al valore massimo (Eq. 6.5) dato che assumono valori certamente positivi. I dati scalati vengono quindi campionati causalmente ed il 70% confluisce nell'insieme di allenamento mentre il restante 30% in quello di prova rispettivamente adoperati per l'apprendimento della rete neurale e per valutare l'errore commesso applicando la conoscenza appresa con dati differenti.

$$y = \frac{y - \min(y)}{\max(y) - \min(y)} \quad (6.4)$$

$$y = \frac{y}{\max(y)} \quad (6.5)$$

6.3 Architettura della rete neurale ed iperparametri

La rete neurale multilayer perceptron è composta da 4 input layer, uno per ogni variabile di input e da 2 hidden layer ciascuno costituito da 64 neuroni che applicano una funzione di attivazione rectified linear unit (r.e.l.u) la cui formulazione assicura che la potenza predetta sia sempre positiva. Quest'ultima è l'unico valore richiesto in uscita pertanto l'output layer è costituito da un solo neurone. La scelta degli iper-parametri è ricaduta su una dimensione del batch pari a 64 per via dell'elevato numero di dati a disposizione nel training set, è stato verificato che applicare la riduzione del gradiente su sottoinsiemi di dimensioni ridotte causa un eccessivo aumento del costo computazionale ed una scarsa generalità della relazione che in fase di test conduceva a risultati inconsistenti. Il numero di epoche pari a 100 scongiura un'iterazione eccessiva del processo di analisi e la conseguente incapacità del modello di generalizzare le relazioni identificate tra le variabili (overfitting). E' stato osservato che un aumento delle epoche prolungava l'apprendimento senza ridurre ulteriormente il gradiente della funzione errore che diventava stabile già a valori inferiore mentre la riduzione massima tollerabile è di 90 epoche al di sotto delle quali il processo di ottimizzazione dei pesi si bloccava in un minimo locale della funzione errore. La scelta di un tasso di apprendimento costante è risultata inappropriata perché i valori testati impedivano sistematicamente la convergenza dell'algoritmo di back-propagation pertanto la scelta ottimizzata del passo è stata delegata alla rete neurale.

Tabella 6.3 Numero di neuroni ed iperparametri

Architettura			
	Numero layer	Neuroni per layer	Funzione attivazione
Input layer	1	4	-
Hidden Layer	2	64	Relu
Output layer	1	1	Relu
Iperparametri			
Batch	64		
Epoche	100		

All'inizio del processo di allenamento le variabili indipendenti (Temperature, umidità relativa ed irraggiamento) fornite ai neuroni dell'input layer vengono ponderate rispetto ai pesi e sommate ai bias (per il momento causali) che caratterizzano ogni connessione sinaptica con i neuroni del primo strato dell'hidden layer, pertanto tutti i neuroni di input forniranno un'attivazione diversa (output) verso tutti quelli degli strati nascosti ad essi collegati. Tutti i neuroni eseguono questo processo e propagano il segnale d'attivazione agli strati successivi finché questo giunge all'output layer. Il neurone appartenente a quest'ultimo confronta il valore (di potenza termica) predetto con quello realmente verificatosi e contenuto nel vettore degli output per l'allenamento stimando l'errore quadratico commesso. Con l'obiettivo di minimizzare l'errore commesso tra la predizione ed il valore reale occorre stabilire la sensibilità della funzione errore dai pesi e bias di ogni connessione sinaptica e modificarli affinché il decremento dell'errore sia il più efficiente possibile. A tal proposito è necessario calcolare il gradiente della funzione errore cioè un vettore avente come componenti le derivate parziali rispetto a tutti i pesi delle connessioni, ognuna delle quali racchiude la dipendenza dalle attivazioni in arrivo da tutti i collegamenti con i neuroni precedenti, per questo il processo prende il nome di algoritmo di backpropagation (retro-propagazione). Il segno della generica componente del gradiente indica se il peso della rispettiva connessione deve aumentare o ridursi mentre il valore assoluto quantifica l'influenza che la modifica di quel peso avrà sulla riduzione della funzione errore. Applicando l'algoritmo di discesa del gradiente i nuovi pesi attribuiti ad ogni connessione sono calcolati come quelli precedenti a cui si somma il prodotto tra gradiente negativo della funzione errore ed il tasso di apprendimento.

$$w^{k+1} = w^k - \eta \cdot \nabla E(w^k) \quad (6.6)$$

Quindi i pesi delle connessioni sinaptiche vengono modificati e ciò intuitivamente corrisponde a fortificare le connessioni che forniscono output vicini a quelli desiderati ed indebolire quelle che inducono l'errore modificandone di conseguenza l'attivazione. Il processo di apprendimento viene ripetuto fin quando $\nabla E(w^k)$ assume valori prossimi a zero ovvero è stato identificato un minimo locale della funzione errore e la variazione dei pesi tra iterazioni successive è trascurabile. Per ridurre il tempo computazionale quanto descritto non viene condotto sulla totalità dei dati ma su sottoinsiemi (batch) campionati casualmente che conducono ad una buona approssimazione dei risultati e l'intero processo viene ripetuto un numero di volte pari alle epoche.

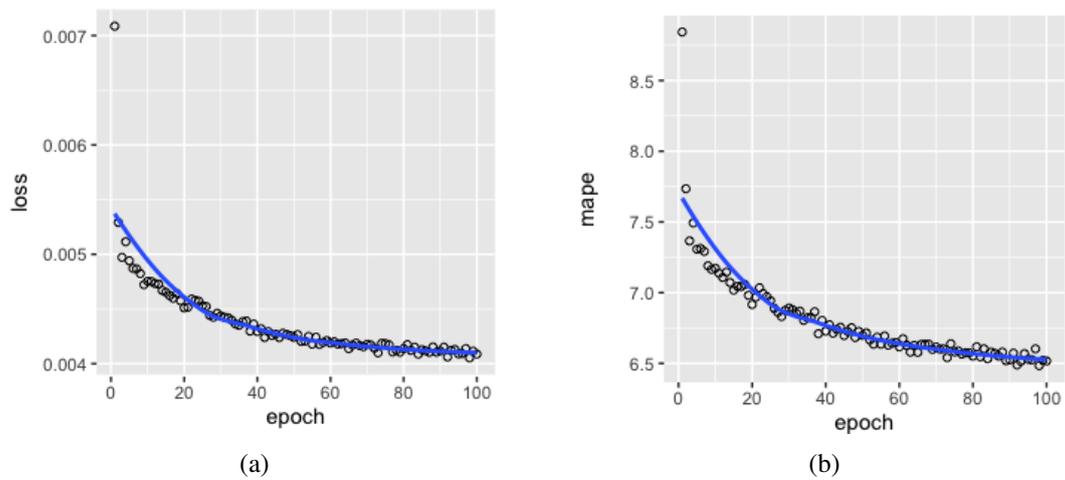


Figura 6.8 Evoluzione dell'errore quadratico (a) e del errore medio assoluto percentuale (b) nel processo di allenamento

Tabella 6.4 Metriche d'errore in allenamento

MAE [kW]	MAPE [%]	MSE	RMSE [kW]	ACC [%]	R^2
0.041	6.5	0.004	0.064	93.5	0.68

Il coefficiente di determinazione R^2 indica che le variabili indipendenti del modello riescono a spiegare il 68% della varianza delle potenze attorno al valor medio risultando significative nella rappresentazione delle potenze termiche erogate che tuttavia subiscono l'influenza di altre forzanti non identificate. L'errore assoluto commesso in media sulle predizioni (MAE) è pari a 41 W, accettabile se confrontato con i valori di potenza predetti mentre l'errore relativo mediamente commesso dal modello su tutte le predizioni ammonta al 6.5%. La varianza (MSE), ovvero la media dei quadrati degli scarti, consente di stimare la deviazione standard (RMSE) che quantifica l'incertezza associata ad ogni predizione e risulta accettabile se confrontata con le potenze caratteristiche del sistema. In conclusione la rete neurale realizza un'accuratezza del 93.5% nel prevedere le potenze disponibili all'utenza termica quindi ha appreso correttamente la relazione funzionale incognita. Per verificare che quest'ultima sia generalizzabile la rete neurale ha eseguito un test in cui ha predetto la potenza termica con riferimento a variabili climatiche mai viste prima e contenute nel database di test. Il confronto tra le predizioni e le reali potenze termiche verificatesi in corrispondenza delle stesse variabili climatiche conducono alla stima delle seguenti metriche

Tabella 6.5 Metriche d'errore in test

MAE [kW]	MAPE [%]	MSE	RMSE [kW]	ACC [%]	R^2
0.043	7	0.0043	0.066	93	0.65

Si osserva un generale e fisiologico aumento degli errori commessi operando con nuove variabili climatiche, l'errore medio assoluto commesso sulle predizioni (MAE) è salito a 43 W ma è ancora accettabile così come l'errore relativo mediamente commesso dal modello su tutte le predizioni che ammonta al 7%. Quest'ultimo ha subito un aumento contenuto rispetto all'allenamento perché sebbene le variabili di input siano differenti assumono valori che variano in range ristretti e le rispettive potenze termiche risultano poco variabili in virtù della stabilità di funzionamento del sistema geotermico. Pertanto la relazione funzionale approssima efficacemente anche i nuovi dati perché molto simili a quelli di allenamento e l'accuratezza del modello è adeguata allo svolgimento delle analisi successive.

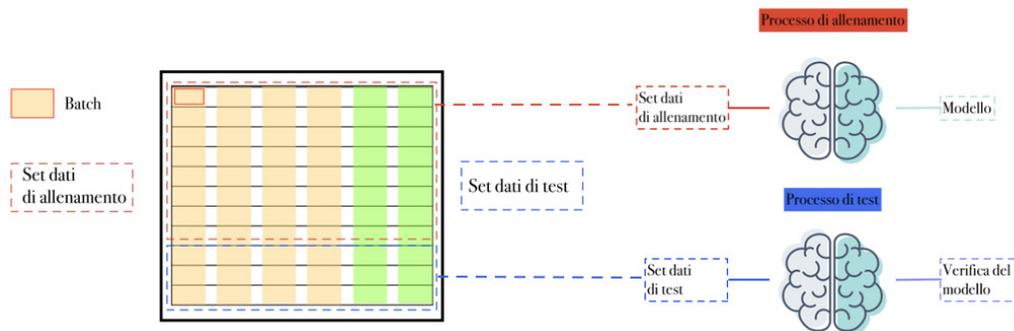


Figura 6.9 Schema logico del processo di realizzazione della rete neurale

6.4 Discussione dei risultati

Con l'intento di stimare la potenza termica che il sistema geotermico sperimentale sarebbe in grado di erogare se sottoposto alle diverse condizioni climatiche che caratterizzano le diverse province sono stati identificati la temperatura media ambientale, del terreno, l'irraggiamento e l'umidità relativa medi annuali. Con riferimento ad alcune province appartenenti alle principali aree italiane è possibile notare che le temperature media annuali riportate in figura 6.10a e l'irraggiamento globale orizzontale in figura 6.10b assumono valori crescenti all'aumentare della latitudine

mentre l'umidità relativa del terreno è superiore nelle regioni della pianura padana e minima in corrispondenza della Puglia e delle isole. La temperatura media annuale del terreno valutata ad una profondità compresa tra 100 ed i 255 cm assume i valori minimi nelle località montane ed aumenta verso le aree meridionali similmente a quella dell'aria.

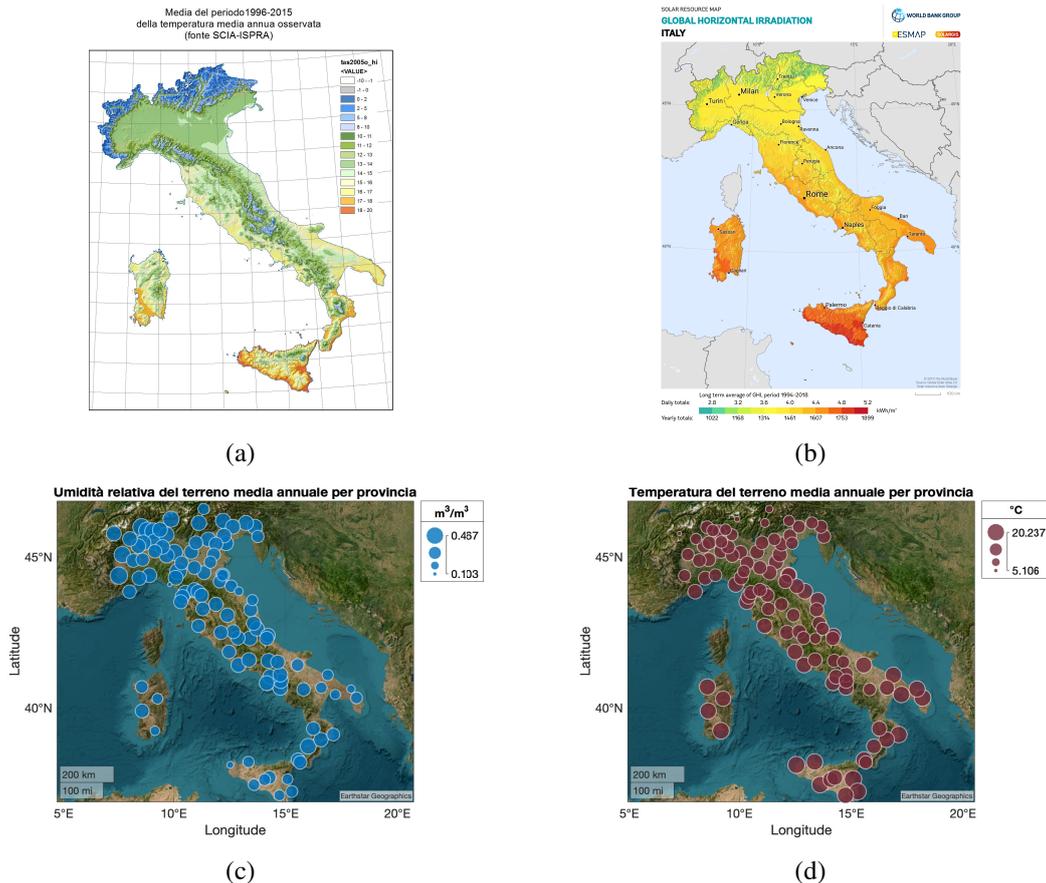


Figura 6.10 Temperatura (a) (Scia-Ispra), irraggiamento globale orizzontale (b) (Global Solar Atlas), umidità relativa (c) e temperatura del terreno medie annuali in Italia

6.4.1 Potenza termica predetta

Sottoponendo queste informazioni alla rete neurale si ottiene la potenza termica predetta che può essere erogata in media ogni anno all'utenza termica. Essa assume valori minimi per Valle d'Aosta, Piemonte e Lombardia perché presentano temperature dell'aria e del terreno più rigide e soggette a variazioni più ampie a livello stagionale nonostante beneficiano di una maggior capacità e conducibilità termica in

virtù della superiore umidità relativa del terreno. La potenza termica è progressivamente crescente verso le regioni meridionali con massimi per le province Siciliane, Calabresi e Campane perché il sistema geotermico operando con terreni a temperatura mediamente più alta dispone di maggiore potenza geotermica. Infatti nelle regioni meridionali gli strati di terreno prossimi alla superficie subiscono l'effetto degli ingenti apporti solari e della temperatura ambientale che favoriscono l'efficacia del sistema geotermico e la potenza erogata all'utenza. Inoltre il trasferimento di calore avverrebbe con una ridotta differenza di temperatura dei termostati quindi con maggior efficienza della pompa di calore.

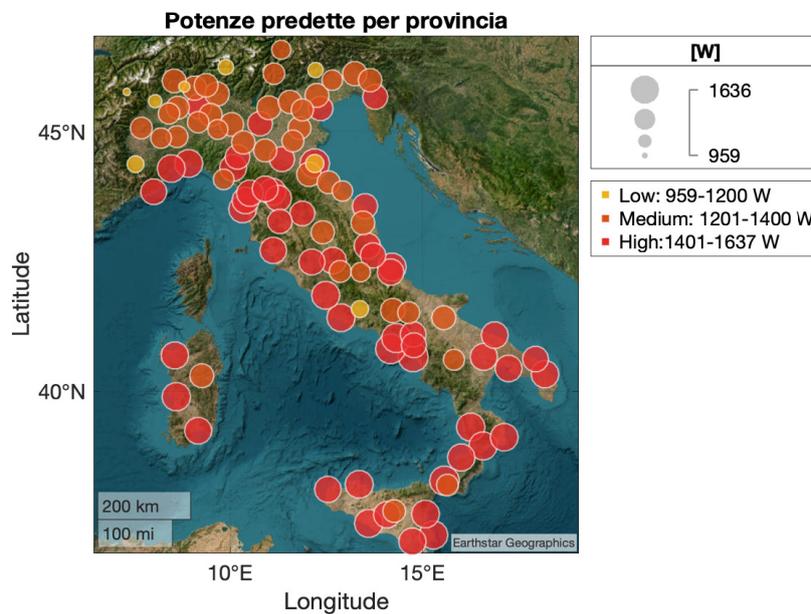


Figura 6.11 Potenza predetta dalla rete neurale per ogni località

Se il sistema geotermico in esame venisse installato in località appartenenti all'arco alpino oppure situate ad elevate altitudini potrebbe erogare all'utenza basse potenze termiche comprese tra 959 ± 67 W e 1200 ± 84 W a causa delle condizioni climatiche sfavorevoli che ridurrebbero il contenuto termico del terreno e l'efficacia del muro energetico. Sia la pianura padana che le zone prealpine consentirebbero al sistema di realizzare una potenza compresa tra 1201 ± 84 W e 1400 ± 98 W con valori crescenti verso il centro Italia. Le potenze predette in provincia di Pisa, Grosseto e Siena sono particolarmente elevate rispetto alle zone limitrofe per via delle temperature medie annuali del terreno particolarmente favorevoli al

funzionamento dei muri energetici. Anche nelle province campane si raggiungono elevati valori di potenza termica disponibile essendo la regione con il più alto potenziale geotermico nazionale (Associazione per lo Sviluppo dell'Industria nel Mezzogiorno, SVIMEZ). Nelle regioni costiere centrali, in quelle meridionali e nelle isole la producibilità prevista è ingente con valori compresi tra 1041 ± 98 W e 1637 ± 115 W in virtù delle temperature medie annuali elevate che derivano dal clima mite indotto dall'azione termoregolatrice svolta dal mare. Invece le località collinari del pre-appennino settentrionale e meridionale potrebbero beneficiare di potenze termiche inferiori, pari a 1201 ± 84 W e 1400 ± 98 W, perché sottoposte ad un clima temperato continentale simile alla pianura con conseguenti temperature dell'aria e del terreno minori rispetto alle zone limitrofe. A tal proposito è interessante notare la presenza di alcune province che sebbene siano situate in centro e sud Italia sono caratterizzate, a differenza di quelle limitrofe, da una bassa potenza predetta come Campobasso, Frosinone, Ravenna e Potenza. Il motivo è che sono caratterizzate da ridotte temperature medie annuali e numero di gradi giorno elevato, inoltre Potenza ha un'altitudine considerevole di 840 m s.l.m.

6.4.2 Dimensionamento dell'area di muro energetico

Le previsioni rappresentano una stima della producibilità che avrebbe il prototipo di area $34.5 m^2$ se fosse installato nelle varie zone e rapportando queste due grandezze si ottiene la potenza media erogabile per unità di superficie. L'intento è ottenere un parametro aggregato che quantifichi l'area di muro energetico necessaria a soddisfare il fabbisogno degli edifici in ogni località, per stimarlo si è fatto riferimento ai valori limite dell'indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale prescritti dal *D.Lgs N.192, articolo 4, comma 2* applicati a partire dal 1 Gennaio 2010 agli edifici residenziali di classe E1 con fattore di forma superiore a 0.9. Questi valori, espressi in kWh/m^2y , costituiscono il consumo totale di energia primaria per il riscaldamento invernale (in regime continuo degli impianti su 24 h) riferito all'unità di superficie massimo in funzione della zona climatica e range di gradi giorno. Ciò permette di stimare l'area di muro energetico necessaria a soddisfare il fabbisogno massimo di energia primaria ammesso dalla normativa rendendo quindi l'approccio conservativo ed i risultati generalizzabili. Dal rapporto tra il fabbisogno medio annuo per unità di superficie calpestable dell'edificio e la potenza media erogabile per unità di superficie del muro energetico si ottiene l'area di GeothermSkin che è

necessario installare per ogni metro quadrato di superficie calpestabile dell'edificio per soddisfare mediamente il carico termico

$$A_{predetta} = \frac{Q_{richiesta}}{Q_{predetta}} \cdot A_{GeothermSkin} \quad (6.7)$$

La figura 6.12 mostra il valore assunto dal parametro adimensionale che esprime l'area di muro energetico per unità di superficie calpestabile dell'edificio, proporzionale alla dimensione della bolla mentre il colore classifica visivamente l'estensione di muro energetico richiesta. Dai risultati emerge che nelle zone afferenti alla pianura padana e quelle montane in corrispondenza dell'arco alpino ed appenninico è richiesta un'ingente superficie di muro energetico variabile tra $0.31 \pm 0.02 \text{ m}^2/\text{m}^2$ e $0.48 \pm 0.04 \text{ m}^2/\text{m}^2$ per soddisfare i fabbisogni termici invernali perché queste zone presentano un carico termico notevole ed una producibilità predetta modesta. Per accrescere la disponibilità di superfici contro-terra su cui installare un prototipo di tale estensione è possibile sfruttare altre superfici come quelle dei parcheggi interrati, conseguendo un incremento della frazione di carico termico invernale soddisfatta e sopperendo alla minor efficacia degli impianti solari termici per il riscaldamento a queste latitudini. Ad ogni modo sarebbe auspicabile l'integrazione con altre tecnologie rinnovabili affinché l'operatività sinergica consenta una diversificazione delle fonti energetiche ed un adeguato riscaldamento degli ambienti interni in ogni condizione. Dovendo installare più moduli GeothermSkin i costi d'investimento risulteranno cospicui ma dalle analisi economiche condotte in precedenza (Ciccullo, 2021) emerge che nelle zone ad elevato fabbisogno termico il risparmio economico è tale da compensare la spesa iniziale e ridurre i tempi di ritorno dell'investimento. Pertanto le regioni del nord con elevate aree richieste sono quelle caratterizzate dal più rilevante potenziale di diffusione di GeothermSkin per via della necessità di coadiuvare le diverse tecnologie rinnovabili per soddisfare gli ingenti fabbisogni termici, dai quali deriva la maggiore competitività economica. Nelle province del centro disposte sulle coste ad un fabbisogno medio si contrappone una producibilità discreta pertanto i valori variano tra $0.21 \pm 0.015 \text{ m}^2/\text{m}^2$ e $0.3 \pm 0.02 \text{ m}^2/\text{m}^2$ e ciò equivale ad installare moduli di estensione compresa tra 21% ed il 30% delle superficie dell'edificio la cui disponibilità è probabile. Anche in queste zone vi è un elevato potenziale di diffusione della tecnologia specialmente nei pressi dei siti geotermici quindi i muri energetici potrebbero contribuire in maniera consistente al riscaldamento sempre affiancati da altri sistemi rinnovabili. Il sud Italia invece gode

di una minor possibilità di diffusione perché sebbene la potenza termica disponibile sia rilevante e sarebbe sufficiente una modesta superficie di muro energetico per riscaldare adeguatamente gli ambienti interni ($0.12 \pm 0.01 \text{ m}^2/\text{m}^2$ e $0.2 \pm 0.015 \text{ m}^2/\text{m}^2$) i carichi termici essendo modesti riducono il bisogno e gli effetti positivi della tecnologia. Inoltre la maggior producibilità del solare termico potrebbe indurre una competizione con la tecnologia geotermica sebbene la produzione di elettricità rinnovabile da fotovoltaico e la possibilità di realizzare anche il raffrescamento estivo dovrebbero favorire le pompe di calore. Pertanto le zone del nord e del centro-nord che richiedono superfici di muro energetico ingenti sono anche quelle che godono del maggior potenziale di diffusione, di cospicui costi fissi ma minori tempi di ritorno dell'investimento. Inoltre le grandi città ospitano più strutture ricettive, estese attività commerciali e grandi edifici con parcheggi interrati con vaste superfici contro-terra, condizioni ottimali all'installazione di GeothermSkin. Nelle località del sud e centro-sud a fronte di un ridotto costo d'investimento potrebbe contrapporsi un risparmio inferiore dovuto ad una minore disponibilità del sistema per il riscaldamento invernale; pertanto l'area di muro energetico deve essere selezionata in maniera ottimizzata anche con l'obiettivo di massimizzare l'autoconsumo ed è ragionevole supporre che il potenziale di diffusione sia inferiore rispetto alle regioni del nord.

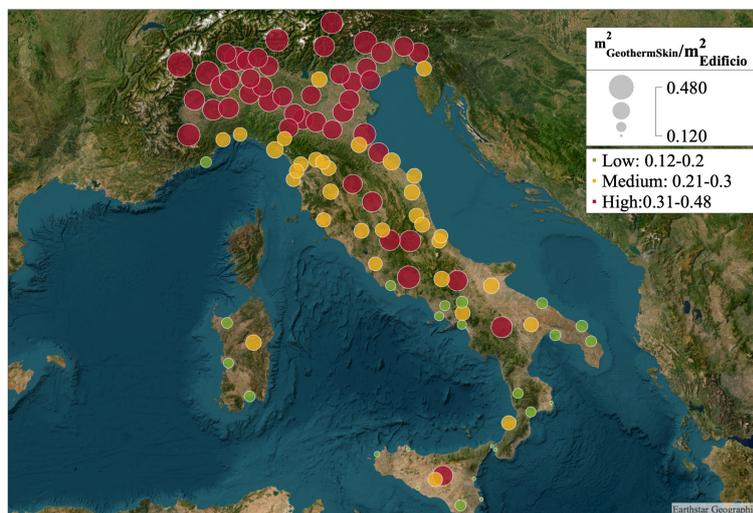


Figura 6.12 Area di muro energetico per unità di superficie calpestabile dell'edificio

6.4.3 Area di muro energetico per i capoluoghi

Osservando in dettaglio i risultati riferiti ai capoluoghi di provincia e le rispettive temperature emerge che quelli a nord ovest come Aosta, Torino e Milano ed a nord est come Trento, Bologna e Venezia richiedono superfici di muro energetico non inferiori a $0.32 \pm 0.02 \text{ m}^2/\text{m}^2$ pertanto hanno un potenziale d'installazione elevato perché le basse temperature dell'aria e del terreno tipiche del clima freddo che caratterizza Aosta e Trieste e del clima continentale delle località della pianura padana e veneta rendono la tecnologia occorrente. Al nord fanno eccezione Genova e Trieste che necessitano di aree minori rispetto alle località limitrofe in virtù delle temperature medie annuali più elevate sia dell'aria che del terreno dovute all'azione termoregolatrice del mare, infatti Genova è soggetta ad un clima subtropicale mentre Trieste subcontinentale. Le aree necessarie nei capoluoghi del centro sono naturalmente inferiori rispetto al nord per via delle crescenti temperature medie ad eccezione di Perugia che sebbene abbia una temperatura media annuale medio-alta quella del terreno è inferiore anche rispetto al nord Italia per via del clima temperato sub-litoraneo che interessa le zone collinari del pre-appennino. Firenze, Ancona e Roma necessitano di aree comprese tra $0.22 \pm 0.015 \text{ m}^2/\text{m}^2$ e $0.25 \pm 0.017 \text{ m}^2/\text{m}^2$ in quanto le prime due beneficiano di un clima sublitoraneo mentre la capitale subtropicale. Tra le regioni del sud l'Aquila e Campobasso spiccano per le elevate aree richieste superiori a $0.34 \pm 0.024 \text{ m}^2/\text{m}^2$ causate dalle temperature di aria e terreno sfavorevoli tipiche del clima temperato fresco e subcontinentale di quelle zone dell'entroterra peraltro ad altezze superiori a 700m s.l.m. Le località del sud richiedono le aree minime, inferiori a $0.18 \pm 0.013 \text{ m}^2/\text{m}^2$ e presentano una modesta occorrenza della tecnologia in virtù delle elevate temperature medie stagionali e modesti fabbisogni termici. Di tendenza opposta è Potenza che sorgendo ad oltre 800m s.l.m è soggetta ad un clima temperato subcontinentale come le regioni del centro nord pertanto richiede un'area prossima a $0.36 \pm 0.025 \text{ m}^2/\text{m}^2$. In conclusione l'area di muro energetico richiesta per il riscaldamento aumenta in maniera non lineare al ridursi delle temperature medie annuali ed al crescere del carico termico richiesto.

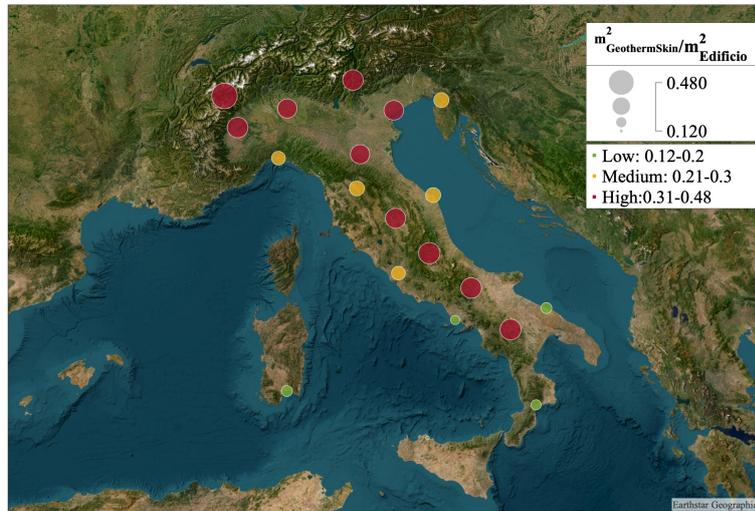


Figura 6.13 Area di muro energetico per unità di superficie calpestabile dell'edificio dei capoluoghi di provincia

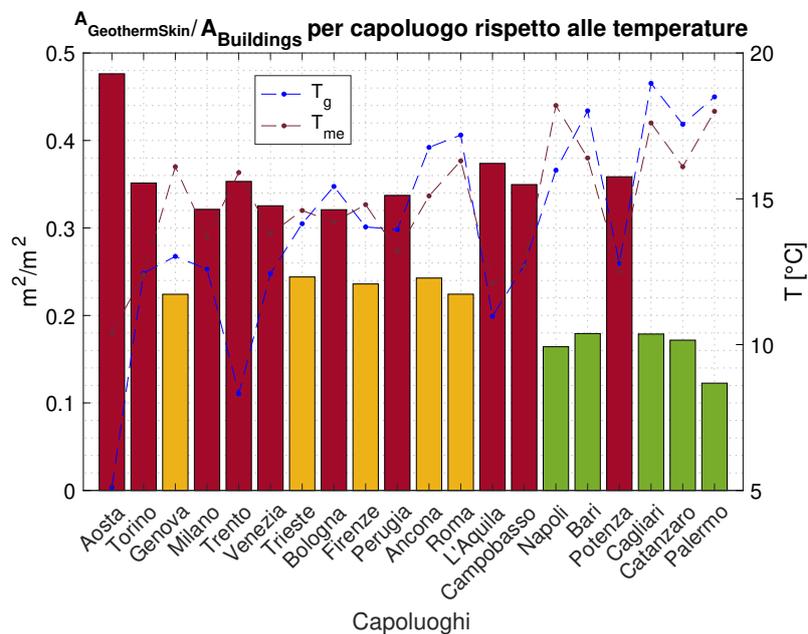


Figura 6.14 Istogramma area di muro energetico per unità di superficie dei capoluoghi al variare delle principali forzanti esterne

Di seguito è riportata la tabella con i risultati in dettaglio limitati ai soli capoluoghi

di provincia

Tabella 6.6 Dettaglio dei risultati

Comune	Zona GG		$T_{me,L}$ [°C]	$T_{g,L}$ [°C]	$U_{r,L}$ [$\frac{m^3}{m^3}$]	Irr_L [$\frac{W}{m^2}$]	$Q_{richiesta}$ [$\frac{kWh}{m^2 \cdot y}$]	$Q_{c.predito}$ [W]	$A_{predetta}$ [$\frac{m^2_{sonde}}{m^2_{edificio}}$]
Aosta	E	2850	10,4	5,1	0,37	168,7	116	959	0,48
Torino	E	2617	12,4	12,4	0,43	162,4	116	1300	0,35
Genova	D	1435	16,1	13	0,36	167,8	88	1545	0,22
Milano	E	2404	13,7	12,5	0,45	166,4	116	1421	0,32
Trento	E	2567	15,9	8,3	0,38	161,4	116	1293	0,35
Venezia	E	2345	13,8	12,4	0,36	166,4	116	1403	0,33
Trieste	D	1929	14,6	14,1	0,27	168,3	88	1420	0,24
Bologna	E	2259	14,2	15,4	0,33	173,3	116	1423	0,32
Firenze	D	1821	14,8	14	0,34	174,7	88	1468	0,24
Ancona	D	1688	15,1	16,7	0,24	184,6	88	1427	0,24
Perugia	E	2289	13,2	13,9	0,35	181,5	116	1354	0,34
Roma	D	1415	16,3	17,1	0,32	190,4	88	1544	0,22
L'Aquila	E	2514	12,1	10,9	0,36	182,7	116	1222	0,37
Campobasso	E	2346	12,7	12,7	0,34	184,8	116	1306	0,35
Bari	C	1185	16,4	18	0,24	190,6	68	1493	0,18
Napoli	C	1034	18,2	15,9	0,36	188,4	68	1630	0,16
Potenza	E	2472	12,5	12,7	0,31	187,8	116	1274	0,36
Catanzaro	C	1328	16,1	17,5	0,35	199,9	68	1558	0,17
Palermo	B	751	18,0	18,4	0,24	209,1	48	1541	0,12
Cagliari	C	990	17,6	18,9	0,20	207,4	68	1497	0,18

Capitolo 7

Conclusioni

Il prototipo di muro energetico GeothermSkin si conferma una soluzione innovativa in grado di convertire le strutture edilizie contro-terra in geoscambiatori superando i limiti delle applicazioni geotermiche tradizionali. Durante la prova di riscaldamento condotta nell'Ottobre 2019 è stato in grado di estrarre dal terreno una potenza termica media pari 1.41 kW con variazioni massime in aumento del +2.13% e in decremento pari a -6.38%, pertanto la potenza estratta varia tra 1.32 kW e 1.44 kW rivelandosi piuttosto stabile al variare delle forzanti climatiche. Con riferimento a quest'ultime è emerso che la temperatura media ambientale e del terreno influiscono maggiormente sulle prestazioni del sistema, tuttavia l'entità degli effetti indotti dalle loro variazioni dipende dalla frequenza di oscillazione e dal tempo di applicazione della forzante oltre che, ovviamente, dal valore assunto. Le variazioni di temperatura ambientale su base giornaliera (dovute all'alternanza giorno-notte) hanno una frequenza elevata ed il terreno con le sue proprietà termiche ne smorza e sfasa gli effetti che si concretizzano in una contenuta variazione della sua temperatura. Ciò consente al sistema geotermico di realizzare coefficienti di prestazione elevati mediamente pari a 6.1 con variazioni contenute comprese tra +1.64% e -4.92% che confermano la stabilità di funzionamento. Per comprendere gli effetti delle variazioni stabili di temperatura a livello stagionale sono stati confrontati i risultati ottenuti durante le prove di riscaldamento risalenti ad Ottobre 2019 e Febbraio 2020 da cui emerge che temperature ambientali e del terreno inferiori determinano una riduzione sia della potenza termica estratta dal terreno che del coefficiente di prestazione, infatti a Febbraio 2020 il muro energetico ha scambiato una potenza media pari a 1 kW ed ha consentito alla pompa di calore di operare con un'efficienza media pari a

5.2. Particolarmente interessante è il risultato relativo alla potenza termica areica estratta da GeothermSkin che ad Ottobre 2019 assume valori compresi tra 30-45 W/m^2 mentre a Febbraio 2020 tra 20-35 W/m^2 . Ciò conferma gli effetti negativi del decremento della temperatura del terreno ed arricchisce le informazioni riguardo la reale resa termica dei muri energetici in accordo con i risultati presenti in letteratura. La potenza termica erogata all'utenza dal sistema geotermico ad Ottobre si attesta in media ad 1.7 kW con variazioni massime in aumento pari a +1.76% e -5.8% in riduzione mentre a Febbraio si riduce ad 1.35 kW. In entrambi i casi, anche in condizioni climatiche avverse, il sistema è in grado di erogare un carico termico sufficiente a consentire il funzionamento del ventilconvettore e riscaldare l'ambiente di prova. Anche l'assorbimento del compressore della pompa di calore decresce con le potenze scambiate passando da 0.28 kW ad Ottobre a 0.24 kW a Febbraio. In entrambe le prove all'aumentare dei cicli di funzionamento sembra innescarsi una progressiva riduzione delle potenze scambiate a cui si sovrappone un andamento globalmente decrescente della temperatura del sottosuolo, probabilmente indice della deriva termica del terreno indotta dalla sua continua cessione di potenza termica. Sarebbe interessante condurre prove di riscaldamento prolungate per verificare l'eventuale insorgenza del fenomeno e vagliare le ricadute sulle prestazioni del muro energetico e del sistema geotermico. Questo approccio ha consentito di comprendere in maniera qualitativa le relazioni esistenti tra le forzanti esterne e le grandezze relative al funzionamento del sistema, con l'obiettivo di prevedere in maniera sistematica la potenza erogata all'utenza termica per diverse variabili climatiche ed eseguire un dimensionamento di massima della superficie di muro energetico necessaria a soddisfare il fabbisogno termico medio annuo di ogni località è stato necessario avvalersi di una rete neurale artificiale multilayer perceptron. Dai risultati emerge che le località pre-alpine arrivano a richiedere fino a $0.48 \pm 0.04 m^2$ di prototipo per ogni metro quadro di superficie dell'edificio perché essendo soggette ad un clima freddo il sistema geotermico è in grado di erogare al più $1200 \pm 84W$ a fronte di un ingente carico termico invernale. Le zone della pianura padana e veneta e quelle collinari del pre-appennino settentrionale e meridionale esigono superfici unitarie variabili tra $0.31 \pm 0.02 m^2/m^2$ $0.48 \pm 0.04 m^2/m^2$ perché il sistema geotermico è in grado di erogare tra $1201 \pm 84 W$ e $1400 \pm 98W$ in relazione ad un carico termico invernale consistente. L'occorrenza di muro energetico stimata rende queste località particolarmente favorevoli alla diffusione di GeothermSkin che potrebbe essere installato anche sulle superfici contro-terra dei parcheggi interrati o dei grandi

edifici per aumentare la quota di carico termico soddisfatta e sopperire alla minor disponibilità della fonte solare per il riscaldamento. E' comunque auspicabile un'integrazione di diverse tecnologie rinnovabili come il solare termico con l'obiettivo di diversificare le fonti e garantire maggiore affidabilità e flessibilità del servizio di riscaldamento. Le zone meridionali e le isole sono quelle dove è richiesta la minor superficie unitaria con valori compresi tra $0.12 \pm 0.01 \text{ m}^2/\text{m}^2$ e $0.2 \pm 0.015 \text{ m}^2/\text{m}^2$ in virtù di potenze termiche disponibili variabili tra $1401 \pm 98 \text{ W}$ e $1637 \pm 115 \text{ W}$ e di un esiguo carico termico medio annuale. Sebbene le aree richieste siano inferiori è ragionevole supporre che la diffusione di GeothermSkin sia moderata da una minor contingenza della tecnologia e dalla maggior competitività offerta dal solare termico sebbene la notevole producibilità fotovoltaica potrebbe favorire le pompe di calore elettriche. Di fondamentale importanza è l'integrazione con altre tecnologie rinnovabili tuttavia regolata da dinamiche di mercato complesse e parzialmente affrontate compatibilmente con i propositi di questa tesi. Tra le zone a nord Genova e Venezia rappresentano un'eccezione richiedendo aree unitarie inferiori per via delle temperature esterne e del terreno favorevoli probabilmente indotte dall'azione termoregolatrice del mare mentre tra quelle del centro e del sud L'aquila, Campobasso, Potenza ed Enna spiccano per le ingenti aree unitarie richieste riconducibili al clima sfavorevole dovuto alle altitudini superiori a 700m s.l.m. Le province di Pisa, Grosseto e Siena sono risultate particolarmente adatte all'installazione di muri energetici tuttavia l'area unitaria richiesta è media a causa dei carichi termici rilevanti. Le province campane, essendo quelle con il più alto potenziale geotermico nazionale, raggiungono notevoli valori di potenza termica disponibile ed a fronte di carichi termici esigui richiedono aree unitarie di muro energetico molto ridotte.

I metodi guidati dai dati e l'apprendimento supervisionato condotto con reti neurali sono generalizzabili a diversi ambiti come le gallerie energetiche, per le quali sarebbe interessante approfondire le relazioni tra la potenza termica ed i parametri caratteristici con un approccio simile a quello adottato in questa tesi. In conclusione l'approccio basato sui dati acquisiti dai sistemi di monitoraggio ha consentito di incrementare la conoscenza delle dinamiche di funzionamento del sistema geotermico sperimentale e del muro energetico al variare delle forzanti esterne. Ciò ha consentito di comprendere le reali potenzialità della tecnologia, punti di forza e svantaggi, ed acquisire maggiore consapevolezza riguardo le condizioni ed i contesti in cui la tecnologia è applicabile in maniera proficua con l'obiettivo

di favorire una maggiore diffusione dell'energia geotermica per la climatizzazione degli edifici e trasformare i centri urbani in città sostenibili.

Appendice A

Risultati del dimensionamento ottenuti con rete neurale

Tabella A.1 Dettaglio dei risultati

Comune	Zona	GG	$T_{me,L}$ [°C]	$T_{g,L}$ [°C]	$U_{r,L}$ [$\frac{m^3}{m^3}$]	Irr_L [$\frac{W}{m^2}$]	$Q_{richiesta}$ [$\frac{kWh}{m^2 \cdot y}$]	$Q_{c,predetto}$ [W]	$A_{predetta}$ [$\frac{m^2_{sande}}{m^2_{edificio}}$]
Agrigento	B	729	18,2	18,6	0,25	207,4	48	1430	0,13
Alessandria	E	2559	12,8	14,4	0,31	167,6	116	1338	0,34
Ancona	D	1688	15,1	16,8	0,24	184,6	88	1402	0,25
Aosta	E	2850	10,4	5,1	0,37	168,7	116	1062	0,43
Ascoli Piceno	D	1698	14,8	14,5	0,35	181,7	88	1480	0,23
L'Aquila	E	2514	12,1	11,0	0,36	182,7	116	1267	0,36
Arezzo	E	2104	14,1	13,7	0,34	178,9	116	1432	0,32
Asti	E	2617	12,3	13,9	0,32	167,6	116	1302	0,35
Avellino	D	1742	13,9	15,5	0,37	186,0	88	1460	0,24
Bari	C	1185	16,4	18,0	0,24	190,6	68	1412	0,19
Bergamo	E	2533	13,5	11,8	0,39	165,9	116	1397	0,33
Biella	E	2589	10,8	11,0	0,36	166,1	116	1148	0,40
Belluno	E	2936	11,2	10,8	0,38	157,1	116	1179	0,39
Benevento	C	1316	14,3	15,9	0,36	187,1	68	1478	0,18
Bologna	E	2259	14,2	15,4	0,33	173,3	116	1444	0,32
Brindisi	C	1083	16,6	18,2	0,17	195,9	68	1317	0,20
Brescia	E	2410	13,5	12,7	0,45	165,9	116	1434	0,32
Bolzano	E	2791	12,6	7,3	0,24	160,5	116	1228	0,37
Cagliari	C	990	17,6	19,0	0,20	207,4	68	1363	0,20
Campobasso	E	2346	12,7	12,7	0,34	184,8	116	1335	0,34
Caserta	C	1013	17,1	15,8	0,37	188,4	68	1604	0,17
Chieti	D	1556	15	15,0	0,34	185,4	88	1494	0,23
Caltanissetta	D	1550	15,8	17,1	0,26	207,7	88	1454	0,24
Cuneo	F	3012	11,4	12,1	0,47	166,5	116	1250	0,37

Tabella A.2 Dettaglio dei risultati

Comune	Zona	GG	$T_{me,L}$ [°C]	$T_{g,L}$ [°C]	$U_{r,L}$ [$\frac{m^3}{m^3}$]	Irr_L [$\frac{W}{m^2}$]	$Q_{richiesta}$ [$\frac{kWh}{m^2 \cdot y}$]	$Q_{c.predito}$ [W]	$A_{predetta}$ [$\frac{m^2_{sonde}}{m^2_{edificio}}$]
Como	E	2228	13,3	13,2	0,45	166,9	116	1423	0,32
Cremona	E	2389	13	14,7	0,43	168,9	116	1411	0,32
Cosenza	C	1317	16,6	16,2	0,32	197,9	68	1534	0,17
Catania	B	833	18,2	20,2	0,23	203,3	48	1402	0,13
Catanzaro	C	1328	16,1	17,6	0,35	199,9	68	1566	0,17
Enna	E	2248	13,4	17,0	0,31	206,1	116	1423	0,32
Ferrara	E	2326	13,1	15,8	0,28	174,0	116	1369	0,33
Foggia	D	1530	14,1	17,9	0,28	188,1	88	1441	0,24
Firenze	D	1821	14,8	14,0	0,34	174,7	88	1465	0,24
Forlì	D	2087	14,2	14,8	0,29	177,2	88	1416	0,24
Frosinone	E	2196	11,8	14,9	0,36	192,6	116	1308	0,35
Genova	D	1435	16,1	13,0	0,36	167,8	88	1539	0,23
Gorizia	E	2333	13,1	13,4	0,37	160,3	116	1372	0,33
Grosseto	D	1550	15,2	16,8	0,31	187,2	88	1496	0,23
Imperia	C	1201	14,7	15,6	0,32	172,8	68	1465	0,18
Isernia	D	1866	13,7	13,7	0,37	185,4	88	1432	0,24
Crotone	B	899	16,5	18,6	0,29	201,2	48	1506	0,13
Lecco	E	2383	13,4	11,3	0,37	166,3	116	1372	0,33
Lodi	E	2592	13,1	14,3	0,35	168,8	116	1386	0,33
Lecce	C	1153	17,1	18,9	0,26	194,8	68	1441	0,19
Livorno	D	1408	15,7	17,1	0,34	180,8	88	1528	0,23
Latina	C	1220	15,7	17,2	0,36	192,7	68	1558	0,17
Lucca	D	1715	14,8	14,8	0,36	180,8	88	1486	0,23
Macerata	D	2005	13,6	15,0	0,33	181,7	88	1415	0,24
Messina	B	707	18,5	18,2	0,33	203,5	48	1553	0,12
Milano	E	2404	13,7	12,6	0,45	166,4	116	1449	0,32
Mantova	E	2388	13,9	15,0	0,34	169,6	116	1430	0,32
Modena	E	2258	13,3	14,4	0,32	173,0	116	1383	0,33
Massa Carrara	D	1525	14,9	15,1	0,37	177,1	88	1497	0,23
Matera	D	1418	16,6	16,2	0,25	190,4	88	1414	0,25
Napoli	C	1034	18,2	16,0	0,36	188,4	68	1599	0,17
Novara	E	2463	12,8	13,8	0,40	167,7	116	1371	0,33
Nuoro	D	1602	14,6	16,6	0,23	197,5	88	1386	0,25
Oristano	C	1059	16,6	18,3	0,33	199,8	68	1551	0,17
Palermo	B	751	18	18,5	0,24	209,1	48	1423	0,13
Piacenza	E	2715	12,1	14,5	0,37	168,9	116	1317	0,35
Padova	E	2383	12,8	14,7	0,33	166,8	116	1355	0,34
Pescara	D	1718	16,1	15,7	0,35	183,2	88	1554	0,22
Perugia	E	2289	13,2	13,9	0,35	181,5	116	1394	0,33
Pisa	D	1694	15	16,1	0,35	180,8	88	1514	0,23
Pordenone	E	2459	12,2	13,0	0,36	164,0	116	1293	0,35
Prato	D	1668	15,2	14,2	0,34	176,2	88	1490	0,23

Tabella A.3 Dettaglio dei risultati

Comune	Zona	GG	$T_{me,L}$ [°C]	$T_{g,L}$ [°C]	$U_{r,L}$ [$\frac{m^3}{m^3}$]	Irr_L [$\frac{W}{m^2}$]	$Q_{richiesta}$ [$\frac{kWh}{m^2 \cdot y}$]	$Q_{c.predetto}$ [W]	$A_{predetta}$ [$\frac{m^2_{sonde}}{m^2_{edificio}}$]
Parma	E	2502	13,4	14,3	0,33	171,0	116	1389	0,33
Pesaro e Urbino	D	2083	13,4	17,4	0,18	184,0	88	1323	0,26
Pistoia	D	1885	14,5	13,9	0,36	176,2	88	1463	0,24
Pavia	E	2623	12,6	14,8	0,32	168,7	116	1339	0,34
Potenza	E	2472	12,5	12,8	0,31	187,8	116	1308	0,35
Ravenna	E	2227	12,1	16,1	0,25	177,1	116	1303	0,35
Reggio Calabria	B	772	18,1	18,1	0,34	203,5	48	1579	0,12
Reggio Emilia	E	2560	12,7	13,7	0,32	172,8	116	1331	0,34
Ragusa	C	1324	17	18,1	0,23	209,1	68	1420	0,19
Rieti	E	2324	12,7	13,5	0,34	183,8	116	1347	0,34
Roma	D	1415	16,3	17,2	0,32	190,4	88	1527	0,23
Rimini	E	2139	13,6	16,0	0,28	177,4	116	1397	0,33
Rovigo	E	2466	13,3	15,6	0,31	173,4	116	1393	0,33
Salerno	C	994	18,4	16,3	0,37	190,6	68	1615	0,17
Siena	D	1943	14	13,9	0,33	179,8	88	1422	0,24
Sondrio	E	2755	11,9	5,8	0,41	160,5	116	1180	0,39
La Spezia	D	1413	14,2	17,0	0,10	173,4	88	1202	0,29
Siracusa	B	799	18,2	19,4	0,27	203,3	48	1455	0,13
Sassari	C	1185	16,1	18,1	0,28	199,3	68	1489	0,18
Savona	D	1481	15,8	14,6	0,35	167,8	88	1535	0,23
Taranto	C	1071	17,1	18,5	0,21	196,8	68	1375	0,19
Teramo	D	1834	14,3	13,4	0,36	181,9	88	1453	0,24
Trento	E	2567	15,9	8,3	0,38	161,4	116	1350	0,34
Torino	E	2617	12,4	12,5	0,43	162,4	116	1326	0,34
Trapani	B	810	18,2	19,5	0,14	212,7	48	1263	0,15
Terni	D	1650	15,2	14,7	0,33	188,8	88	1499	0,23
Trieste	D	1929	14,6	14,1	0,27	168,3	88	1404	0,25
Treviso	E	2378	13,4	13,5	0,35	161,7	116	1389	0,33
Udine	E	2323	13,6	12,1	0,37	160,3	116	1394	0,33
Varese	E	2652	10,5	12,3	0,46	164,3	116	1171	0,39
Verbania	E	2426	13,1	12,7	0,46	164,3	116	1403	0,33
Vercelli	E	2751	12,4	14,0	0,36	167,7	116	1327	0,34
Venezia	E	2345	13,8	12,4	0,36	166,4	116	1412	0,32
Vicenza	E	2371	13,2	12,6	0,36	166,6	116	1368	0,33
Verona	D	2068	13,7	14,1	0,32	169,6	88	1400	0,25
Viterbo	D	1989	14,8	15,5	0,33	187,0	88	1483	0,23
Vibo Valentia	D	1586	15	15,8	0,40	197,5	88	1541	0,22

Appendice B

Codici di calcolo

```
1 Pressure detector 2
2
3 p_hp=6e5:0.5e5:14e5;
4 p_lp=6e5:0.5e5:9e5;
5 A=NaN(length(p_hp)*length(p_lp),6);
6 p_hp_t=zeros(length(BT14),1);
7 p_lp_t=zeros(length(BT14),1);
8
9 for i=1:length(BT14)                                %per ogni istante di tempo, punto di funzionamento
10     k=0;
11     for l=1:length(p_hp)                            %per ogni pressione massima
12                                                 %per ogni pressione massima
13         Tsat_14=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('T','P',p_hp(l),'Q',1,'R407C');%[K]
14         h_ls=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('H','P',p_hp(l),'Q',0,'R407C')/1000; %[J/kgK]
15
16         for j=1:length(p_lp)                        %per ogni pressione minima
17
18             if p_hp(l)>p_lp(j)                      %riduce casi analzzati
19
20                 k=k+1;
21                 A(k,1)=p_hp(l);                    %scrive coppia pressioni in matrice
22                 A(k,2)=p_lp(j);
23                 Tsat_17=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('T','P',p_lp(j),'Q',1,'R407C');%[K]
24
25                 if fcompr(i)~=0
26
27                     if BT14(i)>Tsat_14 && BT17(i)>Tsat_17    % se punto esterno alla zona bifase
28                         %cp
29                         cp_14=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('C','P',p_hp(l),
30                             'T',BT14(i),'R407C')/1000;
31                         cp_17=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('C','P',p_lp(j),
32                             'T',BT17(i),'R407C')/1000;
33                         %h
34                         h_14=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('H','P',p_hp(l),
35                             'T',BT14(i),'R407C')/1000;
36                         h_17=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('H','P',p_lp(j),
37                             'T',BT17(i),'R407C')/1000;
38                         %lc
39                         lreal=(cp_14*BT14(i))-(cp_17*BT17(i)); %Lavoro reale
40                         lguess=h_14-h_17; %[kJ/kg]          %Lavoro ipotizzato
41                         %scostamenti
42                         A(k,3)=abs(lguess-lreal);          %scostamento
43                         A(k,4)=(abs(lguess-lreal))/lreal;  %scostamento relativo
44
45                     else
46                         A(k,3)=NaN;                      %scostamento
47                         A(k,4)=NaN;                      %scostamento relativo
48                     end
49                 end
50             end
51         end
52     end
53 end
```

```

49             A(k,6)=0;                                     %flag stato
50             end
51         end
52     end
53 end
54     [~, riga_p]=min(A(:,4));                             %individuo coppia pressioni che realizza minimo scost. rel
55     if A(riga_p,6)==1                                    %se compressore acceso e punto esterno a zona bifase
56         p_hp_t(i)=A(riga_p,1);
57         p_lp_t(i)=A(riga_p,2);
58     else                                                %se compressore spento o punto bifase
59         p_hp_t(i)=NaN;
60         p_lp_t(i)=NaN;
61     end
62 end
63
64 %% Prestazioni
65
66 if variabile==1
67     Q_H2O_g=ones(length(BT14),1)*460/(1000*3600); %[m3/s]
68     else
69         if variabile==2
70             Q_H2O_g=ones(length(BT14),1)*925.81/(1000*3600); %[m3/s]
71         end
72     end
73 G_H2O_g=Q_H2O_g*1000; %[kg/s]
74
75 for i=1:length(BT14)
76
77     if fcompr(i)~=0 && isnan(p_hp_t(i))==false && isnan(p_lp_t(i))==false && GP1(i)~=0 && GP2(i)~=0...
78     && BT12(i)>BT3(i)
79         Tsat_14=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('T','P', p_hp_t(i),'Q',1,'R407C');%[K]
80         Tsat_17=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('T','P', p_lp_t(i),'Q',1,'R407C');%[K]
81
82         if BT14(i)>Tsat_14 && BT17(i)>Tsat_17             %controllo bifase
83             h_ls=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('H','P', p_hp_t(i),'Q',0,'R407C')/1000; %[kJ/kg]
84             h4=h_ls; %[J/kgK]
85             cp_14(i)=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('C','P', p_hp_t(i),'T',BT14(i),'R407C')/1000;
86             cp_17(i)=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('C','P',p_lp_t(i),'T',BT17(i),'R407C')/1000;
87             %h
88             h_14(i)=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('H','P', p_hp_t(i),'T',BT14(i),'R407C')/1000;
89             h_17(i)=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('H','P',p_lp_t(i),'T',BT17(i),'R407C')/1000;
90             %cp circuito idro
91             cp_water=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('C','P',mean([1.1,1.8])*1e5,'T',
92             mean([BT12(i),BT3(i)]),'Water')/1000;
93             Tm=mean([BT12(i),BT3(i)]); %[K]
94             cp_glicole=cp_g(Tm);
95             cp_h2o=cp_water*0.75+cp_glicole*0.25;
96             %cp circuito sonde
97             cp_water=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('C','P',mean([1.4,1.9])*1e5,'T',
98             mean([BT10(i),BT11(i)]),'Water')/1000;
99             Tm=mean([BT10(i),BT11(i)]);
100            cp_glicole=cp_g(Tm);
101            cp_h2o_g=cp_water*0.75+cp_glicole*0.25;
102            %Lavoro compressore
103            l_c2(i)=h_14(i)-h_17(i);
104            %calore condensatore
105            qc(i)=h_14(i)-h_ls;
106            %Portate massica e volumica refrigerante
107            G_R407c(i)=(G_H2O_g(i)*cp_h2o_g*(BT10(i)-BT11(i)))/(qc(i)-lc2(i));
108            ro_R407C=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('D','P',mean([p_hp_t(i),p_lp_t(i)]),
109            'T',mean([BT14(i),BT17(i)]),'R407C');
110            Q_R407c(i)=G_R407c(i)/ro_R407C;
111            %Potenza condensatore
112            Qc_1(i)=qc(i)*G_R407c(i);
113            %Portata massica e volumica circuito idro utenza
114            G_H2O(i)=Qc_1(i)/(cp_h2o*(BT12(i)-BT3(i)));
115            ro_H2O=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('D','P',101325,'T',
116            mean([BT12(i),BT3(i)]),'Water'); %[kg/m3]
117            Q_H2O(i)=G_H2O(i)/ro_H2O;
118            Qc_2(i)=G_H2O(i)*cp_h2o*(BT12(i)-BT3(i));
119            %calore e potenza evaporatore
120            qe(i)=h_17(i)-h_ls;
121            Qev_1(i)=qe(i)*G_R407c(i);

```

```

122         Qev_2(i)=G_H2O_g(i)*cp_h2o_g*(BT10(i)-BT11(i));
123     %Potenza compressore
124     Lc(i)=lc2(i)*G_R407c(i);
125     %COP
126     COP2(i)=qc(i)/lc2(i);
127     dT10_11(i)=BT10(i)-BT11(i);
128     dT3_12(i)=BT12(i)-BT3(i);
129     dTr(i)=BT14(i)-BT17(i);
130
131     else
132         lc2(i)=NaN;
133         qc(i)=NaN;
134         qe(i)=NaN;
135         COP2(i)=NaN;
136         Qc_1(i)=NaN;
137         Qc_2(i)=NaN;
138         Qev_1(i)=NaN;
139         Qev_2(i)=NaN;
140         G_R407c(i)=NaN;
141         G_H2O(i)=NaN;
142         Lc(i)=NaN;
143         dT10_11(i)=NaN;
144         dT3_12(i)=NaN;
145         dTr(i)=NaN;
146     end
147
148     else
149         lc2(i)=0;
150         qc(i)=0;
151         qe(i)=0;
152         COP2(i)=0; %to NaN x grafici
153         Qc_1(i)=0;
154         Qc_2(i)=0;
155         Qev_1(i)=0;
156         Qev_2(i)=0;
157         G_R407c(i)=0;
158         G_H2O(i)=0;
159         Lc(i)=0;
160         dT10_11(i)=0;
161         dT3_12(i)=0;
162         dTr(i)=0;
163     end
164
165     Rete neurale
166     df<-rbind(df_19,df_20)
167     #Identificare potenza nulla ed etichetta
168     df <- df %>% mutate(Outlier_Qc = ifelse(Qc<=0,"Outlier","Ok"))
169     #Estraggo solo potenze non nulle
170     df_clean <- df[df$Outlier_Qc!="Outlier",]
171     #Outlier solo su potenze non nulle
172     outlier <- boxplot(df_clean$Qc, data=df_clean, plot = F)$out
173     #estraggo potenze non outlier e nulle
174     df_clean <- df_clean[df_clean$Outlier_Qc!="Outlier",]
175     df_clean$Ur<-df_clean$Ur/100
176     #Import dati localita
177     localita<-read.csv(file.path("data","dati_climatici.csv"),header=TRUE,dec=".",sep=";")
178     #Assegnazione Epi D.Lgs N.192, articolo 4, comma2
179     localita <- localita %>% mutate(Q_richiesta = ifelse((GG<=601),36,
180     ifelse((GG>=601 & GG<=901),48,ifelse((GG>901 & GG<=1401),68,
181     ifelse((GG>1401 & GG<=2101),88,ifelse((GG>2101),116,0))))))
182     #Conversione
183     localita$Q_richiesta <- localita$Q_richiesta*3.6e6/(365*24*60*60) #[W/m2]
184     #Massimi e minimi
185     maxQc <- max(df_clean$Qc)
186     maxUr <- max(df_clean$Ur)
187     maxIrr <- max(df_clean$Irr)
188     maxText <- max(df_clean$Text)
189     minText<-min(df_clean$Text)
190     maxTg <- max(df_clean$Tg)
191     minTg<-min(df_clean$Tg)
192     #Normalizzazione input/output
193     dfANN_scalato <- data.frame(DateTime=df_clean$DateTime, Text =
194     (df_clean$Text - minText)/(maxText - minText), Tg = (df_clean$Tg - minTg)/(maxTg - minTg),

```

```

195     Irr = df_clean$Irr/maxIrr,Ur = df_clean$Ur/maxUr,Qc = df_clean$Qc/maxQc)
196 p <- sample(dfANN_scalato$DateTime, size = 4760)
197 dfANN_scalato <- dfANN_scalato %>% mutate(train_test = ifelse(DateTime %in% p,"train","test"))
198 dfANN_scalato_train <- dfANN_scalato %>% filter(train_test=="train")
199 dfANN_scalato_test <- dfANN_scalato %>% filter(train_test=="test")
200
201 x_train <- as.matrix(dfANN_scalato_train[,2:5])
202 y_train <- as.matrix(dfANN_scalato_train[,6])
203 x_test <- as.matrix(dfANN_scalato_test[,2:5])
204 y_test <- as.matrix(dfANN_scalato_test[,6])
205 #Modello
206 modello <- keras_model_sequential() %>%
207   layer_dense(units = 64, activation = "relu",input_shape = ncol(x_train)) %>%
208   layer_dense(units = 64, activation = "relu") %>%
209   layer_dense(units = 1, activation = 'relu')
210 modello %>% compile(
211   optimizer = keras::optimizer_rmsprop(),
212   loss = "mse",
213   metrics = c("mape"))
214 #Apprendimento
215 learn <- modello %>% fit(
216   x = x_train,
217   y = y_train,
218   epochs = 100,
219   batch_size =64,
220   verbose = 2)
221 plot(learn)
222 #verifica prestazioni
223 modello %>% evaluate(x_train, y_train)
224 modello %>% evaluate(x_test, y_test)
225 dfANN_scalato_train$Qc_pred <- modello %>% predict(x_train)
226 dfANN_scalato_test$Qc_pred <- modello %>% predict(x_test)
227 #Metriche d'errore
228 metriche_ANN_train<-data.frame(R2=caret::R2(dfANN_scalato_train$Qc_pred,
229 dfANN_scalato_train$Qc),
230 RMSE = RMSE(dfANN_scalato_train$Qc_pred, dfANN_scalato_train$Qc),
231 MSE = MSE(dfANN_scalato_train$Qc_pred, dfANN_scalato_train$Qc),
232 MAE = MAE(dfANN_scalato_train$Qc_pred, dfANN_scalato_train$Qc),
233 MAPE = MAPE(dfANN_scalato_train$Qc_pred, dfANN_scalato_train$Qc)*100)
234 metriche_ANN_test <- data.frame(R2=caret::R2(dfANN_scalato_test$Qc_pred,
235 dfANN_scalato_test$Qc),
236 RMSE = RMSE(dfANN_scalato_test$Qc_pred, dfANN_scalato_test$Qc),
237 MSE = MSE(dfANN_scalato_test$Qc_pred, dfANN_scalato_test$Qc),
238 MAE = MAE(dfANN_scalato_test$Qc_pred, dfANN_scalato_test$Qc),
239 MAPE = MAPE(dfANN_scalato_test$Qc_pred, dfANN_scalato_test$Qc)*100)
240 #scalo dati localita
241 maxUrL <- max(localita$Ur)
242 minUrL <- min(localita$Ur)
243 maxIrrL <- max(localita$Irr)
244 minIrrL <- min(localita$Irr)
245 maxTmeL <- max(localita$Tme)
246 minTmeL <- min(localita$Tme)
247 maxTgL <- max(localita$Tg)
248 minTgL<-min(localita$Tg)
249 maxQrL <- max(localita$Q_richiesta)
250 minQrL<-min(localita$Q_richiesta)
251 #T media annuale province Italiane
252 df_localita_scalato <- data.frame(Tme = (localita$Tme - minTmeL)/(maxTmeL - minTmeL),
253 Tg = (localita$Tg - minTgL)/(maxTgL - minTgL),Irr = localita$Irr/maxIrrL,
254 Ur = localita$Ur/maxUrL)
255 x_loc <- as.matrix(df_localita_scalato[,1:4])
256 #Predizione Qc
257 df_localita_scalato$Qc_predetto_scalato <- modello %>% predict(x_loc) #kW
258 #De-normalizzazione
259 localita$Qc_predetto=df_localita_scalato$Qc_predetto_scalato*maxQc*1000 #kW-> W
260 localita$pot_spec=localita$Qc_predetto/34.5 #W/m2 di sonda
261 localita$KPI=1/(localita$Qc_predetto/34.5) #m2 di sonde/W predetto prodotto dalla pdc
262 localita$Area=localita$KPI*localita$Q_richiesta #m2 sonda/m2 superficie utile edificio

```

Nomenclatura

Lettere greche

φ	Porosità
η_e	Porosità effettiva
ρ_w	Densità dell'acqua
μ_w	Viscosità dinamica dell'acqua
α	Comprimibilità della struttura porosa
β	Comprimibilità dell'acqua
dh	Variazione del battente d'acqua
β_s	Costante di smorzamento
$\beta_s = \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}$	Fattore di smorzamento
σ	Funzione di attivazione
η	Tasso di apprendimento
ϕ_i	Flusso Termico

Operatori

∇	Gradiente
∇^2	Laplaciano
∂	Derivata parziale
$\sum_{i=1}^N$	Sommatoria

Lettere romane

V	Volume dei pori vuoti
V_t	Volume totale del campione
V_f	Rapporto di vuoto
S_y	Resa specifica
S_r	Ritenzione specifica
K	Conduttività idraulica
k	Permeabilità intrinseca
C	Fattore di forma
d	Diametro medio dei pori
Q	Portata d'acqua dell'acquifero
A	Area sezione del mezzo poroso
$\frac{dh}{dt}$	Gradiente idraulico

v	Velocità di Darcy
v_x	Velocità di infiltrazione
S_s	Immagazzinamento specifico
b	Spessore dell'acquifero
S	Coefficiente di stoccaggio
V_w	Volume d'acqua disponibile
$c_{p,w}$	Calore specifico dell'acqua
k_w	Conducibilità termica dell'acqua
T_w	Temperatura dell'acqua
q_w''	Generazione volumetrica di potenza nell'acqua
$c_{p,g}$	Calore specifico del terreno
k_g	Conducibilità termica del terreno
T_g	Temperatura del terreno
q_g''	Generazione volumetrica di potenza nel terreno
x	Coordinata spaziale x
z	Coordinata spaziale z
U	Velocità effettiva
A_s	Ampiezza media sinusoidale
T_m	Valor medio della temperatura ambientale esterna
ω	Pulsazione della sinusoidale
q	Flusso termico
X	Parametro di cortocircuito idraulico
L	Distanza tra pozzi
COP	Coefficiente di prestazione
EER	Energy Efficiency Ratio
Q_1	Calore ceduto al pozzo termico
T_1	Temperatura del pozzo termico
Q_2	Calore assorbito dalla sorgente termica
T_2	Temperatura della sorgente termica
W	Lavoro fornito
$a(x)$	Attivazione del neurone
x_i	Dato di input
w_i	Peso della connessione
b_i	Bias o valore soglia
T_s	Training set
$E_p(w)$	Errore quadratico medio
W_i	Potenza tecnica
W_0	Potenza di deformazione
U^T	Energia interna totale
E_c	Energia cinetica

E_g	Energia potenziale
h_k	Entalpia
e_c	Energia cinetica specifica
e_g	Energia potenziale specifica
\dot{G}_b^a	Portata in massa a) al primario 1 o secondario 2 del fluido b
$p_{a,b}$	Pressione a) al primario 1 o secondario 2 per il fluido b
v	Volume specifico
z	Quota geodetica
h_s	Carico piezometrico pompa
h_L	Perdita di carico
L_c	Potenza tecnica assorbita del compressore
Q_c	Potenza termica condensatore
Q_{ev}	Potenza termica evaporatore
GL	Gradi di libertà
NC	Numero di componenti chimiche
NF	Numero di fasi
l_c	Lavoro specifico del compressore
$scost_{rel}$	Scostamento relativo
q_c	Potenza termica specifica al condensatore
GG	Gradi giorno
t_i	Tempo
$Q_{ev,spec}$	Potenza areica all'evaporatore
$A_{GeothermSkin}$	Area di GeothermSkin
T_{ext}	Temperatura esterna
T_g	Temperatura del terreno
Irr	Irraggiamento
U_r	Umidità relativa
$T_{me,L}$	Temperatura media esterna annua località
$T_{g,L}$	Temperatura terreno media annua località
Irr_L	Irraggiamento medio annuo località
$U_{r,L}$	Umidità relativa terreno media annua località
Q_{1°	Primo quartile della distribuzione statistica
Q_{3°	Terzo quartile della distribuzione statistica
IQR	Range inter-quartile
K_{IQR}	Coefficiente di sensibilità del metodo inter-quartile
$Q_{richiesta}$	Potenza termica richiesta media annua
$Q_{predetta}$	Potenza termica predetta
$A_{predetta}$	Area di GeothermSkin predetta
DM	Gradi minuto

$h_{s,c.l.i}$	Entalpia specifica di saturazione sulla curva limite inferiore R407c
h_{BT_i}	Entalpia specifica dello stato BT_i
p_{lp}	Pressione di evaporazione R407c
p_{hp}	Pressione di condensazione R407c
h_0	Entalpia di riferimento
p_0	Pressione di riferimento
p_{amb}	Pressione ambientale
T_{sat}	Temperatura di saturazione

Bibliografia

Baralis, M., Barla, M., (2021), Development and testing of a novel geothermal wall system, Dip.di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino, International Journal of Energy and Environmental Engineering, Springer

Baralis, M., (2021), Optimisation of geothermal resources in urban areas, Tesi di Dottorato, Politecnico di Torino, Relatori: Barla, M.

Barbier, E., (1997), Nature and technology of geothermal energy: a review, Elsevier Science, Great Britain

Baretta, S., (2018), Simulazione Numerica di sistemi Borehole Thermal Energy Storage (BTES), Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino, Relatori: Casasso, A., Sethi, R., Della Valentina, S.

Barla, M., Di Donna, A., (2018), Energy tunnels: concept and design aspects, Dip.di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino

Barla, M., Di Donna, A., (2015), Gallerie energetiche in ambiente urbano, Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica, Cagliari

Barla, M., Insana, A., Benincasa di Caravaccio, A., (2023), Lessons learnt from a full-scale implementation of energy walls, Symposium on Energy Geotechnics, Delft, Netherlands (Under Review)

Barla, M., Insana, A., (2018), Energy Tunnel Segmental Lining: an Experimental Site in Turin Metro, Dip.di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino

Bertini, I., (2020), L'efficienza energetica: una leva trasversale per la transizione energetica, ENEA, Roma

Caleffi S.p.a, (2020), Idraulica 38, Poligrafica Moderna s.r.l, Novara

Capodaglio, P., Baietto, A., Casasso, A., Della Valentina, S., (2018), Geotermia a bassa entalpia: aspetti ambientali, energetici ed economici, Progetto Interreg Alpine Space GRETA

Capozzoli, A., Materiale del corso 'Gestione energetica e automazione negli edifici', corso di laurea in Ingegneria Energetica e Nucleare - Politecnico di Torino, anno accademico 2021/2022, titolare: prof. Capozzoli A."

Carnazza, P., Giorgio, F., Gli effetti del COVID - 19 sull'economia italiana e sul sistema produttivo, Argomenti: N.16

Casasso, A., Sethi, R., (2013), Tecnologia e potenzialità dei sistemi geotermici a bassa entalpia, Dipartimento di Ingegneria per l'Ambiente, il Territorio e le Infrastrutture, Politecnico di Torino

Ciccullo, M., (2021), Applicazione e studio in campo sperimentale di una pompa di calore geotermica, Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino, Relatori: Relatori:Papurello, D.

Davies, J. H., Davies, D. R., (2010), Il flusso di calore della superficie terrestre. Terra solida

Dickson, M., Fanelli, M., (2004), Cos'è l'Energia Geotermica?, IGA-International Geothermal Association

Di Donna A., Cecinato F., Loveridge F, (2016), Energy performance of diaphragm walls used as heat exchangers. Proceedings of the Institution of Civil Engineering, ICE Publishing, London, UK.

Fracastoro, G.V., (2018), Materiale del corso 'Energetica e Fonti Rinnovabili', corso di laurea in Ingegneria Energetica - Politecnico di Torino, anno accademico 2018/2019, titolare: prof. Fracastoro G.V."

Franconi, V., Alberti, L., Dispense di idrogeologia applicata parte I, Engineering

Giannoli, L., Vacca, S., (2017), Progettazione di un apparato di laboratorio per lo studio del Test di Risposta Termica del terreno in presenza di moto di falda, Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Milano, Relatori: Angelotti, A., Molinaroli, L.

Grippo, I., Sciandrone, M., Metodi di ottimizzazione per le reti neurali, Università degli Studi di Roma "Tor Vergata"

Incropera, F., Bergman, T., L., Lavine, A., S., Dewitt, D., P., (2011), Introduction to Heat Transfer, United States of America:John Wiley & Sons, Inc.

International Energy Agency IEA, (2022), The Future of Heat Pumps, France

International Energy Agency IEA, (2022), World Energy Outlook, France

International Energy Agency IEA, (2021), World Energy Outlook, France

La Rosa, M., (2019), Studio di fattibilità di un impianto geotermico a pompa di calore in un condominio a Cuneo, Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino, Relatori: Relatori: Casasso, A., Sethi, R., Della Valentina, S.

Masoero, M.C., Materiale del corso 'Progettazione di impianti termotecnici', corso di laurea in Ingegneria Energetica e Nucleare - Politecnico di Torino, anno accademico 2021/2022, titolare: prof. Masoero, M.C."

Massachusetts Institute of Technology, The Future of Geothermal Energy

Materiale del corso 'Risorse idriche', corso di laurea in Ingegneria civile e ambientale - Politecnico di Bari, anno accademico 2022/2023"

Nielsen, M., A., (2015) Neural Networks and Deep Learning, Determination Press

Taddia, G., Materiale del corso 'Geothermal Energy', corso di laurea in Ingegneria Energetica e Nucleare - Politecnico di Torino, anno accademico 2021/2022, titolare: prof. Taddia G."

Taylor, C.A. and Stefan, H.G. (2009), Shallow groundwater temperature response to climate change and urbanization, Journal of Hydrology

United Nations Environment Programme (2022).2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector, Nairobi.

United Nations Environment Programme (2021).2021 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector, Nairobi.

Violante, A.C., Guidi, G., (2020), Geotermia a bassa entalpia e decarbonizzazione, ENEA, Roma

Lista di pubblicazioni del candidato

Poveromo, A., Insana, A., Papurello, D., Barla, M., (2023), A neural network approach for quick dimensioning of energy walls, Symposium on Energy Geotechnics, Delft, Netherlands (Under Review)