

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile



Tesi di Laurea Magistrale

***Analisi dell'utilizzo di un sistema energetico
contro terra per la climatizzazione di edifici***

Relatori

Prof. Marco Barla

Ing. Matteo Baralis

Candidata

Federica Tofalo

Dicembre 2019

*“Affiancatevi sempre
a persone che credono in voi
e vi incoraggiano”
Alla mia famiglia.*

SOMMARIO

Indice	IX
Indice delle figure	IX
Indice delle tabelle	XIII
1. Introduzione.....	1
1.1 Risparmio energetico e fonti rinnovabili.....	1
1.2 Obiettivi e struttura della tesi	5
2. La geotermia.....	7
2.1 Geotermia ad alta e a bassa entalpia	7
2.1.1 Le pompe di calore a compressione	9
2.2 Impianti “Open loop”	13
2.3 Impianti “Closed loop”	15
2.3.1 I principali meccanismi di scambio termico nel terreno	15
2.3.2 Le sonde verticali	17
2.3.2.1 Il Ground Response Test.....	19
2.3.2.2 La prova in cantiere e l’elaborazione dei dati.....	20
2.3.2.3 La procedura di installazione in cantiere	25
2.3.2.4 Il montaggio del collettore	28
2.3.2.5 Il metodo di dimensionamento secondo l’ASHRAE.....	30
2.3.1 I collettori orizzontali	36
2.3.1.1 La posa in cantiere	39
2.4 Geostrutture energetiche	41
2.4.1 I pali energetici	42

2.4.3	I tunnel energetici	45
2.4.2	I muri energetici	47
2.5	La normativa in ambito geotermico	50
2.5.1	Il quadro europeo e americano	50
2.5.2	Il quadro normativo in Italia.....	52
2.5.3	Le direttive della regione Piemonte.....	52
2.5.3.1	Le Linee Guida per le sonde geotermiche	55
3.	Il contesto torinese.....	57
3.1	Il patrimonio storico	57
3.1.1	Le principali tipologie edilizie.....	58
3.1.2	Le zone climatiche italiane	60
3.1.2.1	La geologia e l'idrogeologia	61
3.2	Il Regolamento Edilizio e le disposizioni per i parcheggi interrati.....	66
3.2.1	Il permesso di costruire	66
3.2.2.	La legge Tognoli.....	67
3.3	La normativa energetica di riferimento in Italia	67
3.3.1	Disposizioni vigenti in materia di energia da fonti rinnovabili.....	69
3.3.2	Metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche	70
3.3.3	La certificazione energetica.....	71
3.3.3.1	Gli edifici di nuova costruzione e le ristrutturazioni	74
3.3.4	Le agevolazioni per il risparmio energetico	75
3.4	Il quadro riassuntivo delle principali disposizioni	77
4.	Il campo sperimentale geothermskin.....	79
4.1	Il campo sperimentale	79
4.1.1	La fattibilità degli interventi.....	80
4.1.2	Le fasi costruttive	83
4.1.3	La descrizione del campo sperimentale.....	87
4.1.4	Il sistema di sensoristica.....	88

4.1.5	Il sistema di acquisizione dei dati.....	93
4.2	La campagna di prove	95
4.2.1	Le prove di raffrescamento.....	98
4.2.1.1	Prova 1: raffrescamento con circuito 2 e 3 in serie.....	99
4.2.1.2	Prova 2: raffrescamento con il circuito 3.....	104
4.2.2	La prova di riscaldamento	107
4.2.2.1	Analisi della temperatura del fluido all'ingresso e all'uscita dalle sonde	109
4.2.3	La potenza estraibile per un condominio.....	113
5.	L'utilizzo del calore.....	115
5.1	Il fabbisogno energetico dell'edificio	115
5.1.1	L'approccio del progetto TABULA	116
5.1.1.1	Le tipologie edilizie, costruttive ed impiantistiche.....	117
5.1.2	La modellazione con TerMus	122
5.1.2.1	Le stratigrafie adottate	125
5.1.2.2	Le ombre e i ponti termici.....	131
5.1.2.3	Il calcolo della prestazione energetica	134
5.2	L'integrazione con altre fonti rinnovabili	137
6.	Conclusioni.....	141
7.	Allegati	145
7.1	Tabella delle potenze estraibili per l'intero ciclo.....	145
7.2	Tabella delle potenze estraibili nel tempo.....	155
8.	Bibliografia.....	159
9.	Sitografia	161

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 – Percentuale del consumo energetico da fonti rinnovabili (Eurostat, 2016)	2
Figura 2 – Capacità di energia geotermica per l'elettricità e per il riscaldamento	3
Figura 3 – Diagramma dell'andamento della temperatura del sottosuolo (www.expoclima.net).....	8
Figura 4 – Schematizzazione delle componenti di un impianto geotermico a circuito chiuso (BRGM).....	8
Figura 5 – Meccanismo di funzionamento di una pompa di calore.....	10
Figura 6 – Sistema geotermico aperto con pozzo di estrazione e di iniezione (BRGM)	13
Figura 7 – Posizionamento delle sonde verticali	18
Figura 8 – Schema di funzionamento del Ground Response Test (eneren.it)	21
Figura 9 – Analogia elettrica e grafico dell'abbattimento di temperatura in funzione del raggio (Geotermia per la climatizzazione, §4.5).....	23
Figura 10 – Trilama e tricono	26
Figura 11 – Strumentazione adottata per la perforazione	27
Figura 12 – Tubazioni di mandata e ritorno unilaterale e alternato (Dodinelli M. & M., Caleffi S.P.A., 2010).....	28
Figura 13 – Collegamento tra tubazioni e collettore (Dodinelli M. & M., Caleffi S.P.A., 2010).....	29
Figura 14 – Diagramma per determinare la resistenza termica del terreno (Capozza A., Linee Guida per la progettazione dei campi geotermici per pompe di calore, Cap 6, 2012)	33
Figura 15 – Valori relativi al fattore di perdita (Capozza A., Linee Guida per la progettazione dei campi geotermici per pompe di calore, Cap 6, 2012)	34
Figura 16 – Disposizione dei collettori orizzontali secondo Geonovis	36
Figura 17 – Le diverse geometrie degli scambiatori (Dodinelli M. & M., Caleffi S.P.A., 2010).....	37

Figura 18 – Disposizione delle tubazioni nel caso di scambiatori ad anello (Dodinelli M. & M., Caleffi S.P.A., 2010).....	38
Figura 19 – Configurazioni dei collettori a canestro (Dodinelli M. & M., Caleffi S.P.A., 2010).....	39
Figura 20 – Esempio di disposizione delle sonde all'interno dei pali energetici	43
Figura 21 – Esempio di disposizione delle tubazioni all'interno della gabbia di armatura dei pali energetici (Brandl, H., 2006)	44
Figura 22 – Schematizzazione del rivestimento di una galleria e assemblaggio dell'armatura sui conci (www.teknoring.com).....	46
Figura 23 – Principali proporzioni per muri di sostegno a gravità (a), a mensola (b), a contrafforti e speroni (c)	48
Figura 24 – Dati relativi alla produzione di potenza elettrica annua e per abitante (geothermie-schweiz.ch).....	51
Figura 25 – Stralcio della Tavola 7, Piano di Tutela della Acque della Regione Piemonte	54
Figura 26 – Edificio tipo con serpentine ancorate lungo il perimetro del muro di sostegno	58
Figura 27 – Zone climatiche italiane (www.certifico.com).....	60
Figura 28 – Schema delle unità metamorfiche della Regione Piemonte (Irace A. & al., Geologia e idro stratigrafia profonda della Pianura Padana Occidentale, pag. 9).....	63
Figura 29 – Esempio di attestato di certificazione energetica	73
Figura 30 – Valori di detrazione massima per i principali interventi	76
Figura 31 – Inquadramento dell'Energy Center con Google Maps	79
Figura 32 – Energy Center.....	80
Figura 33 – Estratto del Foglio 8B del PRG di Torino contenente le sigle (u e cr) relative destinazione d'uso.....	81
Figura 34 – Stralcio della tavola II, La Spina Centrale, la Spina 2	82
Figura 35 – I sistemi di contrasto installati.....	84
Figura 36 – Livellazione dello strato di magrone	85
Figura 37 – Sistemazione finale delle serpentine	86
Figura 38 – Render del muro di sostegno	86
Figura 39 – Disposizione geometrica delle serpentine con quotatura in cm	87
Figura 40 – Sezione laterale con i piani di riferimento (la quotatura è in cm).....	88
Figura 41 – Sensore di temperatura	89
Figura 42 – Barretta estensimetrica	90

Figura 43 – Cella di pressione a base rettangolare	90
Figura 44 – Disposizione orizzontale delle celle di pressione.....	91
Figura 45 Disposizione verticale delle celle di pressione.....	91
Figura 46 – Sensore Sentek drill & drop probe	92
Figura 47 – Misuratore TEROS 21.....	93
Figura 48 – Unità di acquisizione dei dati	94
Figura 49 – A partire da sinistra: il vaso di accumulo, il ventilconvettore e la pompa di calore.....	95
Figura 50 – Misuratori di portata.....	96
Figura 51 – Conta calorie.....	97
Figura 52 – Schema di flusso del liquido refrigerante in condizioni di raffrescamento. 98	
Figura 53 – Grafico prova 1, temperatura di mandata dell’impianto (BT2) e temperatura di ritorno del fluido (BT3)	99
Figura 54 – Grafico BT2, BT3 ciclo completo della prova 1	100
Figura 55 – Grafico ciclo ct, ht generale	100
Figura 56 – Valori di C8-T1 dal 16 al 23 settembre.....	103
Figura 57 – Valori di C8-T6 dal 16 al 23 settembre	103
Figura 58 – Grafico prova 1 temperatura di mandata dell’impianto (BT2) e temperatura di ritorno del fluido (BT3) del 24 settembre.....	104
Figura 59 – Grafico temperatura di mandata dell’impianto (BT2) e temperatura di ritorno del fluido (BT3), ciclo completo della prova 2 del 24 settembre	105
Figura 60 – Schema di flusso del liquido refrigerante in condizioni di raffrescamento	107
Figura 61 – Valori di C8-T1 e C8-T6 per il 29 e 30 ottobre.....	108
Figura 62 – Grafico della temperatura del fluido in ingresso e in uscita dalle serpentine del 23 al 31 ottobre	109
Figura 63 – Grafico della temperatura del fluido in ingresso e in uscita dalle serpentine del 29 e 30 ottobre	110
Figura 64 – Grafico della temperatura del fluido in ingresso e in uscita dalle serpentine del 29 e 30 ottobre per un ciclo.....	111
Figura 65 – Posizionamento delle serpentine lungo il muro di sostegno di un edificio	113
Figura 66 – Le principali tipologie edilizie in Italia che caratterizzano la fascia climatica media.....	117
Figura 67 – Pagina 1 della scheda illustrativa per un blocco di appartamenti.....	119
Figura 68 – Pagina 2 della scheda illustrativa per un blocco di appartamenti.....	120

Figura 69 – Dati generali TerMus.....	122
Figura 70 – Pianta architettonica di riferimento	123
Figura 71 – Impostazioni per il posizionamento del nord	124
Figura 72 – Impostazioni della pompa di calore.....	125
Figura 73 – Chiusura verticale opaca con isolamento a cappotto.....	126
Figura 74 – La partizione verticale opaca isolata	126
Figura 75 – La partizione verticale opaca che separa gli alloggi.....	127
Figura 76 – La partizione verticale opaca.....	127
Figura 77 – Solaio prefabbricato in calcestruzzo con lastre Predalles	128
Figura 78 – Solaio interpiano.....	129
Figura 79 – Solaio di copertura.....	129
Figura 80 – Impostazioni per i vani	130
Figura 81 – Impostazioni per l’inserimento delle schermature	131
Figura 82 – Impostazioni per l’inserimento degli oggetti orizzontali e verticali.....	131
Figura 83 – Schematizzazione del ponte termico PT_01	133
Figura 84 – Mesh e andamento della temperatura per il ponte termico PT_01	133
Figura 85 – Andamento delle isoterme per il ponte termico PT_01.....	134
Figura 86 – Classe energetica dell’edificio.....	135
Figura 87 – Valori per i requisiti minimi di un edificio in classe A3	136
Figura 88 – Ipotesi 1 di suddivisione del fabbisogno minimo di energia da fonti rinnovabili.....	139
Figura 89 – Ipotesi 2 di suddivisione del fabbisogno minimo di energia da fonti rinnovabili.....	139

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 – Temperature minime, massime e medie per la città di Torino (Climate – Data.org)	61
Tabella 2 – Intervalli di permeabilità.....	64
Tabella 3 – Resa termica in funzione della conducibilità termica media	64
Tabella 4 – Tabella riassuntiva dei risultati della prova 1 e della prova 2	106
Tabella 5 – Tabella riassuntiva per il calcolo della potenza estraibile	111
Tabella 6 – Valori di potenza estraibile	113
Tabella 7 – Confronto tra i valori ottenuti con TABULA e con TerMus.....	137
Tabella 8 – Potenziale estraibile nelle prove di raffrescamento e di riscaldamento.....	142
Tabella 9 – Potenze estraibili per il circuito “lato sonde”	154
Tabella 10 – Potenze estraibili per il circuito “lato sonde” per il periodo di attivazione del compressore	157

1. INTRODUZIONE

La necessità di adottare fonti di energia rinnovabili che non prevedano o che riducano l'utilizzo di combustibili fossili come gas, petrolio e carbone, deriva per lo più dal problema del riscaldamento globale. L'uomo, a partire dalla rivoluzione industriale, ha cominciato a produrre energia servendosi degli idrocarburi e avendo come risultato l'emissione di gas serra che catturano il calore atmosferico causando una serie di cambiamenti delle condizioni climatiche e danneggiando numerose specie viventi. A partire dalla presa di coscienza di questo grave problema sono stati posti alcuni obiettivi con il protocollo di Kyoto (1997) dando inizio ad una politica energetica basata sulla riduzione di tali emissioni: entro il 2020 si intende ridurre la produzione di gas serra del 20% rispetto alle emissioni del 1990. La riduzione della dipendenza dai mercati dei combustibili fossili è messa a punto incentivando le fonti di energia rinnovabili tra cui l'energia eolica, l'energia solare, l'energia idroelettrica, l'energia mareomotrice e l'energia geotermica.

1.1 RISPARMIO ENERGETICO E FONTI RINNOVABILI

A partire dal 2007 l'Europa ha dato il via ad una nuova politica energetica: il 13 dicembre, tramite il *Trattato di Lisbona* (art. 194) si evidenzia l'importanza di garantire il funzionamento del mercato interno e la sicurezza dell'approvvigionamento energetico dell'Unione Europea promuovendo il risparmio energetico e l'interconnessione delle reti energetiche. Una svolta importante è rappresentata dal documento "Una politica energetica per l'Europa", firmato il 10 gennaio 2007, che fissa gli obiettivi per il futuro evidenziando le strategie e le problematiche non solo legate all'impatto ambientale, ma anche all'aspetto geopolitico, economico, sociale e culturale (Musto F.M. e Duca G., 2017). Tali obiettivi, caratterizzati da vincoli di natura giuridica, stabiliti dalla direttiva 2009/28/CE, portano gli Stati membri a adottare piani d'azione con lo scopo di promuovere le energie rinnovabili.

Il grafico in Figura 1, realizzato dall'Eurostat, mostra la situazione europea del 2016: la Svezia è lo Stato con la quota di utilizzo di energia da fonti rinnovabili maggiore (53,9%) ed è seguita dalla Finlandia (38,7%) e dalla Lettonia (37,2%). La percentuale di energia rinnovabile raggiunta riguarda tre diversi settori, quello dell'energia elettrica, quello dei trasporti e quello del riscaldamento e del raffrescamento.

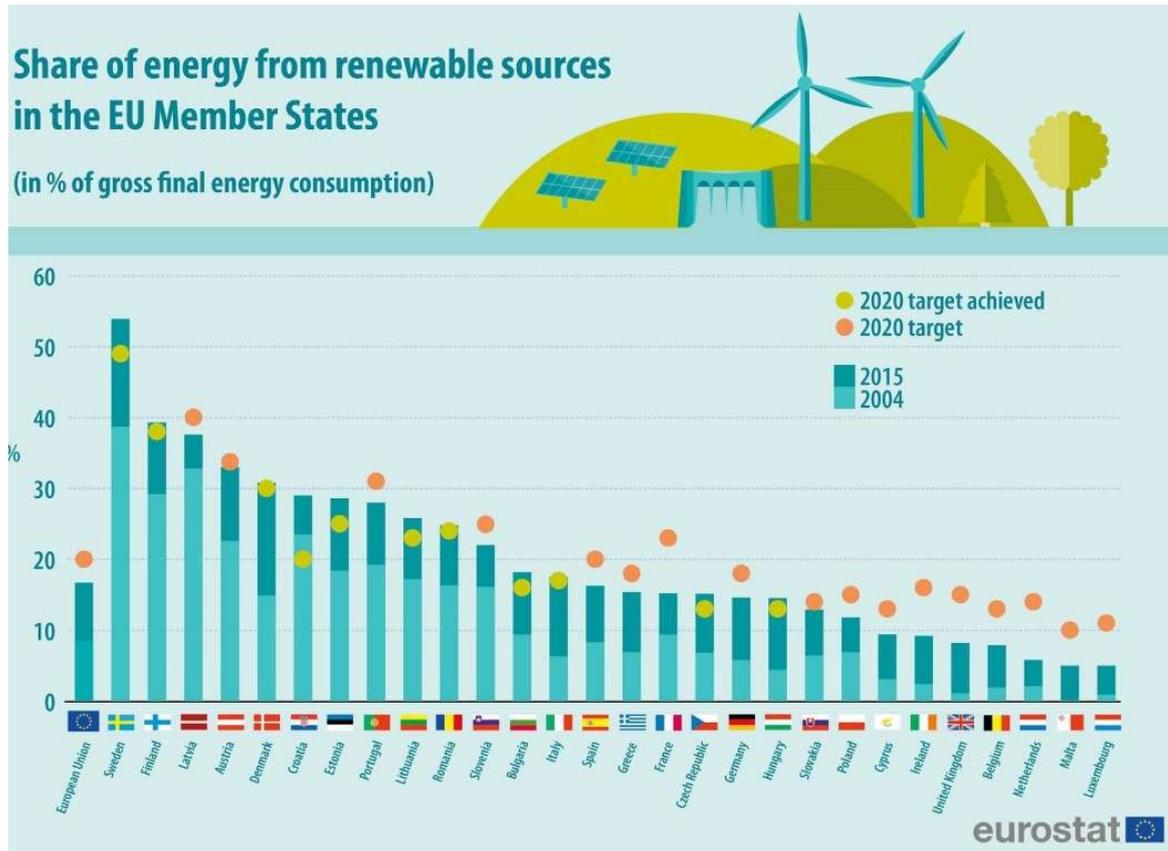


Figura 1 – Percentuale del consumo energetico da fonti rinnovabili (Eurostat, 2016)

È interessante citare l'EGEC (European Geothermal Energy Council), un'organizzazione no-profit nata nel 1998 che ogni anno, a partire dal Dicembre 2011, pubblica un report con lo scopo di rendere noti i dati e gli sviluppi del mercato geotermico per la produzione di elettricità, per il riscaldamento e il raffrescamento. La sede è collocata a Bruxelles e ospita circa 120 membri provenienti da 28 paesi diversi che lavorano sugli aspetti politici, di mercato e del settore della comunicazione con lo scopo di creare una collaborazione sempre più stretta tra il settore industriale e le istituzioni europee. La Figura 2, inserita nel report datato Giugno 2019, riporta i valori delle potenze, espresse in MW, relative agli impianti geotermici per il riscaldamento e il raffrescamento e per la produzione di elettricità in Europa.

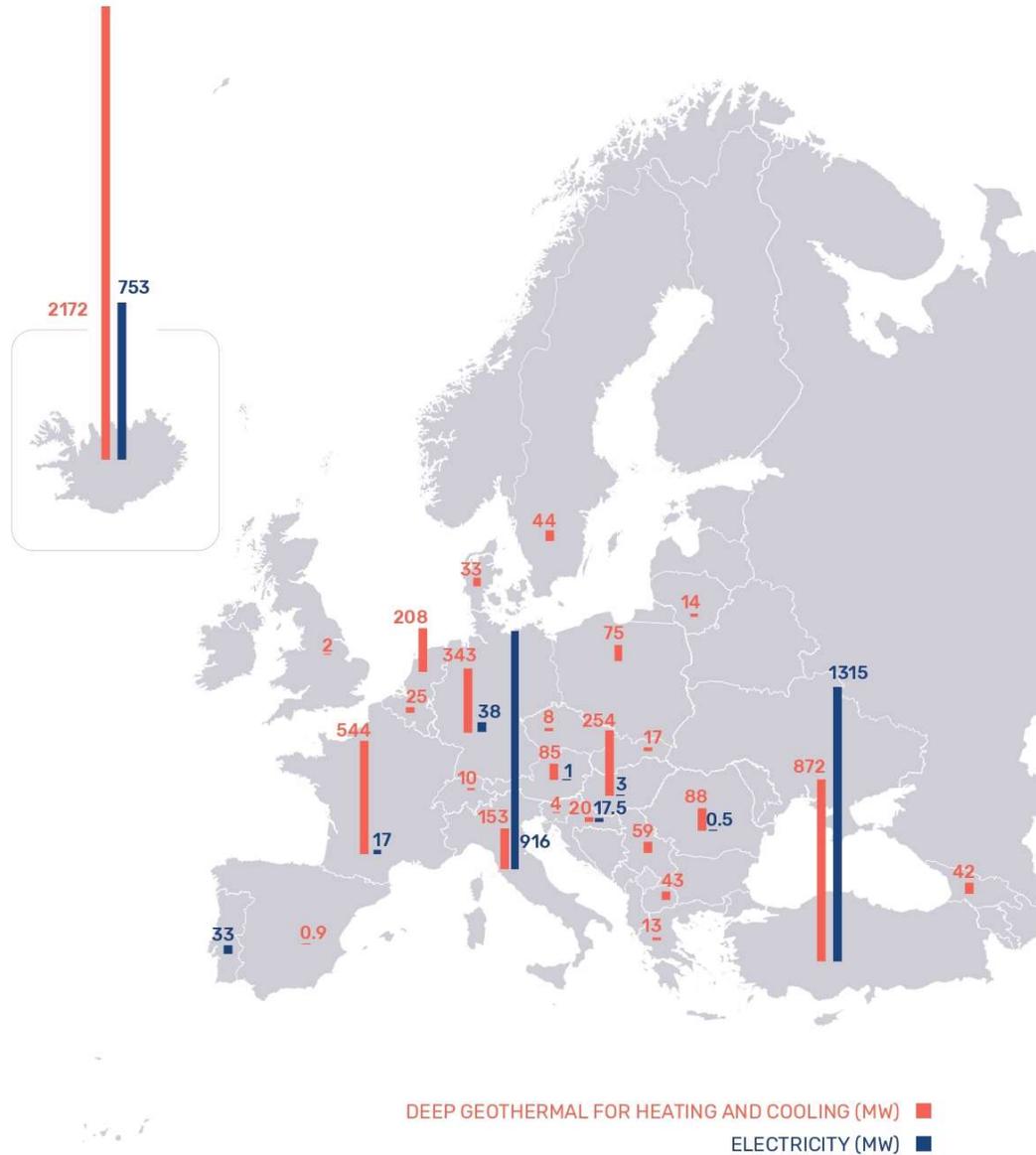


Figura 2 – Capacità di energia geotermica per l'elettricità e per il riscaldamento

Oltre a fornire una visione statistica, la pubblicazione dell'EGEC pone la sua attenzione sugli aspetti di mercato, sulle evoluzioni tecnologiche e sulle politiche che governano il settore della geotermia. Come riportato dall'EGEC, nel 2018 la capacità totale installata in Europa è misurata in megawatt elettrico e raggiunge il valore di 3,091 MWe, che corrisponde a 127 impianti geotermici in opera per la produzione di energia elettrica. Questi valori mostrano come il mercato geotermico per l'energia elettrica sia in rapida crescita. Nel corso degli anni anche la geotermia ad alta profondità per il riscaldamento e il raffrescamento degli ambienti ha visto lo sviluppo numerosi progetti dal settore dell'industria agroalimentare a quello edilizio e deve la sua diffusione agli investimenti di numerose aziende. Durante il 2018 sono stati commissionati o rinnovati 12 impianti

geotermici ad alta profondità arrivando ad una capacità totale di 149 MWth (megawatt termico), la maggior parte della quale prodotta dai Paesi Bassi (circa 66 MWth).

Invece, il settore della geotermia superficiale abbinato alla tecnologia delle *Ground Source Heat Pumps (GSHP)* è caratterizzato da una crescita più lenta nonostante il suolo europeo presenti le condizioni ottimali al suo sviluppo: infatti, la geotermia a bassa entalpia impiega l'energia a temperature più basse per il riscaldamento e il raffrescamento degli edifici. A partire dal 2018 è stata stimata una capacità minima installata di 23.000 MWth distribuita su più di 1,9 milioni di installazioni GSHP. Nel caso di sistemi geotermici superficiali, le stime individuate dall'EGEC a partire dal 2012 derivano dalla combinazione dei dati di vendita delle pompe di calore, dalla visione di insieme dell'EurObserv'ER che riporta la condizione delle energie rinnovabili in Europa, dalle conferenze EGC 2016 (European Geothermal Congress) e WGC 2015 (World Geothermal Congress) e dai risultati dell'Eurostat del 2017. Per cui, la maggior parte delle informazioni è riferita ai dati del 2017, mentre i valori del 2018 riguardano solo Germania, Francia e Svizzera.

Secondo l'EGEC Geothermal Market Report (2018), il settore geotermico è in costante crescita e deve il suo sviluppo anche all'introduzione di nuove tecnologie che hanno portato alla costruzione dei primi impianti geotermici nel 2017 in Ungheria e nel 2018 in Croazia.

Tutti questi valori mostrano come l'energia termica immagazzinata nel terreno rappresenti una risorsa rinnovabile il cui sviluppo cresce di pari passo con l'innovazione tecnologica che permette di ottimizzare gli impianti riducendo le emissioni di gas serra e i consumi in termini economici arrivando alla “decarbonizzazione” dell'economia europea. Per i prossimi anni è già stata programmata una nuova politica energetica per i paesi europei per la riduzione del 40% delle emissioni entro il 2030 e dell'80% delle emissioni entro il 2050.

Negli ultimi anni si è potuto constatare che all'ottimizzazione dei sistemi impiantistici è associato il concetto di edifici ad elevate prestazioni energetiche, chiamati *Nearly Zero Energy-Buildings* basato sull'individuazione di soluzioni tecnologiche e smart che portino i nuovi edifici a consumare quasi zero energia. A partire da questa idea nasce il progetto europeo CoNZEBS (Solution sets for the Cost reduction of new Nearly Zero-

Energy Buildings) finanziato dal programma di ricerca europeo Horizon 2020 che coinvolge Germania, Italia, Danimarca e Slovenia e che ha come periodo di realizzazione quello che va dal 1° giugno 2017 al 30 novembre 2019. Per la sua concretizzazione sono state analizzate le prestazioni in base al life cycle costs (LLC) e al life cycle assessment (LCA) di diverse soluzioni impiantistiche per case plurifamiliari. Le soluzioni tecnologiche proposte mirano all'incremento delle prestazioni energetiche e riguardano il risparmio economico per l'installazione di sistemi impiantistici e per i sistemi di generazione come il teleriscaldamento a bassa temperatura che sfrutta fonti energetiche rinnovabili (FER) e sistemi energetici rinnovabili (RES). Per cui, a partire dalla concezione di un edificio ad elevate prestazioni si minimizza la domanda energetica riducendo di fatto i consumi totali e l'impatto ambientale. In Italia si stimano attualmente tra 650 e 850 edifici NZEB nel campo dell'edilizia residenziale.

1.2 OBIETTIVI E STRUTTURA DELLA TESI

La presente tesi ha lo scopo di descrivere il funzionamento generale di un impianto geotermico a bassa entalpia e riportare i risultati sperimentali riguardanti la realizzazione di un muro di sostegno energetico per la climatizzazione degli edifici in superficie dimostrando l'efficienza degli impianti geotermici.

Nella prima parte dell'elaborato verranno descritti i meccanismi principali di funzionamento dei sistemi geotermici evidenziando i principi e le applicazioni alla base di questa tecnologia. In particolare, il secondo capitolo affronta il tema della geotermia illustrando i concetti base legati alla geotermia ad alta e a bassa entalpia e i meccanismi che governano lo scambio di calore nel terreno. Saranno descritti gli elementi che costituiscono un impianto geotermico in riferimento all'impianto di produzione del calore costituito dalle pompe di calore e i rendimenti durante il periodo invernale ed estivo. Verrà fatta una distinzione tra gli impianti open loop e closed loop spiegando il meccanismo di funzionamento delle sonde geotermiche verticali e dei collettori orizzontali. Per le sonde verticali verrà illustrato il test necessario a determinare le caratteristiche del terreno, la procedura di installazione in cantiere e i metodi di dimensionamento più utilizzati.

La quarta parte del capitolo si concentrerà sulle geostrutture energetiche più diffuse, quali pali di fondazione, muri e tunnel energetici descrivendo le modalità di funzionamento e

di costruzione in cantiere. Nell'ultima parte del secondo capitolo verrà delineato il quadro normativo europeo, con particolare riferimento a quello italiano.

Alcune direttive nazionali riguardanti il campo energetico ed ambientale possono essere individuate all'interno del Codice civile e della normativa UNI; nel caso specifico della regione Piemonte è stato possibile citare il Piano di Tutela delle Acque, le Linee Guida per l'installazione delle sonde geotermiche (2016) e alcuni decreti legislativi per la tutela dell'aria e la riduzione delle emissioni.

Nel terzo capitolo dopo aver descritto le principali tipologie edilizie, le caratteristiche climatiche e geologiche in riferimento all'area metropolitana di Torino, si delinea il quadro normativo italiano a livello energetico per l'emissione dell'attestato di certificazione energetica e per le agevolazioni fiscali connesse all'introduzione di energia da fonti rinnovabili.

La seconda parte della tesi è legata ad un caso studio: nel quarto capitolo verrà descritto il campo sperimentale dell'Energy Center, la fattibilità degli interventi in funzione delle prescrizioni fornite dal PRG di Torino, le fasi costruttive e il sistema di sensoristica installato.

Successivamente, a partire dall'interpretazione dei risultati delle prove eseguite in fase di raffrescamento e riscaldamento verrà analizzato il fabbisogno energetico dell'edificio valutando la capacità di climatizzazione del solo sistema geotermico e proponendo soluzioni riguardanti altre fonti di energia rinnovabili ad integrazione del sistema geotermico installato. A fronte dei dati ottenuti dalle prove sperimentali si è deciso di adottare due diversi approcci per l'analisi delle caratteristiche energetiche di un edificio tipo: il primo approccio fornisce il fabbisogno energetico in funzione di dati raccolti in letteratura; il secondo ha portato alla modellazione accurata di un edificio tipo attraverso il software TerMus. Entrambe le metodologie hanno come scopo quello di ottenere un valore per il fabbisogno energetico dell'edificio che sia confrontabile con la potenza estraibile dal sistema geotermico installato all'Energy Center.

2. LA GEOTERMIA

2.1 GEOTERMIA AD ALTA E A BASSA ENTALPIA

Lo studio della produzione e del trasporto di calore attraverso il terreno prende il nome di geotermia. Il termine deriva da due parole greche “geo” e “thermos” che significano rispettivamente “terra” e “caldo” ed indicano una delle forme di energia rinnovabile più diffuse. Oltre alla geotermia esistono altri sistemi per la produzione di energia tramite fonti rinnovabili; sempre più spesso per l'alimentazione degli impianti di riscaldamento e raffrescamento si utilizza l'energia prodotta dai pannelli fotovoltaici o solari termici.

Il territorio italiano si presta allo sviluppo della geotermia grazie alle caratteristiche favorevoli del sottosuolo; il buon funzionamento di un impianto geotermico è strettamente legato alla conduttività termica ovvero la capacità del terreno di trasferire il calore per conduzione e alla capacità termica di volume che rappresenta il calore rilasciato da 1 unità di volume di roccia come risultato di una variazione di temperatura di 1°K.

È opportuno distinguere due principali applicazioni dell'energia geotermica: i sistemi ad alta entalpia e a bassa entalpia. Per geotermia *ad alta entalpia o deep Geothermal* si intende quell'ambito della geotermia che sfrutta il calore proveniente da fluidi caldi, come i sistemi idrotermali. In questi impianti, collocati a profondità che variano da decine di metri a diversi chilometri, le temperature sono molto elevate, da 100° a 350°C e il calore viene convertito in energia elettrica tramite turbogeneratori.

Invece, si parla di geotermia *a bassa entalpia o geotermia superficiale* per indicare quel ramo della geotermia che sfrutta il calore proveniente dallo strato superficiale del suolo, fino a 100-200 m di profondità generalmente caratterizzato da una temperatura inferiore a 40°C. In Italia il terreno presenta una temperatura costante di 12°-14° C da 10 m a 100 m che aumenta con la profondità in base alle caratteristiche del sottosuolo e alla presenza di acqua: vi è un incremento di 3°C ogni 100 m. In Figura 3 è possibile osservare l'andamento della temperatura del terreno durante i mesi invernali ed estivi in funzione della profondità (Expoclima).

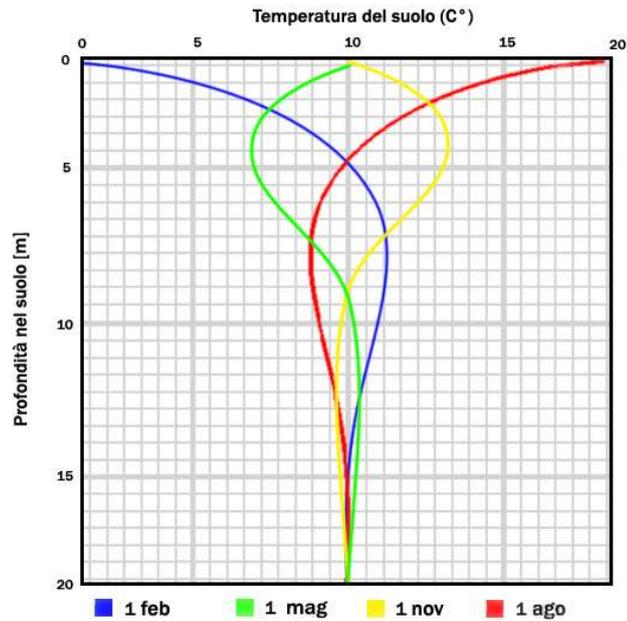


Figura 3 – Diagramma dell'andamento della temperatura del sottosuolo (www.expoclima.net)

Generalmente un impianto geotermico superficiale per il riscaldamento è costituito da due sistemi, uno per la produzione di calore e uno per la sua distribuzione. Il primo è rappresentato dall'impianto geotermico di riscaldamento che lavora assieme alla pompa di calore, una macchina termica che trasferisce il calore ai locali interni dell'edificio mediante i terminali di impianto come pannelli radianti, radiatori o ventilconvettori.

In Figura 4 si riporta una schematizzazione delle componenti di un impianto geotermico closed loop fornita dal servizio geologico nazionale francese (BRGM, Bureau de Recherches Géologiques et Minières).

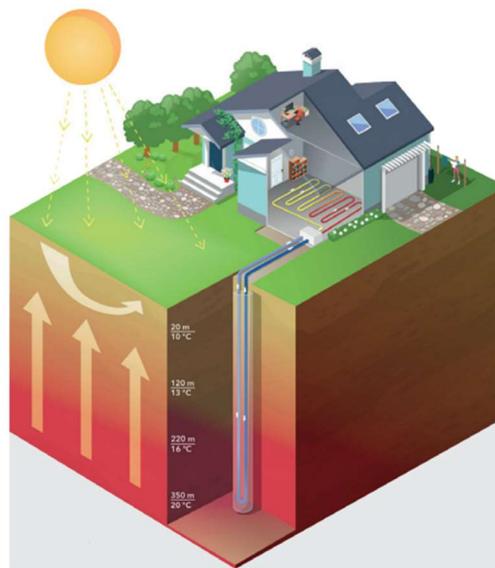


Figura 4 – Schematizzazione delle componenti di un impianto geotermico a circuito chiuso (BRGM)

2.1.1 LE POMPE DI CALORE A COMPRESSIONE

L'evoluzione di queste macchine termiche si ha a partire dagli anni '70 quando, in seguito alle numerose crisi energetiche si comincia a parlare di risparmio energetico e vengono installate le prime pompe di calore negli Stati Uniti. Successivamente, negli anni '90 il loro sviluppo si diffonde in Giappone e in Nord Europa, dove si adottano macchine termiche per il riscaldamento degli edifici che sfruttano il calore proveniente dall'acqua di falda. Il dimensionamento deve essere eseguito tenendo conto di diversi fattori come la tipologia di involucro edilizio, le condizioni climatiche, il tipo di impianto e la sorgente termica scelta.

Il funzionamento della macchina è di tipo ciclico e si basa su quattro trasformazioni principali: evaporazione, compressione, condensazione ed espansione. Tramite l'energia elettrica viene riscaldato il fluido refrigerante presente all'interno del circuito e raggiungendo il punto di ebollizione si assiste alla sua evaporazione. All'interno del compressore, il fluido allo stato gassoso subisce un aumento di pressione e un ulteriore incremento di temperatura che verrà utilizzata per riscaldare gli ambienti dell'edificio. Questo scambio di calore provoca il passaggio di stato da gas a liquido all'interno del condensatore poiché il fluido diminuisce la sua temperatura, mantenendo tuttavia una pressione ancora elevata. Per tale motivo, attraverso una valvola di espansione (o di laminazione) è possibile riportare la pressione a quella iniziale e ricominciare un nuovo ciclo termodinamico.

Il fluido refrigerante deve essere scelto in funzione della pressione di condensazione ed evaporazione che deve essere moderata, del calore di vaporizzazione che deve essere elevato e del volume specifico del vapore saturo che deve essere più basso possibile per minimizzare la portata volumetrica.

Per la scelta del fluido refrigerante, come riporta Basta S. & Minchio F. (2008), occorre optare per una sostanza che non danneggi l'ozono stratosferico rispettando le prescrizioni che stabilisce il Protocollo di Montreal. Il fluido deve avere un contenuto ridotto di cloro e di fluoro per minimizzare l'impatto sull'ambiente, evitando anche problemi di infiammabilità.

Negli ultimi anni sono state intraprese numerose ricerche sull'utilizzo di nuovi fluidi a limitato impatto atmosferico e l'attenzione è stata posta soprattutto sui liquidi refrigeranti naturali, poiché già presenti nell'atmosfera e privi di cloro e fluoro.

Il sistema a pompa di calore più adatto viene scelto in base alla temperatura di lavoro del fluido e alla portata. In Figura 5 è stato riportato lo schema di funzionamento di una pompa di calore.

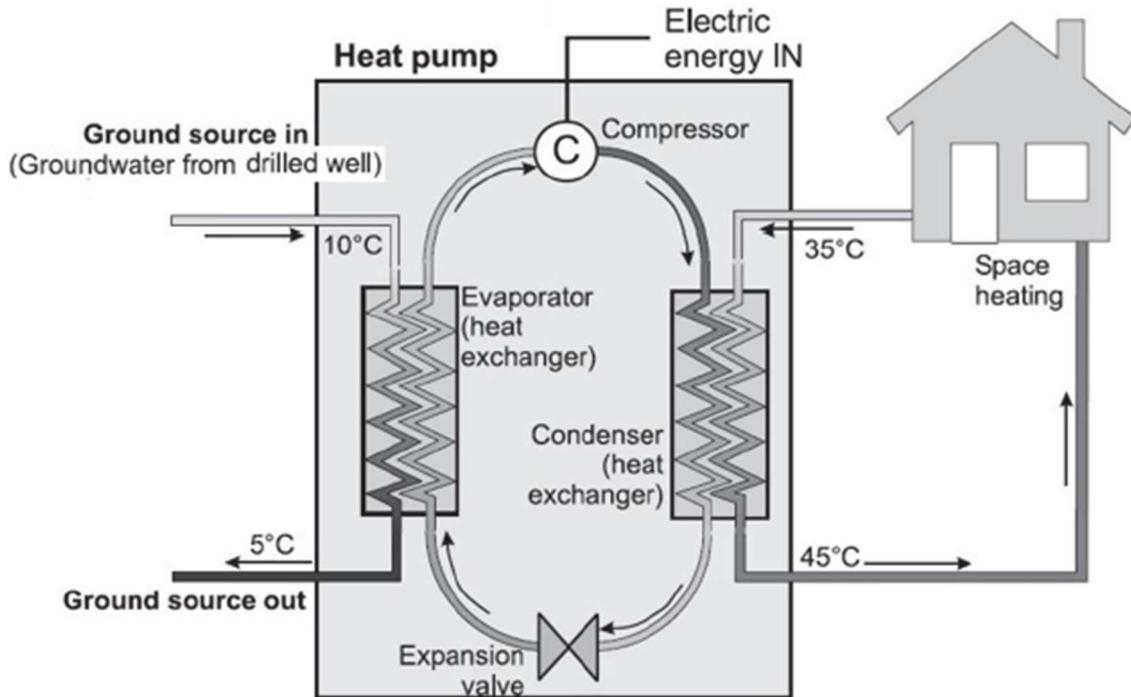


Figura 5 – Meccanismo di funzionamento di una pompa di calore

Nel caso in esame verrà analizzato il meccanismo di funzionamento delle pompe che scambiano il calore con il terreno attraverso il fluido termovettore passante per le sonde. La sua efficacia dipende anche dalla capacità del terreno di immagazzinare calore durante il periodo estivo rilasciandolo lentamente durante l'inverno.

Il Coefficient of Performance (COP) permette di quantificare il lavoro svolto dalla pompa di calore durante il periodo invernale e viene espresso dal rapporto tra la quantità di calore ottenuta e il lavoro fornito.

$$COP = \frac{Q}{L} [-]$$

Il COP massimo, che si ha quando il ciclo frigorifero è ideale e prende il nome di ciclo di Carnot poiché è totalmente reversibile, vale:

$$COP = \frac{T_1}{T_1 - T_0} [-]$$

Dove T_1 rappresenta la temperatura della sorgente calda, ovvero dei locali interni dell'edificio e T_0 è la temperatura della sorgente fredda, ovvero dell'ambiente. Tuttavia, nella realtà non è possibile ottenere il rendimento massimo: occorre tenere conto delle irreversibilità che incontra il meccanismo di funzionamento della pompa di calore. Un contributo delle irreversibilità avviene in corrispondenza della valvola di laminazione poiché non è possibile riportare tutto il fluido alla pressione iniziale, mentre l'irreversibilità interna più importante è dovuta alla non perfetta compressione del fluido.

Tutti questi fattori generano un COP ridotto del 50% rispetto al rendimento teorico di Carnot dovuto per lo più alla differenza di temperatura tra le due sorgenti. Infatti, l'efficienza energetica di una macchina termica aumenta se le temperature delle due sorgenti sono vicine.

Nel caso estivo, se il ciclo termodinamico della pompa di calore viene invertito si parla di *active cooling*, altrimenti se si sfrutta direttamente la differenza naturale di temperatura tra le sonde geotermiche e il terreno, (senza l'utilizzo della P.d.C) si assiste al meccanismo di *free cooling o natural cooling*, per cui sono necessarie particolari condizioni al contorno.

Durante l'active cooling, le componenti della P.d.C non cambiano ma la sua efficienza viene quantificata mediante l'Energy Efficiency Ratio (EER) espresso come rapporto tra il calore ceduto dall'ambiente interno e il lavoro fornito:

$$EER = \frac{Q}{L} [-]$$

Il coefficiente di refrigerazione assume valori più elevati rispetto al COP salendo anche fino a 5.

Come nel caso precedente, l'efficienza reale non è superiore alla metà dell'efficienza ideale, funzione della temperatura della sorgente fredda T_1 , rappresentata dai locali interni dell'edificio e della sorgente calda T_0 , corrispondente all'ambiente esterno.

La potenza termica della pompa di calore (P), nel caso invernale ed estivo mantiene la stessa espressione, tuttavia occorre tenere in considerazione che, nel caso estivo la temperatura in uscita dalla pompa di calore è maggiore della temperatura in entrata e per tale motivo nella relazione compare il segno negativo.

$$P = C_p \cdot Q \cdot \Delta T \left[\frac{kcal}{h} \right]$$

All'interno dell'espressione precedente $C_p \left[\frac{kcal}{^{\circ}C \cdot 1} \right]$ rappresenta il calore specifico del fluido, $Q \left[\frac{1}{h} \right]$ è la portata e $\Delta T [^{\circ}C]$ è la variazione di temperatura.

Il circuito è invertito rispetto al funzionamento invernale: il fluido termovettore riscaldato si trova allo stato gassoso e cede calore condensando. Anche in questo caso la valvola di espansione consente l'abbassamento di pressione del gas, che assorbe il calore del fluido proveniente dal luogo da raffrescare, provocando un nuovo cambiamento di stato. Ora il vapore a pressione minore fluisce nel compressore per essere riportato alle condizioni iniziali e ricominciare un nuovo ciclo.

Per cui, nel periodo invernale la pompa di calore utilizza il condensatore per scambiare calore tra il fluido termovettore e l'ambiente interno, mentre in estate tale passaggio di calore, nel verso opposto, avviene grazie all'evaporatore.

Nonostante i numerosi vantaggi nell'utilizzo di una pompa di calore geotermica in active cooling che impiega il terreno come serbatoio di stoccaggio "freddo", vi sono alcuni lati negativi. Uno di questi è legato al consumo di *exergia*, ovvero di energia elettrica che deve essere fornita all'impianto per poter sottrarre il calore dai locali interni e cederlo all'ambiente esterno. Tale consumo aumenta se è maggiore la differenza di temperatura tra il fluido termovettore e l'ambiente da raffrescare. Nella sua globalità il sistema a pompe di calore geotermico risulta in ogni caso vantaggioso sia a livello economico sia ambientale rispetto ad un normale impianto a P.d.C. aria-acqua funzionando in modalità reversibile pur mantenendo rendimenti elevati. Per ottenere una buona efficienza è fondamentale concepire fin da subito il sistema impiantistico più adatto e far procedere la progettazione architettonica, strutturale ed impiantistica di pari passo.

2.2 IMPIANTI “OPEN LOOP”

Gli impianti geotermici di riscaldamento e raffrescamento possono essere a circuito aperto (*open loop*) o chiuso (*closed loop*). Nel primo caso vi è uno scambio diretto tra la pompa di calore e il fluido termovettore rappresentato da acque sotterranee (falde) e acque superficiali (fiumi, laghi, mare e bacini artificiali) che non sono disponibili ovunque e la cui utilizzazione è soggetta a restrizioni e vincoli dettati da normative locali.

Le acque superficiali, come riferito da Basta S. & Minchio F. (2008) furono impiegate per la prima volta nel 1940 per la climatizzazione di un edificio commerciale e diedero il via alla diffusione degli impianti *open loop*, molti dei quali in Italia. Grazie alla presenza di due pozzi, uno di estrazione (o produzione) tramite il quale l'acqua viene estratta e un pozzo di iniezione volto all'immissione del fluido che ha subito lo scambio termico, è possibile sfruttare l'acqua superficiale a 10°-15°C o quella sotterranea a 10°-12°C. L'iniezione può avvenire direttamente da un lago o da un fiume o può verificarsi all'interno di un unico pozzo insieme al meccanismo di estrazione.

Un particolare sistema a circuito aperto è rappresentato dalle standing column well, il cui principio di funzionamento si basa sull'utilizzo di un unico pozzo per il prelievo e per la reimmissione: infatti, l'acqua viene prelevata a partire dal fondo del pozzo e al termine dello scambio termico all'interno della pompa di calore viene reimpressa nella parte superiore del pozzo. In Figura 6 è illustrato un sistema geotermico aperto con pozzo di estrazione.



Figura 6 – Sistema geotermico aperto con pozzo di estrazione e di iniezione (BRGM)

Prima dell'installazione di un sistema geotermico a circuito aperto occorre valutare alcuni fattori: il monitoraggio della qualità dell'acqua risulta fondamentale in quanto la presenza di ferro e manganese può causare incrostazioni, corrosioni e occlusioni dell'impianto. Altre sostanze, come calcite e sale possono essere problematiche per il corretto funzionamento del sistema. Un ulteriore fattore da considerare è la quantità di acqua disponibile che è funzione della permeabilità del sottosuolo e la possibilità di scaricare l'acqua utilizzata rispettando le normative locali.

Uno dei vantaggi dei sistemi open loop è il maggiore rendimento della pompa di calore dovuto al fatto che l'acqua prelevata non risente dello scambio termico, a differenza del terreno presente in prossimità delle sonde geotermiche. Questo significa che sono sistemi energeticamente più efficienti in quanto la temperatura dell'acqua si mantiene più stabile nel tempo.

Tuttavia, in alcuni casi può verificarsi il fenomeno del corto-circuito termo-idraulico che si manifesta quando l'acqua del pozzo di iniezione è termicamente alterata e influenza l'acqua del pozzo di produzione producendo un calo del rendimento energetico della pompa di calore. In generale, la scelta impiantistica dei sistemi a circuito aperto permette di risparmiare le superfici impiegate e la sua ottimizzazione dipende per lo più dal posizionamento del pozzo alla corretta profondità e dal collocamento dello scambiatore di calore. Gli impianti open loop sono spesso impiegati per edifici con elevati fabbisogni termici come centri commerciali, musei, cinema o grandi palazzine ad uso uffici.

A differenza dei sistemi closed loop, per i sistemi a circuito aperto, caratterizzati da perforazioni a elevata profondità sono maggiori i tempi necessari a richiedere le autorizzazioni per l'installazione e anche le operazioni successive di manutenzione possono risultare più costose.

2.3 IMPIANTI “CLOSED LOOP”

I sistemi impiantistici a circuito chiuso, oggetto della seguente tesi, utilizzano un fluido termovettore, generalmente acqua e glicole propilenico (liquido refrigerante) che scorre all'interno di sonde verticali note in letteratura con il nome di *BHE* (Borehole Heat Exchanger), pali di fondazione o collettori orizzontali (Shallow Heat Collectors) per fornire o estrarre il calore. Questa tipologia di sistema può essere installata in ogni luogo che abbia le caratteristiche del sottosuolo favorevoli e ha attuato il suo sviluppo per lo più in Europa (Svizzera, Germania, Austria e Svezia) dove le profondità variano in funzione della tipologia di suolo.

2.3.1 I PRINCIPALI MECCANISMI DI SCAMBIO TERMICO NEL TERRENO

Come già illustrato, il terreno scambia calore per conduzione con le strutture che vi sono immerse ed il fluido all'interno delle tubazioni, grazie al processo di convezione, aumenta la sua temperatura. Per cui, il meccanismo di trasporto del calore avviene secondo due modalità: la conduzione e la convezione. Il flusso conduttivo risulta proporzionale al gradiente di temperatura e segue la *Legge di Fourier*.

Si riporta l'espressione della legge di Fourier in coordinate cilindriche:

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \cdot \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial \Phi} \cdot \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial \Phi} \right) + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}$$

Dove:

- z [m] rappresenta l'altezza;
- r [m] è il raggio;
- Φ [°] è l'angolo longitudinale;
- $\lambda \left[\frac{W}{mK} \right]$ è la conduttività termica del terreno, ovvero il flusso di calore trasmesso attraverso un corpo di superficie di 1 m^2 e spessore pari a 1 m per una differenza di temperatura di 1 grado Kelvin;
- $\rho \cdot c \left[\frac{J}{m^3K} \right]$ è la capacità termica volumetrica, ovvero la quantità di calore da fornire ad un corpo per elevare di 1 grado Kelvin la sua massa unitaria;
- $q \left[\frac{W}{m^3} \right]$ è la potenza termica scambiata per unità di volume;

- $T[K]$ è la temperatura;
- $t[s]$ è il tempo.

Quando il calore si propaga per conduzione significa che si trasmette tra due corpi solidi a contatto a diversa temperatura e senza che avvenga trasporto di materia. All'interno di una sonda geotermica il calore fluisce attraverso le pareti del collettore, la malta cementizia e il terreno. Nel caso del terreno, il flusso di energia è la somma dei flussi di calore attraverso la fase fluida e solida. La conducibilità termica può essere scritta in funzione della porosità (n) e della conduttività termica del fluido (λ_f) e della matrice solida (λ).

$$\lambda = n\lambda_f + (1 - n)\lambda_s$$

Per tale motivo la soluzione della sonda geotermica è legata ad un problema a lungo termine.

Dall'altra parte, il fenomeno della convezione riguarda un tipo di trasporto di materia ed energia che avviene quando un fluido (come aria o acqua) entra in contatto con un corpo la cui temperatura è maggiore di quella del fluido stesso. Questo regola lo scambio termico tra il tubo freddo e il fluido caldo, dove però si verificano fenomeni di dispersione termica, motivo per cui le tubazioni presentano una dimensione limitata che può variare da 20 a 40 mm.

Il flusso geotermico (q) che si verifica nel terreno è responsabile del gradiente di temperatura. Il campo di temperatura nella terra viene assunto stazionario ed è funzione solo della profondità z .

La quota di estrazione del calore, secondo quanto riportato da *Claesson J. & Eskilson P.* nel 1987, rappresenta il calore totale estratto per lunghezza della sonda:

$$q_{Estratto} = \frac{Q}{H} \left[\frac{W}{m} \right]$$

Tale quota, a profondità molto elevate oltre la sonda, rimane costante. Invece, sulla superficie del suolo il flusso di calore, funzione del tempo e del raggio, si sovrappone al flusso geotermico naturale che normalmente attraversa la superficie del suolo.

$Q_s(t)$ rappresenta una delle due fonti di energia della sonda, chiamata “fonte di energia di contorno” poiché il calore arriva sia dal flusso geotermico, sia dall’ambiente.

Il contributo netto dell’ambiente è definito dall’integrazione del flusso totale alla superficie del terreno, cioè sottraendo al flusso superficiale il flusso geotermico naturale, attraverso l’area per cui fluisce e pertanto è un valore positivo.

$$Q(t) = \int (q_{surf}(r, t) - q_{geo}) dS$$

L’altra fonte di calore è $Q_g(t)$ che rappresenta la potenza termica derivante dalla capacità termica del suolo: questa fonte di calore può rimanere solo se la temperatura del suolo decresce col tempo.

Tra i diversi fattori che influenzano la temperatura del terreno vi sono le fluttuazioni stagionali che, tuttavia già a 20 m di profondità possono essere trascurate e assumono il valore medio annuale. L’influenza stagionale è strettamente collegata al valore di diffusività termica; nel caso in cui la diffusività sia molto bassa l’influenza stagionale può essere considerata trascurabile già a 10-20 m di profondità.

2.3.2 LE SONDE VERTICALI

Le sonde geotermiche verticali si sviluppano nel terreno fino ad una profondità di 150-200 m e sono generalmente costituite da due tubi in materiale plastico a forma di U ottenendo configurazioni a singolo U o a doppio U. Quest’ultima configurazione porta con sé numerosi vantaggi nel caso in cui vi sia un’occlusione del tubo e migliora lo scambio termico con il terreno a parità di portata grazie al minor diametro dei tubi. Come già accennato precedentemente, l’elevata profondità per il posizionamento delle sonde consente di ottenere una resa termica migliore in quanto la temperatura del terreno, oltre i 20 m, aumenta di 3°C ogni 100 m.

Come riporta Tinti F. (2008), i primi scambiatori erano metallici e maggiormente soggetti a corrosione mentre le tubazioni in polietilene con diametro da 20 a 40 mm conferiscono a tali sistemi una durata media di 100 anni in determinate condizioni di pressione e temperatura (16 bar e 15°C). In Figura 7 si riporta un’immagine relativa al posizionamento delle sonde di andata e di ritorno.

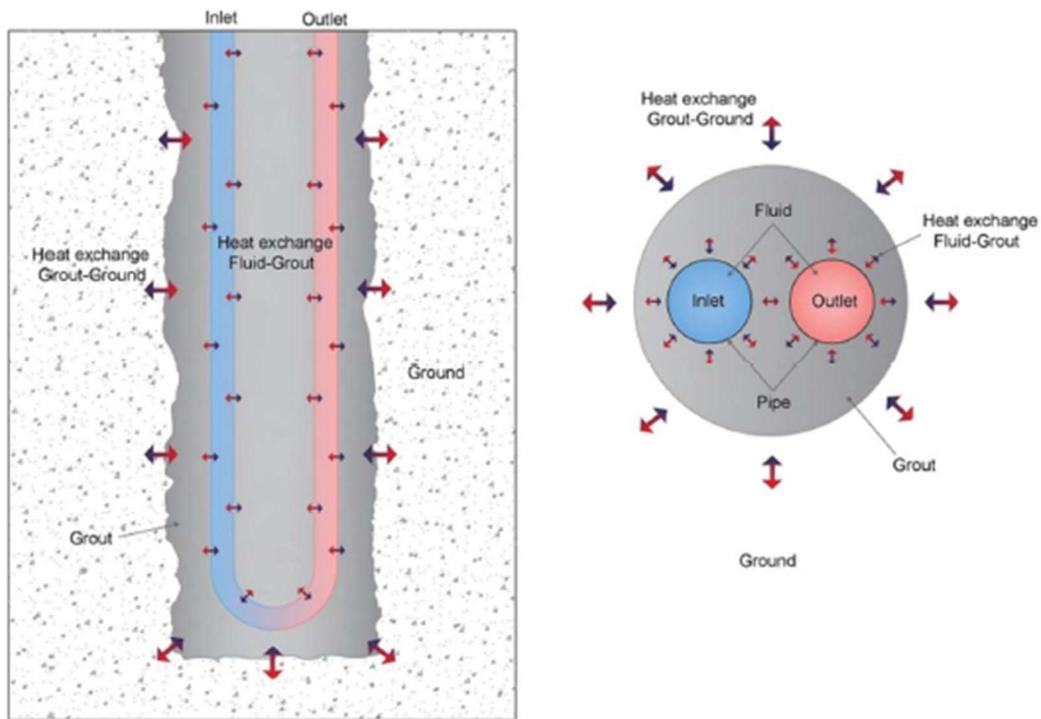


Figura 7 – Posizionamento delle sonde verticali

Dopo aver inserito le sonde, il foro viene riempito con boiaccia cemento-bentonitica, un'operazione che richiede particolare attenzione per evitare che rimangano degli interstizi, la cui presenza aumenta la differenza tra la pressione del fluido e l'ambiente esterno causando il decadimento della conduttività termica e una diminuzione di efficienza della pompa di calore nel tempo.

Il materiale di riempimento deve essere in primo luogo compatibile a livello ambientale e non solubile in acqua nel caso in cui si verificasse il contatto diretto con la falda. All'interno del foro si può inserire boiaccia di cemento-bentonitica, sabbia o sedimenti del terreno in funzione della conducibilità termica, della compatibilità ambientale e dell'elasticità del materiale, parametro che rappresenta la resistenza alle sollecitazioni indotte dai movimenti naturali ed antropici del terreno.

Per ottimizzare lo scambio di calore, il materiale deve essere caratterizzato da una conducibilità termica paragonabile a quella del terreno che generalmente varia da 1 a 3 W/kgK. Pertanto, i fanghi bentonitici a causa della loro bassa conduttività pari a 0,6 - 0,7 W/kgK non favoriscono la trasmissione del calore tra la sonda e il terreno.

Nel foro viene inserito il materiale proveniente dallo scavo e una miscela a base di cemento o a base di bentonite (chiamata *grouting*) riducendo al minimo il materiale cementato e favorendo il riempimento degli interstizi grazie alla presenza della sabbia. In

ogni caso occorre tenere in considerazione alcune caratteristiche dei materiali come la viscosità funzione della percentuale di sabbia, il diametro dei granelli e il rapporto acqua/cemento. La scelta del diametro delle tubazioni è strettamente legata al costo del tubo, alla quantità di liquido refrigerante da inserire e alle fasi di installazione. All'interno delle sonde viene inserita acqua e antigelo, generalmente glicole propilenico in percentuale tra il 10% e il 30% permettendo l'abbassamento del punto di congelamento fino a -15°C.

L'*International Ground Source Heat Pump Association* (IGSHPA) raccomanda l'utilizzo di tre tipologie di fluidi non infiammabili, non tossici, compatibili con gli altri materiali del sistema, non corrosivi, economici, con buone caratteristiche di scambio termico e a basso impatto ambientale. Tra questi vi è l'acqua potabile, l'acqua con acetato di potassio e l'acqua con glicole propilenico che risulta essere la soluzione migliore.

Infatti, il glicole favorisce l'abbassamento della temperatura di congelamento dell'acqua permettendo in ogni caso lo scambio termico ed è maggiormente compatibile a livello ambientale.

Un impianto geotermico a sonde verticali può essere costituito da un'unica perforazione profonda oppure da un sistema di sonde geotermiche opportunamente posizionate in base allo spazio a disposizione, alla conducibilità del terreno, alla presenza di acqua e al costo dell'energia elettrica necessaria a pompare l'acqua nei fori. Per evitare di arrecare danni alle fondazioni le sonde devono essere posizionate ad una distanza minima di 4-5 m (Dodinelli M. & M., 2010). Inoltre, è importante considerare la possibile interferenza termica tra le sonde; se non viene rispettata una distanza minima che varia da 4 a 8 m può avvenire una perdita di efficienza dell'impianto e in alcuni casi causare una variazione termica irreversibile che provoca una maggiore crescita arborea.

2.3.2.1 IL GROUND RESPONSE TEST

Il dimensionamento delle sonde verticali deve essere eseguito tenendo in considerazione i parametri relativi al sottosuolo e all'impianto. Le caratteristiche del terreno sono collegate alla scelta di un modello di comportamento adeguato: ogni schematizzazione fisica ha lo scopo di avvicinarsi il più possibile alla realtà e di studiare in modo più dettagliato quegli aspetti che, dopo aver eseguito un'analisi di sensibilità, risultano essere più significativi. Le sonde producono un bacino termico nel suolo, che può essere facilmente approssimabile ad una porzione cilindrica di terreno in grado di scambiare calore per conduzione e attraverso il moto dell'acqua, sia sottoforma di liquido che di

vapore. Risulta quindi importante monitorare la temperatura in ingresso del fluido in estate e soprattutto in inverno assicurandosi che sia lontana dai limiti minimi per evitare di creare problemi alle componenti dell'impianto.

Le caratteristiche termofisiche del sottosuolo (conduttività termica) e della sonda geotermica (resistenza termica dello scambiatore) vengono determinate a partire dal *Ground Response Test* o *Thermal Response Test* (test di risposta termica).

Più in generale, con il GRT si intende determinare alcune proprietà termiche del terreno tra cui:

- Temperatura indisturbata;
- Conducibilità termica;
- Coefficiente globale di scambio termico;
- Resistenza della sonda.

2.3.2.2 LA PROVA IN CANTIERE E L'ELABORAZIONE DEI DATI

Il test viene eseguito applicando, tramite resistenze elettriche, una potenza termica costante ad una sonda geotermica per un tempo minimo di 72 ore: il circuito della macchina viene connesso ai tubi in ingresso e in uscita della sonda che fuoriesce dal foro.

Solitamente la potenza applicata è simile a quella prevista durante il normale funzionamento dell'impianto e consiste nell'immettere all'interno della sonda una certa quantità di fluido (non riscaldato) per circa 20-30 minuti tramite il quale è possibile misurare temperatura in ingresso e in uscita e determinare lo scambio termico avvenuto. La temperatura viene annotata ad intervalli di 2 minuti. Un metodo alternativo consiste nell'inserire un termometro all'interno della sonda riempita con il fluido, che misura la temperatura a diverse quote permettendo di ottenere il valore medio non influenzato dal calore dissipato dalla pompa in circolazione.

Successivamente, si procede pompando nella sonda l'acqua o una miscela di acqua e glicole propilenico riscaldata mantenendo costante l'apporto di calore per circa tre giorni, al termine dei quali vengono misurate le temperature in entrata e in uscita da un apposito strumento. Lo schema di funzionamento del GRT è mostrato in Figura 8.

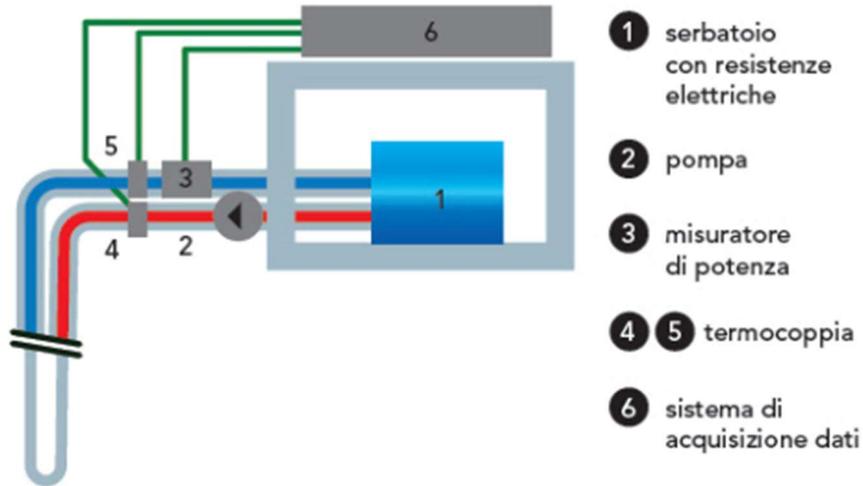


Figura 8 – Schema di funzionamento del Ground Response Test (eneren.it)

Per la determinazione della temperatura del campo termico attorno alla sonda si può fare riferimento all'equazione di *HellStrom, Morgensen ed Eskilson* (Tinti F., 2008) con ipotesi di sorgente lineare infinita e iniezione costante di calore che in forma semplificata vale:

$$T_b - T_g = q \cdot R_g = \frac{q}{4\pi\lambda} \cdot \left(\ln \frac{4\alpha t}{r_b^2} - \gamma \right)$$

I termini che compaiono rappresentano:

- T_b [°C o K] è la temperatura media sulle pareti del foro;
- T_g [°C o K] è la temperatura del terreno indisturbato;
- q $\left[\frac{W}{m} \right]$ è la potenza termica iniettata nella sonda per metro lineare;
- R_g $\left[\frac{W}{mK} \right]$ è la resistenza termica nell'intorno della sonda;
- λ $\left[\frac{W}{mK} \right]$ è la conduttività termica del terreno;
- α $\left[\frac{m^2}{s} \right]$ è la diffusività termica ricavata da analisi geologiche e ricavabile con la seguente relazione:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \left[\frac{mK}{W} \right]$$

- ρc_p $\left[\frac{J}{m^3K} \right]$ è la capacità termica volumetrica media del terreno;
- r_b [m] è il raggio della sonda, ovvero del foro;
- γ [-] è la costante di Eulero che vale 0,5772;

- t [s] è la durata del test, che per l'ipotesi di iniezione costante di calore e quindi di regime stazionario, deve essere maggiore o uguale di un tempo t_M espresso come segue:

$$t \geq t_M = \frac{ar^2}{\alpha} [s]$$

Nell'espressione “ a ” rappresenta un coefficiente numerico che varia in funzione della precisione teorica; quando ha valore 5 significa che la precisione corrisponde al 10%.

R_b esprime la resistenza termica del pozzo, ovvero tra il fluido termovettore e la superficie esterna del pozzo a contatto con il terreno e segue la relazione:

$$T_f(t) - T_b(t) = q \cdot R_b$$

Dove:

- $T_f(t)$ [°C o K] è la temperatura media del fluido nel collettore;
- $T_b(t)$ [°C o K] è la temperatura sulla superficie della sonda;
- q $\left[\frac{W}{m}\right]$ è la quantità di potenza iniettata.

È possibile adottare un'analogia elettrica considerando R_b e R_g come due resistenze disposte in serie, in modo tale che, in condizioni stazionarie, il campo di variazione della temperatura possa essere espresso come segue:

$$T_f - T_g = q \cdot (R_b + R_g) = q \cdot \left[R_b + \frac{1}{4\pi\lambda} \cdot \left(\ln \frac{4\alpha t}{r_b^2} - \gamma \right) \right]$$

La resistenza termica del pozzo è un parametro molto importante che causa l'abbattimento della temperatura tra il fluido e il terreno e pertanto dovrebbe assumere un valore più basso possibile utilizzando materiali di riempimento adeguati. In Figura 9 è mostrata l'analogia elettrica e il grafico che riporta l'abbattimento della temperatura in funzione del raggio.

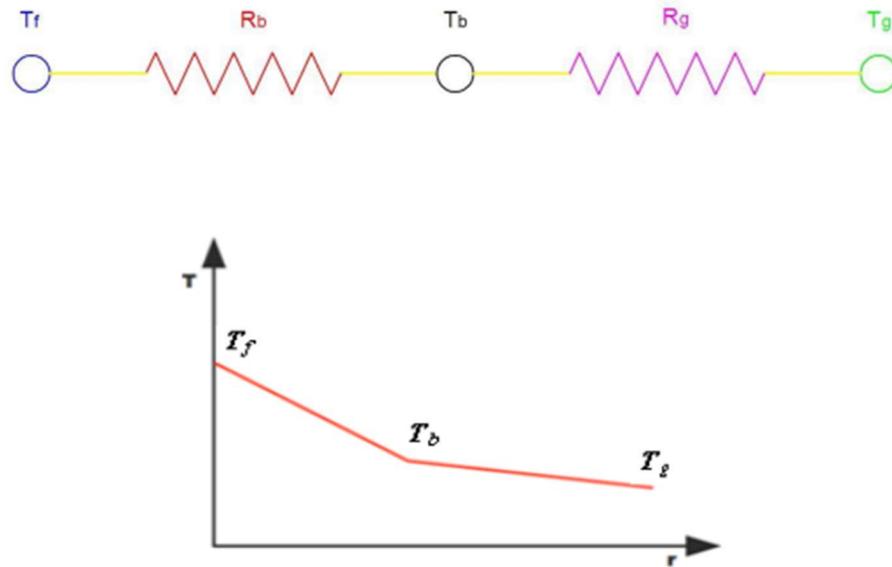


Figura 9 – Analogia elettrica e grafico dell'abbattimento di temperatura in funzione del raggio (*Geotermia per la climatizzazione*, §4.5)

Esplicitando q come rapporto tra la potenza termica e la lunghezza attiva della sonda è possibile riscrivere l'espressione.

$$q = \frac{Q}{H}$$

$$T_f = T_g = \left[\frac{Q}{H} \cdot \left[\frac{1}{4\pi\lambda} \cdot \left(\ln \frac{4\alpha}{r_b^2} - \gamma \right) + R_b \right] + T_g \right] + \frac{Q}{4\pi\lambda H} \ln(t)$$

Per riportare la relazione in forma lineare ci si serve di due parametri a [°C] e b $\left[\frac{^\circ\text{C}}{\ln(s)} \right]$ che valgono:

$$a = \left[\frac{Q}{H} \cdot \left[\frac{1}{4\pi\lambda} \cdot \left(\ln \frac{4\alpha}{r_b^2} - \gamma \right) + R_b \right] + T_g \right] \quad b = \frac{Q}{4\pi\lambda H}$$

$$T_f = a + b \cdot \ln(t)$$

L'espressione precedente rappresenta l'equazione di una retta con intercetta a e pendenza pari a b stimate tramite l'operazione di regressione lineare, ovvero un metodo volto a stimare i valori di una variabile dipendente a partire dai valori di una o più variabili indipendenti. Conoscendo il valore di b è possibile ricavare un valore stimato di λ_{Equiv} , indipendente dal tempo (Gehlin, 2002):

$$\lambda_{Equiv} = \frac{Q}{4\pi b H} \left[\frac{W}{mK} \right]$$

Utilizzando la conducibilità termica stimata del terreno, λ_{Equiv} , è possibile ricavare la resistenza termica del pozzo R_b .

$$R_b = \frac{1}{q} \cdot (T_f(t) - T_b(t)) = \frac{1}{q} \cdot (T_f - T_g) - \frac{1}{4\pi\lambda} \cdot \left(\ln(t) + \ln \frac{4\alpha}{r_b^2} - \gamma \right)$$

Tuttavia, tale metodo porta con sé alcune incertezze come la durata del test, durante la quale il flusso di calore viene considerato costante; inoltre, la conducibilità termica media del terreno e la resistenza termica del pozzo variano, seppure di poco.

La conducibilità termica assume valori di poco superiori a quelli ottenuti da prove di laboratorio: a causa della presenza di acqua tra i grani di materiale si ha una maggiore capacità di trasferimento del calore rispetto all'aria nei pori dei provini di laboratorio. Per prima cosa, la presenza di acqua favorisce il trasporto di calore oltre che per conduzione anche per convezione, a causa del naturale moto dell'acqua di falda; la convezione naturale del calore può anche seguire l'andamento della temperatura facendo muovere gli strati più caldi verso l'alto e quelli più freddi verso il basso. Si tratta di un fenomeno strettamente collegato ai gradienti di temperatura presenti nel terreno e ai valori di permeabilità orizzontale e verticale. Nel caso di permeabilità molto bassa il fenomeno della convezione naturale può essere considerato trascurabile.

La durata minima del test, che si aggira intorno a 60-72 ore di funzionamento evita che il valore di λ sia influenzato dal tubo collettore e dal materiale di riempimento della sonda. La resistenza termica del pozzo ha una precisione del 10% che può essere aumentata svolgendo analisi e misurazioni più accurate.

Il test di risposta termica subisce comunque l'influenza del livello della falda e la velocità del suo flusso costringendo ad eseguire prove in differenti condizioni climatiche o periodi dell'anno per individuare diversi valori di temperatura del terreno e di resistenza termica. Inoltre, questo modello non tiene conto dei differenti strati di terreno in quanto considera un valore medio; esistono altri modelli, come quello di sorgente cilindrica e i modelli matematici che permettono di rappresentare le caratteristiche del suolo più realisticamente.

2.3.2.3 LA PROCEDURA DI INSTALLAZIONE IN CANTIERE

Dopo aver valutato la posizione delle sonde geotermiche verticali che devono essere collocate ad una distanza minima di 4-5 m dall'edificio, nel processo di installazione di sonde geotermiche si possono individuare alcune fasi fondamentali:

- La perforazione;
- L'inserimento delle sonde verticali;
- Il getto di riempimento.

Le sonde a U arrivano in cantiere confezionate su europallet e protette da una pellicola termoretraibile. Sono inserite su un apparecchio sbobinante e prima del loro inserimento all'interno del foro, vengono assemblate a croce e fissate tra loro attraverso perni filettati; inoltre, alla base della sonda è possibile inserire un peso 15-20 kg che serve a facilitare la discesa della sonda nel pozzo e viene fissato sempre attraverso perni filettati forniti insieme alla sonda e ai pesi. Nella parte terminale della sonda il tubo viene raccordato tramite fusione termica (fusione ad incastro o saldatura testa-testa) in modo tale da permettere l'inversione del moto rispetto alla direzione verticale. La macchina perforatrice viene trasportata in cantiere mediante appositi mezzi e viene posizionata in prossimità dell'area adibita al collocamento delle sonde verticali. L'apparecchio perforatore con tecnologia "a doppia testa" permette di raggiungere una profondità di 100-150 m in terreni sciolti e 250-300 m in roccia ed è costituito da un rivestimento metallico esterno, un'asta interna di perforazione con acqua, un tricono dentato (o un trilama) e una scarpa dentata che favorisce l'avanzamento della parete esterna. Generalmente più usato, il tricono è formato da tre coni dentati aventi assi di simmetria che confluiscono all'interno di un corpo centrale metallico. La funzione principale dei coni dentati è quella di frantumare la roccia durante il meccanismo di rotazione. È adatto a materiali molto duri mentre per quelli più teneri è possibile servirsi di un trilama (Figura 10).



Figura 10 – Trilama e tricono

Esistono principalmente due meccanismi di perforazione: a rotazione e a roto-percussione. Se la perforazione è a rotazione l'utensile interno, sottoposto a pressione dalla batteria di aste, ruota attorno al proprio asse e avanza nel terreno facendo fuoriuscire il fluido attraverso gli ugelli. La rotazione è comandata da un motore esterno e si trasmette attraverso le aste.

Se oltre alla rotazione avviene anche la percussione (necessaria in terreni che presentano materiali molto duri), un martello causa la frantumazione della roccia, la rotazione e l'avanzamento nel terreno dell'utensile.

Grazie alla presenza del fluido i detriti sono allontanati, aspirati e depositati in un apposito vascone per il loro smaltimento. Il martello può essere posizionato sulla testa di perforazione o a fondo foro battendo direttamente sul terreno. Il fluido utilizzato viene scelto in funzione della tipologia di suolo e può essere acqua, fanghi bentonitici e aria compressa: nel caso di materiali sciolti e fini, l'acqua favorisce l'avanzamento della perforazione e allontana i detriti di roccia (Tinti F., 2008). Tuttavia, a causa della sua bassa densità, l'acqua non è in grado di sostenere le pareti dello scavo e per tale motivo si è soliti utilizzare i fanghi bentonitici, costituiti da una miscela di acqua e bentonite. Si tratta di una soluzione adatta a materiali sciolti e fini, che però risulta dannosa a livello ambientale se entra in contatto con falde acquifere e per tale motivo deve essere smaltita seguendo specifiche modalità. I granelli di argilla bentonitica riempiono i fori del terreno, creando una pressione negativa e stabilizzando la parete di scavo.

Come alternativa è possibile servirsi di aria compressa, installando un compressore all'esterno del foro che inietta l'aria all'interno del pozzo, tramite circolazione diretta permettendo la risalita dei detriti per la loro raccolta. Le sonde geotermiche verticali sono inserite con il tubo di riempimento all'interno del foro di perforazione: generalmente si inseriscono due sonde a U singolo e si sigilla il foro con una miscela di sabbia e bentonite

o malta termica. Dopo il riempimento del foro di perforazione si esegue una prova di funzionamento inserendo all'interno della sonda fluido ad una pressione minima di 6 bar.

Le sonde che fuoriescono dal terreno vengono collegate ai condotti di raccordo e si raccordano le tubazioni al collettore nel punto più alto dell'impianto. L'impianto viene riempito con il fluido premiscelato per sciacquare le tubazioni e rimuovere l'aria presente. Solitamente il sistema viene sottoposto ad una prova a pressione con una pressione pari a 1,5 quella di esercizio. Se sono presenti più sonde verticali, queste saranno collocate a distanze non inferiori a 8 m al fine di evitare interferenze termiche. In Figura 11 si riporta un'immagine relativa al cantiere e alla strumentazione adottata.



Figura 11 – Strumentazione adottata per la perforazione

2.3.2.4 IL MONTAGGIO DEL COLLETTORE

Le tubazioni di mandata e di ritorno che fuoriescono dal terreno possono essere collegate insieme mediante un raccordo a Y oppure possono essere indirizzate singolarmente verso il collettore. I tubi derivanti dalla pompa di calore sono collegati al collettore secondo le modalità riportate in Figura 12 (metodo Tichelmann): metodo unilaterale e metodo alternato.

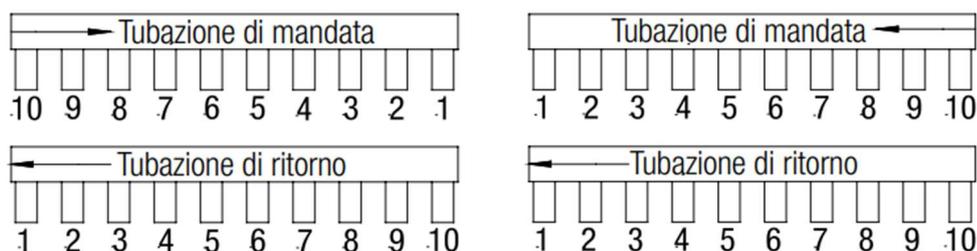


Figura 12 – Tubazioni di mandata e ritorno unilaterale e alternato (Dodinelli M. & M., Caleffi S.P.A., 2010)

Il collettore può essere allacciato in senso orizzontale o verticale creando una curva di 90° prima del collegamento al collettore. Occorre prestare molta attenzione al fenomeno dell'umidità che può creare un danneggiamento dei tubi; per evitare che le tubazioni entrino in contatto con il muro è possibile inserire una lastra in poliuretano espanso rigido. La Figura 13 sottostante riporta il collegamento delle sonde nella parte inferiore del collettore e mostra i principali componenti di un circuito:

- Il vaso di espansione: serve a limitare le sovrappressioni generate a partire da variazioni volumetriche del fluido.
- La valvola di sicurezza: serve a proteggere l'impianto da possibili sovrappressioni frequenti durante la fase di riempimento o di rinnovo del fluido.
- Il manometro: misura la pressione dell'impianto durante il suo funzionamento.
- Il termometro: misura la temperatura del fluido in entrata e in uscita dalla pompa di calore.
- La valvola di sfogo dell'aria: serve a rimuovere l'aria presente nel circuito al fine di evitare la generazione di rumori e una minore capacità di scambio del calore.
- Il defangatore: serve ad eliminare le impurità dall'impianto.
- I pressostati di minima: proteggono i circuiti frigoriferi delle pompe di calore nel caso in cui fossero presenti delle perdite.

- I pressostati di sicurezza: interrompono il funzionamento delle pompe di calore in presenza di sovrappressioni dovute su surriscaldamenti.
- I flussostati: controllano la circolazione nei circuiti geotermici e la presenza di possibili ostruzioni.
- I Giunti antivibranti: evitano la propagazione delle vibrazioni dalla pompa di calore al circuito.
- I collettori di distribuzione: è importante che siano protetti da condensa mediante apposita coibentazione e sono caratterizzati da basse perdite di carico.
- Le valvole di intercettazione: rendono indipendenti i vari circuiti geotermici nel caso in cui fossero presenti delle perdite.
- Le valvole di regolazione della portata: regolano le portate dei circuiti geotermici per assicurare il corretto funzionamento delle pompe di calore.

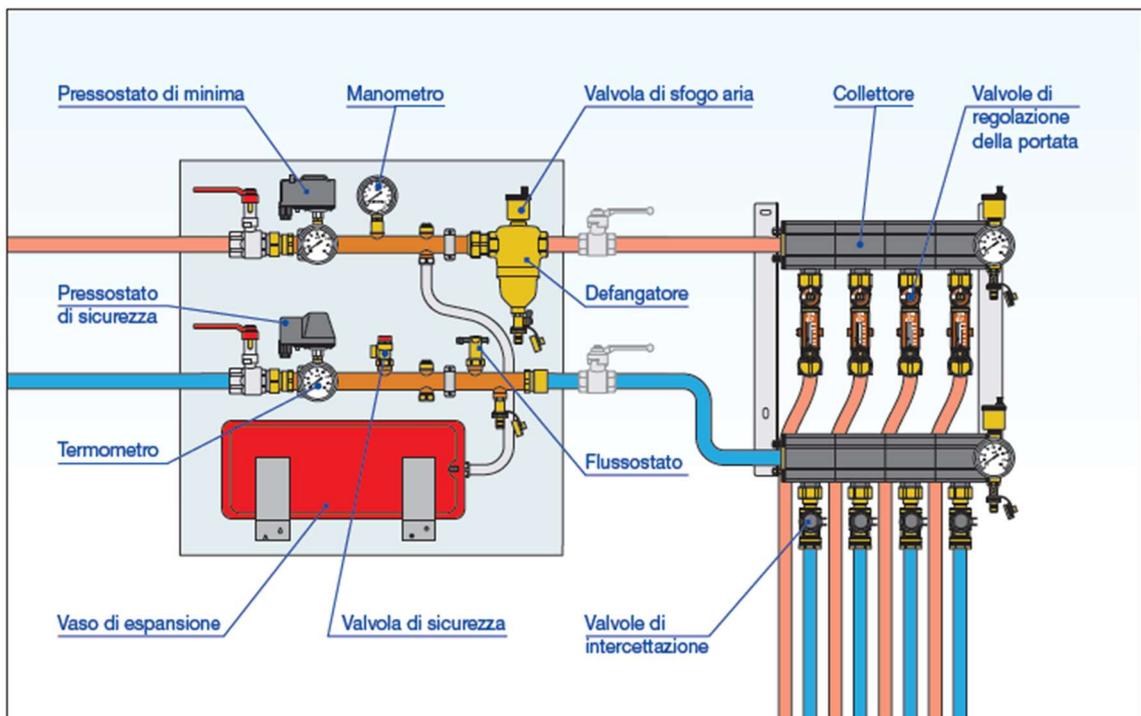


Figura 13 – Collegamento tra tubazioni e collettore (Dodinelli M. & M., Caleffi S.P.A., 2010)

L'impianto viene riempito con il fluido premiscelato per sciacquare le tubazioni e rimuovere l'aria presente. Solitamente il sistema viene sottoposto ad una prova a pressione con una pressione pari a 1,5 quella di esercizio.

Conoscendo la temperatura su cui regolare il fluido termovettore (di solito varia da 10°C a 20°C) è possibile stabilire il quantitativo di acqua e di glicole da inserire: questi vengono

premiscelati e poi inseriti all'interno dell'impianto. Ogni anno è importante controllare il pH della soluzione che deve risultare neutro e la quantità di antigelo presente.

La costruzione del muro contro-terra procede a pannelli alternati seguendo le fasi appena descritte. I pannelli, costruiti alternativamente a maturazione avvenuta, vengono privati dello strato superiore di calcestruzzo per effettuare un nuovo getto comune a tutti gli elementi generando una trave di coronamento che collega tutti i pannelli in testa.

Quando l'impianto comincerà a funzionare la potenza elettrica della pompa di calore sarà sommata alla potenza termica prodotta dalle sonde per soddisfare il fabbisogno termico dell'edificio.

2.3.2.5 IL METODO DI DIMENSIONAMENTO SECONDO L'ASHRAE

Per il dimensionamento di un campo di sonde geotermiche verticali vi sono tre principali tipologie di approccio: procedurale, mediante funzioni di trasferimento e di tipo numerico.

L'approccio procedurale è basato sull'ipotesi di sorgente lineare: tra i dati di ingresso è importante stabilire a priori il fabbisogno energetico per il riscaldamento, per il raffrescamento e la potenza termica e frigorifera di progetto.

La seconda metodologia si serve di funzioni di trasferimento, ovvero di algoritmi derivanti da un'analisi numerica eseguita da *Claesson J. & Eskilson P.* nel 1987 che ha portato all'introduzione di una funzione adimensionale chiamata *g-function* per il calcolo dello scambio termico con diverse geometrie di scambiatori. Tali funzioni dipendono dalla distanza tra gli scambiatori e dalla loro distribuzione.

L'ultimo metodo ha un approccio numerico ed è molto preciso in quanto basato su analisi agli elementi finiti, alle differenze finite o ai volumi finiti e richiede un tempo di elaborazione maggiore dato dalla necessità di considerare il profilo orario delle potenze richieste dall'impianto.

Tra le metodologie di calcolo di tipo procedurale per il dimensionamento delle sonde geotermiche verticali si fa riferimento a quella proposta dall'*ASHRAE* (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers). Il metodo *ASHRAE*, consigliato dalla normativa UNI 11466 (Sistemi geotermici a pompa di calore – Requisiti per il dimensionamento e la progettazione) è il risultato di un modello matematico analitico sviluppato da *Kavanaugh e Rafferty*, ottenuto partendo dal modello di una sorgente cilindrica e aggiungendo un calcolo della resistenza del terreno basato su diversi

impulsi di calore sul lungo, sul medio e sul breve periodo. Le relazioni seguenti permettono il calcolo della lunghezza totale (m) del sistema di scambiatori di calore per il riscaldamento invernale L_h (heating) e il raffrescamento estivo L_c (cooling).

$$L_h = \frac{\dot{Q}_a \cdot R_{ga} \cdot \dot{Q}_{g,cD} \cdot [R_b + (PLF_{m,hD} \cdot R_{gm}) + (R_{gd} \cdot F_{sc})]}{\theta_g - \left(\frac{\theta_{wi} + \theta_{wo}}{2}\right)_{hD} - \theta_p}$$

$$L_c = \frac{\dot{Q}_a \cdot R_{ga} \cdot \dot{Q}_{g,cD} \cdot [R_b + (PLF_{m,cD} \cdot R_{gm}) + (R_{gd} \cdot F_{sc})]}{\theta_g - \left(\frac{\theta_{wi} + \theta_{wo}}{2}\right)_{cD} - \theta_p}$$

\dot{Q}_a [W] rappresenta il flusso termico medio scambiato con il terreno in un anno che viene calcolato mediante relazioni specifiche e dipende dai rendimenti delle pompe di calore e dal numero di ore equivalenti annuali a pieno carico dell'impianto di riscaldamento e raffrescamento.

$\dot{Q}_{g,hD}$ [W] e $\dot{Q}_{g,cD}$ [W] sono le potenze termiche di progetto lato terreno durante il periodo invernale ed estivo.

è la potenza termica di progetto lato terreno durante il periodo invernale.

Il calcolo di tali potenze dipende dalla tipologia di pompa di calore presente, a compressione di vapore o ad assorbimento; solitamente per quest'ultimo caso non è possibile risalire alle potenze di picco che devono per forza essere calcolate sulla base delle potenze termiche disponibili e pertanto sono fornite dal costruttore stesso.

$R_b \left[\frac{mK}{W}\right]$ è la resistenza termica equivalente per unità di lunghezza dello scambiatore di calore corrispondente allo scambio termico tra il fluido termovettore e la superficie di perforazione.

Tale resistenza è quella presente all'interfaccia tra il fluido termovettore e la parete di perforazione ed è data dalla combinazione di tre resistenze, quella relativa al tubo in cui scorre il fluido (R_{pp}), quella del materiale di riempimento (R_{gr}) e la resistenza del tubo esterno (R_t).

$$R_b = R_{pp} + R_{gr} + R_t$$

$R_{ga} \left[\frac{mK}{W}\right]$ è la resistenza termica efficace del terreno, per unità di lunghezza e riferita all'impulso annuale.

$R_{gm} \left[\frac{mK}{W} \right]$ è la resistenza termica efficace del terreno espressa per unità di lunghezza e riferita all'impulso mensile.

$R_{gd} \left[\frac{mK}{W} \right]$ è la resistenza termica efficace del terreno espressa per unità di lunghezza e riferita all'impulso giornaliero.

Per il calcolo delle tre resistenze termiche del terreno è necessario trovare una correlazione tra il tempo che esprime l'impulso di scambio, le caratteristiche geometriche dello scambiatore e le proprietà del terreno. Pertanto, viene calcolato il numero di Fourier come segue:

$$F_o = \frac{4 \cdot \alpha_g \cdot \tau}{D_b^2}$$

- $\alpha_g \left[\frac{m^2}{s} \right]$ esprime la diffusività del terreno;
- $\tau [s]$ è il periodo di durata dell'impulso;
- $D_b [m]$ è il diametro della perforazione.

Nel caso annuale τ vale 3650 giorni (10 anni) in quanto rappresenta il periodo di tempo necessario per rendere il flusso termico stazionario; nel caso mensile tale valore è incrementato di 30 giorni, mentre nel caso giornaliero al valore mensile si aggiungono 6 ore, ovvero 0,25 giorni. Per cui si definiscono tre numeri di Fourier, ovvero tre durate dell'impulso e per ognuna di esse si calcola il corrispondente G-Factor tramite la relazione seguente valida se $F_o > 2$ o attraverso il grafico basato sulla soluzione della sorgente cilindrica (Figura 14).

$$G = 0,0758 \cdot \ln(F_o) + 0,1009$$

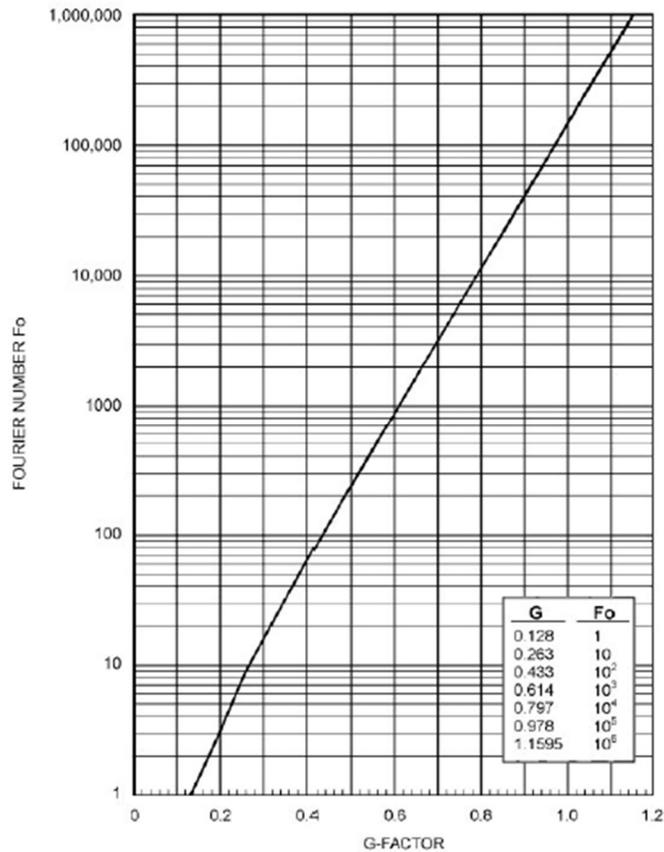


Figura 14 – Diagramma per determinare la resistenza termica del terreno (Capozza A., Linee Guida per la progettazione dei campi geotermici per pompe di calore, Cap 6, 2012)

Le resistenze termiche del terreno sono calcolate come segue:

$$R_{ga} = \frac{G_f - G_1}{\lambda_g} \quad R_{gm} = \frac{G_1 - G_2}{\lambda_g} \quad R_{gd} = \frac{G_2}{\lambda_g}$$

G_f è il G-factor relativo al numero di Fourier, mentre λ_g è la conduttività termica del terreno.

$PLF_{m,hD}$ [-] e $PLF_{m,cD}$ [-] rappresentano i fattori di carico parziale per il periodo di riscaldamento e di raffreddamento. Questi due fattori sono calcolati mediante relazioni specifiche dipendenti dalla potenza termica di progetto della pompa di calore, dal fabbisogno energetico nel mese di progetto in riscaldamento e in raffreddamento e dal numero di giorni del mese di progetto.

F_{sc} [-] è il fattore di perdita per cortocircuito termico nello scambiatore di calore a terreno tra tubo di mandata e tubo di ritorno (Figura 15). Viene calcolato per interpolazione dei

dati riportati in tabella e viene stimato in base alla portata specifica di ogni singolo scambiatore e al numero di scambiatori collegati in serie al circuito geotermico.

Scambiatori per circuito	F_{sc}	
	0.036 kg·s ⁻¹ /kW	0.054 kg·s ⁻¹ /kW
1	1,06	1,04
2	1,03	1,02
3	1,02	1,01

Figura 15 – Valori relativi al fattore di perdita (Capozza A., Linee Guida per la progettazione dei campi geotermici per pompe di calore, Cap 6, 2012)

θ_g [°C] è la temperatura del terreno indisturbato.

θ_{wi} [°C] e θ_{wo} [°C] rappresentano la temperatura del fluido termovettore entrante nello scambiatore ed uscente in condizioni di progetto. θ_{wo} è espresso come segue:

$$\theta_{wo} = \theta_g \pm \Delta\theta_{gw}$$

Il segno della somma algebrica viene usato negativo in fase di riscaldamento e positivo durante il periodo di raffrescamento.

θ_g è la temperatura del terreno.

θ_{gw} è la differenza tra la temperatura del fluido uscente e la temperatura del terreno e durante il regime di riscaldamento varia entro l'intervallo 6 ÷ 11 K, mentre per il raffrescamento assume valori compresi tra 11 ÷ 17 K.

θ_{wi} si calcola dalla relazione:

$$\theta_{wi} = \theta_{wo} \pm \Delta\theta_w$$

$\Delta\theta_w$ rappresenta il salto termico del fluido e deve essere tale da garantire, all'interno delle tubazioni, un regime di moto non lineare e quindi con numero di Reynolds maggiore di 2300 e che la velocità del fluido non porti ad avere perdite di carico elevate necessitando di un sistema di sistema di pompaggio dispendioso.

Solitamente, tale salto varia da 3 ÷ 5 K.

θ_p [°C] è la temperatura di penalizzazione, che indica la variazione di temperatura nel terreno e si calcola mediante una relazione specifica che tiene conto del numero e della disposizione geometrica delle sonde.

$$\theta_p = \frac{1 \cdot N_4 + 0,5 \cdot N_3 + 0,25 \cdot N_2 + 0,1 \cdot N_1}{N_{tot}} \cdot \theta_{p1}$$

Dove:

- N_4 è il numero di scambiatori circondati su tutti e quattro i lati da altre sonde;
- N_3 è il numero di scambiatori circondati su tre lati da altre sonde;
- N_2 è il numero di scambiatori circondati su due lati da altre sonde;
- N_1 è il numero di scambiatori circondati su un solo lato da altre sonde;
- N_{tot} è il numero totale sonde;
- θ_{p1} è la temperatura di penalizzazione per uno scambiatore di calore circondato su tutti e quattro i lati da altri scambiatori analoghi.

La relazione precedente fa riferimento ad una disposizione delle sonde “a griglia” e pertanto esistono altri metodi per il calcolo della temperatura di penalizzazione che si servono della capacità di accumulo termico del parallelepipedo di terreno interessato dal funzionamento della sonda.

Dopo aver calcolato la lunghezza delle sonde è possibile valutare la lunghezza di progetto, L_D (“D” indica “design”) tra quella individuata per il periodo invernale e quella determinata per il periodo estivo.

Per cui, in genere, sulla base dei rendimenti della macchina termica (COP) e frigorifera (EER) è possibile effettuare il dimensionamento (scegliendo tra L_h e L_c) e trovando L_D . Si procede con il calcolo delle temperature medie mensili del terreno, delle efficienze medie mensili della pompa di calore ai sensi della UNI/TS 11300-3/4 e delle efficienze medie stagionali della pompa di calore (COP e EER). Questi step fanno parte di un processo iterativo che termina quando la differenza tra la lunghezza di progetto e la lunghezza di progetto dell'iterazione precedente è inferiore a 1 m.

Data la molteplicità dei parametri da utilizzare per il calcolo della lunghezza delle sonde verticali, nel 2010 Philippe et al. hanno implementato il metodo ASHRAE in un foglio Excel scaricabile in maniera gratuita.

2.3.1 I COLLETTORI ORIZZONTALI

I collettori orizzontali o sonde geotermiche orizzontali (Figura 16) rappresentano una tipologia di impianto geotermico a circuito chiuso che sfrutta lo scambio di calore superficiale e porta con sé un minore impatto ambientale e un risparmio economico dovuto all'assenza di una perforazione profonda. Anche per questa tipologia di sistema, utilizzata sia per il riscaldamento che per il raffrescamento, il terreno viene sfruttato come serbatoio di calore assorbendo calore durante il periodo estivo e rilasciandolo in inverno per riscaldare i locali interni all'edificio.

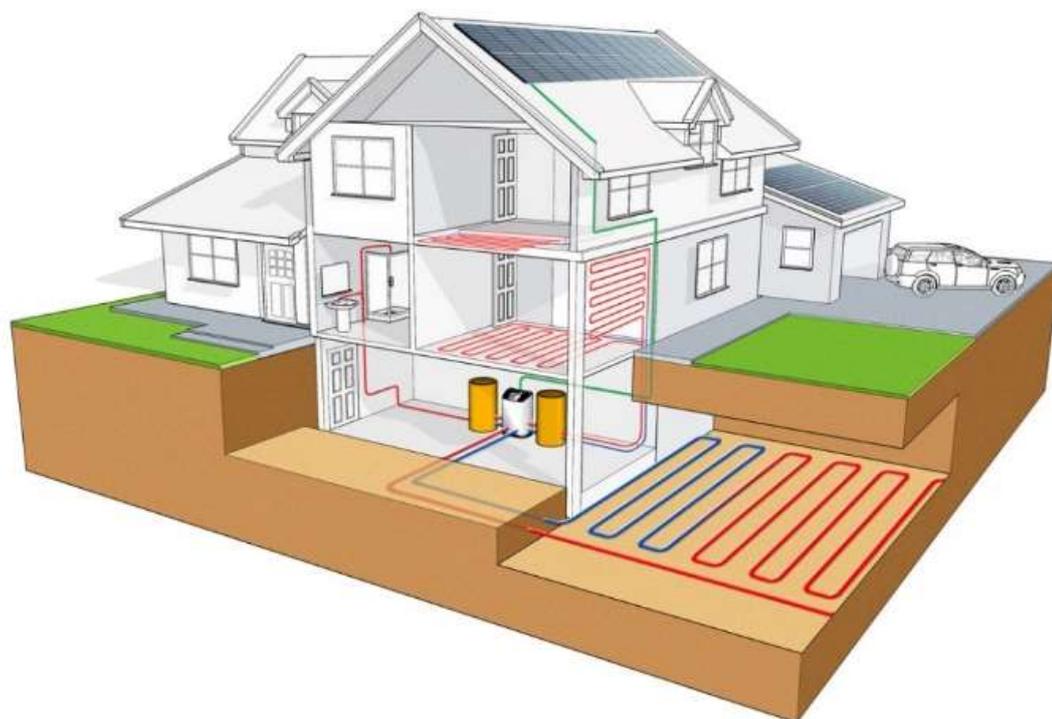


Figura 16 – Disposizione dei collettori orizzontali secondo Geonovis

Si tratta di una valida alternativa al sistema di sonde geotermiche verticali che tuttavia svolge ancora un ruolo di nicchia dovuto in parte alla minore efficienza causata dall'influenza delle fluttuazioni superficiali di temperatura. È una soluzione che non necessita dell'utilizzo di una macchina perforatrice ed è adatta soprattutto a edifici in cui non è possibile inserire sonde verticali per particolari vincoli geologici.

Tuttavia, occorre avere a disposizione una vasta area verde soggetta ad irraggiamento solare che deve essere almeno il doppio rispetto alla superficie da climatizzare e per questo motivo la sua installazione non è adatta a edifici di grandi dimensioni.

Esistono diverse configurazioni geometriche per gli scambiatori che variano per semplicità di posa e per modalità di distribuzione del calore e il loro dimensionamento avviene in funzione della resa termica del terreno, ovvero della tipologia di materiale, della densità e della quantità di acqua presente. Infatti, data l'impossibilità di svolgere un test di risposta termica, per la vasta area richiesta e per l'impossibilità di realizzare solo alcuni circuiti di serpentine, si procede con un dimensionamento classico che fa riferimento a valori tabellati e tiene conto di elevati fattori di sicurezza.

In alternativa, la lunghezza complessiva dei collettori può essere determinata mediante due equazioni, simili a quelle per le sonde verticali, che seguono il metodo dell'IGSHPA (International Ground Source Heat Pump Association) del 2009. In Figura 17 si riportano le principali geometrie adottate per scambiatori orizzontali.

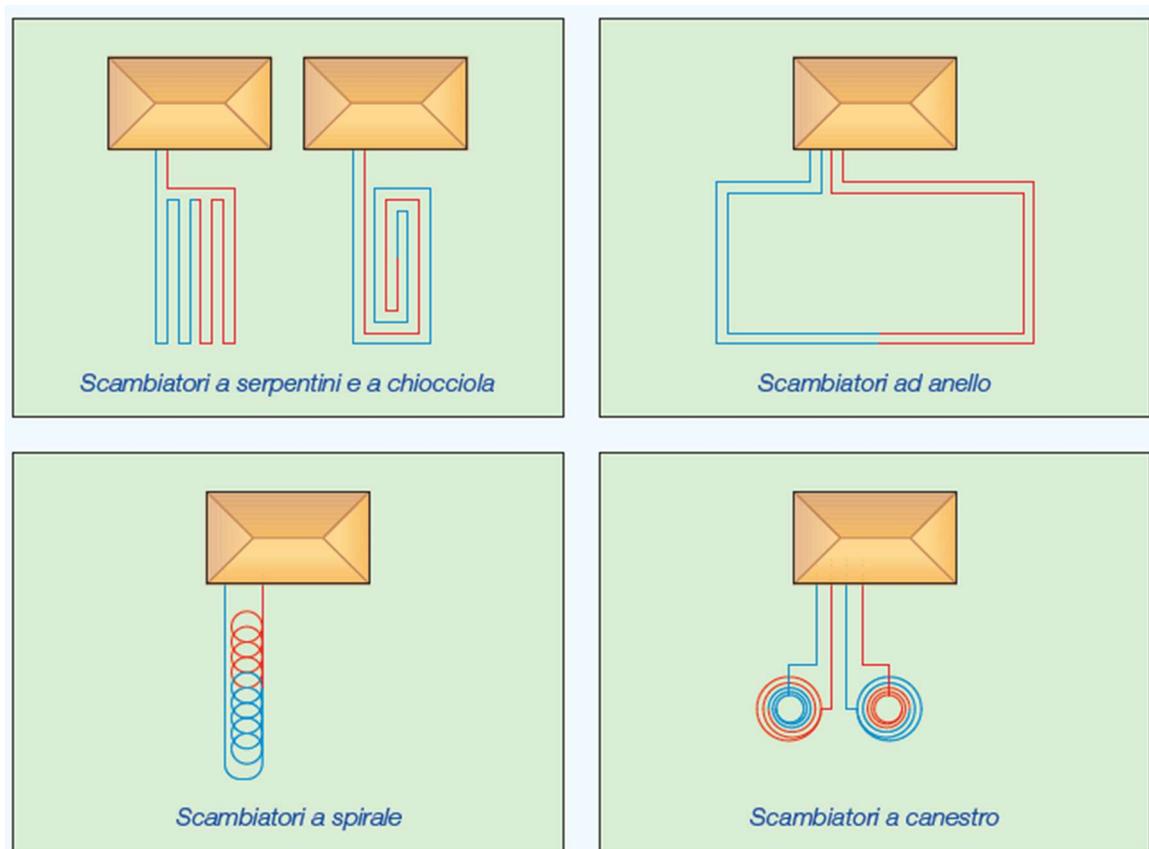


Figura 17 – Le diverse geometrie degli scambiatori (Dodinelli M. & M., Caleffi S.P.A., 2010)

Nel caso di scambiatori a serpentini o a chiocciola, la cui posa è di facile attuazione, si ottiene una diffusione più omogenea del calore ma è comunque opportuno posizionare le tubazioni ad una distanza non inferiore a 40 cm. Gli scambiatori ad anello (aperto o

chiuso) possono svilupparsi su uno o più piani causando in tal caso interferenze termiche tra le tubazioni (Figura 18).

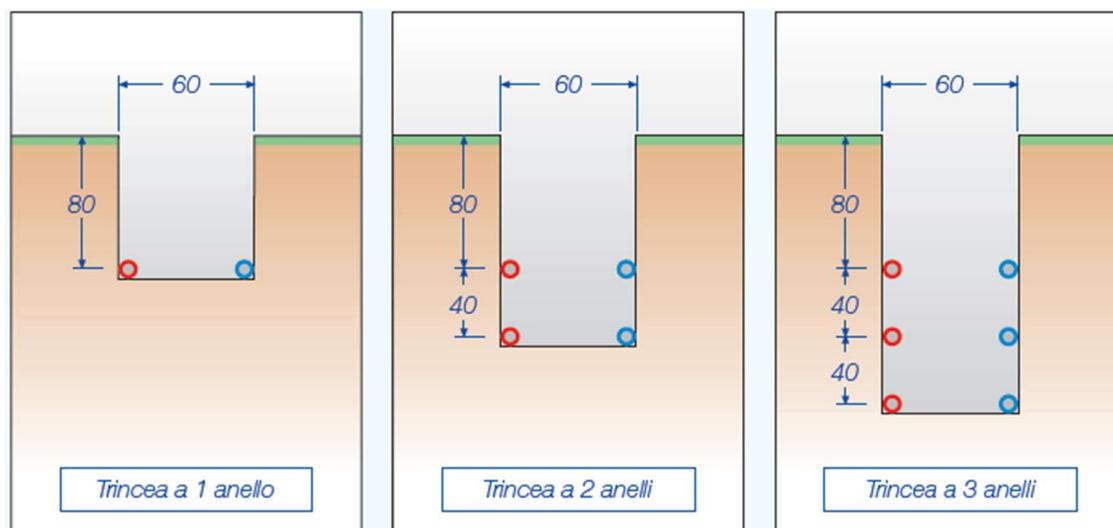


Figura 18 – Disposizione delle tubazioni nel caso di scambiatori ad anello (Dodinelli M. & M., Caleffi S.P.A., 2010)

Gli scambiatori a spirale sono chiamati così in quanto le tubazioni formano dei cerchi di diametro D tra loro sovrapposti con passo pari a $D/4$, $D/2$ o D e pertanto si sviluppano fino a 1-1,5 m di profondità. La resa termica dello scambiatore varia in funzione della tipologia di terreno.

L'ultima tipologia di scambiatori è anche quella di più recente utilizzo ed è rappresentata dagli scambiatori a canestro, le cui tubazioni sono ancorate ad armature in ferro o in plastica.

Le tubazioni, assemblate in cantiere o in sito, hanno una forma cilindrica o conica e in funzione della dimensione (piccola, media o grande) presentano collegamenti in serie, in parallelo o monocanestro (Figura 19).

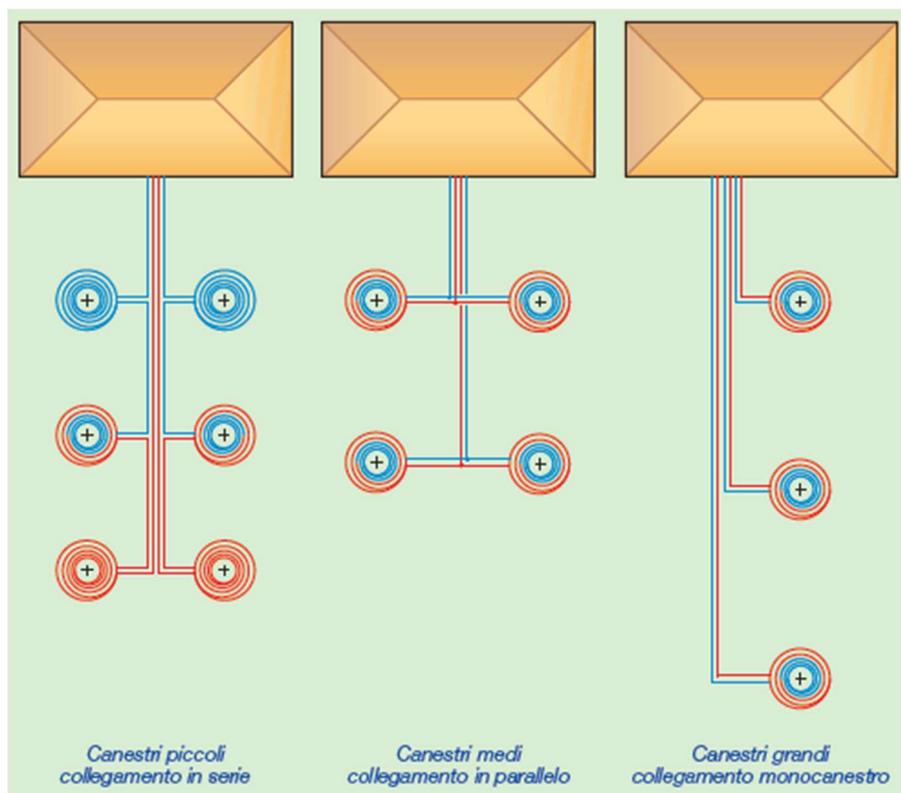


Figura 19 – Configurazioni dei collettori a canestro (Dodinelli M. & M., Caleffi S.P.A., 2010)

In genere, viene eseguito uno scavo, a sbancamento o a trincea, di profondità pari a 2-3 m la cui scelta è svolta in funzione della variazione della temperatura del terreno; già a 3 m di profondità tale fluttuazione è molto piccola. Le operazioni proseguono con l'inserimento di tubazioni di diametro pari a 16-26 mm in polietilene semplice o polietilene reticolato ad alta pressione con all'interno il fluido termovettore.

2.3.1.1 LA POSA IN CANTIERE

Lo schema della posa è illustrato nella figura seguente: dopo aver svolto i tubi, questi vengono fissati con chiodi conficcabili nel terreno. Nel caso di tubi in polietilene semplice il materiale plastico viene posizionato su un letto di sabbia, mentre, nel secondo caso grazie all'elevata resistenza delle tubazioni, queste sono in grado di sopportare gli urti derivanti da pietre ma è comunque consigliato creare uno strato di appoggio formato da materiale di risulta. I collettori sono coperti con una gettata di terreno o sabbia e i chiodi vengono rimossi.

Le sonde, collocate orizzontalmente, sono posizionate con interasse che varia da 0,6 m a 1,5 m e formano diversi circuiti che convergono in due collettori, uno di andata e uno di ritorno collegati al circuito della pompa di calore. Dopo aver sciacquato le tubazioni al

fine di rimuovere l'aria presente, si riempie il tubo con il fluido termovettore premiscelato e si esegue un test di pressione con una pressione pari a 1,5 volte quella di esercizio. La superficie di terreno necessaria può essere individuata sulla base della potenza elettrica richiesta dalla pompa di calore, W_{El} e del COP. Dal rapporto tra questi due valori si ottiene la potenza elettrica assorbita dalla medesima macchina termica. La potenza da scambiare con il terreno ($Q_{termica}$) è calcolata come la differenza tra la potenza richiesta alla pompa di calore e la potenza assorbita, mentre la superficie (S) complessiva da impiegare è data dal rapporto tra il calore che il terreno scambia e il rendimento specifico del terreno ($q_{termica}$) che varia in funzione della tipologia e della presenza di acqua.

$$W_{El} = \frac{Q_{pdc}}{COP} [W]$$

$$Q_{termica} = Q_{pdc} - W_{El} [W]$$

$$S = \frac{Q_{termica}}{q_{termica}} [m^2]$$

Per la loro posa non vengono richieste autorizzazioni specifiche alla autorità competenti, tuttavia occorre rispettare alcune distanze minime: si consiglia di posizionare le sonde orizzontali ad almeno 3 m di distanza dalle fondazioni, a 2 m dalle reti degli impianti idrici e a 1,5 m da reti elettriche e del gas (Dodinelli M &M, 2010).

La presenza del collettore provoca una consistente variazione di temperatura soprattutto superficialmente, in un intervallo di profondità pari a 0,5-1,5 m. A differenza della vegetazione bassa che ha radici che si sviluppano in lunghezza per circa 60 cm e che non risente dell'influenza dell'impianto geotermico, le radici delle piante ad alto fusto possono svilupparsi fino a 1-1,5 m e sono influenzate da tale flusso di calore che può causare una modifica del naturale metabolismo. Da numerosi casi studio è risultato che in estate è possibile avere una variazione positiva di temperatura fino a 10°C e in inverno una variazione negativa massima di 5°C.

2.4 GEOSTRUTTURE ENERGETICHE

Con geostrutture energetiche attive si intende quella categoria di strutture costruite con lo scopo di scambiare calore con il suolo attraverso sistemi impiantistici a circuito chiuso che vengono inseriti al momento del getto del calcestruzzo. Come nel caso delle sonde verticali, all'interno del sistema impiantistico scorre un fluido termovettore in grado di scambiare il calore derivante dal terreno. Tra le possibili strutture geotermiche a circuito chiuso vi sono i pali di fondazione, i diaframmi e i tunnel energetici. Si tratta di opere che possono essere inserite solo in edifici di nuova costruzione permettendo una riduzione dei costi grazie allo sfruttamento dello scavo già previsto.

Per i pali e per i muri energetici, dopo aver eseguito un pre-dimensionamento, impostando la geometria di base, solitamente si esegue la verifica dell'opera di sostegno in condizioni statiche riferendosi alle prescrizioni fornite dalle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2018) per lo stato limite di esercizio (SLE) e per lo stato limite ultimo (SLU).

In particolare, per lo SLU si verifica lo stato limite di tipo geotecnico (GEO) e per perdita di equilibrio del corpo rigido (EQU). In entrambi i casi occorre verificare la stabilità globale del complesso opera di sostegno-terreno, lo scorrimento sul piano di posa, il collasso per carico limite (verifica a capacità portante) e il ribaltamento rispetto ad un punto posto sul lato inferiore, a valle del muro. Per le verifiche a scorrimento, a ribaltamento e a capacità portante si utilizza l'approccio A1+M1+R3, mentre per quella globale si segue l'approccio A2+M2+R2. I diversi approcci si differenziano per il modo di utilizzo dei fattori di sicurezza associati alle azioni (A), alle resistenze (M) e al materiale (R) che vengono riportati nelle apposite tabelle delle NTC.

Per azioni si intende generalmente il contributo dato dal peso proprio del terreno, dal sovraccarico, dall'acqua, dalla presenza di elementi di ancoraggio e da variazioni di temperatura. Il fattore di sicurezza varia a seconda che il carico in esame sia permanente strutturale, permanente non strutturale o variabile e in base all'effetto favorevole o sfavorevole.

Nonostante siano strutture meno diffuse rispetto ai sistemi di sonde verticali, è opportuno fornire una descrizione generale del meccanismo di funzionamento e i vantaggi e gli svantaggi che li caratterizzano.

2.4.1 I PALI ENERGETICI

In genere, la tipologia di fondazione più adatta viene scelta in funzione della dimensione dell'edificio e delle caratteristiche di resistenza del terreno; se dalle indagini geologiche il materiale risulta caratterizzato da scarsa resistenza meccanica, la scelta della tipologia di fondazione ricade sull'inserimento di pali che si estendono in profondità fino al raggiungimento di uno strato di terreno più consistente.

I pali energetici rappresentano una valida alternativa alle sonde nei pozzi verticali e sono chiamati così poiché le tubazioni inserite vengono fissate all'armatura della struttura di fondazione. Possono essere pali prefabbricati se le sonde sono precedentemente inglobate nella struttura che verrà inserita nel terreno oppure possono essere costruiti direttamente in sito e in tal caso il calcestruzzo viene gettato all'interno del foro di perforazione. Gli elementi prefabbricati hanno diametri standardizzati e dimensioni minori rispetto ai pali costruiti in sito. A 50 cm dalla testa del palo viene lasciato lo spazio per connettere le sonde geotermiche.

Data l'impossibilità di controllare la posizione e il riempimento dei pali prefabbricati, di solito si preferisce inserire strutture realizzate in sito.

Le tubazioni in polietilene o polietilene reticolato assumono una configurazione a U o a spirale in un singolo palo avente diametro di 1 m ed estensione da 15 a 40 m di profondità. I tubi sono collegati poi alla pompa di calore mediante circuiti in serie o di tipo compensato a ritorno inverso.

In fabbrica le sonde sono ancorate alla gabbia di armatura del palo tramite elementi di fissaggio o fascette per cavi e, dopo aver eseguito il foro mediante perforazione, viene inserito l'elemento. In corrispondenza della testa del palo i tubi contrassegnati vengono inseriti in una guaina protettiva e sono fissati e tagliati secondo le necessità.

Successivamente, il foro è riempito con il calcestruzzo che, caratterizzato da una buona conduttività e capacità termica, maggiore rispetto al materiale bentonico, consente la trasmissione del calore. In genere le tubazioni hanno diametri compresi tra 20 e 25 mm e spessore di 2-3 mm all'interno dei quali scorre acqua e glicole propilenico. Come riportato da Brandl H. (2006), all'ingresso del fluido nella sonda vi sono una valvola ed un manometro che conferiscono al liquido una pressione di 8-10 bar, che viene mantenuta fino a qualche giorno dopo il getto e anche prima della chiusura del circuito primario, ovvero il circuito interno ad ogni singolo palo. Inoltre, è opportuno installare dei termometri per controllare che la temperatura all'interno del circuito primario non scenda

sotto 0°C. Una schematizzazione della disposizione delle sonde all'interno dei pali energetici è illustrata in Figura 20 e in Figura 21.

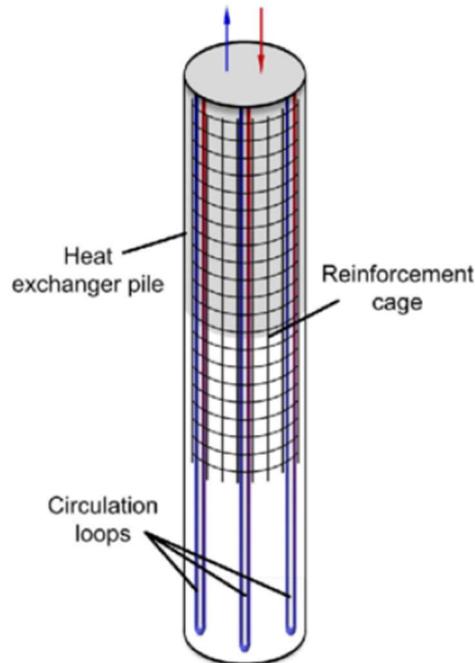


Figura 20 – Esempio di disposizione delle sonde all'interno dei pali energetici

Al circuito primario è connesso il circuito secondario che permette la distribuzione del calore all'interno dell'edificio. Come nel caso di sonde verticali, viene effettuato un controllo circa la resistenza delle tubazioni applicando una pressione di prova di 6 bar e registrando la pressione di prova applicata; successivamente, dopo il getto di calcestruzzo viene eseguita un'altra prova a pressione e le tubazioni sono collegate direttamente al collettore del circuito di riscaldamento e raffrescamento.

La funzione principale del palo di fondazione è di tipo strutturale e rappresenta un sistema geotermico più complesso, in quanto occorre dimensionare l'elemento in modo tale da evitare sollecitazioni termiche che possano provocare un peggioramento delle sue proprietà meccaniche. Quando la struttura si scalda si dilata deformando il terreno adiacente e quando si raffredda si contrae; nel caso di terreni argillosi, la deformazione plastica del terreno permane. Come conseguenza si ha la diminuzione di attrito laterale tra la struttura di fondazione e il terreno, e quindi una riduzione della resistenza globale del palo che non è più in grado di sfruttare la resistenza per attrito. Oltre a essere in grado di sopportare i carichi soprastanti occorre evitare che il fluido all'interno delle sonde non congeli poiché tale condizione causerebbe ulteriori sforzi.

Per tale motivo, per la progettazione dei pali occorre studiare le caratteristiche del terreno e l'influenza termica dell'edificio sul terreno sottostante: la potenza termica estratta per il raffrescamento estivo deve tenere conto del fatto che l'edificio "scalda" il terreno sottostante e deve essere dunque inferiore alla potenza termica per il riscaldamento invernale (Tinti F., 2008). Se i valori di energia fossero molto vicini, questo causerebbe un progressivo riscaldamento del terreno negli anni, diminuendo l'efficienza di refrigerazione.

La minore conduttività termica dovuta alla presenza di un terreno argilloso e la limitata deformazione termica del palo rendono i pali energetici un sistema non conveniente e che rappresenta ancora oggi solo una piccola parte del mercato geotermico. Tra i fattori positivi, vi è il risparmio di spazio, utile soprattutto in contesti molto urbanizzati e l'assenza dei costi di perforazione per le specifiche sonde, in quanto queste vengono inserite dopo aver eseguito un unico foro a scopo strutturale. D'altra parte, il risparmio economico per lo scavo è colmato dalla spesa necessaria per acquistare lunghe tubazioni e per far circolare il fluido al loro interno.

Per la progettazione dei pali energetici esistono specifici software che tengono conto dell'effetto delle dilatazioni e delle contrazioni termiche sull'efficienza strutturale del palo. Esistono anche altri elementi strutturali in grado di supportare i collettori, come i muri di sostegno, le paratie e le platee e in tale caso si usa il termine più generico di "fondazioni fredde".



Figura 21 – Esempio di disposizione delle tubazioni all'interno della gabbia di armatura dei pali energetici (Brandl, H., 2006)

2.4.3 I TUNNEL ENERGETICI

I tunnel energetici, come riportano Barla M. & di Donna A. (2015), sono strutture energetiche il cui funzionamento è basato sull'attivazione termica del rivestimento. Si tratta di gallerie superficiali costruite in ambito urbano, che attraverso un sistema impiantistico sono in grado di sfruttare il calore del suolo per il riscaldamento e il raffrescamento degli edifici posti nelle vicinanze. In particolare, è interessante citare il prototipo del Politecnico di Torino messo a punto nel 2017 che prende il nome di *ENERTUN*.

Alla base del progetto vi è l'inserimento di tubazioni in polietilene all'interno dei conci della galleria proprio come per i pali di fondazione e i muri energetici: le sonde contengono un fluido termovettore, generalmente acqua e glicole propilenico, in grado di scambiare calore utilizzato per alimentare le pompe di calore collocate all'interno degli edifici soprastanti. Nel caso in esame sono stati realizzati 12 conci in calcestruzzo in stabilimento e sono stati trasportati in sito per l'assemblaggio dei due anelli nel tratto di metropolitana Lingotto-Bengasi della linea 1 (Figura 22). Il tratto di galleria è stato realizzato con quattro talpe meccaniche, più comunemente chiamate TBM (tunnel boring machine) di diametro pari a 6,8 m per una lunghezza di 80 m avanzando 10 m ogni giorno. Lo scavo è stato eseguito al di sotto della falda posta a 12 m dal piano campagna con lo scopo di evitare interferenze con strutture storiche, quali la galleria di Pietro Micca e diversi parcheggi interrati. Infatti, la galleria posta a 15-20 m è rivestita con anelli di spessore pari a 30 cm: le tubazioni in polietilene reticolato sono posizionate al loro interno a 10 cm dal bordo esterno e hanno diametro di 25 mm e spessore di 2,3 mm. In particolare, nello spessore della tubazione è possibile riconoscere tre diversi strati, uno interno di polietilene ad alta intensità, uno medio di materiale polimerico e uno esterno volto a creare una barriera per l'ossigeno. Vi sono dei manicotti, che oltre a rendere l'impianto ispezionabile in superficie, permettono la connessione tra le tubazioni e la condotta di andata e di ritorno tra i diversi conci.

In prossimità della galleria energetica sorge il Grattacielo della Regione ancora incompleto e i cui uffici in futuro potrebbero essere alimentati dal suddetto impianto. A seguito di numerose indagini geotecniche e numeriche eseguite in sito è stato costruito un modello semplificato del sottosuolo di Torino usato anche per compiere analisi di flusso termo-idraulico sugli elementi finiti (FEM). Le simulazioni eseguite per la stagione estiva ed invernale si basano sull'impostazione di valori iniziali per la velocità e la temperatura

del fluido (0,4 m/s e 4-28°C). L'output dell'analisi di simulazione è rappresentato dalla temperatura in uscita del fluido da cui è possibile ricavare la quantità di calore sottoforma di potenza termica necessaria per alimentare l'edificio. Le condizioni favorevoli del sottosuolo di Torino permettono uno scambio ottimale del calore ottenendo risultati molto positivi in fatto di risparmio economico: infatti, si è stimato che il costo per l'attivazione termica dell'impianto risulta essere inferiore all'1% del costo totale dell'opera, metodo che inoltre risulta maggiormente conveniente rispetto all'inserimento di sonde geotermiche verticali (Barla M. & di Donna A., 2015).

Inoltre, l'installazione di tale sistema di sonde permette di limitare il surriscaldamento interno della galleria dovuto al traffico dei veicoli e la riduzione della necessità di ventilazione forzata grazie all'assorbimento del calore; tuttavia, il sistema geotermico non deve influenzare la capacità strutturale del rivestimento in calcestruzzo della galleria e la sua impermeabilità. Occorre prestare molta attenzione alla fase di collegamento tra le tubazioni dei diversi conci, in quanto potrebbero crearsi interferenze con l'avanzamento della TBM mettendo a rischio la durabilità delle sonde.

Tale tecnologia trova applicazione soprattutto nelle aree urbane densamente popolate e permette di ridurre i costi complessivi di realizzazione in quanto non vi è la necessità di eseguire un apposito scavo sfruttando le opere strutturali già previste.

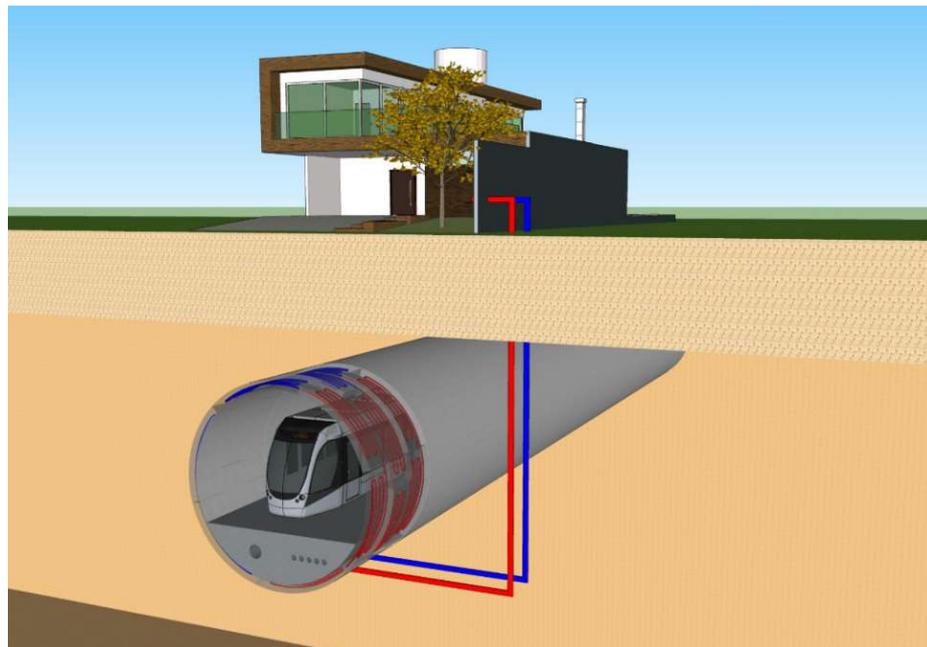


Figura 22 – Schematizzazione del rivestimento di una galleria e assemblaggio dell'armatura sui conci (www.teknoiring.com)

2.4.2 I MURI ENERGETICI

Un'altra tipologia di strutture energeticamente attive è rappresentata dai diaframmi, opere di sostegno contenenti sonde in grado di scambiare calore con il terreno. Anche in questo caso non sono presenti ulteriori costi significativi di realizzazione oltre a quelli previsti per la costruzione di tali elementi strutturali. Tra i vantaggi associati a questa tecnologia vi è l'elevata capacità di sostegno ottenuta raggiungendo profondità molto elevate e la capacità di creare una barriera impermeabile.

A partire dagli anni '80, come riporta l'articolo Brandl H., (2006) in Austria e in Svizzera per la prima volta l'energia è stata ottenuta da elementi di fondazione come solai contro-terra, pali di fondazione e muri di sostegno (1996). La costruzione strutture al cui interno sono posizionate sonde che permettono la circolazione del fluido termovettore porta allo sfruttamento della buona conducibilità termica del calcestruzzo. Si tratta di un metodo innovativo ed economico che, nel rispetto dell'ambiente, permette il riscaldamento ed il raffrescamento dei locali dell'edificio attraverso l'utilizzo di energia termica rinnovabile. Il funzionamento combinato, in estate e in inverno, consente di evitare il fenomeno della deriva termica, corrispondente ad una variazione irreversibile di temperatura del terreno che causerebbe una diminuzione di efficienza dell'impianto geotermico e una modifica del metabolismo della vegetazione.

I muri di sostegno nascono con l'intento di stabilizzare pendii naturali o artificiali e possono essere collocati a valle del terreno instabile e prendono il nome di muri di controripa, oppure possono essere costruiti a monte e in tal caso si parla di muri di sottoripa o sottoscarpa. La costruzione di queste opere porta ad una modifica dell'equilibrio generale del pendio e pertanto risulta importante scegliere la tipologia di struttura più adeguata anche in base alla geometria e al rapporto dimensionale. In generale, la tipologia di muro più diffusa è rappresentata dai muri a gravità, la cui funzione di sostegno è dovuta al peso proprio della struttura e per questo motivo possono essere costruiti in muratura, in pietra o in calcestruzzo. A differenza dei muri a gravità, i muri di sostegno a mensola e a contrafforti e speroni sfruttano anche il peso del terreno presente a monte della fondazione e viene inserito il quantitativo di armatura adeguato a superare le verifiche che verranno spiegate in seguito. Inoltre, i muri di sostegno a gravità raggiungono altezze di circa 3,5 m, inferiori rispetto a muri a mensola, a contrafforti e a

speroni. Sono strutture armate a flessione e a taglio alte anche 7 m. In Figura 23 sono illustrate le diverse tipologie di muri di sostegno.

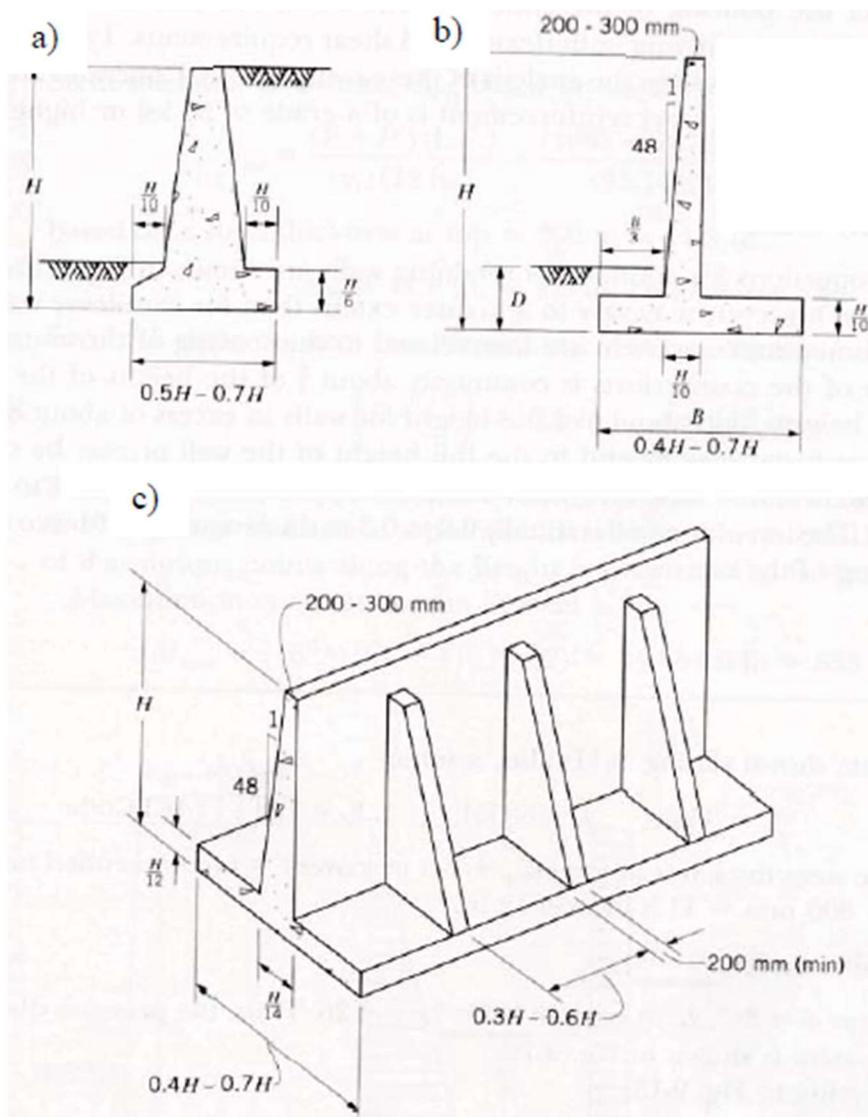


Figura 23 – Principali proporzioni per muri di sostegno a gravità (a), a mensola (b), a contrafforti e speroni (c)

Per ridurre la spinta causata dal terreno posto a monte si è soliti realizzare un pendio con debole pendenza, mentre per ridurre la spinta dovuta alla presenza di acqua si interviene inserendo opportuni sistemi di drenaggio.

Tra questi vi sono i fori di drenaggio di diametro pari a 10-15 cm che vengono collocati lungo tutta l'altezza del muro e permettono la raccolta dell'acqua all'interno di una canaletta posizionata alla base del muro; in alternativa, è possibile inserire materiali drenanti, posizionati sul pendio del terreno in modo tale da abbassare il livello della falda o collocare dei dreni sub-orizzontali.

Come nel caso dei pali energetici, è necessario eseguire analisi termomeccaniche per comprendere l'influenza degli stress termici sulla capacità strutturale dell'elemento. Tali effetti in alcuni casi non possono essere considerati trascurabili e si manifestano sottoforma di spostamenti addizionali e variazioni delle azioni interne. Le deformazioni causate dall'espansione e dalla contrazione termica possono causare fratture o aumentare la dimensione di quelle già presenti creando un ulteriore danno alla struttura. Per cui è importante assicurarsi che la temperatura induca spostamenti tollerabili ed eseguire verifiche a livello di stabilità globale e di sicurezza strutturale. Se tali analisi non fossero soddisfatte sarebbe possibile inserire elementi strutturali, quali tiranti o puntoni in calcestruzzo per aumentare la resistenza del diaframma. Per analizzare il comportamento del sistema opera-terreno ci si serve di metodi numerici, permettono di simulare il tenendo conto anche delle fasi costruttive come lo scavo e il getto, che inducono ulteriori sforzi e tensioni. Tra le tipologie adottate vi è l'analisi agli elementi finiti (FEA) e la modellazione agli elementi finiti (FEM) utile soprattutto per eseguire uno studio termo-idraulico e conoscere l'efficienza energetica e gli effetti dell'attivazione termica sul terreno circostante. Per questo motivo la tecnica di modellazione numerica in fase di progettazione risulta essere molto importante come strumento di simulazione delle condizioni in sito e prevedere la risposta futura dell'opera realizzata.

Si tratta di strutture realizzabili in quasi tutti i tipi di terreni e in molteplici contesti, soprattutto di tipo urbano, per parcheggi e piani interrati, stazioni metropolitane ma anche per edifici residenziali. Per la città di Torino il caso del Grattacielo San Paolo, del passante ferroviario e della metropolitana rappresentano solo alcuni degli esempi più rilevanti di tale tecnologia.

2.5 LA NORMATIVA IN AMBITO GEOTERMICO

La commissione europea a partire dal gennaio 2006 ha promosso il progetto *Ground-Reach* con lo scopo di incentivare il mercato dei sistemi di condizionamento degli edifici che sfruttano l'energia geotermica. Le normative hanno lo scopo di garantire il rispetto ambientale durante le fasi di installazione ponendo particolare attenzione alla protezione delle acque superficiali e sotterranee.

2.5.1 IL QUADRO EUROPEO E AMERICANO

Uno dei paesi più sviluppati dal punto di vista delle fonti rinnovabili è la Svizzera che ha introdotto un piano legislativo volto a ridurre le emissioni di anidride carbonica fino all'80% e possiede il più alto numero di pompe di calore in rapporto alla sua popolazione. La lunghezza della sonda, ovvero la profondità dell'impianto viene definita secondo le norme della Società svizzera degli ingegneri e degli architetti (SIA) e deve essere stabilita prima di richiedere l'autorizzazione della perforazione e la licenza di costruzione comunale. La procedura di autorizzazione varia per ogni cantone e sul web è possibile trovare carte cantonali che mostrano in quali zone è permessa l'installazione di sonde e a quali condizioni. "Il certificato di qualità per le imprese di perforazioni di sonde geotermiche verticali" serve all'impresa per poter mettere a punto tutte le fasi di installazione di un impianto geotermico sul territorio nazionale e viene rilasciato in conformità delle norme svizzere emanate dalla SIA e riguardanti:

- Le condizioni generali per l'esecuzione dei lavori di costruzione;
- L'evacuazione e il trattamento delle acque di cantiere;
- Il dimensionamento dei sistemi captanti il calore del sottosuolo a bassa temperatura;
- L'accumulo stagionale di calore;
- Il principio di utilizzo del calore della terra a limitata profondità per i sistemi di riscaldamento;
- L'energia di provenienza dal sottosuolo;

Esistono altre raccomandazioni e direttive da seguire per gli impianti geotermici, una di queste è la AWP T1 per l'installazione di sistemi a pompa di calore con sonde geotermiche e la norma tedesca VDI 4640 per l'utilizzo termico del sottosuolo, che

rappresenta anche la direttiva tecnica di riferimento in Europa. In particolare, la Direttiva VDI 4640 è divisa in quattro parti:

- Foglio 1, Fondamenti, autorizzazioni e aspetti ambientali;
- Foglio 2, Pompe di calore accoppiate al terreno;
- Foglio 3, Stoccaggio energia termica sotterranea;
- Foglio 4, Sfruttamento diretto.

Per cui l'azienda ha l'obbligo di verificare tutte le autorizzazioni necessarie prima dell'avvio dei lavori e disporre le procedure di cantiere adatte a svolgere ogni fase in sicurezza. Inoltre, è compito dell'impresa prelevare alcuni campioni di materiale dal luogo di perforazione per individuarne la stratigrafia e redigere un protocollo di perforazione da mandare alle autorità competenti. Oltre alla Svizzera, all'interno del mercato geotermico assumono posizioni di rilievo anche l'Austria, l'Olanda, le cui installazioni risalgono dalla prima metà degli anni '80, la Svezia e la Germania. Come già evidenziato, la normativa tecnica tedesca rappresenta un caposaldo all'interno del piano legislativo europeo. Tutte le parti della norma sono legate a riferimenti legislativi tedeschi fornendo una visione chiara per l'esecuzione delle opere e di fondamentale importanza per la diffusione dei sistemi geotermici in Germania. Nella tabella sottostante (Figura 24) sono riportati i dati relativi alla potenza annuale e per abitante prodotta nei paesi maggiormente in via di sviluppo all'interno del mercato geotermico del 2016. Come si può notare, la Svezia risulta il paese caratterizzato dalla produzione maggiore di energia geotermica, seguono l'Islanda e la Finlandia.

Paese	Produzione (MWh/anno)	Produzione (MWh) per abitante
Islanda	7'422'000	22,79
Svezia	14'423'380	1,40
Finlandia	5'000'400	0,91
Nuova Zelanda	2'394'910	0,53
Norvegia	2'294'630	0,45
Svizzera	3'288'260	0,41

Figura 24 – Dati relativi alla produzione di potenza elettrica annua e per abitante (geothermie-schweiz.ch)

Fuori dal contesto europeo, gli Stati Uniti, che non aderirono al protocollo di Kyoto, sono tra i maggiori installatori di impianti di climatizzazione geotermica: l'ASHRAE è l'ente adottato a livello mondiale come riferimento per il settore del riscaldamento e della

climatizzazione. I sistemi geotermici che scambiano calore con l'acqua di falda si diffusero nei primi anni '70, mentre dieci anni dopo furono installati i primi impianti a circuito chiuso; si tratta di un settore in costante crescita, che non ha subito arresti o rallentamenti come nel caso dei paesi europei.

2.5.2 IL QUADRO NORMATIVO IN ITALIA

In Italia la normativa in campo geotermico è ancora carente e varia da regione a regione, tuttavia non tutte le regioni hanno inserito un piano legislativo per la progettazione e l'installazione di impianti geotermici ostacolando in parte il diffondersi di questa nuova tecnologia. Per una maggiore comprensione del quadro normativo, nei paragrafi successivi, si intende riportare gli articoli e le normative ambientali che compaiono nel Codice civile e quelle emanata dall'ente UNI (Ente Nazionale Italiano di Unificazione):

- Il Codice civile:
 - Art. 840, Sottosuolo e spazio sovrastante al suolo;
 - Art. 844, Immissioni;
 - Art. 889, Distanze per pozzi, cisterne, fosse e tubi.
- la Normativa UNI EN:
 - 10349:1994, riguarda il Riscaldamento e il raffrescamento degli edifici;
 - 10339:1995, è intitolata Impianti aeraulici a fini di benessere;
 - 11466:2012, è relativa a Sistemi geotermici a pompa di calore - Requisiti per il dimensionamento e la progettazione;
 - 11467:2012, Sistemi geotermici a pompa di calore - Requisiti per l'installazione;
 - 11468:2012, Sistemi geotermici a pompa di calore - Requisiti ambientali;
 - TS 11300:2012, Prestazioni energetiche degli edifici.

2.5.3 LE DIRETTIVE DELLA REGIONE PIEMONTE

La regolamentazione burocratica varia da provincia a provincia e cambia a seconda che si voglia realizzare un impianto geotermico a circuito aperto o a circuito chiuso. In generale, per perforazioni a fini idrici o di ingegneria civile, a profondità superiore a 30 m è necessario darne la comunicazione al *Servizio geologico della Direzione Generale delle Miniere del Ministero dello Sviluppo Economico* entro 30 giorni prima delle perforazioni.

Occorre redigere una relazione corredata dei risultati geologici e geofisici a partire dalle prove in sito; tutte queste informazioni saranno controllate dal Servizio Geologico che ha il compito produrre carte geotecniche utili a valutare la fattibilità degli impianti geotermici in alcune tipologie di sottosuolo.

Non tutti i lavori di perforazione richiedono una licenza, solo nel caso in cui questi possano creare danni all'acqua sotterranea è necessario ottenere un'autorizzazione dalle autorità competenti. I sistemi closed loop rientrano, quasi in tutta Italia, all'interno della normativa per l'utilizzazione della risorsa idrica chiamata L. 36/94 o "Legge Galli" e per lo scarico di acque per scopi energetici (Decreto Legislativo 152/2006). Tra le direttive della regione Piemonte vi sono:

- Il Decreto Legislativo 3 aprile 2006, **n.152**, Norme in materia ambientale, parte quinta (norme in materia di tutela dell'aria e di riduzione delle emissioni atmosfera di impianti e attività).
- il Decreto legislativo 11 febbraio 2010, **n. 22** che consiste nel riassetto della normativa in materia di ricerca e coltivazione delle risorse geotermiche. Definisce tre categorie di risorse geotermiche: ad alta, a media e a bassa entalpia. Le risorse geotermiche ad alta entalpia sono quelle caratterizzate da una temperatura del fluido termovettore superiore a 150°C; le risorse geotermiche a media entalpia presentano una temperatura del fluido termovettore compresa tra 90°C e 150°C; infine, si definiscono risorse geotermiche a bassa entalpia quelle caratterizzate da una temperatura del fluido termovettore inferiore a 90°C.
- La Determinazione dirigenziale 3 dicembre 2012, **n.900**.
- la Determinazione dirigenziale 3 marzo 2016, **n.66**, Linee Guida per l'installazione delle sonde geotermiche.
- il Piano di tutela delle acque (2018), **PTA**; Il Piano di Tutela delle Acque (PTA) ha lo scopo di proteggere le acque superficiali e sotterranee del territorio permettendo lo sviluppo sostenibile della comunità. Si compone di otto parti contenenti la relazione generale con la verifica di competenza, le misure di piano con le norme e gli allegati, le tavole di piano, il rapporto ambientale VAS e il piano di monitoraggio VAS. In Figura 25 si riporta un estratto della tavola 7 del Piano di Tutela della Acque della Regione Piemonte per la rappresentazione delle zone di riserva caratterizzate dalla presenza di risorse idriche sotterranee non ancora utilizzare per il consumo umano, ma potenzialmente destinabili a tale uso.

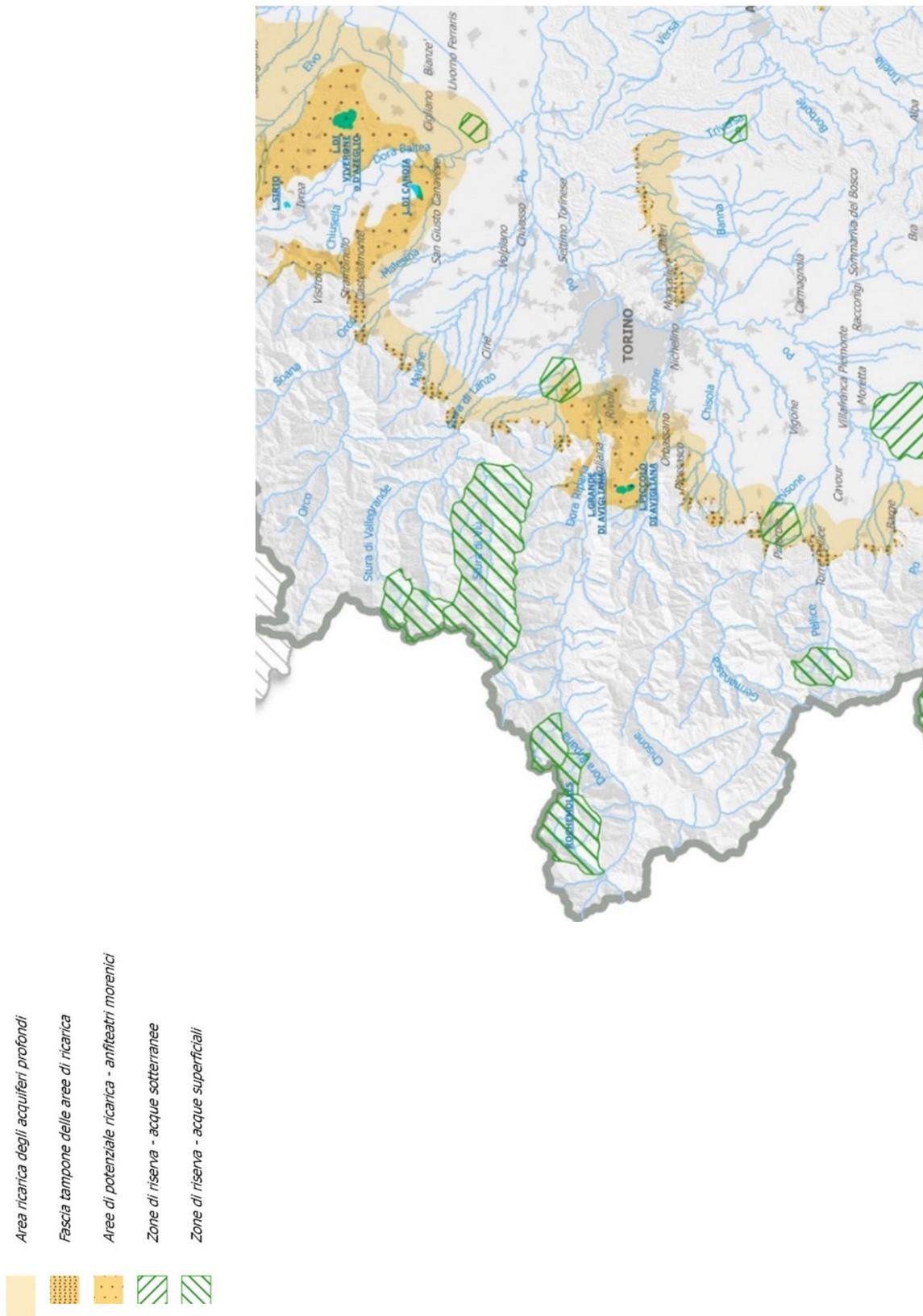


Figura 25 – Stralcio della Tavola 7, Piano di Tutela della Acque della Regione Piemonte

2.5.3.1 LE LINEE GUIDA PER LE SONDE GEOTERMICHE

Con la **Determinazione dirigenziale 3 marzo 2016, n.66** del settore Tutela delle acque della Direzione Ambiente della Regione Piemonte, sono state approvate le Linee Guida per le sonde geotermiche la cui adozione è stata dettata dalla carenza di una specifica normativa per quanto riguarda gli impianti a circuito chiuso a fronte di un sempre più elevato numero di installazioni che rendono necessarie precauzioni ambientali riguardo profondità e modalità di perforazione delle sonde, al fine di garantire il rispetto della normativa regionale in materia di protezione delle acque sotterranee.

Nella parte iniziale del documento gli impianti di sonde geotermiche sono stati suddivisi in piccoli impianti e grandi impianti. I primi sono caratterizzati da una potenza termica o frigorifera utile inferiore o uguale a 30 kW; i secondi hanno potenza termica o frigorifera utile superiore a 50 kW.

Nella prima parte del documento sono riportate le modalità tecnico-operative per la progettazione, l'installazione, il collaudo, la gestione e la dismissione degli impianti. In riferimento alle sonde geotermiche verticali sono spiegate le modalità di tracciamento, di perforazione, le tubazioni e la posa delle sonde geotermiche, la cementazione, i fluidi termovettori, il collaudo, il monitoraggio e la dismissione.

Nella seconda parte delle linee guida sono elencati ed illustrati i contenuti degli elaborati progettuali per piccoli e grandi impianti.

Per i piccoli impianti occorre fornire una relazione tecnica di progetto dell'impianto che contenga la descrizione della tipologia di impianto, della geometria delle sonde, della volumetria e superficie da riscaldare o raffrescare, del periodo di utilizzo dell'impianto, della potenza termica o frigorifera utile, COP, delle informazioni riguardanti le tubazioni e la temperatura del fluido e delle tecniche di perforazione in base alla caratterizzazione geotecnica derivante da dati bibliografici.

Invece, per i grandi impianti viene richiesta la caratterizzazione delle proprietà termiche dei terreni attraversati sulla base del GRT, la caratterizzazione litostratigrafica che interessa un intorno significativo dell'impianto e il censimento degli impianti geotermici, anche quello degli impianti a ciclo aperto con utilizzo di acqua di falda, in un'area avente il raggio di almeno 1 km dal perimetro esterno dell'impianto.

Nel caso di impianti costituiti da più di 100 sonde geotermiche viene richiesto un piano di monitoraggio con lo scopo di individuare la posizione dei piezometri di monitoraggio, la stratigrafia del piezometro eseguito a carotaggio continuo, le caratteristiche della strumentazione, il protocollo analitico e le tempistiche di campionamento. Per gli aspetti che non vengono presi in considerazione si fa riferimento alla normativa UNI.

3. IL CONTESTO TORINESE

3.1 IL PATRIMONIO STORICO

Come riferito dal progetto *Piano d'azione per l'energia sostenibile*, Torino è una città di 886 837 abitanti estesa su una superficie di 130 km² che, secondo i dati ISTAT del 2011, consta 36 158 edifici adibiti ad uso residenziale. Nel corso della storia la città ha subito diverse trasformazioni in ambito urbano e per questo motivo si presenta ricca di edifici storici, tra i quali è possibile individuare per lo più grandi e piccole palazzine, villette a schiera e condomini che, data l'epoca, non seguono le leggi sul contenimento dei consumi energetici emanate negli anni successivi.

Gli edifici costruiti prima del 1910 sono caratterizzati da una struttura in muratura portante; dal 1910 al 1972 vi è la compresenza di murature portanti e strutture in cemento armato con murature di tamponamento; dagli anni '70 agli anni '90 sono sempre più frequenti le strutture in cemento armato con tamponamenti isolati, mentre dal 1990 in poi si sono diffuse le pareti di tamponamento isolate per la riduzione dei consumi energetici e gli impianti di riscaldamento più efficienti.

Come si vedrà in seguito, tra gli obiettivi principali per lo sfruttamento della risorsa geotermica a bassa entalpia vi è la necessità di una caratterizzazione e classificazione delle aree idonee a livello locale, in quanto la difficile individuazione della risorsa geotermica limita lo sviluppo del sistema impiantistico a livello dei singoli cittadini.

3.1.1 LE PRINCIPALI TIPOLOGIE EDILIZIE

In generale, l'installazione di impianti geotermici può avvenire sia per edifici di nuova costruzione sia sul costruito attraverso interventi di riqualificazione energetica. Nel primo caso occorre progettare il sistema impiantistico adeguato di pari passo con la parte architettonica e strutturale dell'edificio al fine di ottimizzare le prestazioni del complesso attraverso l'utilizzo di materiali di isolamento adeguati e limitando i ponti termici.

Come già spiegato, l'installazione di un sistema geotermico è favorita dalla presenza di un'area a disposizione, soprattutto se si tratta di collettori orizzontali o sonde verticali e si adatta a diverse tipologie edilizie, dal condominio ad uso residenziale alla villetta a schiera.

Per esempio, per l'installazione di un impianto geotermico costituito da serpentine a contatto con il terreno, l'ancoraggio delle stesse può avvenire lungo tutto il perimetro della superficie esterna del muro di sostegno sfruttando la potenza estraibile al m². La Figura 26 ha lo scopo di evidenziare la disposizione delle sonde geotermiche in un edificio tipo di diversi piani.



Figura 26 – Edificio tipo con serpentine ancorate lungo il perimetro del muro di sostegno

A seconda della tipologia edilizia le potenze termiche che entrano in gioco sono diverse. Per questo motivo, gli impianti geotermici superficiali difficilmente vengono installati in edifici di grandi dimensioni come nel caso del Grattacielo San Paolo; il numero elevato

di locali ad uso ufficio e i grandi volumi non possono essere riscaldati o raffrescati dal solo sistema geotermico.

Invece, per gli interventi di riqualificazione energetica, la loro fattibilità è legata a diversi fattori. La presenza di aree servite da una rete di teleriscaldamento e di centri storici limita la tipologia di interventi realizzabili. Nel primo caso, se alcune aree sono servite da teleriscaldamento, negli edifici non sarà presente una caldaia ma uno scambiatore di calore difficilmente sostituibile. Nel secondo caso, il PRG può imporre alcuni vincoli nell'ambito di edifici storici e le procedure di autorizzazione possono risultare maggiormente complicate. Non si tratta di situazioni sempre valide in quanto è possibile che vi sia un edificio nei pressi di una stazione di teleriscaldamento che non sia allacciato così come possono essere presenti edifici storici non soggetti a vincoli architettonici che impediscono la realizzazione degli interventi.

A Torino si conta una percentuale di edifici storici pari al 17% degli edifici residenziali in Provincia di Torino, mentre le aree teleriscaldate occupano un 22% (Piano d'azione per l'energia sostenibile della provincia di Torino e della potenzialità di risparmio energetico e delle fonti rinnovabili in ambito urbano, 2013).

Negli ultimi anni le novità in campo energetico hanno portato a stabilire l'efficienza e la qualità di un edificio in termini di consumi energetici ed emissioni tramite la certificazione energetica. Questa riporta i dati riguardanti il consumo di energia e la produzione di anidride carbonica associata all'edificio.

L'Italia si presenta come un paese molto vario in termini di contesto climatico e quindi di consumi: cambiano le esigenze in fatto di riscaldamento e raffrescamento in funzione della posizione geografica dell'edificio e delle tecniche di costruzione. Edifici in pietra avranno necessità energetiche differenti rispetto a costruzioni in mattone pieno, mattoni forati o in mattoni composti da materiali isolanti.

La difficoltà per la scelta di un impianto geotermico in Italia è data anche dal fatto che la maggior parte delle abitazioni è stata costruita prima degli anni '80 con vecchie tecnologie impiantistiche e con scelte architettoniche e stratigrafiche che non tengono conto delle dispersioni termiche dell'edificio. Per cui, oltre a riuscire ad inglobare la nuova tecnologia nei progetti di nuova costruzione, è importante elaborare nuove tecniche di intervento che portino l'edificio a ridurre i consumi energetici e le emissioni di gas inquinanti. Nel caso

di riqualificazione energetica il compito del progettista è anche quello di rispettare la storia dell'edificio, cercando di non stravolgere la sua natura.

3.1.2 LA ZONE CLIMATICHE ITALIANE

Il fabbisogno energetico dell'edificio è strettamente collegato al contesto climatico nel quale esso si inserisce e varia anche a seconda del settore coinvolto (residenziale o terziario). La suddivisione della penisola italiana in zone climatiche è stata introdotta il 26 agosto 1993 dal *Decreto del presidente della Repubblica n. 412* all'interno del regolamento per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti geotermici. Si tratta di sei zone che, divise non per comuni ma per collocazione geografica, si distinguono sulla base dei gradi giorno e sono caratterizzate da un codice alfabetico (Figura 27). I gradi giorno (GG) rappresentano un'unità di misura data dalla somma, estesa a tutti i giorni di periodo annuale di riscaldamento, delle differenze positive di temperatura degli ambienti interni (20°C) e la temperatura media esterna.

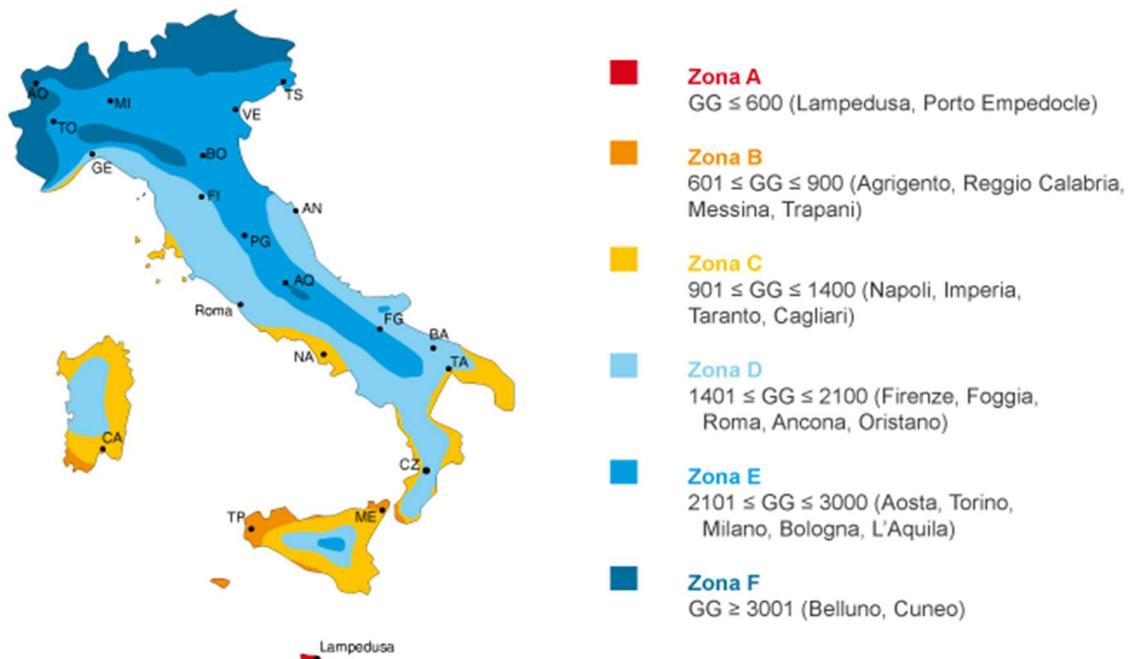


Figura 27 – Zone climatiche italiane (www.certifico.com)

La città di Torino si trova nella zona climatica E con 2617 GG base 20°, in cui il fabbisogno è sia di riscaldamento invernale che di climatizzazione estiva. Secondo una particolare classificazione dei climi, chiamata classificazione di W. Koppen, Torino è

caratterizzata da un clima temperato umido delle medie latitudini con estate calda (it.wikipedia.org).

Gli inverni risultano moderatamente freddi, asciutti e spesso soleggianti: la zona di Torino è interessata da nevicate caratterizzate da una risalita termica dovuta alla particolare conformazione orografica della porzione occidentale di Pianura Padana. L'ARPA sul sito mette a disposizione i dati relativi alle temperature annuali della città di Torino (Tabella 1). Prendendo come riferimento l'anno 2017, la temperatura minima di -1,7°C si verifica nel mese di gennaio, mentre la temperatura massima di 29,3 °C viene raggiunta nei mesi di giugno e luglio.

<i>Temperatura [°C]</i>	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
<i>Minima</i>	-1,7	0	3,8	7,4	11,6	15,3	17,9	17,2	14	8,9	3,7	0
<i>Massima</i>	4,6	7,3	12,8	17,8	22,7	26,2	29,3	27,7	23,7	17,1	10,1	5,9
<i>Media</i>	1,4	3,6	8,3	12,6	17,1	29,7	23,6	22,4	18,8	13	6,9	2,9

Tabella 1 – Temperature minime, massime e medie per la città di Torino (Climate – Data.org)

Il sistema di riscaldamento più comune in Italia è rappresentato da una caldaia, generalmente a condensazione che permette il recupero di calore di condensazione ottenendo rendimenti molto elevati. Una soluzione ancora migliore, come già visto, è rappresentata dalla pompa di calore.

3.1.2.1 LA GEOLOGIA E L'IDROGEOLOGIA

Il primo step da affrontare in vista dell'installazione di un impianto geotermico adeguato riguarda l'analisi delle caratteristiche del terreno. In particolare, il rendimento degli scambiatori è funzione delle proprietà termiche e idrogeologiche del terreno che possono determinarne una buona o una cattiva resa. Come già espresso, tra le proprietà del suolo che influenzano il trasporto dell'energia geotermica vi è la conduttività termica del terreno, funzione della densità e della granulometria e la presenza di acqua, il cui congelamento durante il periodo invernale riduce lo scambio termico. Tra le proprietà idrogeologiche vi è la conducibilità idraulica che è misurata in m/s ed è associata a diverse tipologie di materiale e la porosità. Tutti questi fattori determinano la potenza termica realmente scambiabile dalle sonde e quindi anche quella richiesta dall'impianto a pompe di calore.

Sul portale Cartografico Nazionale del Ministero dell'ambiente, nel database della Provincia di Torino sono contenute le informazioni relative alla caratterizzazione geologica utile a valutare la possibilità di utilizzo dell'energia geotermica in una determinata area. La descrizione dei parametri geologici avviene per il terreno presente in corrispondenza del piano campagna e per i materiali a differenti profondità. Per fare ciò è possibile consultare la carta geologica elaborata dall'ISPRA in scala 1:50 000 (sito ISPRA ambiente) che si compone di due fogli, uno per la zona est di Torino (Foglio 156) e uno per la zona ovest (Foglio 155). La carta geologica digitale del Piemonte costituisce uno strumento di base fondamentale per la conoscenza del territorio piemontese e fornisce informazioni propedeutiche all'analisi della pericolosità geologica, alla pianificazione e gestione del suolo e del sottosuolo e alla progettazione di opere e infrastrutture.

Tale cartografia è generata in formato raster e necessita di essere georeferenziata e sovrapposta alla CTRN della Regione Piemonte. Dalla carta geologica elaborata dall'ISPRA è possibile ricavare i valori di conducibilità termica dei materiali presenti nel sottosuolo e inserire tali informazioni in un sistema GIS.

Altre informazioni possono essere ricavate a partire dal documento *Geologia e idrostratigrafia profonda della Pianura Padana Occidentale (2009)* che fornisce un quadro più completo insieme alle stratigrafie elaborate dalla Provincia di Torino per lo studio delle acque sotterranee. Qui è necessario tenere in considerazione l'influenza della porosità dei diversi strati litologici sulla conducibilità idraulica del suolo. Tale documento adotta un approccio multidisciplinare fornendo informazioni circa la stratigrafia e l'idrogeologia a partire dall'interpretazione di prove sismiche a riflessione e creando un quadro completo della struttura dei materiali. Torino rientra nella zona del Bacino Padano Occidentale caratterizzata da depositi del Pleistocene medio-Olocene ovvero depositi con caratteristiche di tipo continentale che comprendono depositi fluviali, fluvio-glaciali, lacustri ed eolici.

In particolare, il sottosuolo di Torino è costituito da sabbie e depositi ghiaiosi mediamente e poco dense, presentando al di sotto di 8-10 m materiali cementati (Barla M & Di Donna A., 2015). Le informazioni geologiche, che derivano da indagini geotecniche e numeriche, permettono di individuare la superficie libera della falda, lo spessore dell'acquifero.

Si riporta una schematizzazione delle principali unità metamorfiche della Regione Piemonte (Figura 28): il Bacino di Alessandria, il Bacino di Savigliano e il Bacino Padano Occidentale.

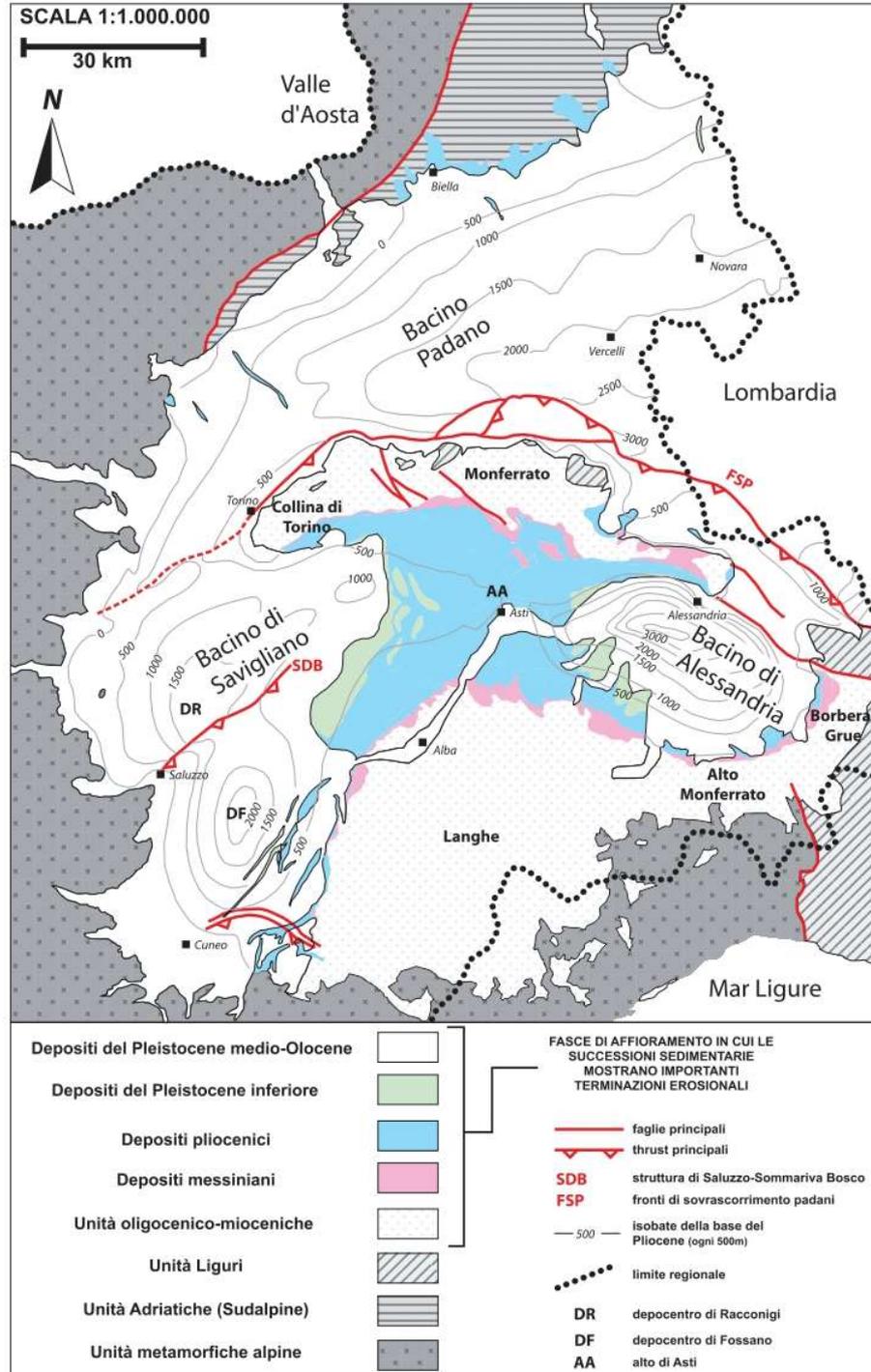


Figura 28 – Schema delle unità metamorfiche della Regione Piemonte (Irace A. & al., Geologia e idro stratigrafia profonda della Pianura Padana Occidentale, pag. 9)

La composizione sabbiosa-ghiaiosa del territorio di Torino porta ad avere valori di permeabilità (k) che oscillano tra 10^{-3} e 10^{-6} m/s. La permeabilità idraulica e la conducibilità termica possono essere poste in relazione al fine di determinare un intervallo di resa termico del sottosuolo (Tabella 2).

Tipologia di materiale	k [m/s]	
<i>Ghiaia pulita</i>	10^{-2}	1
<i>Sabbia pulita, sabbia e ghiaia</i>	10^{-5}	10^{-2}
<i>Sabbia molto fine</i>	10^{-6}	10^{-4}
<i>Limo e sabbia argillosa</i>	10^{-9}	10^{-5}
<i>Limo</i>	10^{-8}	10^{-6}
<i>Argilla omogenea sottofalda</i>	< 10^{-9}	
<i>Argilla sovraconsolidata fessurata</i>	10^{-8}	10^{-4}
<i>Roccia non fessurata</i>	10^{-12}	10^{-10}

Tabella 2 – Intervalli di permeabilità

In Tabella 3 si riporta la resa di diversi terreni in funzione della conducibilità termica media del materiale.

Tipologia di materiale	Conducibilità termica media [W/mK]	Resa [W/m]	Tipologia di resa
<i>Pomici</i>	0,4	20-30	Bassissima
<i>Ghiaia asciutta</i>	0,4	20-40	Bassissima
<i>Sabbia asciutta</i>	0,5	30-50	Bassa
<i>Limi e argille asciutti</i>	0,6	30-50	Bassa
<i>Ossidiane</i>	1,3	30-40	Media
<i>Ghiaia bagnata</i>	1,6	40-50	Media
<i>Basalti</i>	1,7	40-50	Media
<i>Gabbri</i>	1,8	40-50	Media
<i>Limi e argille bagnate</i>	1,8	40-50	Media
<i>Porfidi</i>	1,9	40-50	Media
<i>Arenarie</i>	2,2	50-60	Buona
<i>Marmo</i>	2,2	50-60	Buona
<i>Sabbia bagnata</i>	2,3	50-60	Buona
<i>Travertini</i>	2,4	50-60	Buona
<i>Ardesia</i>	2,4	50-60	Buona
<i>Granodioriti</i>	2,5	60-70	Molto buona
<i>Gesso</i>	2,5	50-60	Molto buona
<i>Calcari</i>	2,8	60-70	Molto buona
<i>Gneiss</i>	2,9	60-70	Molto buona
<i>Graniti</i>	3,5	80-90	Ottima

Tabella 3 – Resa termica in funzione della conducibilità termica media

La presenza e la profondità della falda incidono molto sulla resa del terreno incrementandone il valore e per questo è importante compiere studi approfonditi circa la configurazione idrogeologica presente nell'area in esame.

In generale, all'interno della pianura piemontese è possibile distinguere la tipologia di acquiferi in:

- superficiali, se raggiungono la profondità massima di 80 m;
- profondi se si trovano a profondità compresa tra 80 e 300 m;
- molto profondi se si spingono oltre i 300 m.

Nella zona in esame lo spessore della falda superficiale varia da 0 a 85 m (Irace A. & al., *Geologia e idro stratigrafia profonda della Pianura Padana Occidentale*).

Un'altra fonte di informazioni è rappresentata dal Piano di Tutela delle Acque (PTA) che mette a disposizione tavole grafiche relative alla litostratigrafia della regione Piemonte e alla caratterizzazione delle acque sotterranee superficiali e profonde. Da tutte queste informazioni è possibile creare un modello GIS tridimensionale che, per ogni zona fornisce le caratteristiche termiche e idrogeologiche del sottosuolo e quindi le potenzialità di installazione di un impianto geotermico che sfrutti il calore prodotto dal terreno e dalle falde.

3.2 IL REGOLAMENTO EDILIZIO E LE DISPOSIZIONI PER I PARCHEGGI INTERRATI

3.2.1 IL PERMESSO DI COSTRUIRE

Nel considerare l'inserimento di un impianto geotermico in un edificio tipo di nuova costruzione sito in Torino, occorre come prima cosa rivolgersi al Comune per la richiesta del Permesso di Costruire come spiegato all'interno del Regolamento Edilizio del Comune di Torino.

Il proprietario che richiede il Permesso di Costruire deve necessariamente presentare in Comune i documenti contenenti le generalità del richiedente, gli estremi catastali, una dichiarazione auto-certificativa inerente alla legittimazione alla realizzazione dell'intervento e il progetto municipale. Quest'ultimo, per le nuove costruzioni, è costituito da un estratto della carta tecnica in scala 1:1000 e della mappa catastale, gli estratti del PRG, la planimetria dello stato di fatto, la planimetria di progetto contenente le indicazioni dei confini di proprietà, le quote planimetriche ed altimetriche del suolo, le piante, le sezioni, i prospetti e i dettagli costruttivi alle opportune scale di rappresentazione. Inoltre, è necessario includere la documentazione fotografica del sito dello stato di fatto e una relazione illustrativa che permetta di comprendere al meglio il progetto e il rispetto delle principali disposizioni normative.

Il Permesso di Costruire viene rilasciato dal Comune in forma scritta e contiene il riferimento alla domanda, agli elaborati tecnici e descrittivi e agli atti allegati, l'indicazione del tipo di intervento e delle destinazioni d'uso, l'identificazione catastale dell'immobile, la sua ubicazione e l'area normativa urbanistica di pertinenza. Compaiono anche gli atti di assenso edilizio onerosi e non onerosi, gli estremi delle deliberazioni del Consiglio Comunale, i termini entro i quali iniziare e ultimare i lavori, le condizioni e le modalità esecutive imposte al Permesso di Costruire ed eventuali prescrizioni particolari per la realizzazione delle opere. Il diniego del permesso di costruire da parte del Comune deve essere motivato specificando quelle disposizioni di legge o di regolamento che impediscono il rilascio del permesso.

L'installazione dell'impianto geotermico ed in particolare delle serpentine avverrebbe sulla superficie esterna dei muri interrati che circondano locali adibiti ad usi accessori, quali autorimesse, cantine, depositi, servizi igienici e lavanderie, verificando la SLP

(superficie lorda di pavimento, che corrisponde alla somma delle superfici di tutti i piani comprese nel perimetro esterno dell'edificio ad esclusione delle superfici accessorie. I locali interrati dovranno avere un'altezza minima di 2,40 m e le murature dovranno essere protette contro l'umidità del terreno mediante intercapedini di 1,00 m di luce libera. Il solaio, di almeno 0,5 m dovrà essere impermeabile e compatto per evitare infiltrazioni di acqua.

3.2.2. LA LEGGE TOGNOLI

Le principali prescrizioni che regolano la possibilità di costruzione di parcheggi interrati sono contenute all'interno della **Legge del 24 marzo 1989, n° 122** chiamata anche “Legge Tognoli”. In particolare, all'articolo 9 si evidenzia la possibilità da parte dei proprietari degli immobili di realizzare nel sottosuolo degli stessi parcheggi da destinare alle singole unità immobiliari secondo gli strumenti urbanistici e i regolamenti edilizi vigenti.

La legge Tognoli prevede che si realizzi almeno 1 metro quadrato di parcheggio ogni 10 metri cubi di volume abitativo costruito. Oltre a normare le dimensioni minime del box auto (5x2,5 m o 5x3,5 m in presenza di persone con limitata capacità motoria o sensoriale), il presente decreto fornisce disposizioni riguardanti la larghezza delle corsie di manovra che non deve essere inferiore a 4,5-5 m per riuscire ad eseguire in sicurezza le manovre di entrata e di uscita dal parcheggio.

3.3 LA NORMATIVA ENERGETICA DI RIFERIMENTO IN ITALIA

L'evoluzione della normativa italiana per la sostenibilità energetica dell'edilizia può essere riassunta come segue:

- Legge **373/76**, “Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici” atte a limitare la potenza termica installata negli edifici tramite opportuni sistemi di isolamento termico dell'edificio.
- Legge 9 gennaio 1991, **n° 10**, “Norme per l'attuazione del Piano energetico nazionale in materia di uso nazionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia”. Oltre a limitare i consumi derivante dalla precedente legge, introduce nel calcolo del fabbisogno termico dell'edificio l'influenza dei carichi interni, dei carichi solari (esogeni) e dell'efficienza dell'impianto. La verifica del fabbisogno energetico nazionale viene eseguita in funzione dei GG e del rapporto S/V (superficie su volume);

- DPR. 26 agosto 1993, **n'412**, “Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia”. Viene definito il fabbisogno termico normalizzato in funzione della zona climatica e dei GG.
- Direttiva 16 dicembre 2002, **n'91**, “Efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici” è una direttiva che riguarda il rendimento energetico nell'edilizia.
- Decreto Legislativo 19 agosto 2005, n' **192** riguarda l'attuazione della direttiva **2009/91/CE** considerando le varie applicazioni la climatizzazione estiva e invernale.
- Decreto Legislativo 29 dicembre 2006, n' **311**, “Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 19/8/05 n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico in edilizia”. Contiene le disposizioni correttive ed integrative del Decreto Legislativo n' **192**.
- DPR. 2 aprile 2009, **n'59**, definisce le metodologie di calcolo della prestazione energetica degli edifici e degli impianti termici per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria.
- Decreto Ministeriale 26 giugno 2009, “Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici.
- Decreto Legislativo 3 marzo 2011, **n'28**, riguarda l'attuazione della direttiva 2009/28/CE e definisce gli strumenti, i meccanismi, gli incentivi e il quadro istituzionale, finanziario e giuridico, necessari per il raggiungimento degli obiettivi di energia da fonti rinnovabili stabiliti per il 2020 facendo anche riferimento settore geotermico.
- Decreto 26 giugno 2015, Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici.

3.3.1 DISPOSIZIONI VIGENTI IN MATERIA DI ENERGIA DA FONTI RINNOVABILI

Il **Decreto Legislativo del 3 marzo 2011, n. 28** chiamato anche “Decreto Rinnovabili” si compone di otto parti che descrivono le finalità, gli obiettivi nel settore energetico fino al 2020 e le procedure amministrative necessarie per richiedere l’autorizzazione per l’installazione di impianti di produzione di energia da fonti rinnovabili. Esistono tre procedure per tale richiesta: l’autorizzazione unica, la procedura abilitativa semplificata e la comunicazione relativa alle attività in edilizia libera. Per la procedura abilitativa semplificata il proprietario dell’immobile deve presentare al Comune almeno trenta giorni prima dell’inizio dei lavori una dichiarazione accompagnata da una relazione firmata da un progettista e dagli elaborati progettuali dimostrando la fattibilità del progetto compatibilmente con gli strumenti urbanistici approvati e i regolamenti edilizi vigenti.

Alla dichiarazione sono allegati gli elaborati tecnici per la connessione redatti dal gestore della rete. La realizzazione dell'intervento deve essere completata entro tre anni dal perfezionamento della procedura abilitativa semplificata e l'interessato è tenuto a comunicare al Comune la data di ultimazione dei lavori. Ultimato l'intervento, il progettista o un tecnico abilitato rilascia un certificato di collaudo finale, che deve essere trasmesso al Comune, con il quale si attesta la conformità dell'opera al progetto presentato con la dichiarazione, nonché ricevuta dell'avvenuta presentazione della variazione catastale conseguente alle opere realizzate ovvero dichiarazione che le stesse non hanno comportato modificazioni del classamento catastale.

L’articolo 11 sancisce l’obbligo di integrazione delle fonti rinnovabili negli edifici di nuova costruzione e negli edifici esistenti sottoposti a ristrutturazioni rilevanti in diverse percentuali:

- 20% dei consumi previsti per l’acqua calda sanitaria, il riscaldamento e il raffrescamento se la richiesta del titolo edilizio è presentata dal 31 maggio 2012 al 31 dicembre 2013;
- 35% dei consumi previsti per l’acqua calda sanitaria, il riscaldamento e il raffrescamento se la richiesta del titolo edilizio è presentata dal 1° gennaio 2014; al 31 dicembre 2016;

- 50% dei consumi previsti per l'acqua calda sanitaria, il riscaldamento e il raffrescamento se la richiesta del titolo edilizio è presentata dal 1° gennaio 2017, posticipato al 1° gennaio 2018 dopo l'emissione della Legge del 27 febbraio 2017, n. 19.

Gli impianti alimentati da fonti rinnovabili devono essere installati all'interno dell'edificio e la loro potenza elettrica viene calcolata con il rapporto tra la superficie in pianta dell'edificio (S) e un coefficiente (K) che vale 50 m²/kW quando la richiesta viene presentato dal 1° gennaio 2017.

$$P = \frac{S}{K} [kW]$$

Nei casi in cui non sia possibile rispettare tali percentuali di integrazione delle fonti rinnovabili, il progettista, tramite la relazione tecnica, dovrà spiegare le motivazioni della non fattibilità degli interventi.

3.3.2 METODOLOGIE DI CALCOLO DELLE PRESTAZIONI ENERGETICHE

Il Decreto 26 giugno 2015 “Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici” sancisce l'utilizzo delle le norme tecniche nazionali emesse dall'ente UNI per il calcolo della prestazione energetica negli edifici. La norma UNI EN che fornisce le disposizioni per il calcolo del fabbisogno energetico è la specifica tecnica TS 11300:2012.

In particolare, la prima parte della TS 11300 riguarda le prestazioni energetiche degli edifici e compare la spiegazione per la determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale. La seconda parte contiene le prescrizioni per il calcolo del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di ACS. Nella terza parte vi è la determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva. Infine, l'ultima parte della specifica tecnica concerne l'utilizzo di energie rinnovabili per il riscaldamento e per la produzione di acqua calda sanitaria.

Le ulteriori metodologie di calcolo per la redazione dell'attestato di prestazione energetica sono riportate nelle Linee Guida Nazionali 26 giugno 2009 e nei successivi aggiornamenti del decreto legislativo.

3.3.3 LA CERTIFICAZIONE ENERGETICA

Il Decreto Legislativo n°311 che definisce “l’attestato di certificazione energetica o di rendimento energetico dell’edificio” attesta la prestazione energetica di un edificio, ovvero il fabbisogno annuo di energia necessaria a soddisfare la climatizzazione invernale ed estiva, la produzione di ACS, la ventilazione e l’illuminazione.

La prestazione energetica degli edifici è determinata in funzione della normativa tecnica UNI e CTI (Comitato Termotecnico Italiano).

Gli indicatori di prestazione energetica, in genere espressi in kilowattora per metro quadrato di superficie netta dell’immobile, sono tre: il fabbisogno annuo di energia primaria per la climatizzazione invernale, l’indice di prestazione energetica EP e il rendimento globale medio stagionale dell’impianto termico.

Per energia primaria per la climatizzazione invernale si intende la quantità di energia necessaria per mantenere, nel corso di un anno, gli ambienti alla temperatura di progetto.

Il parametro fondamentale è il rendimento energetico che è espresso mediante un indicatore chiamato “indice di prestazione energetica annua per la climatizzazione invernale” (EP) ed è misurato in kilowattora per metro quadrato di superficie utile (kWh/m^2) o per metro cubo di volume lordo (kWh/m^3) in base al quale viene eseguita la classificazione degli edifici.

L’indice di prestazione energetico viene riferito ad un singolo utilizzo energetico come la climatizzazione invernale (EPH), estiva (EPC) e la produzione di acqua calda sanitaria (EPW) ed è riferito all’unità di superficie utile o di volume lordo nell’intervallo di tempo di un anno.

Infine, vi è il rendimento globale medio stagionale dell’impianto termico espresso come rapporto tra il fabbisogno di energia termica utile per la climatizzazione invernale e l’energia primaria delle fonti energetiche.

Il calcolo per stabilire la classe di appartenenza di un edificio viene fatto utilizzando i dati climatici di Torino con 2617 GG: a seconda del livello viene associata una lettera da A+ a G e NC indicante la classe energetica. Le ultime classi G e NC rappresentano gli immobili che consumano più energia.

La necessità di certificare gli immobili deriva dall'esigenza di valutare il corretto utilizzo dell'energia portando ad una continua riduzione dei consumi con lo scopo di ottenere edifici sempre più sostenibili. Per questo motivo la Certificazione energetica premia tutti quei fabbricati che soddisfano gli standard di eccellenza in termini energetici ed ambientali e associa delle classi di consumo ad ogni edificio in funzione della sua qualità energetica.

L'attestato di certificazione ha una durata temporale massima di 10 anni e scade nel caso in cui l'edificio sia soggetto ad un intervento di ristrutturazione ovvero ad una riqualificazione energetica. In seguito alla classificazione dell'edificio viene rilasciato l'attestato di prestazione energetica (APE) contenente i dati relativi alle prestazioni energetiche dell'edificio, i valori vigenti a norma di legge e i valori di riferimento. Il rilascio avviene tramite procedure rigide in quanto ogni elemento viene registrato da un certificatore e permette di attribuire la classe energetica all'edificio. Per cui, il certificatore è un'ulteriore figura, distinta ed indipendente, che compare insieme al progettista e al direttore dei lavori e il suo lavoro inizia a partire dalle prime fasi della progettazione. Più in generale, il certificatore controlla che le soluzioni rispettino le esigenze richieste dal committente e la normativa.

In Europa ci sono differenti modelli di attestati di certificazione energetica con diverso numero di classi energetiche, ma quasi tutti riportano nella seconda e ultima pagina i possibili interventi migliorativi da applicare all'edificio, il costo iniziale e il successivo risparmio energetico. In Figura 29 si riporta un esempio di attestato di certificazione energetica.

ATTESTATO DI PRESTAZIONE ENERGETICA DEGLI EDIFICI		APE 2015																																																
CODICE IDENTIFICATIVO: xxxxxxxxxxxx VALIDO FINO AL: 31/12/2017																																																		
DATI GENERALI																																																		
Destinazione d'uso <input type="checkbox"/> Residenziale <input checked="" type="checkbox"/> Non residenziale Classificazione D.P.R. 412/93: E.2 - Edificio adibito ad ufficio ed assimilabili	Oggetto dell'attestato <input type="checkbox"/> Intero edificio <input checked="" type="checkbox"/> Unità immobiliare <input type="checkbox"/> Gruppo di unità immobiliari Numero di unità immobiliari di cui è composto l'edificio: nd	<input type="checkbox"/> Nuova costruzione <input type="checkbox"/> Passaggio di proprietà <input checked="" type="checkbox"/> Locazione <input type="checkbox"/> Ristrutturazione importante <input type="checkbox"/> Riqualificazione energetica <input type="checkbox"/> Altro: _____																																																
Dati identificativi																																																		
Regione : Lazio Comune : Roma (RM) Indirizzo : xxxxxxxx Piano : x Interno : Coordinate GIS : 0.000 ; 0.000	Zona climatica : D Anno di costruzione: fine '800 (stima) Superficie utile riscaldata: 303.5 m ² Superficie utile raffrescata: 303.5 m ² Volume lordo riscaldato: 1272.7 m ³ Volume lordo raffrescato: 1272.7 m ³																																																	
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Comune catastale</th> <th colspan="4">Roma (RM)</th> <th colspan="2">Sezione</th> <th colspan="2">Foglio</th> <th colspan="2">xxx</th> <th colspan="2">Particella</th> <th colspan="2">xx</th> </tr> <tr> <th>Subalterni</th> <th>da</th> <th>xx</th> <th>a</th> <th>xx</th> <th>da</th> <th>a</th> <th>da</th> <th>a</th> <th>da</th> <th>a</th> <th>da</th> <th>a</th> <th>da</th> <th>a</th> <th>da</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Altri subalterni</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			Comune catastale		Roma (RM)				Sezione		Foglio		xxx		Particella		xx		Subalterni	da	xx	a	xx	da	a	da	Altri subalterni																							
Comune catastale		Roma (RM)				Sezione		Foglio		xxx		Particella		xx																																				
Subalterni	da	xx	a	xx	da	a	da	a	da	a	da	a	da	a	da																																			
Altri subalterni																																																		
Servizi energetici presenti																																																		
<input checked="" type="checkbox"/> Climatizzazione invernale <input checked="" type="checkbox"/> Climatizzazione estiva	<input type="checkbox"/> Ventilazione meccanica <input checked="" type="checkbox"/> Prod. acqua calda sanitaria	<input checked="" type="checkbox"/> Illuminazione <input type="checkbox"/> Trasporto di persone o cose																																																
PRESTAZIONE ENERGETICA GLOBALE E DEL FABBRICATO																																																		
La sezione riporta l'indice di prestazione energetica globale non rinnovabile in funzione del fabbricato e dei servizi energetici presenti, nonché la prestazione energetica del fabbricato, al netto del rendimento degli impianti presenti.																																																		
Prestazione energetica del fabbricato <table border="1"> <thead> <tr> <th>INVERNO</th> <th>ESTATE</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> </td> <td> </td> </tr> </tbody> </table>	INVERNO	ESTATE	 	 	Prestazione energetica globale <p>EDIFICIO A ENERGIA QUASI ZERO</p> <p>CLASSE ENERGETICA E</p> <p>EP_{gl,nren} 263.8 kWh/m² anno</p>	Riferimenti Gli immobili simili a questo avrebbero in media la seguente classificazione: Se nuovi: B (106.4) Se esistenti:																																												
INVERNO	ESTATE																																																	

Figura 29 – Esempio di attestato di certificazione energetica

3.3.3.1 GLI EDIFICI DI NUOVA COSTRUZIONE E LE RISTRUTTURAZIONI

Per le singole regioni ci sono specifiche delibere, mentre per lo Stato italiano valgono alcuni obblighi.

Il primo riguarda gli edifici di nuova costruzione: il certificato energetico deve essere rilasciato al momento della domanda di agibilità dell'unità immobiliare. A partire dal 2007, tutti i contratti relativi agli impianti termici o di climatizzazione degli edifici pubblici devono possedere la certificazione energetica, ricevuta entro i sei mesi dall'inizio del contratto. Sono assimilati a edifici nuovi gli edifici sottoposti a demolizione e ricostruzione i cui indici di prestazione sono relativi all'intero edificio. Rientrano in tale categoria (nuova costruzione, demolizione e ricostruzione) anche gli ampliamenti di edifici esistenti con volume superiore al 15% di quello esistente o superiore a 500 m³. In particolare, viene fatta una distinzione a seconda che i volumi esistenti non climatizzati siano collegati a impianti tecnici nuovi o preesistenti.

Il secondo obbligo riguarda le ristrutturazioni importanti e le riqualificazioni: sono interventi che riguardano gli elementi e i componenti integrati dell'involucro edilizio (trasparenti o opachi) che separano un volume a temperatura controllata dall'ambiente esterno e da ambienti non climatizzati con un'incidenza superiore al 25% della superficie disperdente lorda dell'edificio. Una seconda suddivisione viene fatta distinguendo le ristrutturazioni di primo e di secondo livello e le riqualificazioni energetiche.

Per ristrutturazione importante di primo livello si intende un intervento che interessa elementi che costituiscono l'involucro edilizio con un'incidenza superiore al 50% della superficie disperdente e comporta il rifacimento dell'impianto termico. I requisiti di prestazione energetica si applicano all'intero edificio.

Per ristrutturazione importante di secondo livello si fa riferimento ad un intervento che interessa elementi che costituiscono l'involucro edilizio con un'incidenza superiore al 25% della superficie disperdente e può interessare un impianto. In tale caso i requisiti di prestazione energetica riguardano le porzioni e i componenti dell'involucro interessati calcolando il coefficiente di scambio termico per trasmissione (H_T) per l'intera parete su cui si è intervenuti.

Infine, la riqualificazione energetica si riferisce ad un intervento non riconducibile né ad una ristrutturazione di primo livello, né ad una ristrutturazione di secondo livello. Ha a

che fare con la ristrutturazione o l'installazione di un nuovo impianto e con la sostituzione o l'installazione di generatori di calore o impianti tecnici.

3.3.4 LE AGEVOLAZIONI PER IL RISPARMIO ENERGETICO

Le agevolazioni fiscali sono detrazioni eseguite a partire dall'imposta sul reddito delle persone fisiche (IRPEF) e dall'imposta sul reddito delle società (IRES) quando vengono effettuati degli interventi di riqualificazione energetica degli edifici esistenti. Tra questi vi è la riduzione del fabbisogno energetico, il miglioramento termico attraverso opportune coibentazioni e serramenti, l'installazione di pannelli solari e le sostituzioni impiantistiche per la climatizzazione invernale. La detrazione vale sugli interventi eseguiti su unità immobiliari e su edifici esistenti di qualunque categoria catastale. La percentuale detraibile varia a seconda che si tratti di una singola unità immobiliare o di edifici condominiali ed è funzione dell'anno in cui si svolgono i suddetti interventi.

La legge di Bilancio 2019 proroga ciò che era stato già stabilito con la Legge di Stabilità 2018 che prevede un ecobonus del 50% o del 65% per gli interventi di riqualificazione energetica dopo che un professionista abilitato attesti il passaggio dell'immobile ad una classe energetica superiore. L'aliquota viene calcolata in funzione delle spese sostenute fino al 31 dicembre 2019.

Per il caso in esame di riqualificazione energetica attraverso l'introduzione di un impianto geotermico a bassa entalpia, si rientra nella casistica delle detrazioni fiscali al 65% purché la spesa totale sia inferiore a 96 000 euro e a partire dal 2008 è prevista una detrazione massima di 60 000 euro.

Dal 1° gennaio 2008 l'agevolazione per la sostituzione degli impianti è stata estesa anche al caso di pompe di calore ad alta efficienza e di impianti geotermici a bassa entalpia e contestuale messa a punto del sistema di distribuzione realizzato. È possibile detrarre alcune spese come quelle relative alle prestazioni professionali necessarie per realizzare gli interventi o acquisire la certificazione energetica e i costi per le opere edilizie funzionali alla realizzazione dell'intervento. Oltre alle spese professionali è possibile detrarre anche i costi relativi alla fornitura e alla posa in opera di materiali di coibentazione, di impianti di climatizzazione e le opere murarie ad essi collegate. Negli interventi ammissibili sono compresi anche eventuali interventi sulla rete di distribuzione,

sui dispositivi di controllo e regolazione e sui sistemi di emissione. La Figura 30 mostra i valori di detrazione massima per i principali interventi.

DETRAZIONE MASSIMA PER I PRINCIPALI INTERVENTI	
Tipo di intervento	detrazione massima
riqualificazione energetica di edifici esistenti	100.000 euro
su involucro di edifici esistenti (per esempio, pareti, finestre, tetti e pavimenti)	60.000 euro
installazione di pannelli solari per la produzione di acqua calda	60.000 euro
sostituzione di impianti di climatizzazione invernale con impianti dotati di caldaie a condensazione ad aria o ad acqua	30.000 euro
dal 2008, sostituzione di impianti di climatizzazione invernale con impianti dotati di pompe di calore ad alta efficienza o impianti geotermici a bassa entalpia	
dal 2012, sostituzione di scaldacqua tradizionali con scaldacqua a pompa di calore dedicati alla produzione di acqua calda sanitaria	
dal 2015, acquisto e posa in opera di schermature solari	60.000 euro
dal 2015, acquisto e posa in opera di impianti di climatizzazione invernale dotati di generatori di calore alimentati da biomasse combustibili	30.000 euro
dal 2016, acquisto, installazione e messa in opera di dispositivi multimediali per il controllo a distanza degli impianti di riscaldamento, di produzione di acqua calda, di climatizzazione delle unità abitative	non è previsto un limite massimo di detrazione
per gli anni 2018 e 2019, acquisto e posa in opera di micro-cogeneratori	100.000 euro
interventi su parti comuni di edifici condominiali per i quali spetta la detrazione del 70 o 75%	non è previsto un limite massimo di detrazione ma un ammontare complessivo delle spese, che non deve essere superiore a 40.000 euro moltiplicato per il numero delle unità immobiliari che compongono l'edificio
interventi su parti comuni di edifici condominiali per i quali spetta la detrazione dell'80 o 85%	non è previsto un limite massimo di detrazione ma un ammontare complessivo delle spese, che non deve essere superiore a 136.000 euro moltiplicato per il numero delle unità immobiliari che compongono l'edificio

Figura 30 – Valori di detrazione massima per i principali interventi

Tra i documenti da presentare per usufruire dell'agevolazione fiscale compare l'asseverazione, l'attestato di prestazione energetica (APE) e la scheda informativa.

L'asseverazione è emessa da un tecnico abilitato che conferma che l'intervento è stato realizzato in conformità con i requisiti tecnici richiesti. Nel caso di pompe di calore con potenza elettrica minore di 100 kW tale documento può essere sostituito da una

certificazione dei produttori. Un altro documento fondamentale è rappresentato dall'attestato di prestazione energetica (APE) che, come già spiegato, permette di conoscere l'efficienza energetica dell'edificio dopo aver eseguito gli interventi previsti. Infine, la scheda informativa permette di riassumere gli interventi realizzati e i dati relativi al soggetto che ha sostenuto le spese e all'edificio. Le informazioni contenute nell'APE e nella scheda informativa devono essere trasmesse all'ENEA entro 90 giorni dalla data di fine dei lavori che corrisponde al giorno del collaudo o dell'attestazione delle funzionalità dell'impianto.

Inoltre, per aver accesso alle agevolazioni fiscali occorre eseguire la dichiarazione dei redditi tramite CU (Certificazione Unica) o modello 730 l'anno successivo ai lavori. All'interno della dichiarazione saranno inserite le spese relative all'acquisto dei diversi componenti dell'impianto tra cui la pompa di calore e le sonde geotermiche, ma anche quelle relative ai lavori di scavo, alla posa delle sonde, all'installazione della pompa e del sistema di distribuzione. È necessario allegare tutte le fatture che testimoniano l'acquisto dei materiali e di tutti gli elementi che fanno parte dell'impianto. I metodi di pagamento che si accettano sono esclusivamente di tipo elettronico, per cui è possibile pagare tramite bonifici bancari o postali e tramite carte di credito.

La detrazione fiscale avviene in dieci rate mensili di uguale valore che vengono erogate per 10 anni.

3.4 IL QUADRO RIASSUNTIVO DELLE PRINCIPALI DISPOSIZIONI

A fronte delle analisi eseguite circa la costruzione di un edificio tipo sito in Torino e la realizzazione di un impianto geotermico a bassa entalpia è possibile riassumere le procedure per la suddetta realizzazione e le principali normative vigenti.

Come riportato nel **Regolamento Edilizio della Città di Torino**, la richiesta di Permesso di Costruire deve essere rivolta al Comune di pertinenza secondo specifiche modalità e comunicando le date di inizio e di fine lavori. Il progetto dovrà necessariamente dimostrare di rispettare la destinazione d'uso, il numero di piani, l'altezza massima dell'edificio, la SLP, gli indici fondiari e le distanze dai confini previste dal PRG del Comune di Torino. Questi sono solo alcuni dei requisiti necessari ad ottenere il Permesso di Costruire, fondamentale per l'inizio dei lavori.

Inoltre, tutti gli interventi eseguiti dovranno rispettare specifiche disposizioni riguardanti l'organizzazione del cantiere, le prescrizioni costruttive e funzionali degli edifici in riferimento alla superficie, all'illuminazione e all'areazione dei locali e la produzione di energia da fonti rinnovabili.

In particolare, il **Decreto Legislativo del 3 marzo 2011, n. 28** sancisce per gli edifici di nuova costruzione e per edifici esistenti sottoposti a ristrutturazioni rilevanti la necessità di includere il 50% dei consumi previsti per l'acqua calda sanitaria, il riscaldamento e il raffrescamento se la richiesta del titolo edilizio è presentata dal 1° gennaio 2018. La prestazione energetica dell'edificio viene calcolata per mezzo delle norme UNI e della specifica tecnica 11300. Inoltre, le agevolazioni fiscali previste per aver inserito un impianto geotermico a bassa entalpia costituito da una pompa di calore geotermica e da serpentine ancorate alla superficie esterna del muro di sostegno interrato che circonda l'edificio arrivano fino al 65% purché la spesa totale sia inferiore a 96 000 euro e a partire dal 2008 è prevista una detrazione massima di 60 000 euro.

La possibilità di realizzare piani interrati adibiti a locali accessori è da ricercare nelle disposizioni fornite dal PRG per le diverse zone di Torino. Una volta verificata la fattibilità degli interventi è necessario verificare la SLP, le altezze minime, gli spessori dei solai, la presenza di intercapedini per l'umidità e le principali norme per la prevenzione incendi. Inoltre, la **Legge del 24 marzo 1989, n° 122** prevede la realizzazione di 1 m² di parcheggio ogni 10 m³ di volume abitativo costruito e fornisce le dimensioni minime per i box auto per gli spazi di manovra.

4. IL CAMPO SPERIMENTALE GEOTHERMSKIN

4.1 IL CAMPO SPERIMENTALE

Un prototipo di muro energetico è stato installato tramite l'inserimento di pannelli modulari di sonde geotermiche a contatto con il terreno in corrispondenza di un muro di sostegno esistente dell'Energy Center sito in via Borsellino a Torino (Figura 31).

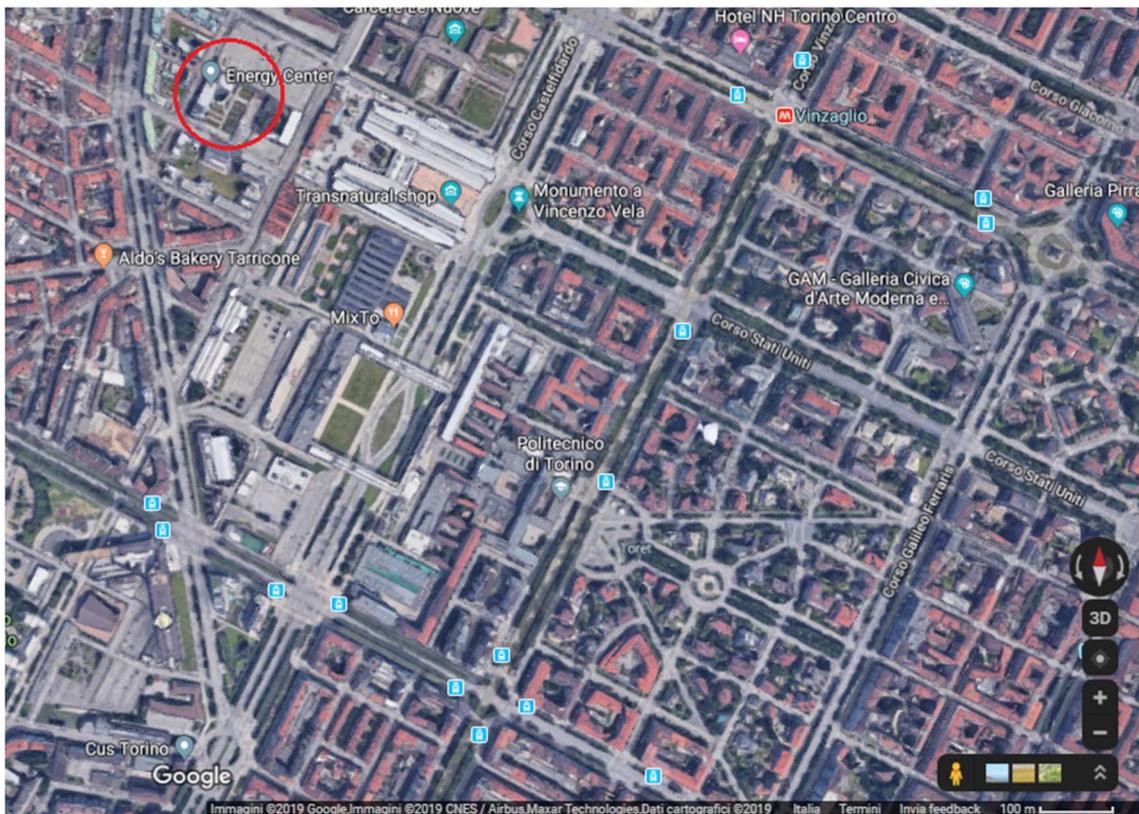


Figura 31 – Inquadramento dell'Energy Center con Google Maps

L'Energy Center (Figura 32) nasce nel 2016 da un'iniziativa del Politecnico di Torino sottoforma di progetto ECI (Energy Center Initiative) con lo scopo di incentivare azioni e progetti di supporto ad autorità locali, enti nazionali e transnazionali riguardanti le tecnologie energetiche più innovative. La struttura si articola in due parti: un edificio interno all'Ateneo che ha il compito di ospitare aziende e start-up del campo energetico

e prende il nome di Energy Center House (EC-H) e un Centro Interdipartimentale per l'Energia (Energy Center Lab) costituito da un gruppo di ricercatori e docenti che si occupano di studiare i metodi di utilizzo dell'energia più innovativi e sostenibili. L'iniziativa del Politecnico ha l'obiettivo di costruire network nazionali ed Europei per lo sviluppo del settore energetico: è fondamentale favorire le interazioni tra la Pubblica Amministrazione, le aziende manifatturiere, i fornitori di servizi pubblici, gli istituti di ricerca e i consumatori per combinare le diverse competenze e affrontare con un approccio multidisciplinare le sfide proposte.



Figura 32 – Energy Center

La struttura di 7 mila metri quadrati, di cui 5 mila destinati al centro e 2 mila al parcheggio, è stata finanziata dalla Regione Piemonte a partire da fondi europei, dalla Compagnia di San Paolo e dalla fondazione CRT.

4.1.1 LA FATTIBILITÀ DEGLI INTERVENTI

Per l'edificio in esame, sito in Torino e collocato in via Paolo Borsellino 38/16 viene individuata dalla tavola di azionamento del PRG l'area di appartenenza al *Foglio 8B* e la destinazione d'uso del fabbricato ovvero l'insieme delle attività ammesse nell'area considerata. Lo studio del PRG per l'area dell'Energy Center consente di valutare la fattibilità degli interventi nel rispetto delle normative e dei vincoli urbanistici. Per cui, si

collinari. L'area dell'Energy Center, a partire dal foglio 8B si può classificare come “zona consolidata residenziale mista” definita come l'insieme delle aree edificate nelle quali si individua la necessità di miglioramento della qualità urbana anche attraverso la dotazione di servizi. La tavola 3 riporta le tipologie di intervento (sostituzione edilizia, completamento, nuovo impianto e ristrutturazione urbanistica), le aree normative, i parametri e gli interventi interni all'area normativa. Per il lotto analizzato si fa riferimento all'art. 8 comma 64 riguardante gli edifici adibiti all'istruzione universitaria e a centri di ricerca. Non sono presenti particolari prescrizioni riguardanti la realizzazione di piani e parcheggi interrati in quanto sono interventi sempre ammessi.

L'Energy Center rispetta le prescrizioni delle Norme Urbanistico Edilizie di Attuazione (NUEA) che valgono nell'area della Spina 2 PR.IN (programma integrato) dell'ambito 8.18/1. Il Geoportale del Comune di Torino allega tre tavole per la Spina 2 PR.IN: nella tavola I compaiono gli indici fondiari; nella tavola II sono riportate le destinazioni d'uso prevalenti, l'altezza degli edifici e gli elementi prescrittivi per la redazione dei piani attuativi; infine, nella tavola III sono indicate le aree per servizi. Si riporta uno stralcio della tavola 4 (Figura 34) recante le altezze massime, il numero di piani, gli allineamenti e i perimetri.

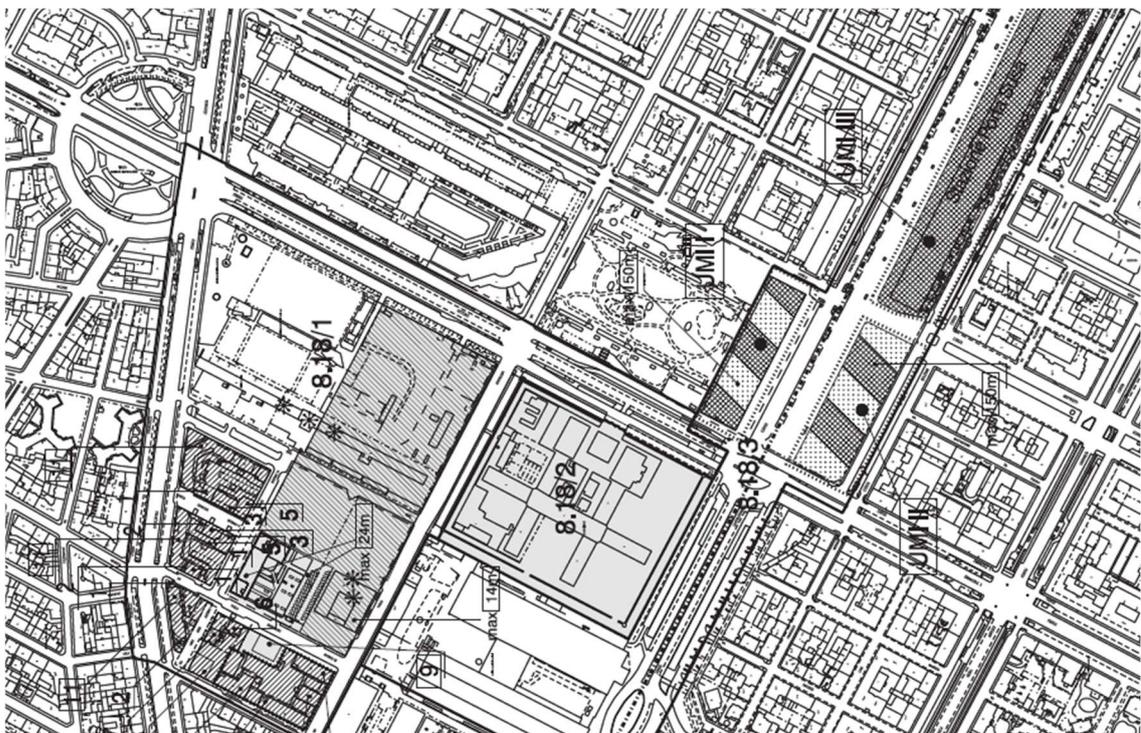


Figura 34 – Stralcio della tavola II, La Spina Centrale, la Spina 2

Il lotto in esame, che rientra nelle aree di interesse generale, presenta un indice fondiario pari a 0,6 e ha un limite di altezza pari a 24 m.

4.1.2 LE FASI COSTRUTTIVE

Le operazioni di scavo per la realizzazione del campo sperimentale hanno avuto inizio alla fine del mese di giugno (26/06/2019) quando l'edificio era già entrato in funzione: tramite un escavatore è stato possibile movimentare la porzione di terreno coinvolta e procedere alla sua frantumazione. Dopo aver effettuato uno scavo fino ad una profondità di 80-120 cm, è stata disposta l'armatura tramite infissione nel terreno e sono stati installati i puntoni di contrasto: si tratta di elementi metallici (modulari e normati secondo la normativa tecnica) che resistono agli sforzi di trazione e compressione che si generano in tali strutture.

I puntoni di acciaio risultano più vantaggiosi rispetto a quelli in legno per diversi motivi: infatti, i primi, possono essere posizionati facilmente e riutilizzati più volte, si adattano maggiormente in quanto sono caratterizzati da forme geometriche e dimensioni differenti e possiedono una grande inerzia. Sono generalmente inseriti per infissione seguendo precise indicazioni e sono posizionati tramite un meccanismo di infissione: un escavatore con benna spinge i moduli dei pannelli nel terreno.

Il materiale metallico degli stessi conferisce un peso ridotto, una maggiore durabilità anche in ambienti in cui è presente acqua e la facilità di posa. Inoltre, è possibile aggiungere puntoni di ancoraggio che limitano la flessibilità della struttura.

In maniera alternata tutti i pannelli sono stati spinti verso il basso lungo i montanti con l'aiuto della benna dell'escavatore (Figura 35).



Figura 35 – I sistemi di contrasto installati

Dopo l'infissione dei pannelli si è proceduto con il getto tramite autopompa di uno strato di magrone a 4,70 m di profondità (Figura 36). In questo caso lo strato di calcestruzzo magro ha lo scopo di creare un piano di posa orizzontale per il posizionamento del trabattello su cui saliranno gli operatori per la disposizione delle sonde nella corretta configurazione impiantistica.

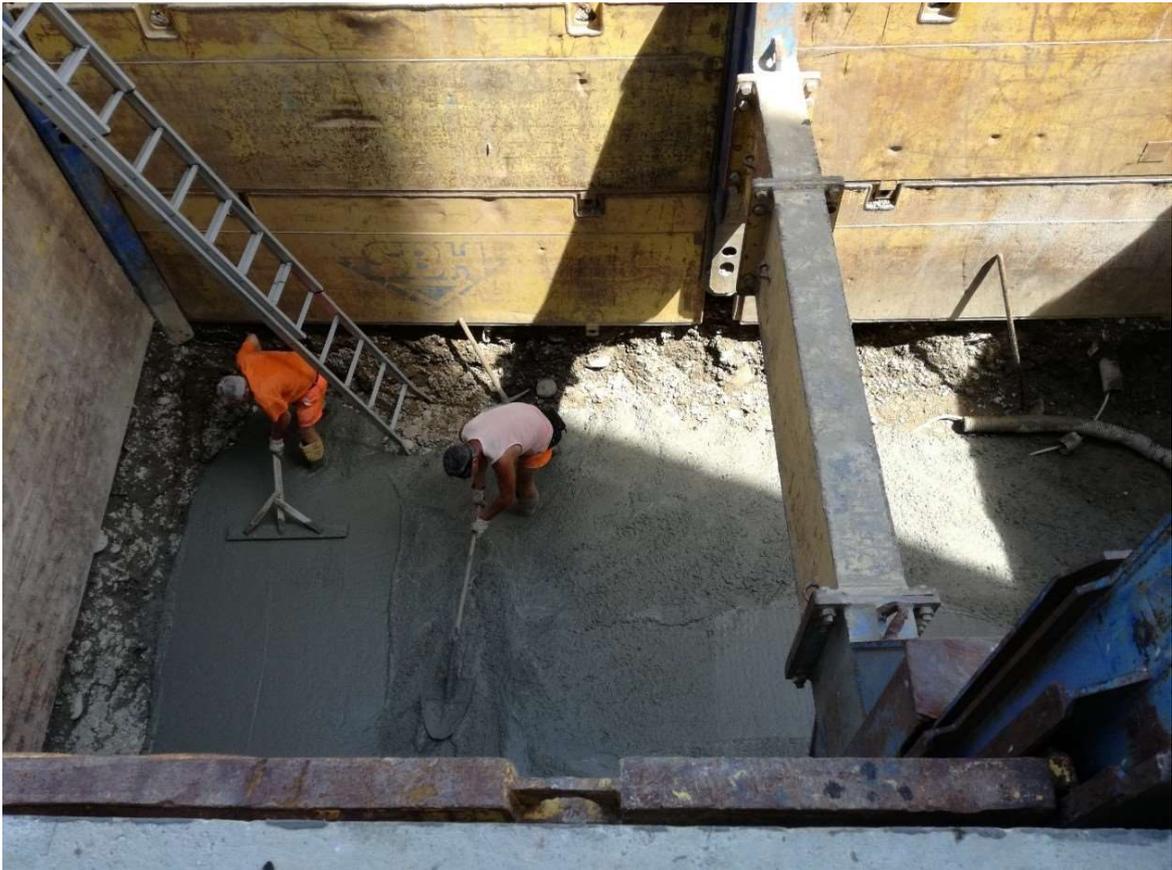


Figura 36 – Livellazione dello strato di magrone

Per collegare le sonde all'impianto sono stati eseguiti alcuni fori sul muro mediante carotatrice ad acqua. Si tratta di una macchina utensile portatile costituita da una parte abrasiva chiamata "corona" e costituita da diamanti industriali che generano il foro e racchiudono il volume di materiale appena asportato e comunemente noto con il nome di "carota". La carotatrice utilizzata ha la particolarità di utilizzare l'acqua in fase di carotaggio anche al fine di raffreddare la punta durante il processo di foratura. Il flusso continuo di acqua viene garantito mediante il collegamento dell'utensile tramite un tubo ad un apposito rubinetto.

Per l'inserimento delle sonde geotermiche sono stati creati dei pannelli modulari con le serpentine e dopo aver eseguito lo scavo della porzione di terreno a contatto con la struttura si è proceduto al loro ancoraggio tramite tasselli.

Al termine delle operazioni di posizionamento delle sonde, il terreno precedentemente spostato è stato ripristinato per riportare le condizioni a quelle pregresse e procedere con l'attivazione termica dell'intera struttura.

Di seguito si riporta un'immagine della sistemazione finale delle serpentine (Figura 37) e un render del muro di sostegno (Figura 38).



Figura 37 – Sistemazione finale delle serpentine

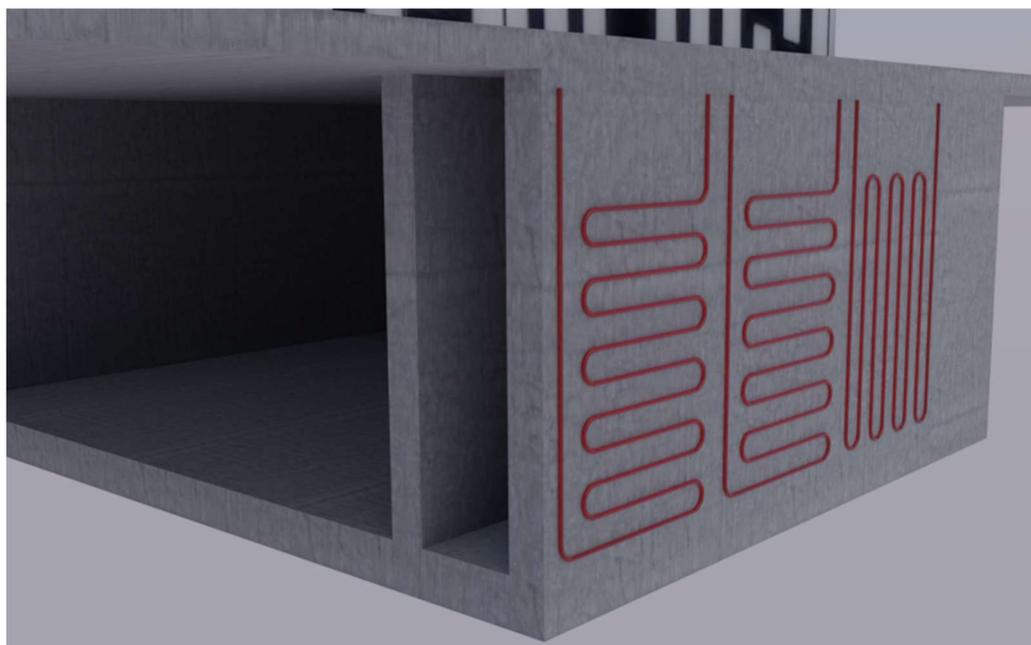


Figura 38 – Render del muro di sostegno

4.1.3 LA DESCRIZIONE DEL CAMPO SPERIMENTALE

Le serpentine sono state ancorate al muro di sostegno esistente seguendo tre diverse configurazioni mostrate in Figura 39. Si tratta di tubazioni in polietilene reticolato che viene trattato ad alte temperature e alte pressioni conferendo un'elevata resistenza e flessibilità al materiale. Le sonde sono certificate e presentano un diametro di 20 mm e uno spessore di 2,0 mm. All'interno delle serpentine scorre acqua e glicole propilenico in percentuale pari a 33%.

Il muro in esame si estende per 7,50 m e raggiunge una profondità di 4,60 m. È stato suddiviso in tre moduli da 2,50 m, due dei quali sono caratterizzati dalla medesima disposizione orizzontale delle serpentine; per l'ultimo modulo le tubazioni sono state inserite, a scopo sperimentale, in maniera verticale. In tutti i casi le serpentine sono posizionate a 20 cm dalle estremità del muro. La figura sottostante mostra le tre configurazioni di serpentine, numerate da sinistra a destra e le principali misure per la realizzazione delle configurazioni.

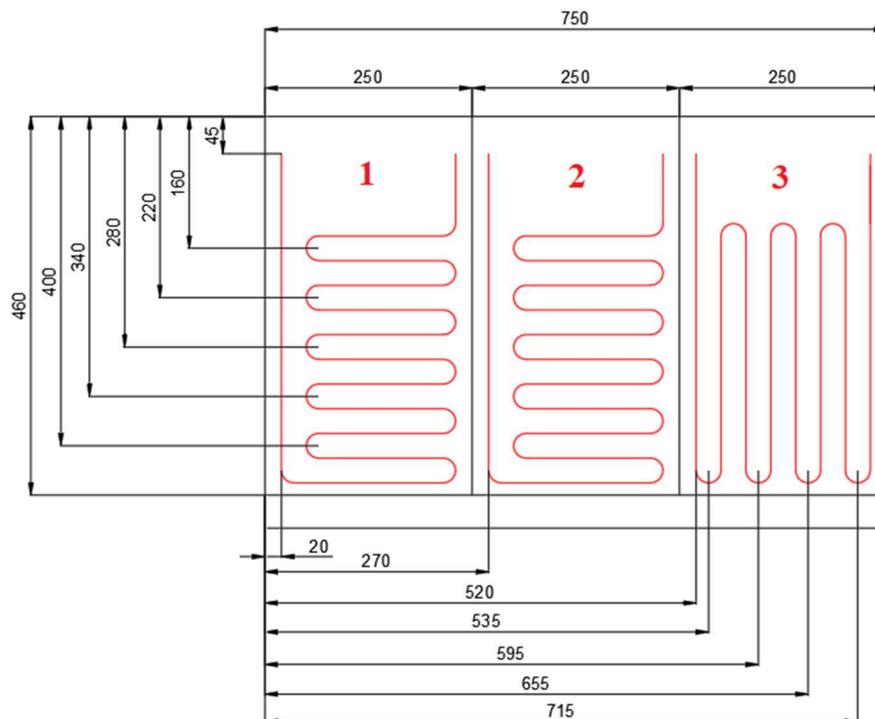


Figura 39 – Disposizione geometrica delle serpentine con quotatura in cm

Dopo aver posizionato le sonde sul muro di sostegno è stato inserito il sistema di sensoristica collegato all'impianto tramite dei fori precedentemente eseguiti lungo la superficie esterna della struttura.

4.1.4 IL SISTEMA DI SENSORISTICA

Il sistema di sensoristica è stato affidato all'azienda Winet Srl specializzata nella progettazione e nella realizzazione di reti di sensori per diverse tipologie di monitoraggio.

I sensori sono stati collocati su quattro livelli di profondità: a partire dal piano campagna il piano A si trova a 75 cm di profondità, il piano B a 215 cm, il piano C a 335 cm e il piano D a 460 cm.

Il sistema di sensoristica si compone di:

- Sensori di temperatura;
- Barrette estensimetriche;
- Celle di pressione;
- Igrometri Sentek drill & drop probe;
- Misuratore di potenziale idrico.

Nella Figura 40 sottostante si riporta uno stralcio di sezione del muro di sostegno evidenziando i piani di riferimento.

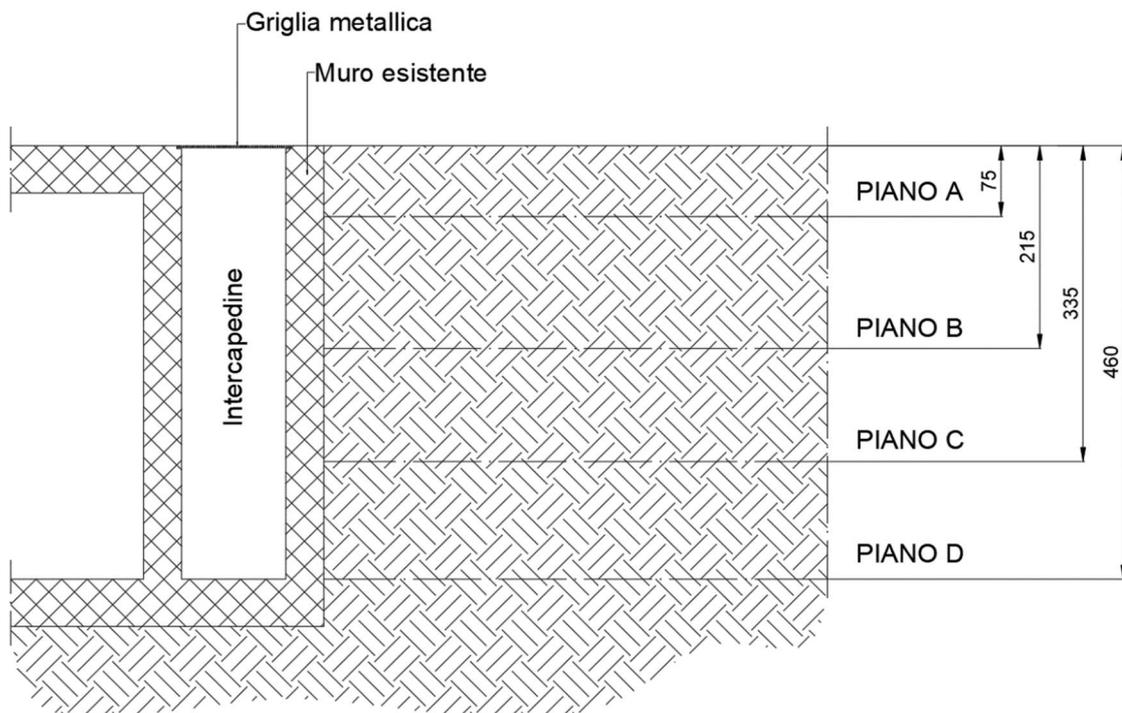


Figura 40 – Sezione laterale con i piani di riferimento (la quotatura è in cm)

In un primo momento sono stati installati dei rilevatori di temperatura (Figura 41) si tratta di sensori per la temperatura ad immersione composti da un cilindro esterno in acciaio

inox che racchiude il sensore che è immerso in resine termo-conduttive. Lo strumento viene solitamente immerso in acqua o nel calcestruzzo ed è in grado di captare variazioni termiche nell'intervallo di temperatura tra -40°C a $+60^{\circ}\text{C}$ con un elevato grado di precisione ($<0,1^{\circ}\text{C}$). La risoluzione è pari a $0,01^{\circ}\text{C}$ e l'altezza della parte metallica è di 8,7 cm.



Figura 41 – Sensore di temperatura

Successivamente sono state installate nove barrette estensimetriche (Figura 42), ovvero estensimetri che monitorano a lungo termine lo stato tensionale e deformativo di strutture in acciaio o calcestruzzo che, come in questo caso, sono soggette a cicli termici applicati. Le barrette vengono fissate o saldate alla struttura tramite due blocchetti oppure vengono annegate nel getto di calcestruzzo. Il loro funzionamento si basa sul principio della corda vibrante: all'interno del tubo vi è un filo di acciaio teso tra le due estremità. La sua variazione di lunghezza è proporzionale alla variazione di frequenza di oscillazione; per cui, dalla variazione di frequenza si può ricavare l'allungamento del filo. Lo strumento è caratterizzato da una grande resistenza e per questo motivo è possibile utilizzarlo anche durante l'infissione di pali di fondazione. La lettura dei dati può essere manuale attraverso una centralina portatile o avvenire in maniera automatica con un sistema di acquisizione dei dati. La precisione dello strumento utilizzato è $\pm 0,2\%$ FS, con risoluzione di 1 mV/V, dimensione di 15 cm e diametro di 2,5 cm.



Figura 42 – Barretta estensimetrica

Per il monitoraggio dello stato tenso-deformativo sono state inserite anche cinque celle di pressione e insieme agli estensimetri sono state posizionate in uno schema volto ad ottenere una distribuzione delle tensioni e delle deformazioni il più uniforme possibile. In particolare, lo strumento misura la pressione tra il muro di sostegno e il terreno per il controllo delle spinte. È costituito da un piatto rettangolare riempito di un olio disareato e connesso ad un trasduttore di pressione elettrico attraverso un tubetto di acciaio. Il trasduttore trasforma la variazione di pressione in segnale elettrico con uscita standard di 4-20 mA. Le celle di pressione vengono installate all'interno del terreno o fissate alla superficie tra terreno e struttura (Figura 43).



Figura 43 – Cella di pressione a base rettangolare

Un componente importante è la valvola di ripressurizzazione che è contenuta all'interno delle celle da inglobare nel calcestruzzo e ha lo scopo di ripressurizzare il piatto sensore

nel caso in cui si creassero delle cavità tra il calcestruzzo e la cella durante il periodo di maturazione. La modalità di installazione può essere orizzontale o verticale (Figura 44 e Figura 45). La prima tipologia di montaggio è adatta a terreni non uniformi e si attua creando uno strato compatto di sabbia di 10 cm e un ulteriore strato di sabbia di 20 cm a protezione del sensore.

Nel secondo caso, il piatto è stato posizionato in maniera complanare rispetto alla superficie della struttura. Questo accorgimento permette di prevenire i fenomeni di “arcing” ovvero un effetto arco che influenza la bontà delle misurazioni.

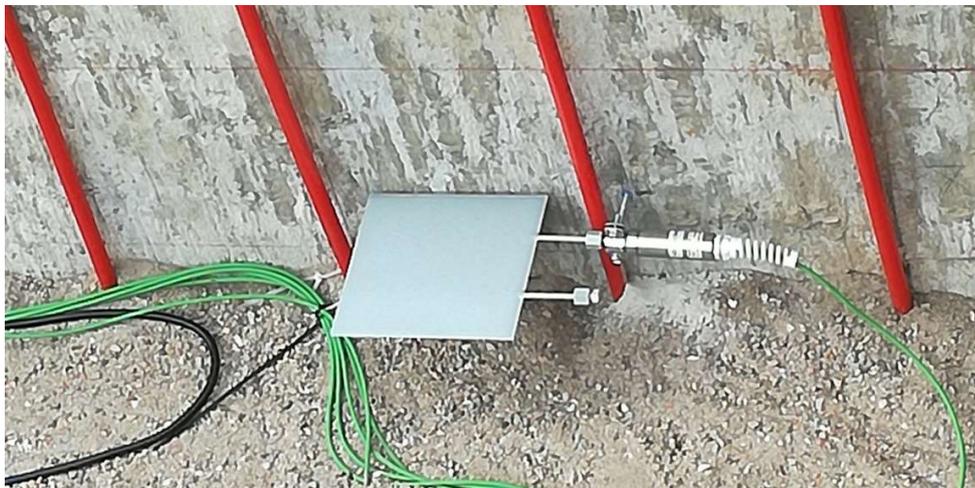


Figura 44 – Disposizione orizzontale delle celle di pressione



Figura 45 Disposizione verticale delle celle di pressione

Il muro in esame è collocato al di sopra della falda e le condizioni del terreno sono di “non completa saturazione”, per cui è stato necessario posizionare alcuni igrometri con lo scopo di rilevare la misura dell’umidità. In particolare, sono stati installati in totale 18 igrometri: 2 sono stati posizionati in corrispondenza del piano D, 2 sul piano C, 3 sul piano B, 3 sul piano A e i rimanenti sono stati collocati tra il piano A e il piano campagna. I sensori Sentek drill & drop probe del modello EnviroSCAN (Figura 46) basano il loro funzionamento sulla tecnologia FDR (riflettometria nel Dominio delle Frequenze) fornendo valori molto accurati circa il contenuto volumetrico di acqua presente nel terreno in prossimità delle sonde geotermiche anche ad elevate profondità. Inoltre, possiedono un rilevatore di temperatura che tuttavia presenta una minore precisione rispetto ai sensori di temperatura illustrati precedentemente. Anche in questo caso, prima e dopo la posa dello strumento, è stato necessario creare uno strato di sabbia a scopo protettivo.



Figura 46 – Sensore Sentek drill & drop probe

Attraverso il misuratore TEROS 21 (Figura 47) viene individuata la permittività dielettrica del materiale che è strettamente correlata al potenziale di suzione, ovvero all’energia potenziale che possiede l’acqua: la relazione tra il contenuto di acqua e il potenziale è descritta dalla curva caratteristica che esprime l’andamento dell’umidità del suolo. Lo strumento è costituito da due dischi in ceramica porosi che, inseriti tra le piastre

in acciaio inox e il circuito, rilevano le variazioni di contenuto di acqua e quindi di umidità.

La misurazione viene eseguita quando l'energia potenziale dell'acqua è in equilibrio con l'acqua nel suolo, infatti quando un elemento entra in contatto idraulico con il suolo il potenziale idrico dello stesso entra in equilibrio con il potenziale del suolo.

La lettura che fornisce è a lungo termine e può essere svolta a diverse profondità senza bisogno di manutenzione grazie al basso consumo energetico. I dati vengono registrati in maniera continua o periodica. La permittività dielettrica dei dischi è funzione della quantità di acqua presente nei pori dello strumento; infatti l'acqua ha un valore di permittività pari a 80 molto elevato rispetto a quello dell'aria, pari a 1 e della ceramica dei dischi pari a 5. Inizialmente lo strumento è stato calibrato ad uno stato saturo a pressione nulla, successivamente ad uno stato secco con pressione pari a -100 kPa e a tre stati intermedi tra 0 e -100 kPa.



Figura 47 – Misuratore TEROS 21

4.1.5 IL SISTEMA DI ACQUISIZIONE DEI DATI

Tutti questi dispositivi di misura sono stati collegati ad un'unità di acquisizione, caratterizzata da un sistema di trasferimento General Packet Radio Service (GPRS) con lo scopo di monitorare le caratteristiche del terreno di rinterro che si trova a diretto contatto con le sonde geotermiche durante il loro funzionamento. Tutti i dati sono inviati ad un server per mezzo di un modem GPRS integrato e di una connessione dati. Le informazioni archiviate sono messe a disposizione in un'area accessibile tramite

username e password per essere elaborate. Tra i dati raccolti vi è la lettura dei parametri misurati dallo strumento e l'andamento delle misure attraverso grafici esplicativi. Inoltre, è possibile esportare le informazioni in vari formati e gestire la cadenza con cui vengono effettuate le misure impostando valori massimi consentiti.

Nell'immagine sottostante (Figura 48) è possibile identificare il modem GPRS, ovvero una scatola di alimentazione generale. Inoltre, sono stati installati tre box per i moduli GSM associati ad ogni serpentina. Il modem generale e quelli singoli sono stati configurati in modo indipendente e vengono alimentati da un pannello elettrico. Il modem viene collegato ai cavi verdi relativi ai sensori di temperatura, ai cavi grigi connessi agli igrometri e ai cavi neri dei tensiometri.



Figura 48 – Unità di acquisizione dei dati

4.2 LA CAMPAGNA DI PROVE

Per effettuare le prove sperimentali, all'interno del locale caldaie dell'Energy Center è stata collocata una pompa di calore geotermica (modello NIBE F1155) dotata di inverter che permette il funzionamento sia per il riscaldamento sia per il raffrescamento, un vaso di accumulo da 100 l e un ventilconvettore che scalda o raffresca a seconda della tipologia di prova (Figura 49).



Figura 49 – A partire da sinistra: il vaso di accumulo, il ventilconvettore e la pompa di calore

Il modello della pompa di calore è dotato di un bollitore dell'acqua, di pompe di circolazione e di un sistema di controllo.

Durante la campagna di prove la pompa di calore è stata impostata secondo la modalità automatica con una velocità di mandata del fluido pari al 100% per consentire un funzionamento costante. All'interno del pannello delle informazioni della pompa di calore compaiono i Gradi Minuto determinati in funzione della differenza tra la temperatura di mandata e quella di ritorno: misurano il fabbisogno di riscaldamento o raffrescamento nell'abitazione corrente. Il valore impostato stabilisce l'attivazione del compressore: se viene superato il valore limite significa che l'impianto comincia a

perdere efficienza ed è necessario intervenire con l'energia elettrica per riportare il sistema alla medesima temperatura impostando un meccanismo di raffrescamento/ riscaldamento attivo. Il valore dei Gradi Minuto è stato scelto in funzione delle indicazioni fornite dal manuale della pompa di calore. Inoltre, la pompa di calore riporta la temperatura del fluido in ingresso e in uscita dalle sonde (BT2 e BT3) e le velocità della pompa di circolazione (GP1 e GP2).

Nel circuito primario, "lato sonde", la pompa di calore manda l'acqua alle serpentine dall'altra parte dell'edificio che assorbe o cede calore al terreno. Si è ipotizzato di trascurare le dispersioni termiche associate alle condotte di mandata e di ritorno che devono compiere un percorso circa di 72 m dalla pompa di calore.

Dopo il percorso dell'acqua all'interno delle tubazioni di mandata, è possibile decidere, tramite la chiusura e l'apertura di specifiche valvole (Figura 50) l'attivazione delle singole serpentine e stabilire la modalità di funzionamento del circuito (in serie o in parallelo).



Figura 50 – Misuratori di portata

In Figura 51 è possibile notare anche la presenza di tre flussimetri che misurano i valori di portata del fluido che circola. Per calcolare l'energia scambiata dalle sonde sono stati inseriti tre conta calorie che misurano la temperatura del fluido di mandata nelle sonde e di ritorno: il circuito 1 e 3 sono monitorati dai singoli conta calorie, mentre per il conta

calorie 2 fornisce il valore totale di energia. Per cui, per determinare il calore scambiato dal circuito 2 è necessario eseguire la differenza tra l'energia totale e l'energia associata ai circuiti 1 e 3.



Figura 51 – Conta calorie

Il fluido ritorna alla pompa di calore ad una temperatura diversa rispetto a quella di mandata ed è soggetto al ciclo spiegato al §2.1.1. L'energia termica che il refrigerante rilascia nel condensatore viene immagazzinata all'interno del boiler della pompa di calore e il mezzo riscaldante circola in un sistema chiuso trasportando calore al bollitore domestico e ai radiatori o alle serpentine.

Dopo l'avvio della pompa di calore in modalità di raffrescamento o riscaldamento, la macchina memorizza all'interno di un file di testo oltre alla data del giorno e all'orario i valori relativi ai sensori di:

- temperatura esterna, **BT1**;
- temperatura di mandata dell'impianto, **BT2**;
- temperatura di ritorno del fluido riscaldante, **BT3**;
- temperatura del fluido all'ingresso delle sonde, **BT10**;
- temperatura del fluido all'uscita delle sonde, **BT11**;
- temperatura di mandata dal condensatore, **BT12**;
- temperatura del gas caldo, **BT14**;
- temperatura del gas in aspirazione, **BT17**;
- temperatura di mandata esterna, **BT25**.

4.2.1 LE PROVE DI RAFFRESCAMENTO

Durante la prima campagna di prove, relativa al raffrescamento estivo, l'acqua fredda viene consegnata al chiller che manda il fluido al vaso di accumulo e poi alla pompa di calore. Il percorso eseguito dall'acqua costituisce il circuito secondario, ovvero il "lato impianto". Invece, nel circuito primario "lato sonde" la pompa di calore manda l'acqua alle serpentine che dissipano il calore. Il fluido torna alla pompa di calore ad una temperatura inferiore rispetto a quella iniziale. Tale differenza di temperatura viene sfruttata dal ventilconvettore, ovvero dal circuito secondario.

Si riporta in Figura 52 il percorso effettuato dal liquido refrigerante all'interno della pompa di calore in condizioni di raffrescamento. Il fluido refrigerante adottato è una miscela ternaria chiamata R-407C e composta da R32 (difluorometano), R125 (pentafluoroetano) e R134a (tetrafluoroetano) in diverse percentuali. Il refrigerante allo stato gassoso e ad alta temperatura cede calore alla sorgente esterna condensando e passa nella valvola di espansione che ne abbassa la pressione. Nel passaggio nella serpentina dell'evaporatore, entra in contatto con il fluido da raffrescare e assorbe il suo calore, cambiando nuovamente di fase. Infine, all'interno del compressore il vapore entra a bassa pressione ed esce con le caratteristiche necessarie a riprendere un nuovo ciclo.

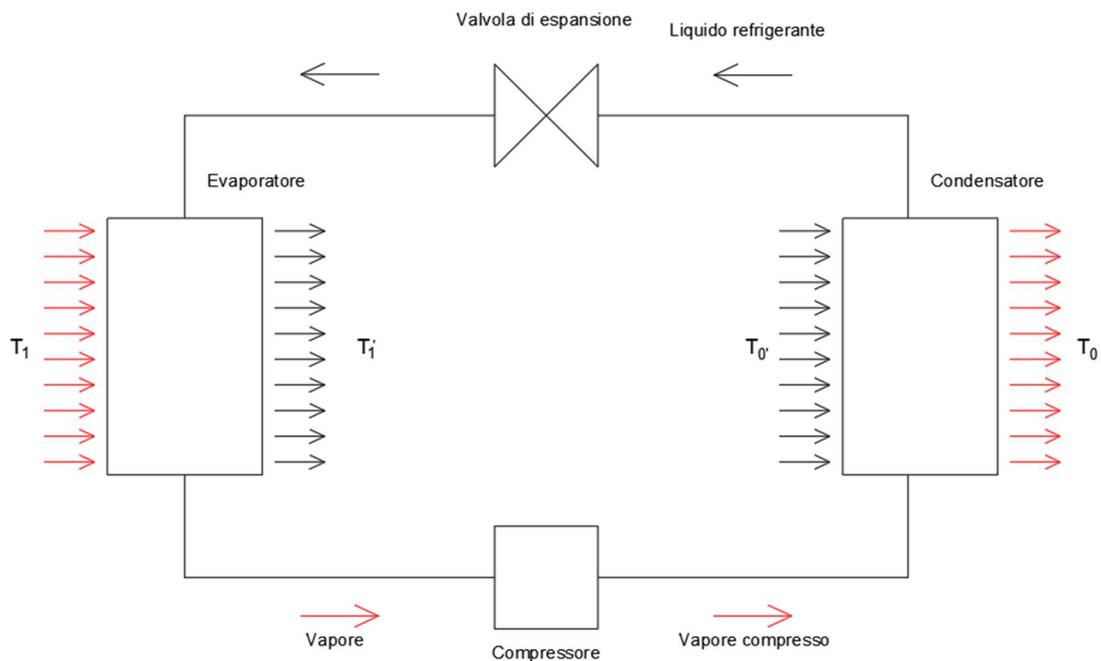


Figura 52 – Schema di flusso del liquido refrigerante in condizioni di raffrescamento

Sono state effettuate due prove sperimentali di raffrescamento con diverse modalità di collegamento. Nel primo caso il circuito 2 e 3 sono stati collegati in serie; nel secondo caso la prova è stata eseguita servendosi esclusivamente del circuito 3.

I grafici e le tabelle relative alle prove di raffrescamento sono stati inseriti a partire dalla tesi di Laurea Magistrale di Ruberto P. (2019).

4.2.1.1 PROVA 1: RAFFRESCAMENTO CON CIRCUITO 2 E 3 IN SERIE

La prima prova di raffrescamento della durata di 3 giorni ha avuto inizio il 16 settembre. L'intervallo di acquisizione dei dati è stato impostato a 30 s monitorando in maniera continua le variazioni di temperatura dalle ore 10:30:45 alle ore 00:00:00. In un primo momento la velocità della pompa di calore, ovvero la velocità di raffrescamento attivo, è stata impostata in maniera crescente dal 75% al 100%.

Successivamente, in data 18 settembre il valore di velocità della pompa di calore lato impianto, è stato fissato al 100% aumentando i tempi di scarica.

Come si nota dal grafico sottostante (Figura 53), l'andamento delle temperature è di tipo periodico.

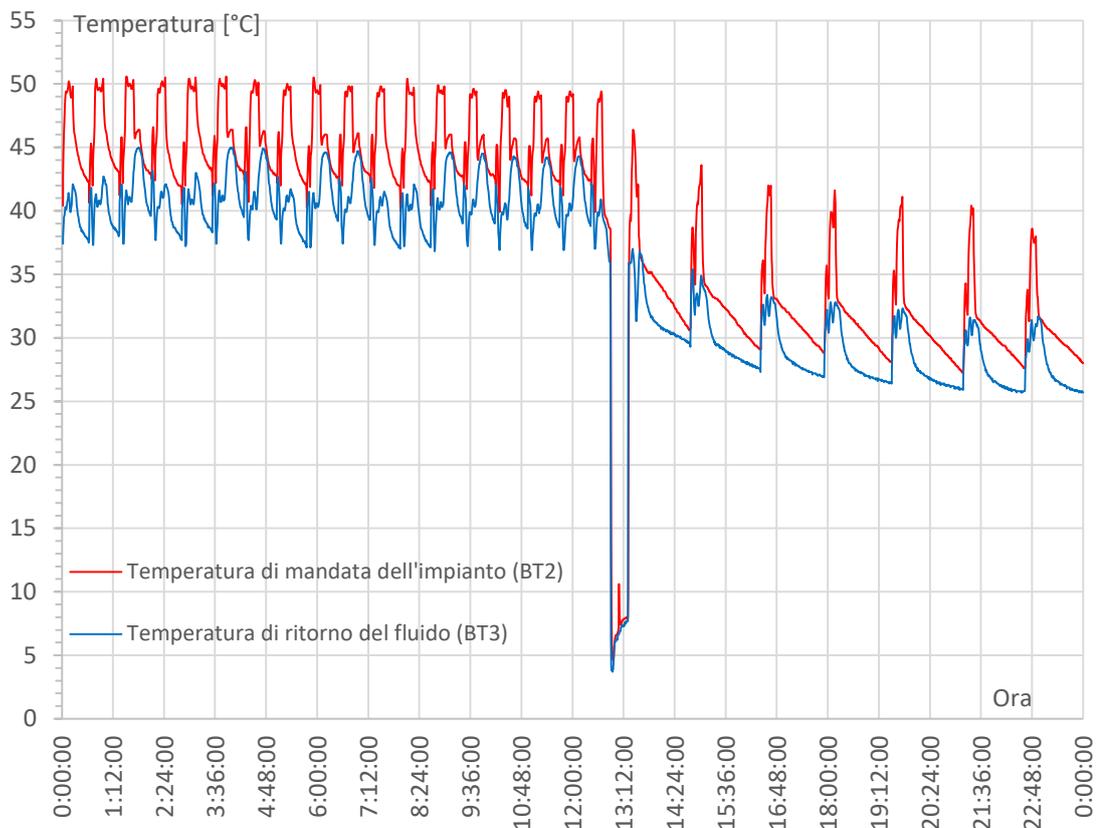


Figura 53 – Grafico prova 1, temperatura di mandata dell'impianto (BT2) e temperatura di ritorno del fluido (BT3)

È stato analizzato un ciclo nel dettaglio (Figura 54): si evidenzia un aumento di temperatura del fluido di mandata a 40,2°C in 15 minuti e un tempo di scarica superiore che ha portato ad avere un ciclo completo in 1 h e 27 min.

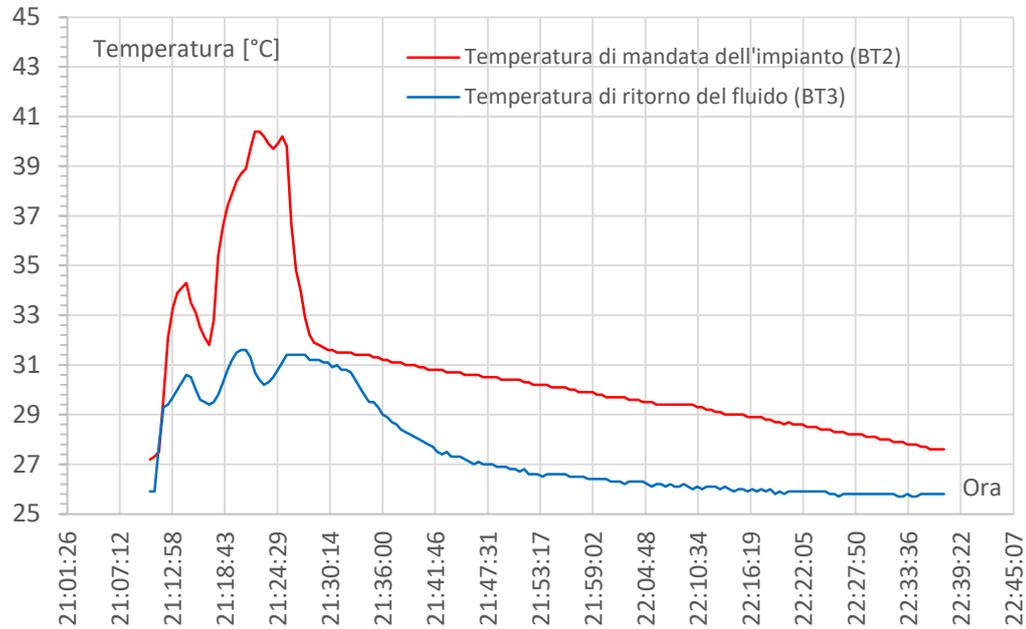


Figura 54 – Grafico BT2, BT3 ciclo completo della prova 1

Inoltre, è stato possibile riportare graficamente i dati provenienti dai contattalorie (Figura 55) evidenziando le differenze tra la temperatura di mandata (ct generale) e di ritorno (ht generale) nel circuito lato “sonde”.

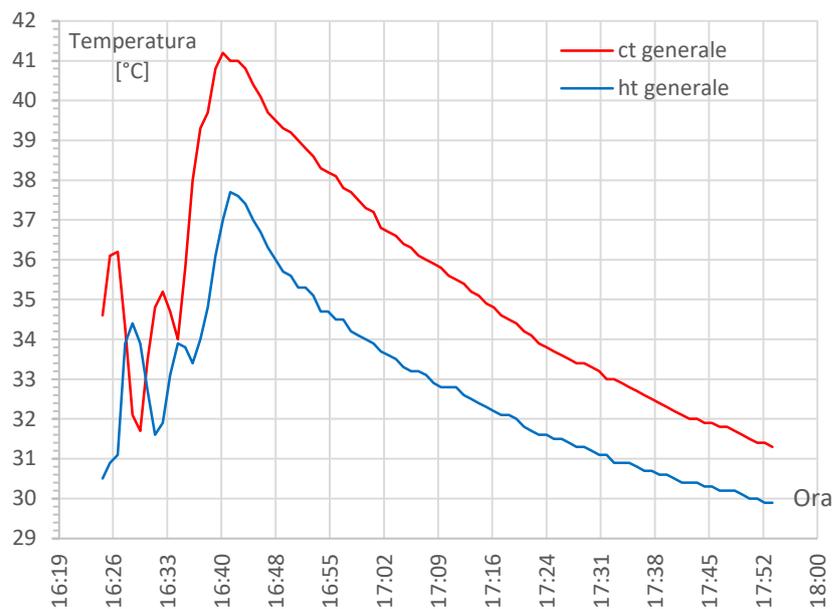


Figura 55 – Grafico ciclo ct, ht generale

Tutti questi dati permettono di ricavare la potenza estraibile \dot{Q} [kW] che è funzione della velocità di portata massica \dot{m} $\left[\frac{kg}{s}\right]$, del calore specifico dell'acqua c $\left[\frac{kJ}{kgK}\right]$ e della variazione di temperatura tra fluido entrante e uscente dalle sonde geotermiche.

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta T$$

La velocità di flusso massica è calcolata come il rapporto tra la densità dell'acqua ρ_w e la portata P $\left[\frac{l}{h}\right]$. Quest'ultima è stata rilevata dai flussimetri e vale:

- $P = 575 \frac{l}{h}$ durante la fase di incremento della temperatura;
- $P = 0 \frac{l}{h}$ quando la temperatura decresce.

Conoscendo il valore della densità dell'acqua pari a $0,997 \frac{kg}{dm^3}$, la velocità di flusso massica vale:

$$\dot{m} = \frac{\rho_w}{3600} \cdot P = 0,159 \frac{kg}{s}$$

Il calore specifico dell'acqua, che in generale è una grandezza dipendente dalla temperatura, in questo caso studio viene assunto costante e vale:

$$c = 4,186 \frac{kJ}{kgK}$$

Per ogni variazione di temperatura tra BT2 e BT3 è stata determinata la potenza estraibile: tra i valori ottenuti si evidenzia come il massimo della potenza estraibile avvenga alle 21:23 con una variazione di temperatura pari a 10 °C.

$$\dot{Q}_{max} = 6,67 kW$$

Conoscendo la potenza estraibile durante l'intero ciclo e, tenendo conto che, durante la fase di scarica la portata è nulla, e di conseguenza anche la potenza, è possibile determinare un valore di potenza medio associato al singolo ciclo.

$$\dot{Q}_{media} = 0,69 kW$$

Conoscendo la lunghezza complessiva del circuito 2 e 3 in serie pari a 57 m è stato possibile determinare il valore della potenza media estraibile per metro lineare:

$$\dot{Q}'_{media} = \frac{690 \text{ W}}{57 \text{ m}} = 12,11 \frac{\text{W}}{\text{m}}$$

Inoltre, nota la superficie dei pannelli modulari pari a 23 m², che rappresenta l'area di contatto con il terreno, è stata calcolata la potenza media estraibile per metro quadrato di superficie.

$$\dot{Q}''_{media} = \frac{690 \text{ W}}{23 \text{ m}^2} = 29,99 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Tale valore rientra nell'intervallo di energia estraibile nel caso di pareti energetiche (Barla et al., 2017) pari a 10 ÷ 50 $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$. Infine, la quantità di energia associata ad un ciclo di durata 1 h e 27 min e riferita all'area di contatto con il terreno vale:

$$E = \dot{Q}_{media} \cdot t_{ciclo} = 3600,93 \text{ kJ}$$

$$E'' = 156,56 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2}$$

Prima dell'avvio della seconda prova di raffrescamento sono state eseguite alcune analisi a partire dai dati forniti dai sensori di temperatura Winet verificando l'idoneità delle condizioni termiche. In particolare, sono state valutate in funzione del tempo le temperature relative ai sensori T1 e T6 della catena termometrica C8, situata nel piano B, collocato a 215 cm di profondità dal piano campagna. In particolare, il sensore T1 è distante 30 cm dalle sonde geotermiche, mentre il sensore T6 è distante 280 cm.

In Figura 56 e in Figura 57 si riportano i grafici relativi alle temperature dei sensori dal 16 settembre al 23 settembre.

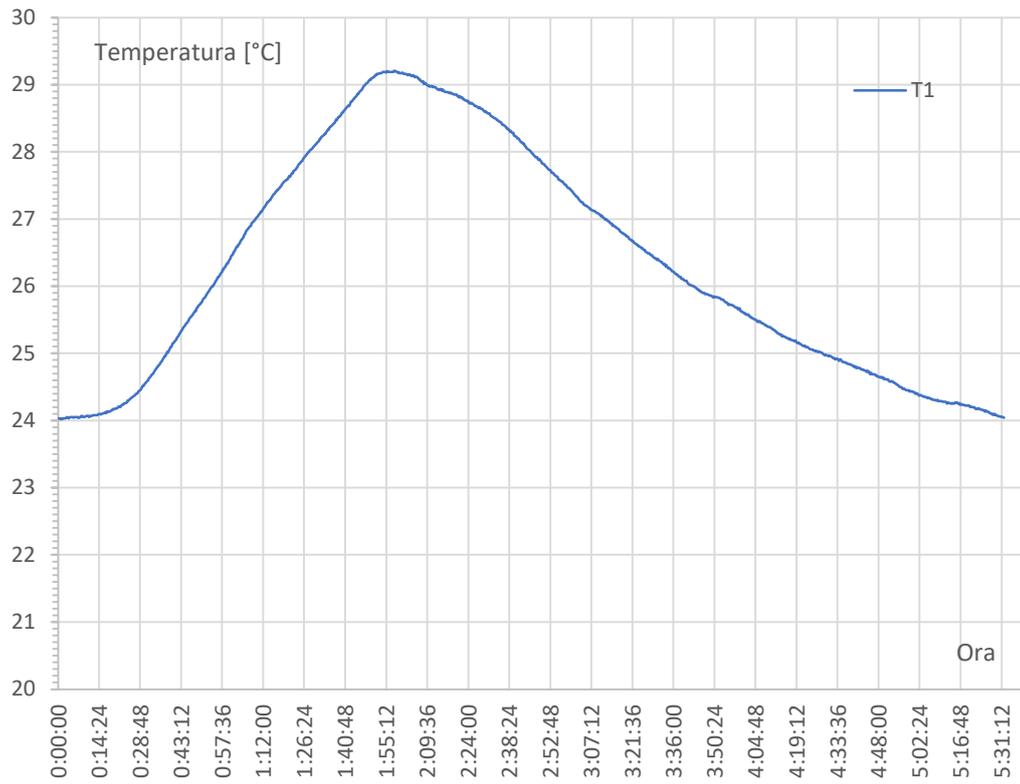


Figura 56 – Valori di C8-T1 dal 16 al 23 settembre

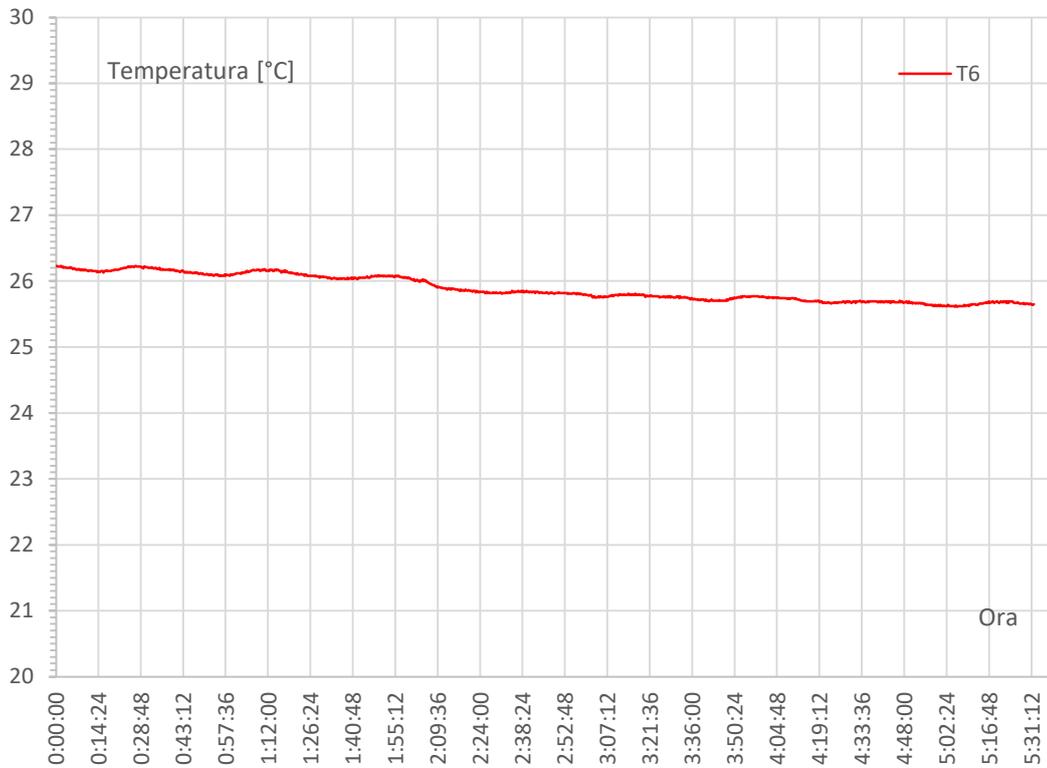


Figura 57 – Valori di C8-T6 dal 16 al 23 settembre

4.2.1.2 PROVA 2: RAFFRESCAMENTO CON IL CIRCUITO 3

La seconda prova di raffrescamento, anch'essa della durata di 3 giorni, coinvolge solo il circuito 3 e ha avuto inizio il 23 settembre.

Si riporta il grafico relativo all'andamento periodico delle temperature BT2 e BT3 a partire dalle ore 00:00:00 del 24 settembre (Figura 58) e il grafico relativo ad un unico ciclo (Figura 59).

In quest'ultimo la temperatura di mandata raggiunge un valore massimo di 33,2 °C in 12 minuti e la durata di un ciclo complessivo, dati i tempi di scarica maggiori, è di 1 h e 45 min.

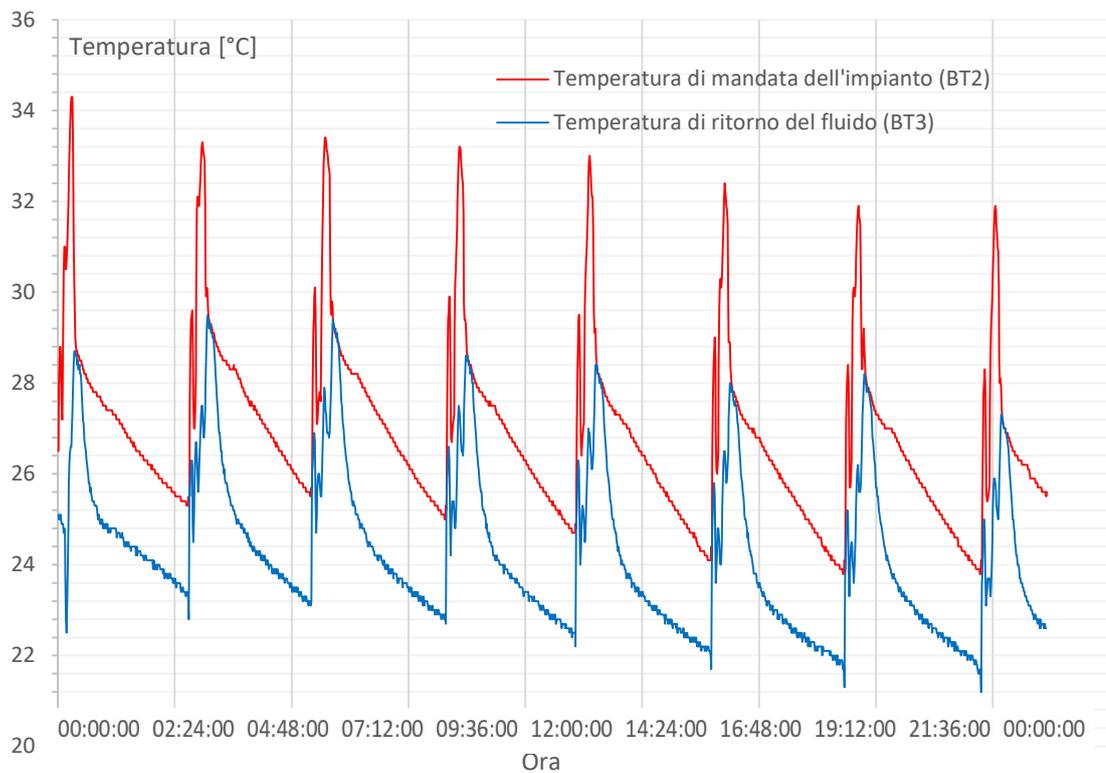


Figura 58 – Grafico prova 1 temperatura di mandata dell'impianto (BT2) e temperatura di ritorno del fluido (BT3) del 24 settembre

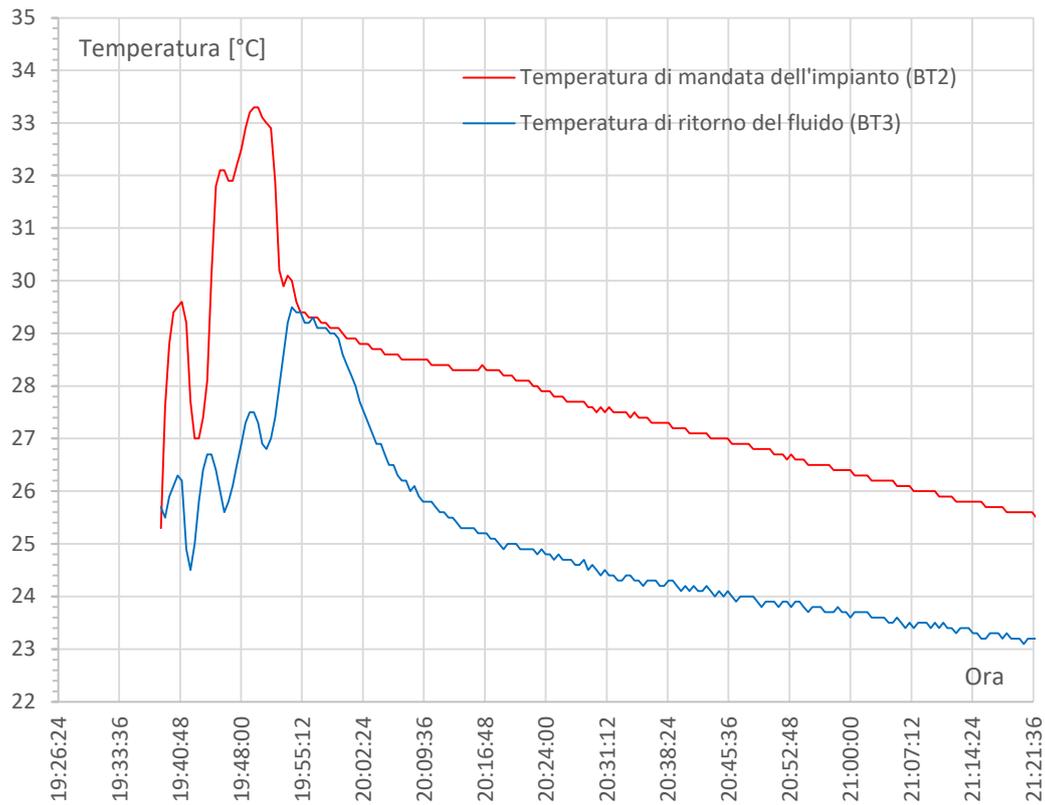


Figura 59 – Grafico temperatura di mandata dell'impianto (BT2) e temperatura di ritorno del fluido (BT3), ciclo completo della prova 2 del 24 settembre

Come per la prima prova di raffrescamento è stata stimata la potenza estraibile a partire dall'orario di attivazione del ciclo alle ore 19:38:31 fino al raggiungimento del valore massimo di temperatura alle ore 19:50:31. Il massimo della potenza estraibile avviene alle 21:46 con una variazione di temperatura pari a 6,5 °C:

$$\dot{Q}_{max} = 4,33 \text{ kW}$$

Conoscendo la potenza estraibile durante l'intero ciclo e, tenendo conto che, durante la fase di scarica la portata è nulla, e di conseguenza anche la potenza, è possibile determinare un valore di potenza medio associato al singolo ciclo.

$$\dot{Q}_{media} = 0,32 \text{ kW}$$

Conoscendo la lunghezza complessiva del circuito 3 è di 29,1 m è stato possibile determinare il valore della potenza media estraibile per metro lineare:

$$\dot{Q}'_{media} = \frac{320 \text{ W}}{29,1 \text{ m}} = 10,99 \frac{\text{W}}{\text{m}}$$

Inoltre, nota la superficie dei pannelli modulari pari a 11,5 m², che rappresenta l'area di contatto con il terreno, è stata calcolata la potenza media estraibile per metro quadrato di superficie.

$$\dot{Q}''_{media} = \frac{320 \text{ W}}{11,5 \text{ m}^2} = 28,14 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Tale valore rientra nell'intervallo di energia estraibile nel caso di pareti energetiche (Barla et al., 2017) pari a 10 ÷ 50 $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$.

Infine, la quantità di energia associata ad un ciclo di durata 1 h e 45 min e riferita all'area di contatto con il terreno vale:

$$E = \dot{Q}_{media} \cdot t_{ciclo} = 2038,10 \text{ kJ}$$

$$E'' = 177,23 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2}$$

I risultati di entrambe le prove sono stati riportati nella tabella sottostante (Tabella 4).

Prove di raffrescamento

<i>Potenza estraibile</i>	Prova 1 (Circuito 2 e 3 in serie)	Prova 2 (Circuito 3)
$\dot{Q}_{max} [kW]$	6,67	4,33
$\dot{Q}_{media} [kW]$	0,69	0,32
$\dot{Q}'_{media} [W/m]$	12,11	10,99
$\dot{Q}''_{media} [W/m^2]$	29,99	28,14

Tabella 4 – Tabella riassuntiva dei risultati della prova 1 e della prova 2

Come si evince dai valori riportati, in termini di potenza massima e di potenza media estraibile risulta più vantaggioso il funzionamento del circuito 2 e 3 in serie rispetto al solo circuito 3. Infatti, la maggiore area di contatto favorisce lo scambio termico e porta ad avere potenze massime e potenze medie superiori. Tuttavia, occorre tenere in considerazione che i valori di potenza associati al circuito 3 sono stati influenzati in parte da un brusco abbassamento delle temperature dell'aria nei a partire dal 23-24 settembre che non ha favorito la realizzazione della prova.

4.2.2 LA PROVA DI RISCALDAMENTO

Durante la prova di riscaldamento il percorso effettuato dal liquido refrigerante all'interno della pompa di calore è illustrato in Figura 60 ed è il seguente:

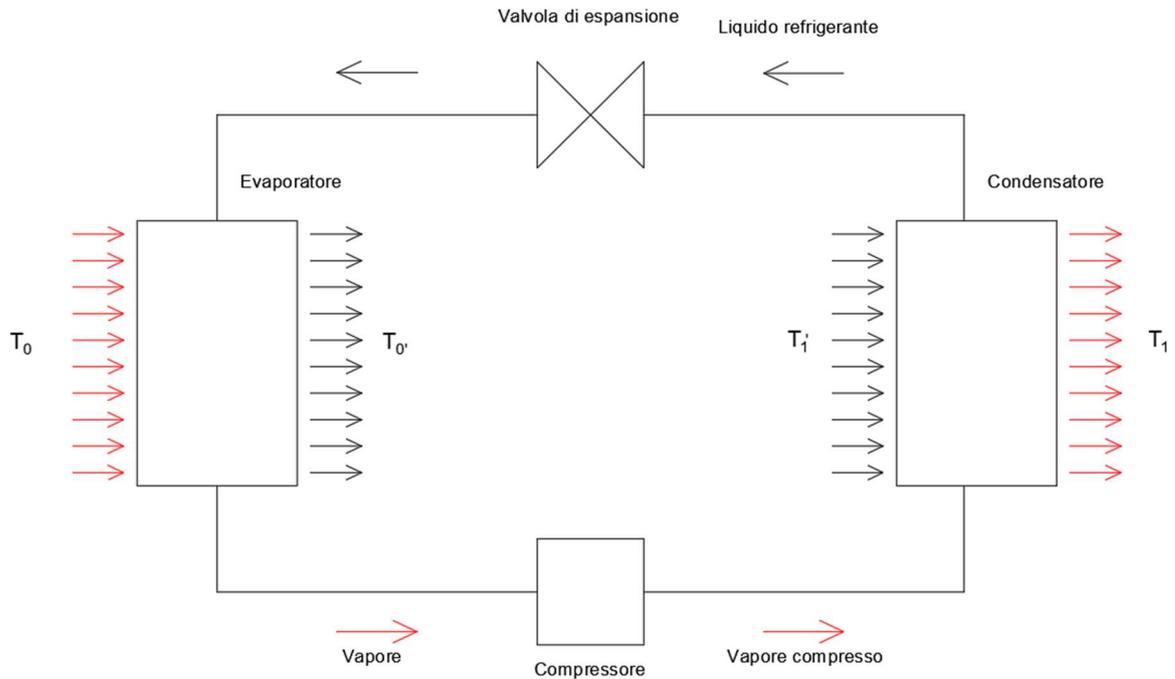


Figura 60 – Schema di flusso del liquido refrigerante in condizioni di riscaldamento

Il refrigerante a bassa temperatura assorbe il calore da una sorgente esterna ed evapora; quando passa all'interno del compressore la pressione e la temperatura aumentano. Il vapore ad elevata temperatura cede il calore, quindi condensa e si raffredda. Infine, il refrigerante passa attraverso la valvola di espansione che ne abbassa la pressione con lo scopo di riprendere un nuovo ciclo.

La prova sperimentale di riscaldamento ha avuto inizio il 23 ottobre 2019 alle ore 14:52 collegando in serie il circuito 1, 2 e 3 ed è terminata il 31 ottobre alle ore 15:30.

Nelle impostazioni della pompa di calore è stato possibile selezionare la modalità di riscaldamento e definire la curva, che nel caso in esame è rappresentata da una retta orizzontale che indica un valore costante di temperatura fissato a 45 °C. Lo scopo della curva di riscaldamento è quello di assicurare una temperatura interna omogenea, indipendentemente dalla temperatura esterna. In funzione di tale curva il computer della pompa di calore determina la temperatura dell'acqua dell'impianto ovvero la temperatura di mandata. Il superamento del valore dei Gradi Minuto regola l'avvio del compressore:

quando il compressore è spento la pompa di calore non è attiva e vi è solo la circolazione del fluido sia lato primario che lato secondario. Come nel caso della prova di raffrescamento, è stato impostato un valore costante per la velocità della pompa di calore lato impianto pari al 100%.

Prima di analizzare i dati di temperatura memorizzati dalla pompa di calore, è stato possibile controllare i valori forniti dai sensori di temperatura Winet, verificando le condizioni di temperatura del terreno ed in particolare il calore immagazzinato durante il periodo estivo. Per tale motivo, per i giorni 29 e 30 ottobre si riportano le temperature relative alla catena termometrica C8 in funzione del tempo, situata nel piano B, ovvero a 215 cm di profondità dal piano campagna. In particolare, è stato considerato il sensore T1 distante 30 cm dalle sonde geotermiche e il sensore T6, distante 280 cm (Figura 61).

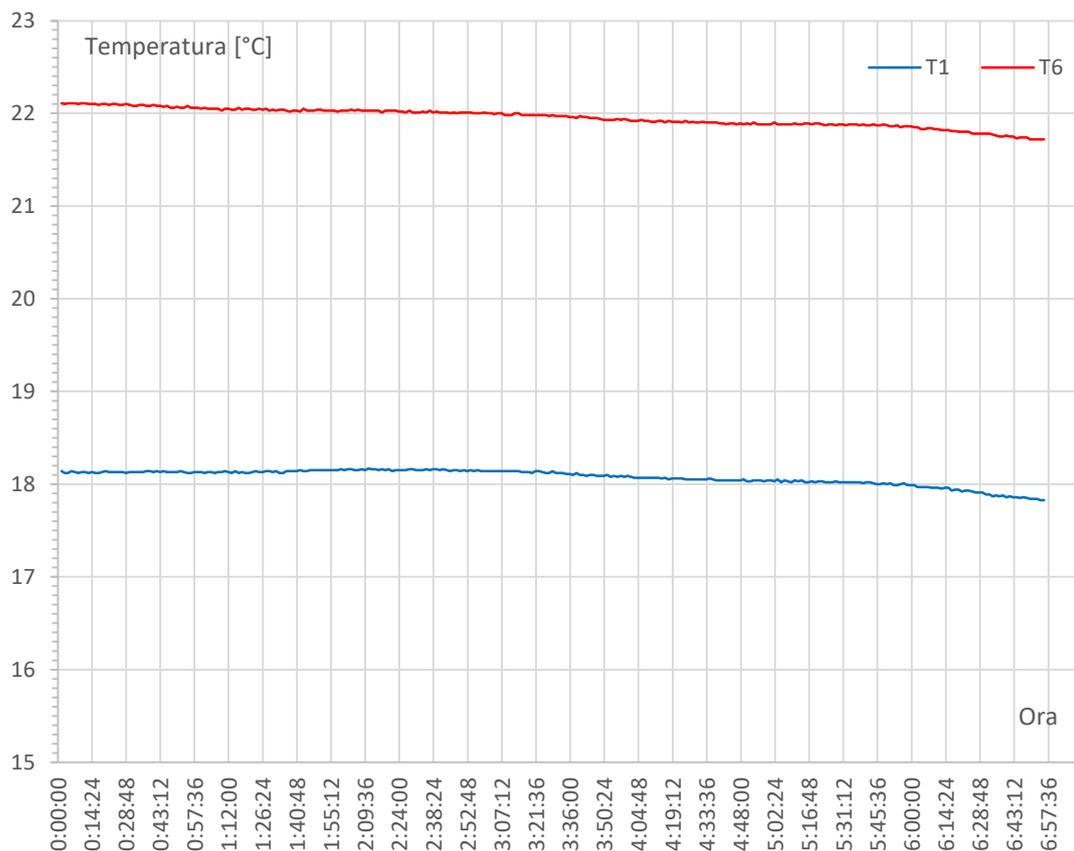


Figura 61 – Valori di C8-T1 e C8-T6 per il 29 e 30 ottobre

L'andamento delle temperature per entrambi i sensori appare quasi costante con la differenza che il sensore T6 più distante rispetto al T1 rileva una temperatura maggiore

data dall'accumulo di calore avvenuto durante il periodo più caldo, ovvero dall'inerzia termica del terreno stesso.

4.2.2.1 ANALISI DELLA TEMPERATURA DEL FLUIDO ALL'INGRESSO E ALL'USCITA DALLE SONDE

Sono stati riportati i valori delle temperature del fluido in ingresso nelle sonde (BT10) e in uscita dalle sonde (BT11) rilevati dal 23 al 31 ottobre (Figura 62).

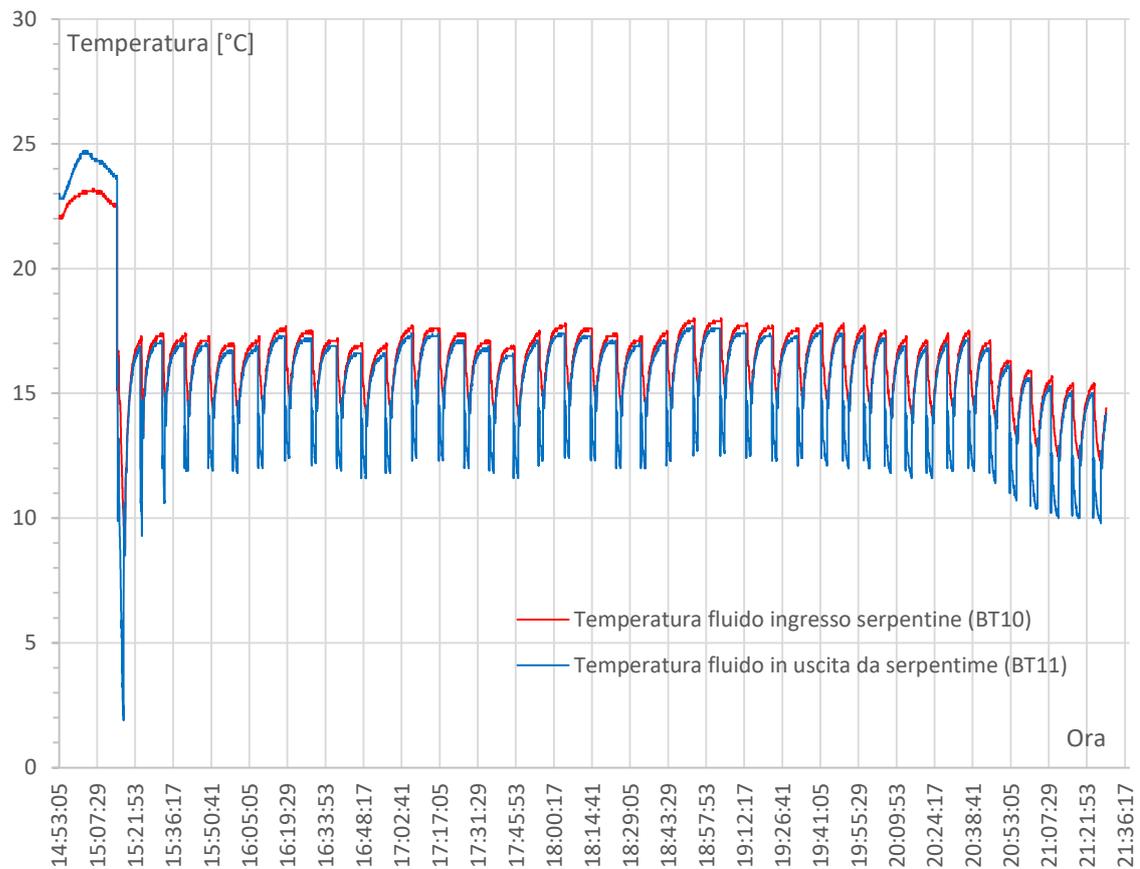


Figura 62 – Grafico della temperatura del fluido in ingresso e in uscita dalle serpentine del 23 al 31 ottobre

Dato l'andamento periodico delle temperature, l'analisi dettagliata è stata eseguita per i giorni 29 e 30 ottobre i cui valori sono stati riportati nel grafico sottostante (Figura 63).

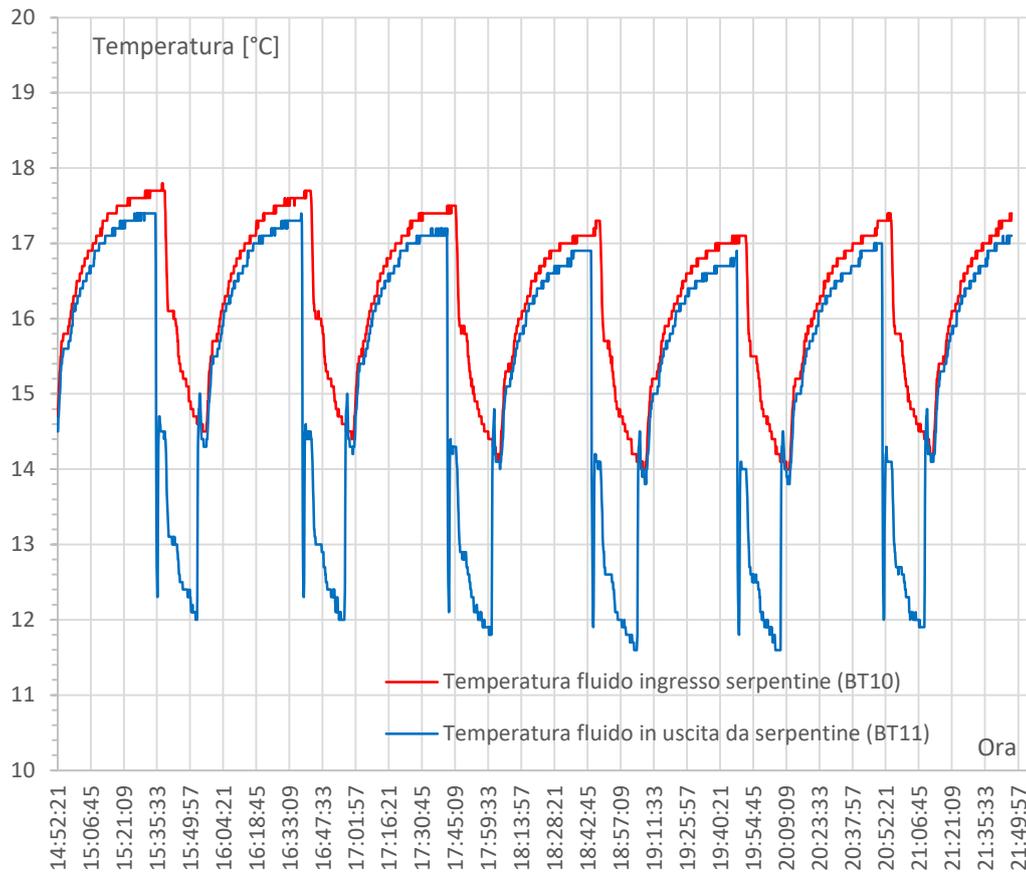


Figura 63 – Grafico della temperatura del fluido in ingresso e in uscita dalle serpentine del 29 e 30 ottobre

È stato possibile riferirsi ad un ciclo più nel dettaglio a partire dalle ore 14:55 fino alle ore 18:23 per un tempo totale di 3 h e 28 min (Figura 64).

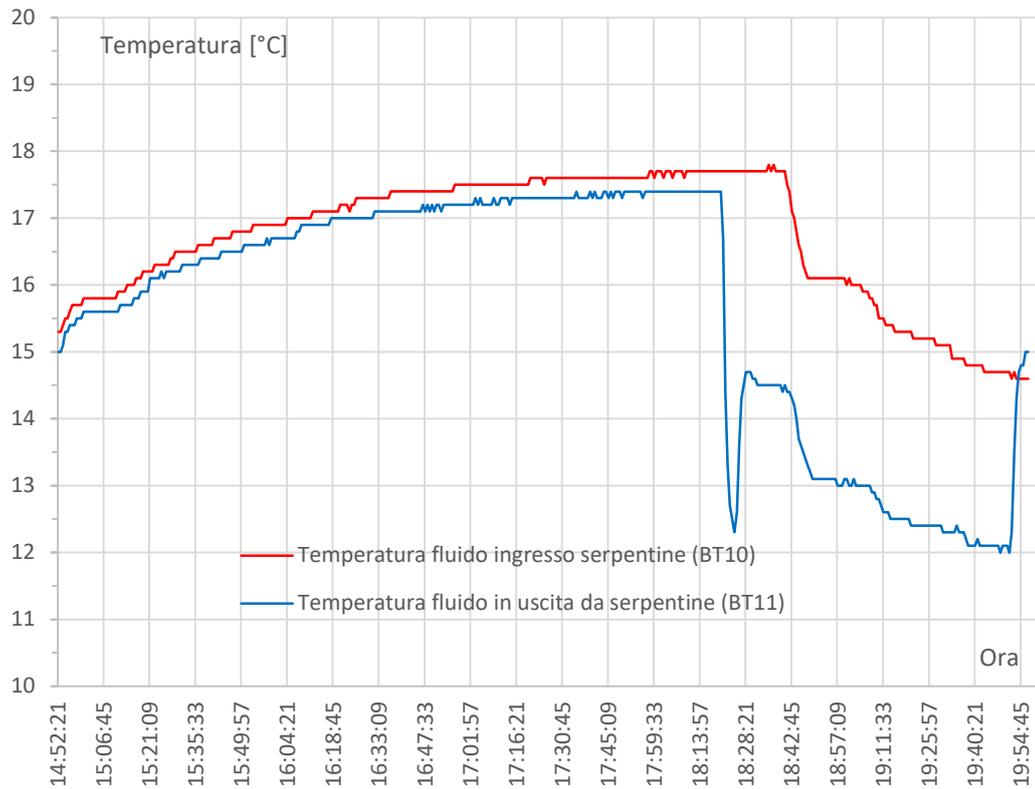


Figura 64 – Grafico della temperatura del fluido in ingresso e in uscita dalle serpentine del 29 e 30 ottobre per un ciclo

Come per la prova di raffrescamento, è stato possibile stimare il valore della potenza estratta in funzione delle temperature di entrata e di uscita del fluido dalle sonde.

$$\dot{Q}_{estratta} = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta T$$

Dai flussimetri, si rileva una portata di ~460 l/h durante la fase di incremento di temperatura e una portata nulla dove si ha un andamento decrescente della temperatura. In Tabella 5 si riportano i valori delle grandezze che entrano in gioco nel calcolo della potenza estraibile.

Grandezze	Simbolo	Unità di misura	Valore
Densità dell'acqua	ρ	[kg/dm ³]	0,997
Calore specifico	c	[kJ/kgK]	4,186
Portata	P	[l/h]	460
Velocità di portata massica	\dot{m}	[kg/s]	0,1273

Tabella 5 – Tabella riassuntiva per il calcolo della potenza estraibile

La potenza massima estraibile si ha alle 17:19 in quanto la differenza di temperatura tra il fluido in entrata e in uscita risulta essere pari a 5,4 °C.

Nell'appendice "Allegati", collocata al fondo del documento (Tabella 9) si riportano i valori per le temperature di mandata e di ritorno dall'impianto e le potenze distribuite durante un ciclo.

Come si evince dai dati, nella fase finale del singolo ciclo alcune potenze risultano essere negative e raggiungono un valore minimo di -0,21 kW. Tale valore potrebbe essere legato all'incertezza della misura; infatti il quantitativo minimo di potenza deve pari a zero e corrisponde al momento in cui la pompa di calore non è attiva, ovvero quando il compressore è spento.

Per il calcolo della potenza complessiva, rappresentata dall'area compresa tra la curva relativa alla temperatura di mandata e quella relativa alla temperatura di ritorno, si è tenuto conto solo dei contributi presenti nell'intervallo di tempo in cui il compressore è attivo: per cui, dopo aver moltiplicato ogni potenza per la differenza di tempo tra il valore successivo e il precedente (30 s), sono stati sommati i valori ottenuti e sono stati divisi per la durata totale del ciclo pari a 3 h e 28 min (12480 s).

$$\dot{Q}_{distribuita} = \frac{\sum(\dot{m} \cdot c \cdot \Delta T \cdot dt)}{t_{ciclo}} = \frac{\sum(\dot{Q}_{estratta})}{t_{ciclo}}$$

Considerando dt pari a 30 s e t_{ciclo} pari a 12480 s, è stata ottenuta una potenza complessiva di:

$$\dot{Q}_{estratta} = 0,48 \text{ kW}$$

Tutti i valori sono stati riportati in Tabella 10, posta al fondo del documento nell'appendice "Allegati".

La lunghezza totale del circuito 1, 2 e 3 in serie è pari a 84,9 m ed è data dalla somma delle lunghezze delle singole serpentine. Tale valore permette di determinare la potenza media estraibile per metro lineare.

$$\dot{Q}'_{media} = \frac{480 \text{ W}}{84,9 \text{ m}} = 5,65 \frac{\text{W}}{\text{m}}$$

Inoltre, nota la superficie totale dei tre pannelli pari a 34,5 m², che rappresenta anche l'area di contatto con il terreno, è stata calcolata la potenza media estraibile per metro quadrato di superficie.

$$\dot{Q}''_{media} = \frac{480 \text{ W}}{34,5 \text{ m}^2} = 13,91 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Tale valore rientra nell'intervallo di energia estraibile nel caso di pareti energetiche (Barla et al., 2017) pari a $10 \div 50 \frac{W}{m^2}$.

4.2.3 LA POTENZA ESTRAIBILE PER UN CONDOMINIO

Per il caso studio si considera un edificio di otto piani con un piano interrato adibito all'autorimessa. Si ipotizza di collocare le serpentine nella configurazione orizzontale e di lunghezza pari a 27,9 m lungo tutto il perimetro del muro di sostegno (Figura 65).

Moltiplicando il perimetro complessivo del muro di 108,50 m per la sua altezza pari a 4,60 m si ottiene un'area totale di 500 m².



Figura 65 – Posizionamento delle serpentine lungo il muro di sostegno di un edificio

Dai calcoli eseguiti in precedenza per le prove di raffrescamento e di riscaldamento sono stati ottenuti i valori di potenza al m²; successivamente, quest'ultima è stata moltiplicata per l'area totale di contatto del muro di sostegno con il terreno con lo scopo di stimare il calore totale estraibile. In Tabella 6 sono riportati i risultati ottenuti durante le prove.

PROVA	$\dot{Q}''_{media} [\frac{W}{m^2}]$	$\dot{Q}''_{totale} [W]$	$\dot{Q}''_{totale} [kW]$
<i>Raffrescamento_1</i>	29,99	14995	14,995
<i>Raffrescamento_2</i>	28,14	14070	14,07
<i>Riscaldamento</i>	13,91	6955	6,95

Tabella 6 – Valori di potenza estraibile

Dai valori ottenuti si evince come la potenza estratta durante le prove di raffrescamento sia circa il doppio della potenza estratta durante la prova di riscaldamento. Il valore inferiore di potenza che caratterizza quest'ultima prova è probabilmente legato alla minore differenza tra la temperatura del fluido in ingresso e in uscita dalle serpentine.

Tali valori, espressi in kW saranno confrontati con il fabbisogno energetico dell'edificio che sarà analizzato più dettagliatamente nel capitolo successivo.

5. L'UTILIZZO DEL CALORE

5.1 IL FABBISOGNO ENERGETICO DELL'EDIFICIO

La concezione di un impianto geotermico deve avvenire in contemporanea con la fase progettuale e in maniera integrata con tutti gli “attori” del processo edilizio. Tale approccio si basa sulla collaborazione e comunicazione tra il campo strutturale, architettonico, impiantistico ed ambientale con lo scopo di minimizzare le incomprensioni e gli errori e raggiungere il migliore risultato possibile. La progettazione integrata rappresenta un nuovo modo di concepire l'edificio a partire dalle prime fasi compiendo le scelte progettuali più adatte tramite un continuo scambio di informazioni tra tutte le figure che ne prendono parte.

I consumi energetici degli edifici sono influenzati dalle tipologie strutturali e costruttive e dall'area climatica in cui l'edificio si trova. Per esempio, per diminuire le dispersioni è possibile aumentare lo spessore delle chiusure verticali opache, incrementando lo strato di isolamento presente e avendo come risultato una diminuzione dell'area interna sfruttabile; per questo motivo, un'ulteriore soluzione è quella di adottare materiali a bassa trasmittanza e serramenti con prestazioni energetiche più elevate, ponendo sempre attenzione alla presenza di ponti termici e minimizzando il rischio di condensazione all'interno degli strati di materiale servendosi del *Diagramma di Glazer*.

In particolare, per la progettazione di un impianto geotermico occorre determinare il fabbisogno energetico dell'edificio, ovvero i carichi termici e frigoriferi annuali e le caratteristiche del terreno tramite il test di risposta termica che permette di individuare la temperatura del terreno indisturbato e l'influenza dell'acqua di falda e stabilire la lunghezza complessiva degli scambiatori a terreno. Si tratta di un processo iterativo durante il quale si considera una temperatura di riferimento media del fluido termovettore durante il periodo invernale ed estivo. La conformità alle nuove normative circa la trasmittanza delle chiusure verticali, opache e trasparenti e dei solai e l'utilizzo di nuove

tecnologie favorisce l'installazione degli impianti geotermici per le nuove costruzioni rispetto a interventi su edifici esistenti caratterizzati da un involucro edilizio di cattiva qualità.

Considerando un edificio di tipo condominiale costituito da otto piani e sito in Torino si è voluto stimare il fabbisogno energetico secondo due diverse modalità. Nel primo caso tale valutazione è stata fatta seguendo le indicazioni riportate dal progetto TABULA portato avanti dal dipartimento di energia del Politecnico di Torino. Nel secondo caso, attraverso il software TerMus è stato modellato con maggiore precisione l'edificio in esame.

5.1.1 L'APPROCCIO DEL PROGETTO TABULA

Negli ultimi anni sono stati compiuti diversi studi circa la dipendenza del fabbisogno energetico dell'edificio dalla tipologia edilizia.

Uno dei progetti, che prende il nome di TABULA (Typology Approach for BUiLding stock energy Assessment) è descritto all'interno di un documento chiamato Fascicolo sulla Tipologia Edilizia Italiana di Vincenzo Corrado & al. ed è stato finanziato dal programma europeo "Intelligent Energy Europe". La suddivisione per tipologie edilizie ha anche lo scopo di determinare la prestazione energetica ed i potenziali di risparmio energetico raggiungibili attraverso operazioni di riqualificazione sia dell'involucro edilizio sia dell'impianto termico. Con l'aiuto dei dati ISTAT sono stati compiute elaborazioni statistiche riguardanti i dati dimensionali degli edifici, le tipologie costruttive, le tipologie impiantistiche e i consumi energetici.

Inoltre, il risultato dell'analisi varia a seconda della tipologia di approccio che si segue. Il primo approccio si basa sulla definizione dei caratteri geometrici e delle tecnologie costruttive ed impiantistiche dell'edificio tipo che può avvenire in funzione dell'esperienza.

Il secondo approccio è riferito ad analisi statistiche ovvero alla scelta dell'edificio tipo in base ad un campione caratterizzato da una specifica geometria e tipologia costruttiva ed impiantistica. Infine, l'ultimo approccio permette di caratterizzare l'edificio come un "archetipo" ovvero un edificio non reale, ma virtuale che presenta un insieme di proprietà individuate statisticamente all'interno di una categoria di edifici.

5.1.1.1 LE TIPOLOGIE EDILIZIE, COSTRUTTIVE ED IMPIANTISTICHE

Tra le diverse tipologie edilizie analizzate (Figura 66) per il caso in esame di una palazzina di otto piani si rientra nell'ottava classe di epoca di costruzione e nella tipologia di "blocco di appartamenti", ovvero un edificio di grandi dimensioni caratterizzato da un numero di piani superiore a 5 e da un numero elevato di unità immobiliari. Inoltre, per ogni tipologia edilizia e per ogni classe di epoca di costruzione sono forniti i valori relativi al volume lordo climatizzato, alla superficie utile di pavimento, alla superficie lorda di pavimento, al rapporto di forma, al numero piani e al numero di appartamenti.

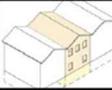
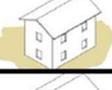
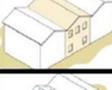
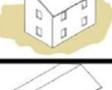
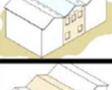
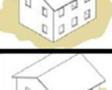
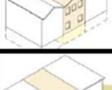
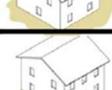
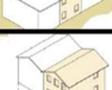
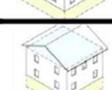
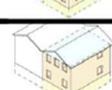
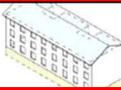
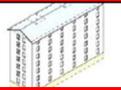
<i>Area climatica media</i>		CASE MONOFAMILIARI	CASE A SCHIERA	EDIFICI MULTIFAMILIARI	BLOCCHI DI APPARTAMENTI
CLASSE DI EPOCA DI COSTRUZIONE	1 Fino al 1900				
	2 1901-1920				
	3 1921-1945				
	4 1946-1960				
	5 1961-1975				
	6 1976-1990				
	7 1991-2005				
	8 Dopo il 2005				

Figura 66 – Le principali tipologie edilizie in Italia che caratterizzano la fascia climatica media

Le tipologie costruttive fanno riferimento ai componenti dell'involucro edilizio opaco e trasparente a cui sono associati specifici parametri termo-fisici.

Gli impianti per il riscaldamento e la produzione di acqua calda sanitaria sono stati scelti secondo l'esperienza e in funzione dei dati forniti dalla letteratura e dalla normativa tecnica creando un vero e proprio database delle tecnologie più diffuse sul territorio italiano. Per ogni tipologia impiantistica si definiscono i sottosistemi impiantistici di emissione, distribuzione e accumulo, l'epoca di costruzione o installazione e l'efficienza energetica. Tra i sottosistemi di emissione si trovano i radiatori e i pannelli radianti

mentre, il sottosistema di distribuzione può essere centralizzato o separato per ogni appartamento.

Per il caso studio si suppone di essere in presenza di un sottosistema di emissione costituito da radiatori regolati con un sistema di distribuzione di tipo centralizzato. In base a tali scelte impiantistiche il rendimento di emissione, tratto dalla parte 2 della specifica tecnica UNI/TS 11300 (prospetto 17) risulta essere all'incirca 0,98-0,99.

La ricerca eseguita dal Politecnico di Torino ha permesso di redigere diverse schede illustrative degli edifici tipo catalogate in funzione dell'area climatica media, della classe di epoca di costruzione e alla classe di dimensione edilizia. Per il caso analizzato si riportano le relative informazioni.

In particolare, in Figura 67 sono riportate le informazioni principali e di carattere geometrico dell'edificio, le tipologie costruttive ipotizzate e le trasmittanze associate, la tipologia di impianto di riscaldamento e di produzione di ACS. In Figura 68 sono proposte due varianti progettuali e i risultati del calcolo della prestazione energetica nel caso base e con l'applicazione delle misure migliorative consigliate.

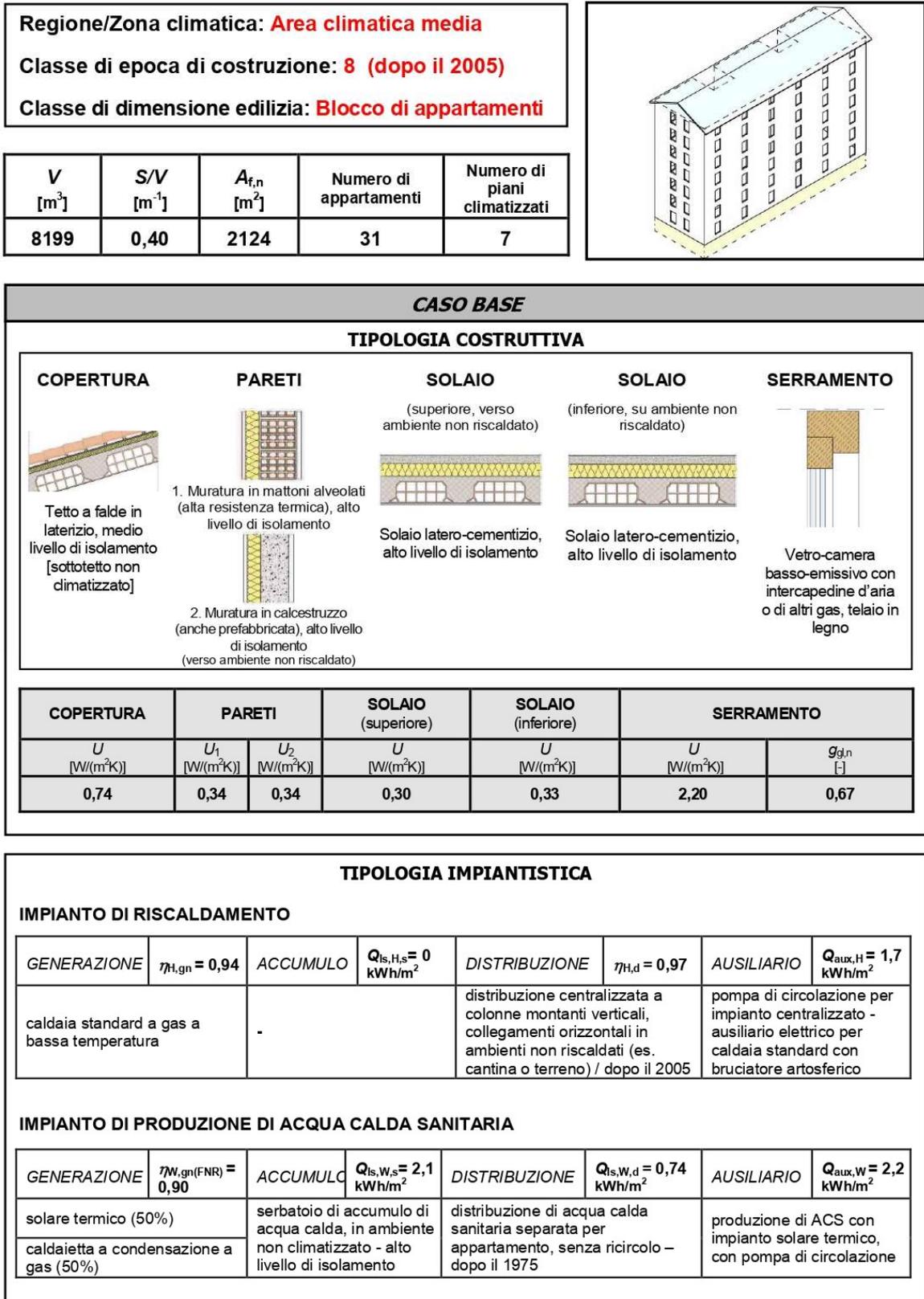


Figura 67 – Pagina 1 della scheda illustrativa per un blocco di appartamenti

PRIMA VARIANTE			
REQUISITI RELATIVI ALL'INVOLUCRO		REQUISITI RELATIVI AGLI IMPIANTI	
ELEMENTO	U W/(m ² K)	RISCALDAMENTO	
		GENERAZIONE $\eta_{H,gr(FNR)} = 0,98$	ACCUMULO $Q_{s,Hs} = 0,8 \text{ kWh/m}^2$
COPERTURA	0,74	solare termico (30%)	serbatoio di accumulo di acqua calda per riscaldamento centralizzato - alto livello di isolamento
PARETI	0,27	caldaia a condensazione, installata in centrale termica (70%)	
SOLAIO (superiore)	0,24	ACQUA CALDA SANITARIA	
SOLAIO (inferiore)	0,30	GENERAZIONE $\eta_{H,gr(FNR)} = 0,90$	ACCUMULO $Q_{s,W,s} = 2,1 \text{ kWh/m}^2$
SERRAMENTI	1,80 ($g_{gr,n} 0,67$)	solare termico (50%)	serbatoio di accumulo di acqua calda, in ambiente non climatizzato - alto livello di isolamento
		caldaia a condensazione a gas (50%)	distribuzione di acqua calda sanitaria separata per appartamento, senza ricircolo - dopo il 1975
			AUSILIARIO $Q_{aux,H} = 2,6 \text{ kWh/m}^2$
			pompa di circolazione per impianto centralizzato - ausiliario elettrico per caldaia a condensazione
			AUSILIARIO $Q_{aux,W} = 2,2 \text{ kWh/m}^2$
			produzione di ACS con impianto solare termico, con pompa di circolazione
Produzione annuale di energia elettrica impianto fotovoltaico: 2,7 kWh/m ²			

SECONDA VARIANTE			
REQUISITI RELATIVI ALL'INVOLUCRO		REQUISITI RELATIVI AGLI IMPIANTI	
ELEMENTO	U W/(m ² K)	RISCALDAMENTO	
		GENERAZIONE $COP_{FNR} = 3,46$	ACCUMULO $Q_{s,Hs} = 0,8 \text{ kWh/m}^2$
COPERTURA	0,11	solare termico (45%)	serbatoio di accumulo di acqua calda per riscaldamento centralizzato - alto livello di isolamento
PARETI	0,13	pompa di calore geotermica (55%)	
SOLAIO (superiore)	0,13	ACQUA CALDA SANITARIA	
SOLAIO (inferiore)	0,19	GENERAZIONE $COP_{FNR} = 3,48$	ACCUMULO $Q_{s,W,s} = 2,1 \text{ kWh/m}^2$
SERRAMENTI	1,10 ($g_{gr,n} 0,50$)	solare termico (75%)	serbatoio di accumulo di acqua calda, in ambiente non climatizzato - alto livello di isolamento
		pompa di calore geotermica (25%)	distribuzione di ACS con ricircolo, rete affacciata all'interno, dopo il 1991
			AUSILIARIO* $Q_{aux,H} = 1,6 \text{ kWh/m}^2$
			pompa di circolazione per impianto centralizzato
			AUSILIARIO $Q_{aux,W} = 2,2 \text{ kWh/m}^2$
			produzione di ACS centralizzata con impianto solare termico, con pompa di circolazione
* In aggiunta si considera il consumo medio annuo di energia elettrica per il ventilatore, pari a 1,42 kWh/m ²			
Produzione annuale di energia elettrica impianto fotovoltaico: 5,4 kWh/m ²			

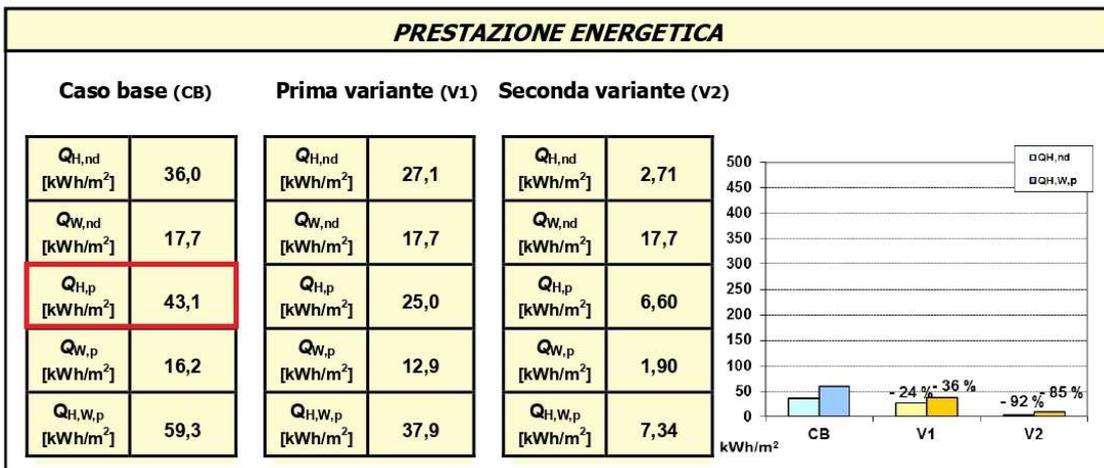


Figura 68 – Pagina 2 della scheda illustrativa per un blocco di appartamenti

Tra i valori riportati compare:

- il fabbisogno annuo di energia netta per il riscaldamento, $Q_{H,nd}$;
- il fabbisogno annuo di energia netta per l'acqua calda sanitaria, $Q_{W,nd}$;
- il fabbisogno annuo di energia primaria per il riscaldamento, $Q_{H,p}$;
- il fabbisogno annuo di energia primaria per l'acqua calda sanitaria, $Q_{W,p}$;
- il fabbisogno annuo di energia primaria per il riscaldamento e l'acqua calda sanitaria, $Q_{H,W,p}$.

È importante distinguere il fabbisogno annuo di energia netta e di energia primaria. In particolare, secondo la presentazione di De Angelis K., il fabbisogno netto di energia termica è la quantità di calore che deve essere fornita o sottratta ad un ambiente climatizzato per mantenere le condizioni di temperatura desiderate durante un dato periodo di tempo. Invece, l'energia primaria è l'energia fornita all'edificio da un impianto di riscaldamento o raffrescamento partendo dal fabbisogno netto dell'involucro e tenendo conto dei rendimenti dell'impianto scelto.

Il passo successivo sarà quello di confrontare il fabbisogno di energia primaria dell'edificio pari a $43,1 \text{ kWh/m}^2$ con la potenza estraibile per mezzo dell'impianto geotermico installato lungo il perimetro dell'edificio valutandone l'efficienza.

$$Q_{H,p} = 43,1 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$$

Purtroppo, le schede non forniscono alcun valore per il fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione estiva.

5.1.2 LA MODELLAZIONE CON TERMUS

TerMus è un software di termotecnica che permette generare il modello energetico di un edificio con lo scopo di valutarne la prestazione energetica.

Dopo avere scaricato la versione di prova del programma e aver inserito il nome del Comune in cui si intende collocare l'edificio, il software fornisce in automatico la zona climatica, i dati geografici (latitudine e longitudine) e i dati di progetto relativi alla stagione estiva e invernale (Figura 69).

DATI GENERALI

CALCOLO

COMUNE

Comune CAP

Provincia Sigla

Regione

Dati geografici

DATI INVERNALI DI PROGETTO

Zona Climatica E

Temperatura esterna [°C]

Umidità relativa esterna [%]

Gradi Giorno

Velocità Vento [m/s]

DATI ESTIVI DI PROGETTO

Temperatura esterna [°C]

Umidità relativa esterna [%]

Escursione termica giornaliera [°C]

Riduzione irrad. TOT per foschia [%]

TEMPERATURE MEDIE MENSILI [°C]

gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
1.2	3.1	8.3	11.9	18.0	22.1	23.6	22.6	19.1	12.3	6.8	2.6

UMIDITA' RELATIVA MENSILE [%]

gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
83.20	80.40	80.60	66.60	65.30	60.40	54.10	72.60	74.60	82.00	93.00	88.20

Figura 69 – Dati generali TerMus

Inoltre, dopo aver importato i file .dwg relativi alle piante architettoniche dei singoli piani, è stato possibile disegnare i muri e solai inserendo le stratigrafie degli elementi costruttivi. Avendo a disposizione nella libreria del programma le principali tipologie costruttive sono stati modificati alcuni modelli variando i materiali, gli spessori e le proprietà termiche.

Per il calcolo energetico non sono state modellate le strutture in calcestruzzo quali travi e pilastri, considerando esclusivamente gli elementi architettonici presenti.

La pianta architettonica, ripetuta per gli otto piani dell'edificio, si compone di quattro appartamenti costituiti da un soggiorno, due wc, un disimpegno e due camere da letto (Figura 70).

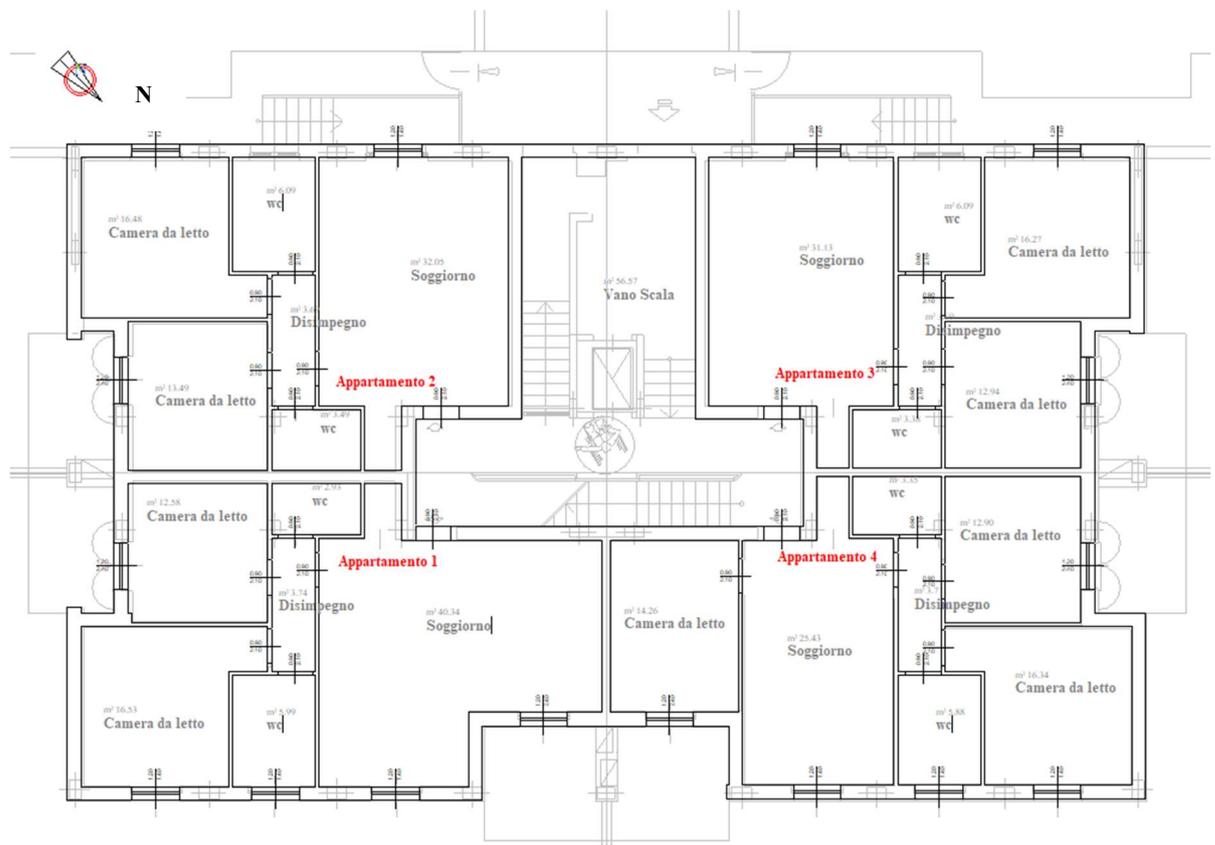


Figura 70 – Pianta architettonica di riferimento

Le caratteristiche geometriche dell'edificio, inserite anche nel report di TerMus, riguardano:

- l'altezza media pari a 2,70 m;
- la superficie netta calpestabile pari a 2689,57 m²;
- la superficie lorda 3172,24 m²;
- il volume netto pari a 7261,83 m³;
- il volume lordo pari a 9826,34 m³;
- il rapporto di forma pari a 0,4359 1/m.

Dopo avere modellato tutti i piani è stato collocato il nord (posizionato in alto a sinistra) in maniera arbitraria tramite il comando “esposizione” (Figura 71).

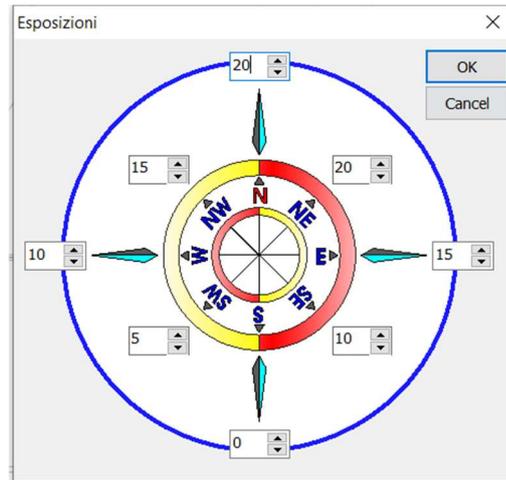


Figura 71 – Impostazioni per il posizionamento del nord

Al fine di rispettare le prescrizioni contenute nel Decreto Legislativo del 3 marzo 2011, n. 28 in materia di energia da fonti rinnovabili, sono stati inseriti i pannelli fotovoltaici con una potenza totale calcolata come rapporto tra la superficie in pianta dell'edificio (S) e un coefficiente (K) che vale $50 \text{ m}^2/\text{kW}$ (§3.3.1):

$$P = \frac{S}{K} = \frac{460 \text{ m}^2}{50 \frac{\text{m}^2}{\text{kW}}} = 9,2 \text{ kW}$$

In funzione di dati trovati in letteratura, la superficie totale dei pannelli che porta ad ottenere una potenza complessiva di 9,2 kW è di circa 50 m^2 .

Per l'esecuzione del calcolo delle prestazioni energetiche dell'edificio è stato necessario tenere in considerazione la presenza di una centrale termica (CT) con una pompa di calore con potenza termica ipotizzata di circa 44 kW in funzione del fabbisogno energetico dei locali e il cui rendimento è stato calcolato dal programma con il metodo della UNI/TS 11300-4 e con le seguenti caratteristiche (Figura 72):

Descrizione METODO di calcolo - Rendimento di GENERAZIONE:
UNI/TS 11300-4

Rendimento di GENERAZIONE:

Tipologia di generatore:
POMPA di CALORE

Ubicazione del generatore: in centrale termica

Combustibile

FC EPr: 0 Tipo: Metano [UdM = Sm³]
FC EPrn: 1.05 P.C.I.: 9.45 CO2: 0.1969

Tipo di Fluido Termovettore: Acqua

Potenza Termica [kW]: 43.9
Coefficienti di prestazione (COP o GUE): 1.75

Fonte energetica: Acqua

Potenza elettrica ausiliari [W]: 470
Portata di aria trattata [m³/h]: 0

Figura 72 – Impostazioni della pompa di calore

È stato ipotizzato anche un sistema per la generazione di ACS.

5.1.2.1 LE STRATIGRAFIE ADOTTATE

Tutte le stratigrafie sono state decise ottenendo un valore di trasmittanza conforme a quanto specificato all'interno della norma UNI EN ISO 6946. La norma fornisce un metodo di calcolo della resistenza termica e della trasmittanza degli involucri edilizi, non coinvolgendo le porte, le finestre e tutti gli elementi vetrati.

Si allegano le immagini relative ai modelli costruttivi per le chiusure verticali opache (i muri perimetrali), le chiusure verticali trasparenti (le porte e le finestre), le partizioni verticali opache, le chiusure orizzontali inferiori (i solai contro terra) e superiori (la copertura) e le partizioni orizzontali (i solai interpiano).

Le pareti perimetrali dell'edificio di spessore pari a 48 cm sono caratterizzate dalla presenza di 15 cm di isolamento termico posizionato verso la parte esterna del muro. Tale tipologia di coibentazione, illustrata in Figura 73, prende il nome di isolamento a "cappotto" e ha lo scopo di isolare l'edificio dal caldo e dal freddo riducendo i ponti termici, sfruttare l'accumulo termico a favore del confort interno e proteggere la facciata dagli agenti atmosferici e meccanici.

Il valore di trasmittanza viene calcolato automaticamente dal programma e vale:

$$U = 0,209 \frac{W}{m^2 K}$$

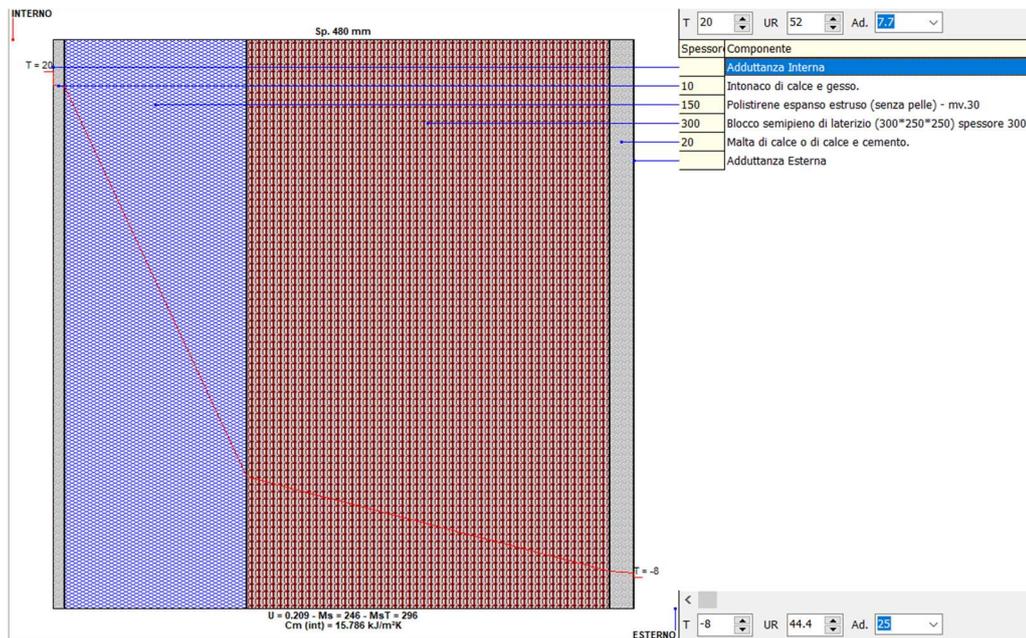


Figura 73 – Chiusura verticale opaca con isolamento a cappotto

Le pareti che separano gli ambienti non riscaldati come il vano scala, dagli ambienti riscaldati come gli appartamenti presentano uno strato di isolamento termico e un laterizio forato di dimensioni inferiori rispetto a quello adottato per i muri perimetrali, arrivando ad avere uno spessore totale di 32 cm e una trasmittanza di 0,22 W/m²K (Figura 74).

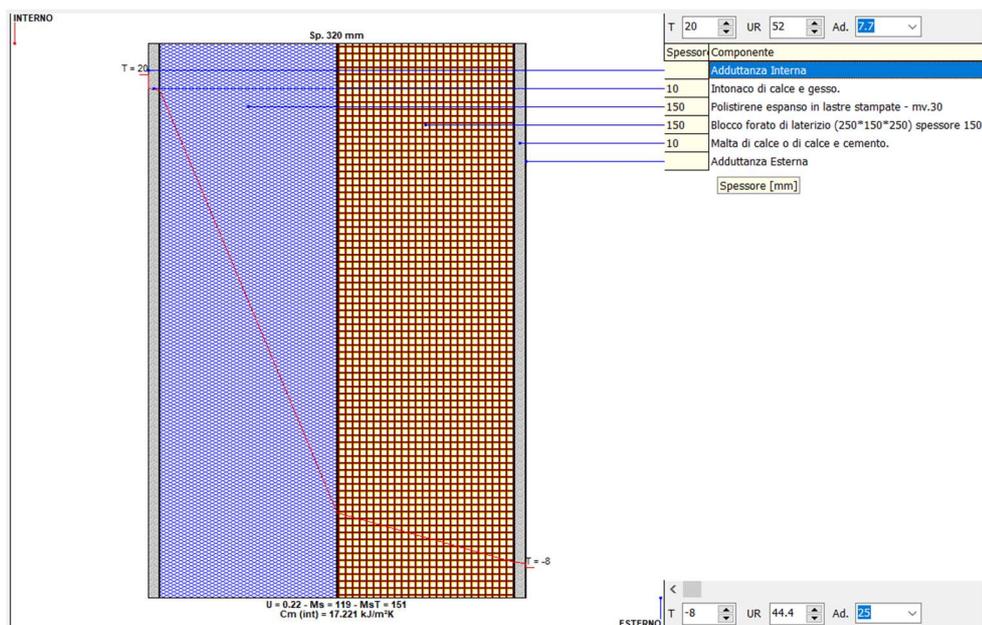


Figura 74 – La partizione verticale opaca isolata

I muri di separazione tra gli alloggi separano ambienti climatizzati e sono caratterizzati da una trasmittanza pari a $0,528 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Figura 75).

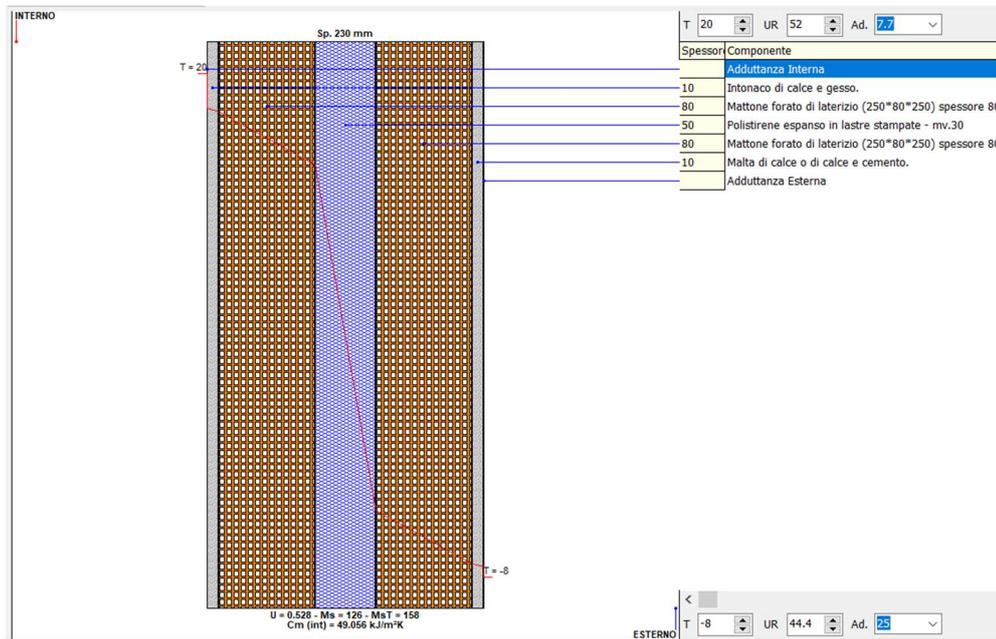


Figura 75 – La partizione verticale opaca che separa gli alloggi

Infine, per i muri che separano i locali riscaldati degli appartamenti è stata adottata la seguente stratigrafia (Figura 76). Il valore elevato di trasmittanza della parete non influenza il calcolo della prestazione energetica in quanto questo tiene conto dei carichi termici scambiati tra gli spazi interni ed esterni.

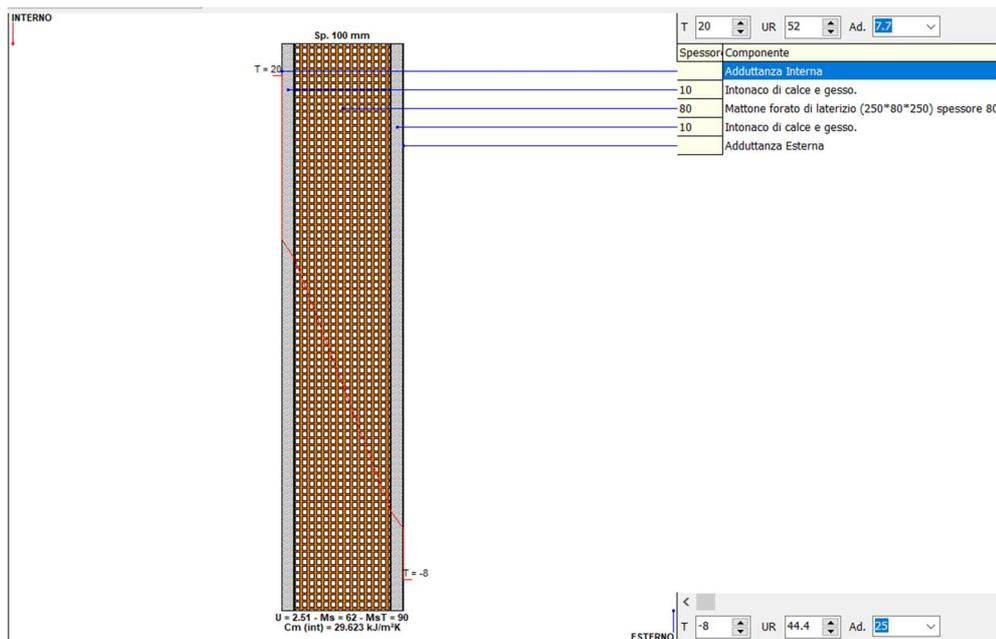


Figura 76 – La partizione verticale opaca

Per tale motivo è stato necessario variare i parametri anche delle finestre e delle porte. In entrambi i casi si è deciso di adottare come componente trasparente un doppio vetro basso emissivo con distanziatori in PVC e trasmittanza pari a $1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ (calcolata dalla norma UNI/TS 11300-1:2014). Invece, la trasmittanza del telaio vale $1,9 \text{ W/m}^2\text{K}$.

La trasmittanza totale, dalla somma di due contributi, che tengono conto rispettivamente della trasmittanza del vetro e del telaio, è calcolata dal software secondo la norma UNI EN ISO 10077-1:2007. La trasmittanza totale di entrambi i serramenti vale $1,88 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Per i solai sono state individuate tre tipologie costruttive: la chiusura orizzontale inferiore (Figura 77), la partizione orizzontale (Figura 78) e la chiusura orizzontale superiore (Figura 79). La chiusura orizzontale inferiore separa il piano riscaldato dal locale autorimessa che rappresenta un ambiente non climatizzato; per questo motivo si è optato per un solaio in lastre Predalles di spessore totale pari a 52 cm e trasmittanza pari a $0,234 \text{ W/m}^2\text{K}$.

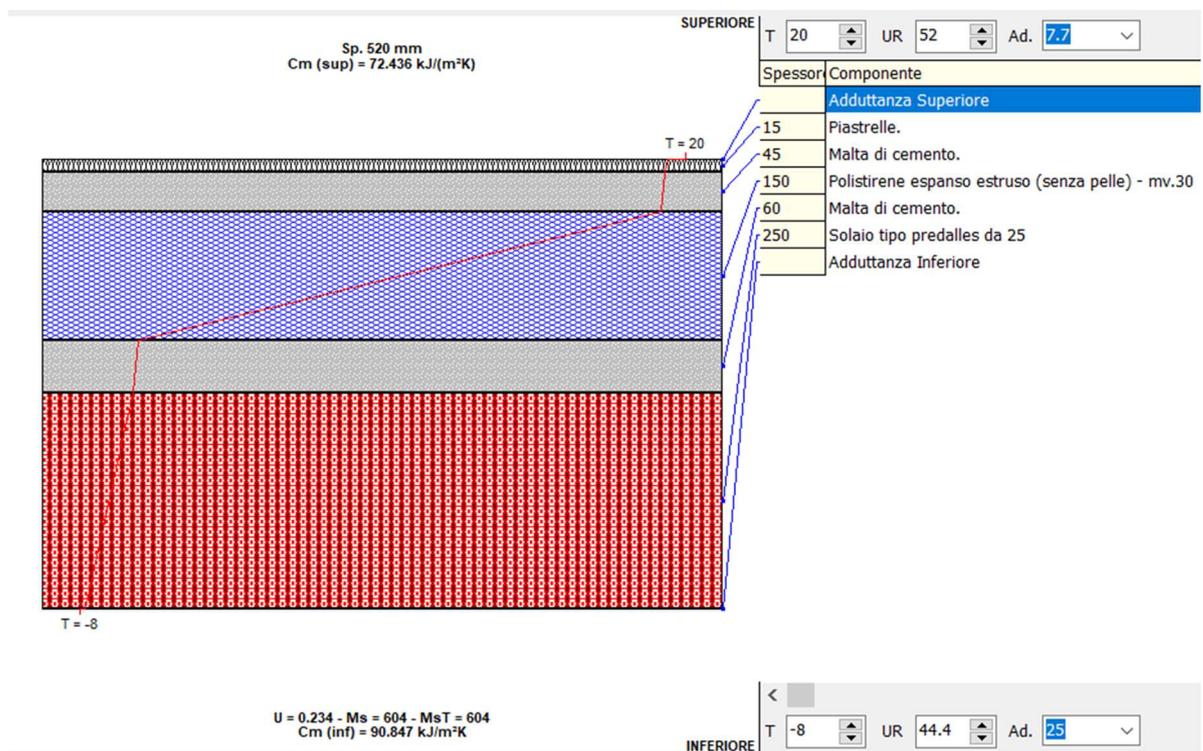


Figura 77 – Solaio prefabbricato in calcestruzzo con lastre Predalles

Il solaio che separa i piani, ovvero gli ambienti riscaldati, ha uno spessore totale di 30 cm e una trasmittanza di $0,776 \text{ W/m}^2\text{K}$.

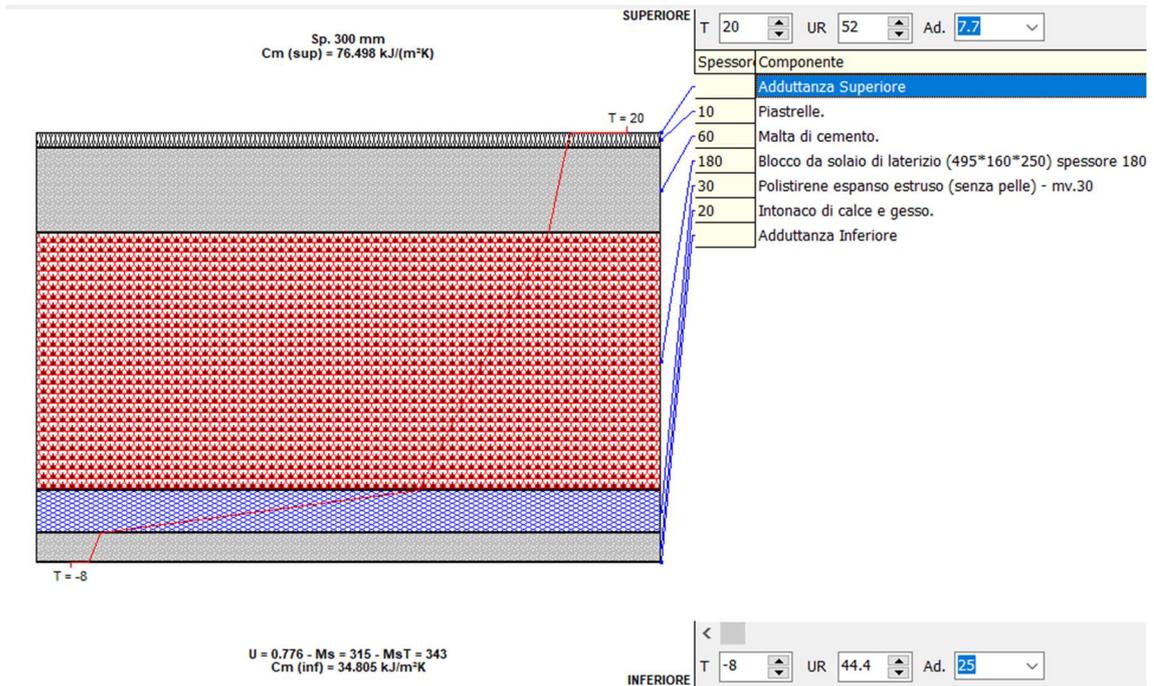


Figura 78 – Solaio interpiano

Il solaio che divide l'ultimo piano di appartamenti dall'ambiente esterno ha uno spessore di 55 cm dovuto alla presenza di uno strato di isolamento consistente. La trasmittanza totale è di 0,291 W/m²K.

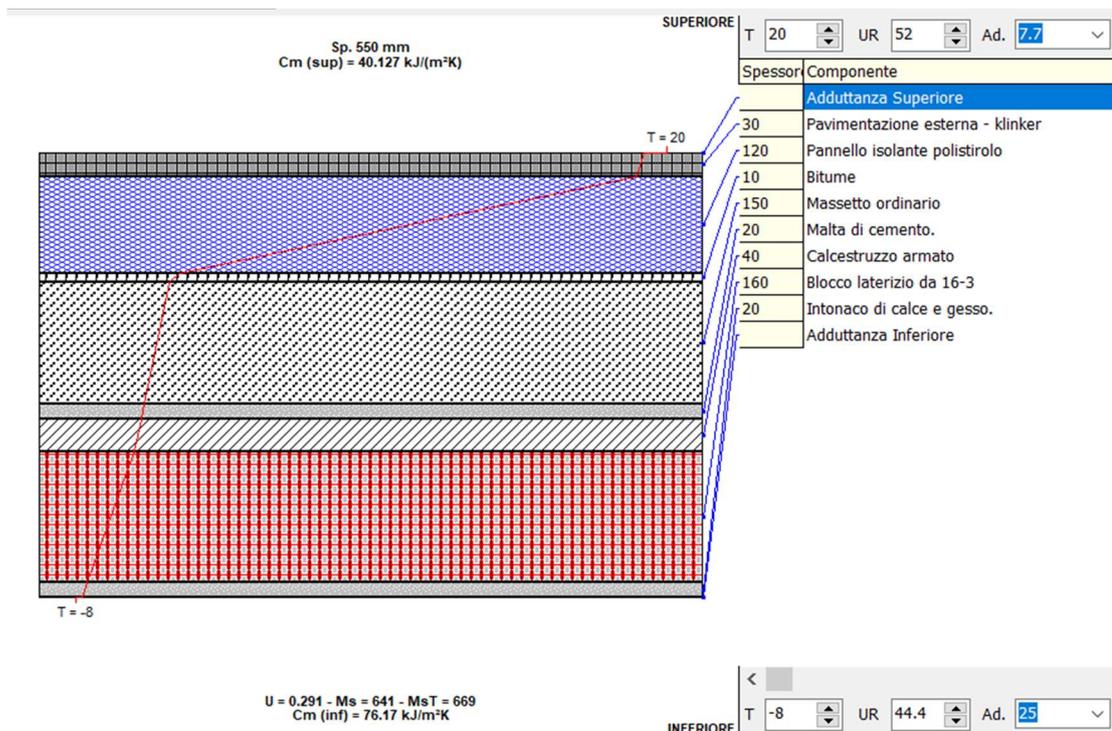


Figura 79 – Solaio di copertura

In TerMus per assegnare i locali sono stati definiti i vani secondo una codifica alfanumerica costituita da una lettera che indica il tipo di piano (rialzato, primo, secondo, terzo) e il numero di alloggio (A1, A2, A3 e A4) nominato in pianta in senso orario. Per esempio, i locali del piano rialzato hanno la seguente dicitura: R_A1, R_A2, R_A3, R_A4.

Al fine del calcolo della prestazione energetica, per ogni vano è stato necessario, specificare la presenza di locali climatizzati e non climatizzati ai piani superiori ed inferiori. Ciò è stato fatto impostando anche la tipologia di solaio superiore ed inferiore in funzione di quelle precedentemente inserite (solaio interpiano, solaio prefabbricato in lastre predalles e solaio di copertura).

In Figura 80 è riportato un esempio: il piano rialzato confina inferiormente con il locale autorimessa (non climatizzato) ed è limitato superiormente dai locali del primo piano riscaldati.

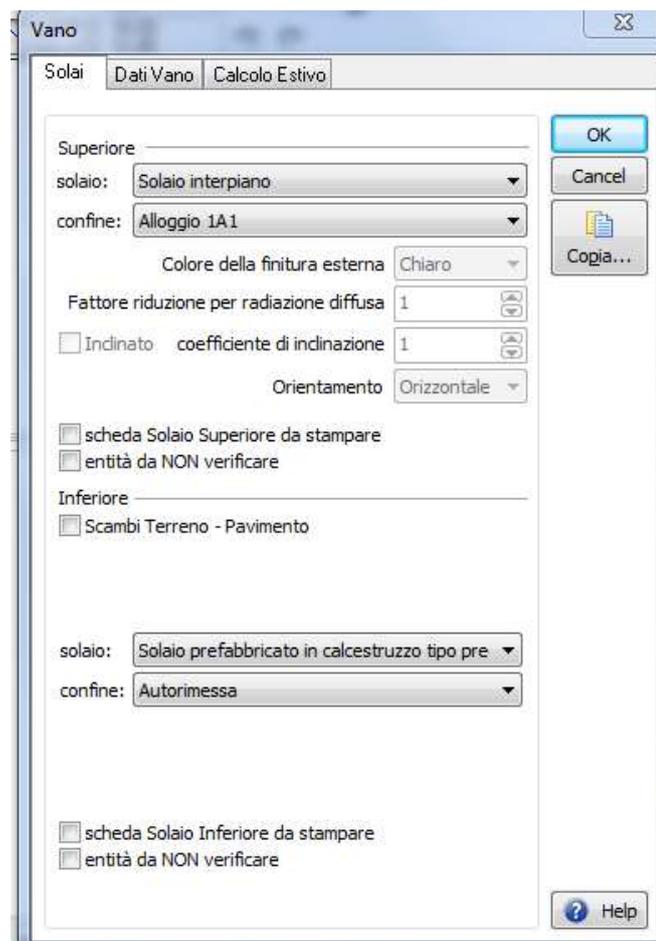


Figura 80 – Impostazioni per i vani

5.1.2.2 LE OMBRE E I PONTI TERMICI

Per ogni finestra e ogni porta è stato opportuno inserire l'ombreggiatura: in entrambi i casi sono state inserite delle schermature interne rappresentate da tende bianche (Figura 81). Per le porte finestre è stato inserito anche il fattore di ombreggiatura calcolato dal software in funzione dell'aggetto orizzontale e verticale (Figura 82).

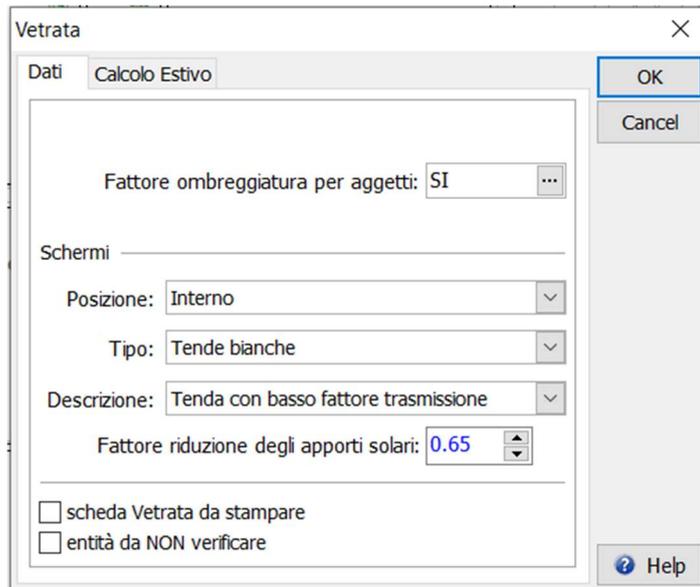


Figura 81 – Impostazioni per l'inserimento delle schermature

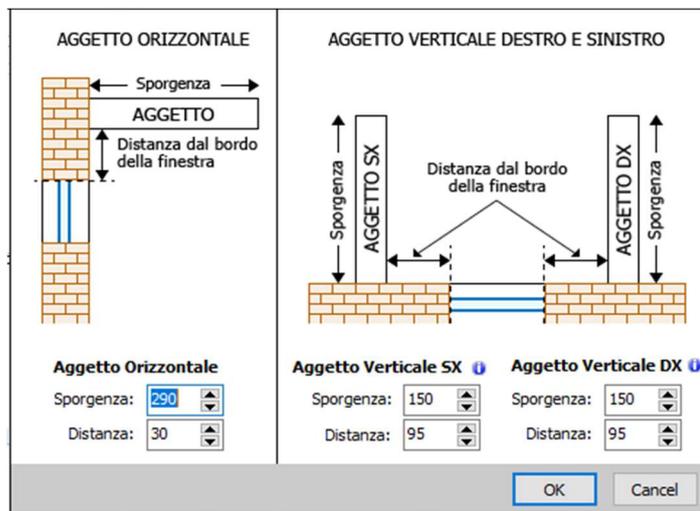


Figura 82 – Impostazioni per l'inserimento degli aggetti orizzontali e verticali

Dopo aver posizionato le schermature e le ombreggiature si è proceduto con l'inserimento dei ponti termici.

I ponti termici consistono in una configurazione strutturale o geometrica che produce una deviazione del flusso termico. Il programma offre la possibilità di inserire i ponti termici

definendo un codice per il PT, scegliendo la categoria di ponte termico e definendo le caratteristiche geometriche e termiche. Successivamente esegue il calcolo della trasmittanza termica lineica con la possibilità di visualizzare mesh, temperature ed isoterme.

La procedura del calcolo numerico della trasmittanza termica lineare (k_l , W/mK) avviene secondo le prescrizioni della norma UNI EN ISO 10211 e la verifica di rischio di formazione muffe segue la normativa UNI EN ISO 13788.

Per il caso in esame sono stati definiti sei tipi di PT:

- angolo pareti (PT_01);
- parete – solaio inferiore (PT_02);
- parete – solaio interpiano (PT_03);
- parete – solaio di copertura (PT_04);
- parete – balcone (PT_05).
- parete – telaio (PT_06a per la finestra, PT_06b per la porta finestra).

Per una maggiore comprensione si allegano le immagini riferite alla prima tipologia di ponte termico, PT_01 che si verifica all'angolo tra due pareti. In Figura 83 vi è la visualizzazione schematica dell'entità composta da cappotto esterno di 15 cm e muratura di 30 cm con i valori di trasmittanza corrispondenti; la seconda immagine (Figura 84) riporta la mesh e l'andamento della temperatura dal lato esterno più freddo (evidenziato in blu) al lato interno più caldo; infine, TerMus fornisce anche l'andamento delle isoterme (Figura 85).

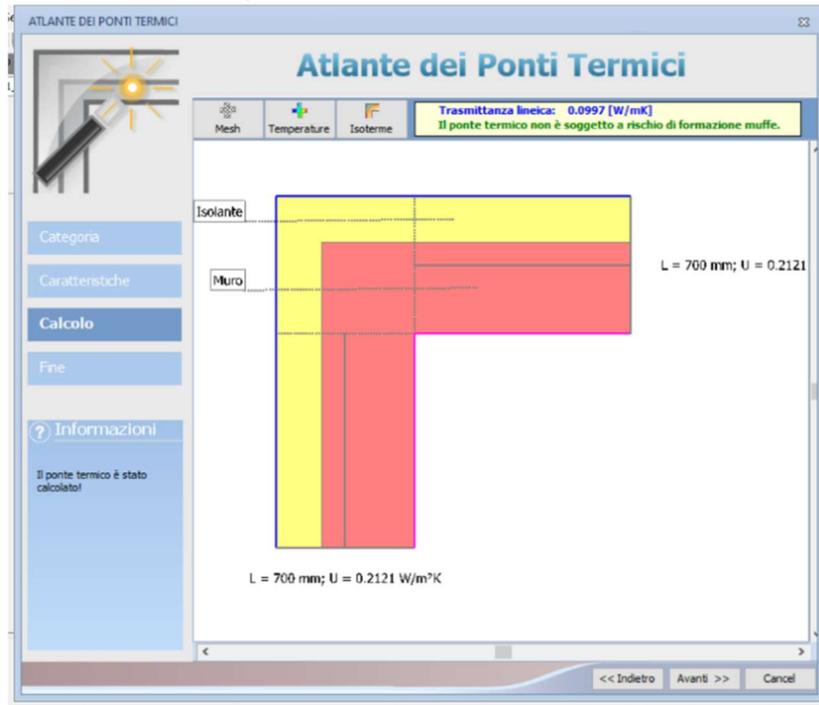


Figura 83 – Schematizzazione del ponte termico PT_01

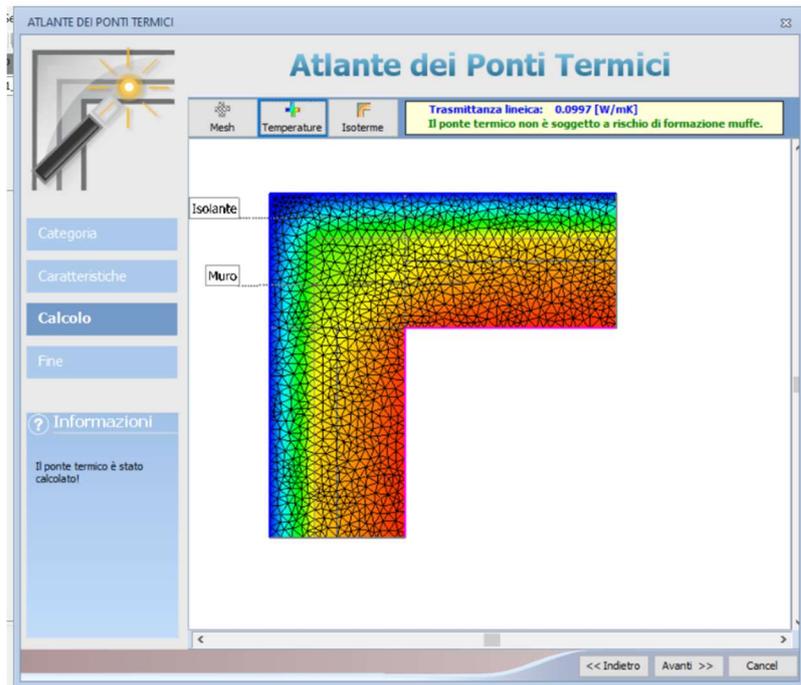


Figura 84 – Mesh e andamento della temperatura per il ponte termico PT_01

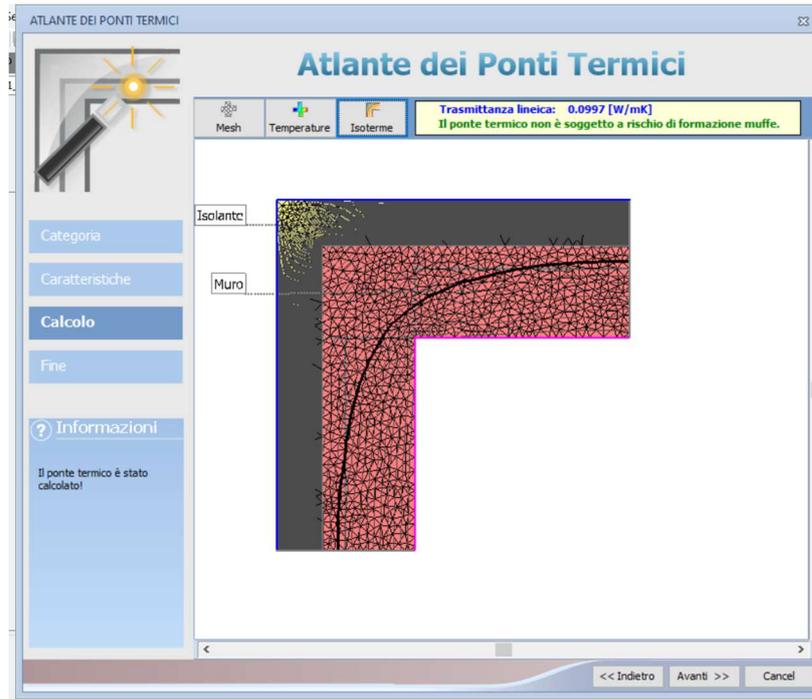


Figura 85 – Andamento delle isoterme per il ponte termico PT_01

Dopo aver creato le tipologie principali di ponti termici, questi sono stati inseriti in ogni piano dell'edificio, associandoli ogni entità ed è stato possibile specificare l'estensione orizzontale o verticale del ponte termico.

Nel caso di PT_01, PT_06a, e PT_06b la lunghezza del ponte termico si estende lungo la direzione verticale in quanto si sviluppa lungo l'altezza del tratto di muro in cui è stato inserito. Invece, le altre tipologie (PT_02, PT_03, PT_04, PT_05) si estendono orizzontalmente.

5.1.2.3 IL CALCOLO DELLA PRESTAZIONE ENERGETICA

Dopo aver inserito tutti i parametri degli elementi costruttivi, la posizioni del nord geografico, la pompa di calore che alimenta l'edificio e il quantitativo minimo di fonti di energia rinnovabili, è stato possibile avviare l'esecuzione del calcolo.

Il calcolo della prestazione energetica è svolto dal software secondo la norma UNI/TS 11300-1. La specifica tecnica fornisce i dati e i metodi per la determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale.

Selezionando una qualsiasi entità è possibile visualizzare i risultati pertinenti.

Per esempio, scegliendo di analizzare le prestazioni della centrale termica ipotizzata sono forniti i valori annuali e mensili riferiti al riscaldamento.

Mentre, il condominio residenziale è caratterizzato dai valori riguardanti l'edificio di riferimento che rispetta i requisiti minimi.

Quest'ultimo risulta essere in classe energetica A3 e pertanto deve rispettare alcune verifiche di legge associate a tale classe (Figura 86).

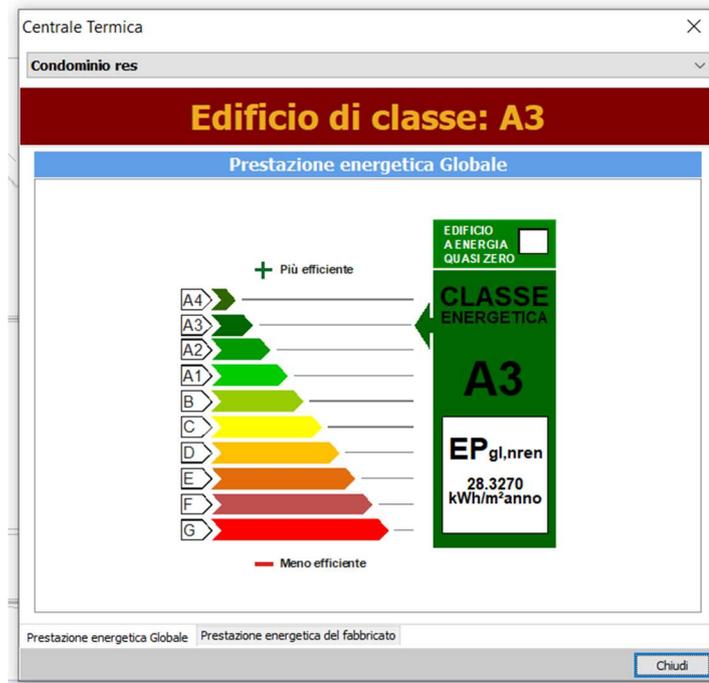


Figura 86 – Classe energetica dell'edificio

I valori forniti riguardano:

- L'indice di prestazione energetica globale non rinnovabile, $E_{Pg,Inr}$
- L'indice di prestazione termica utile per il riscaldamento, $E_{Ph,nd}$
- L'indice di prestazione termica utile per il raffrescamento, $E_{Pc,nd}$
- Il rendimento globale medio per il riscaldamento, η_{Gh}
- Il rendimento globale medio per il raffrescamento, η_{Gc}
- Il rendimento globale medio dell'impianto di ACS, η_{Gw} .

L'indice di prestazione energetica globale è dato dalla somma di due contributi, l'indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale e l'indice di prestazione energetica per l'acqua calda sanitaria:

$$E_{Pgl} = E_{P,i} + E_{P,acs}$$

Tale valore, insieme all'indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale, permette di attribuire all'edificio la classe energetica di appartenenza.

Un altro parametro importante è l'indice di prestazione termica utile per il riscaldamento, $E_{Ph,nd}$ che esprime il consumo totale di energia primaria per il riscaldamento invernale (in regime continuo) riferito all'unità di superficie utile degli immobili residenziali.

Il fabbisogno energetico per il riscaldamento di un edificio tipo di classe A3 è riportato in Figura 87 e vale:

$$E_{Ph,nd} = 34,25 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{anno}}$$

Edificio riferimento (requisiti minimi)			
Classe	Classe Energetica Globale dell' EOdC		A3
EPgInr	Indice di Prestazione Energetica GLOBALE non rinnovabile	kWh/m ² anno	39.1142
EPh,nd	Indice di prestazione termica utile per riscaldamento	kWh/m ² anno	34.2560
EPc,nd	Indice di prestazione termica utile per raffrescamento	kWh/m ² anno	4.2375
EtaGh	Rendimento Globale Medio per Riscaldamento LIMITE		0.7786
EtaGc	Rendimento Globale Medio dell'impianto di Raffrescamento		0.0000
EtaGw	Rendimento Globale Medio dell'impianto di ACS		0.6220

Figura 87 – Valori per i requisiti minimi di un edificio in classe A3

Inoltre, nel report finale di TerMus risulta fondamentale il valore riguardante il Fabbisogno di Energia Termica dell'edificio per il riscaldamento $Q_{h,ri}$ pari a 92 133,89 kWh.

5.2 L'INTEGRAZIONE CON ALTRE FONTI RINNOVABILI

Dai risultati ottenuti con l'approccio TABULA e TerMus si evince come la modellazione accurata di un edificio tipo abbia fornito valori più precisi che tengono conto dei materiali, delle stratigrafie ipotizzate, dei ponti termici e della tipologia di impianto di climatizzazione adottato.

Inoltre, la prima metodologia non fornisce un'indicazione per la prestazione termica dell'edificio durante il periodo estivo. Per tale motivo è stato opportuno considerare la seconda tipologia di modellazione.

In Tabella 7 si riportano i risultati riguardanti l'indice di prestazione termica utile per il riscaldamento $E_{h,np}$ e per il raffrescamento $E_{c,np}$.

RISULTATI	$E_{h,np} \left[\frac{kWh}{m^2 \text{anno}} \right]$	$E_{c,np} \left[\frac{kWh}{m^2 \text{anno}} \right]$
TABULA	43,1	-
TerMus	34,256	4,2375

Tabella 7 – Confronto tra i valori ottenuti con TABULA e con TerMus

Nel caso invernale è stato ipotizzato un periodo di funzionamento della pompa di calore pari alla durata della stagione di riscaldamento che è direttamente correlata alla zona climatica, ovvero ai gradi giorno della località. Il DPR 16 aprile 2013, n°74 stabilisce il periodo di attivazione dell'impianto di riscaldamento e il numero massimo di ore giornaliere per ogni zona climatica.

Ipotizzando che l'edificio sia sito in Torino, la zona climatica di riferimento è la "E" e la stagione di climatizzazione invernale ha inizio il 15 ottobre e termina il 15 aprile, per una durata complessiva di 183 giorni. Tenendo conto del limite massimo di 14 ore al giorno di funzionamento, il prodotto tra la potenza estratta e il tempo porta ad ottenere un'energia globale di 17 818,71 kWh.

$$Q_{estratta} = 6,95 \text{ kW}$$

$$E = 6,95 \text{ kW} \cdot 183 \text{ giorni} \cdot 14 \text{ ore} = 17 818,71 \text{ kWh}$$

Se si confronta tale valore con il Fabbisogno di Energia Termica dell'edificio di riferimento in classe A3 pari a 92 133,89 kWh si nota come l'impianto geotermico riesca a soddisfare meno del 20% del fabbisogno energetico per il riscaldamento.

$$\frac{17\,818,71 \text{ kWh}}{92\,133,89 \text{ kWh}} \cdot 100\% = 19,34 \%$$

Nonostante il fabbisogno termico dell'edificio sia stato fornito dal report di TerMus in termini di kWh, non è stato possibile risalire al periodo di funzionamento dell'impianto ipotizzato dal programma. Per questo motivo è stato opportuno eseguire un confronto anche tra le potenze in gioco non tenendo conto del fattore tempo.

In primis, è stato preso come riferimento il carico termico di progetto che tiene conto delle perdite massime di trasmissione, di ventilazione e del fattore di ripresa associato all'edificio.

$$Q_P = 80,87 \text{ kW}$$

Tale valore, che esprime la potenza termica che deve essere fornita per mantenere l'ambiente in condizione prefissate di temperatura e umidità, è da porre in relazione con la potenza estratta dalle serpentine e pari a 6,95 kW.

Dai risultati si nota che, la potenza estraibile nel caso invernale è inferiore a un decimo della potenza richiesta per colmare le perdite massime di carico. Quindi, l'impianto geotermico nelle condizioni più estreme riesce a soddisfare l'8,60 % del fabbisogno energetico per il riscaldamento.

$$\frac{6,95 \text{ kW}}{80,87 \text{ kWh}} \cdot 100\% = 8,60 \%$$

Queste considerazioni portano a considerare l'inserimento di altre fonti rinnovabili per raggiungere il quantitativo minimo del 50% (Decreto Legislativo del 3 marzo 2011, n. 28).

La quota del 50% di rinnovabili può essere rappresentata circa dal 20% di energia geotermica e dal restante 30% di energia proveniente dai pannelli solari fotovoltaici, da centrali idroelettriche o da fonti eoliche.

Per esempio, si può pensare di adottare il 20% di energia proveniente dall'impianto geotermico e il 30% di energia ricavata dai pannelli fotovoltaici (Figura 88) o suddividere il 30% in due contributi, uno eolico e uno solare fotovoltaico (Figura 89).

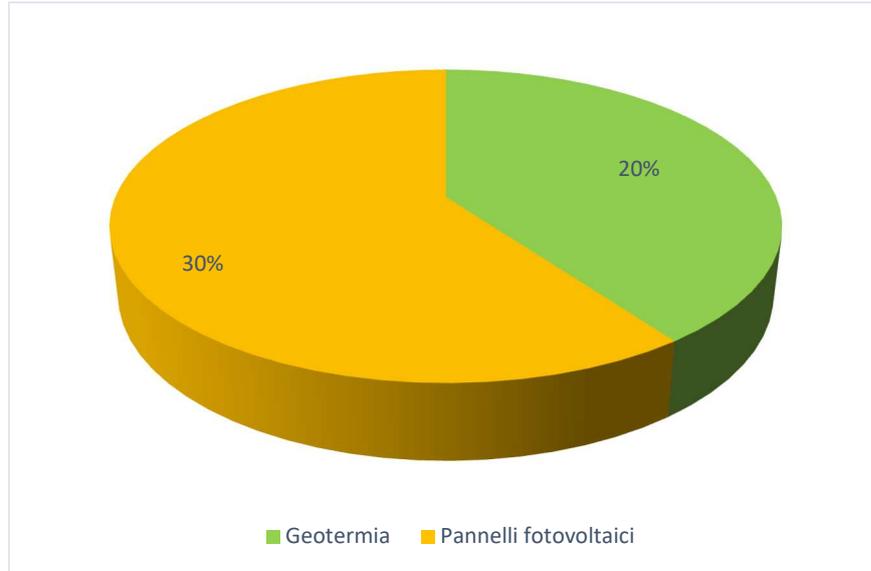


Figura 88 – Ipotesi 1 di suddivisione del fabbisogno minimo di energia da fonti rinnovabili

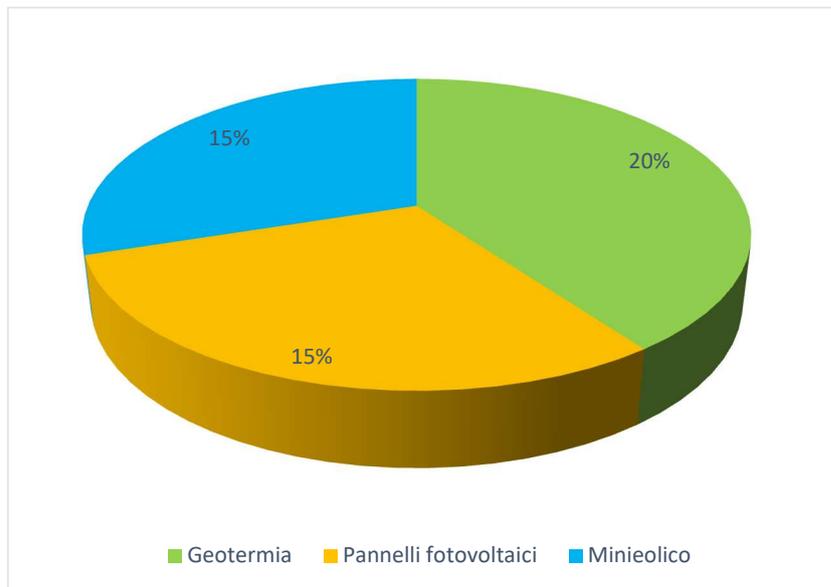


Figura 89 – Ipotesi 2 di suddivisione del fabbisogno minimo di energia da fonti rinnovabili

Dopo aver verificato la fattibilità dell'installazione in base a vincoli e le limitazioni imposte da normative locali, la scelta della tipologia di un sistema energetico a fonti rinnovabili è strettamente legata ad un'analisi dei costi e dei benefici e alla presenza di spazi disponibili.

Per esempio, per l'installazione di pannelli solari fotovoltaici occorre verificare la presenza di un'area sufficientemente grande.

In genere, la dimensione dei pannelli varia in base al tipo materiale (silicio policristallino, silicio monocristallino e silicio monocristallino ad alto rendimento). Secondo dati di mercato, un pannello di silicio monocristallino di spessore pari a 34 mm, ha altezza di 1661 mm e larghezza di 996 mm e copre una potenza di picco di 300 W (www.tgreen.it).

Come già specificato al §5.1.2, per l'edificio ipotizzato il 50% di energia da fonti rinnovabili corrisponde ad una potenza di picco di 9,2 kW: se si considera che tale percentuale sia raggiunta con l'inserimento dei soli pannelli, l'area massima coinvolta è circa di 50 m² su 460 m² di copertura disponibili.

6. CONCLUSIONI

A partire da uno studio approfondito dei meccanismi di scambio termico nel terreno e delle diverse tipologie impiantistiche, la presente tesi ha voluto dimostrare l'efficienza degli impianti geotermici superficiali.

Dopo aver riportato la situazione politica ed energetica europea degli ultimi anni sottolineando l'importanza dell'utilizzo di energia da fonti rinnovabili, ci si è concentrati sui diversi sistemi geotermici, descrivendo le caratteristiche delle sonde verticali, dei collettori orizzontali e delle geostrutture energetiche.

È risultata fondamentale la ricerca delle principali normative italiane vigenti per la tutela ambientale, per il calcolo della prestazione energetica dell'edificio, per i quantitativi minimi di energia da fonti rinnovabili e per le agevolazioni fiscali connesse al loro utilizzo.

Il Capitolo 4 riporta la descrizione del campo sperimentale del muro di sostegno energetico, descrivendo le fasi di scavo e di posa dei tre moduli di serpentine e l'installazione del sistema di sensoristica. Quest'ultimo è costituito dai sensori di temperatura, dalle barrette estensimetriche, dalle celle di pressione, dagli igrometri sentek drill & drop probe e dal misuratore di potenziale idrico.

Terminata l'installazione dell'impianto geotermico, si è proceduto alla sua attivazione eseguendo due prove sperimentali di raffrescamento estivo e una prova di riscaldamento. La prima prova di raffrescamento ha visto l'utilizzo dei circuiti 2 e 3 in serie, mentre per la seconda prova di raffrescamento è stato utilizzato solo il circuito 3, caratterizzato da una disposizione verticale delle serpentine. Infine, l'unica prova di riscaldamento eseguita ha coinvolto i circuiti 1, 2 e 3 in serie.

Il caso studio considerato ha voluto analizzare il potenziale estraibile dall'impianto geotermico tramite il controllo delle temperature durante le due prove di raffrescamento e la prova di riscaldamento.

In Tabella 8 si riportano i valori di potenza confrontati.

<i>PROVA</i>	\dot{Q}''_{totale} [kW]
<i>Raffrescamento_1</i>	14,99
<i>Raffrescamento_2</i>	14,07
<i>Riscaldamento</i>	6,95

Tabella 8 – Potenziale estraibile nelle prove di raffrescamento e di riscaldamento

Dai dati si evince come la potenza estratta durante le due prove di raffrescamento sia il doppio del potenziale ricavato durante l'unica prova di riscaldamento.

Inoltre, a partire dal campo sperimentale del muro di sostegno situato presso l'Energy Center, è stata valutata la possibilità di climatizzare un edificio residenziale di otto piani sito in Torino mediante un impianto geotermico dello stesso tipo.

Per la modellazione termica dell'edificio ci si è avvalsi del software TerMus, in versione trial grazie al quale è stato possibile ipotizzare le tecnologie costruttive, inserire i materiali più adatti e associare i valori di trasmittanza nel rispetto dei limiti imposti dalla legge per le chiusure verticali opache e trasparenti.

I risultati del calcolo della prestazione energetica hanno fornito valori riguardanti il fabbisogno e il carico termico relativi solamente al periodo invernale.

Per il caso estivo, la prova di raffrescamento che ha fornito il risultato migliore in termini di potenza estratta è la prova che coinvolge il circuito 2 e il circuito 3 in serie ottenendo un valore pari a 14,99 kW. Tuttavia, non è stato possibile confrontare i valori di potenza ricavati dal calcolo per il regime estivo in quanto la versione trial di TerMus non possiede tale estensione.

In futuro, tramite analisi più dettagliate sarebbe interessante provvedere anche all'esecuzione del calcolo del carico termico durante il regime estivo per ottenere valori confrontabili con il potenziale geotermico ottenuto sperimentalmente.

Per il caso invernale, dal confronto tra il fabbisogno termico dell'edificio con la potenza estratta nel periodo di funzionamento dell'impianto si evince come l'impianto geotermico riesca a soddisfare circa il 20% del fabbisogno energetico per il riscaldamento. Invece, dal confronto tra le potenze Q_p è emersa la capacità di alimentare un edificio di tali dimensioni in una percentuale inferiore 10% per la situazione più critica del periodo invernale.

Quindi, questo studio evidenzia come l'inserimento di un sistema geotermico a serpentine a contatto con il terreno non permetta di colmare completamente il carico termico dell'edificio durante la stagione invernale. Tuttavia, questa potenza può rappresentare un contributo fondamentale per il raggiungimento della quota minima di energia proveniente da fonti rinnovabili pari al 50%.

Per cui, oltre all'inserimento di pannelli solari fotovoltaici che necessitano di ampi spazi, si può pensare di ottenere tale percentuale avvalendosi di altre fonti energetiche rinnovabili, come le centrali idroelettriche e le pale eoliche.

La scelta della tipologia di sistema si basa su un'analisi costi-benefici: per esempio per quantificare il costo complessivo di un impianto geotermico occorre stimare i costi di installazione e di esercizio (Tinti F., 2008). I costi di installazione saranno inferiori rispetto a quelli di un impianto che necessita di perforazioni profonde e saranno relativi ai mezzi utilizzati per lo scavo. Altri costi sono quelli relativi all'installazione delle sonde (in funzione della resistenza e del diametro) e alla pompa di calore geotermica, il cui prezzo varia a seconda della potenza richiesta.

Tutte le tecnologie a fonti rinnovabili sono indispensabili per ridurre i consumi energetici e limitare le emissioni di grandi quantitativi di gas serra. Per esempio, l'installazione di una pompa di calore geotermica rispetto ad un tradizionale impianto a combustione porta ad una minore produzione di anidride carbonica e alla mancata emissione dei fumi (PM10) portando ad un miglioramento della qualità dell'aria soprattutto in contesti urbani.

Per questo motivo, in Italia e nel mondo, i governi e le amministrazioni locali si impegnano a promuovere il risparmio energetico anche con incentivi fiscali. Tuttavia, in Italia nell'ultimo anno l'andamento degli inverni più miti e la presenza di un quadro normativo carente hanno influenzato la produzione termica da fonti rinnovabili creando una situazione di stallo soprattutto per il solare termico e la geotermia. Nelle prospettive future risulta importante l'adozione di tali tecnologie soprattutto in zone urbane densamente popolate dove le aree disponibili sono limitate e la scelta di un impianto geotermico risulta essere sempre più vantaggiosa, soprattutto se associata ad altri sistemi a fonti rinnovabili, come il solare fotovoltaico, l'idroelettrico e il minieolico.

7. ALLEGATI

7.1 TABELLA DELLE POTENZE ESTRAIBILI PER L'INTERO CICLO

<i>Date</i>	<i>Time</i>	<i>BT10 [°C]</i>	<i>BT11 [°C]</i>	<i>BT10-BT11 [°C]</i>	<i>Q_{ESTRAIBILE} [kW]</i>
2019-10-29	14:52:21	15,3	15	0,3	0,16
2019-10-29	14:52:51	15,3	15	0,3	0,16
2019-10-29	14:53:21	15,4	15,1	0,3	0,16
2019-10-29	14:53:51	15,5	15,3	0,2	0,11
2019-10-29	14:54:21	15,5	15,3	0,2	0,11
2019-10-29	14:54:51	15,6	15,4	0,2	0,11
2019-10-29	14:55:21	15,7	15,4	0,3	0,16
2019-10-29	14:55:51	15,7	15,4	0,3	0,16
2019-10-29	14:56:21	15,7	15,5	0,2	0,11
2019-10-29	14:56:51	15,7	15,5	0,2	0,11
2019-10-29	14:57:21	15,7	15,5	0,2	0,11
2019-10-29	14:57:51	15,8	15,6	0,2	0,11
2019-10-29	14:58:21	15,8	15,6	0,2	0,11
2019-10-29	14:58:51	15,8	15,6	0,2	0,11
2019-10-29	14:59:21	15,8	15,6	0,2	0,11
2019-10-29	14:59:51	15,8	15,6	0,2	0,11
2019-10-29	15:00:21	15,8	15,6	0,2	0,11
2019-10-29	15:00:51	15,8	15,6	0,2	0,11
2019-10-29	15:01:21	15,8	15,6	0,2	0,11
2019-10-29	15:01:51	15,8	15,6	0,2	0,11
2019-10-29	15:02:21	15,8	15,6	0,2	0,11
2019-10-29	15:02:51	15,8	15,6	0,2	0,11
2019-10-29	15:03:21	15,8	15,6	0,2	0,11
2019-10-29	15:03:51	15,8	15,6	0,2	0,11
2019-10-29	15:04:21	15,8	15,6	0,2	0,11
2019-10-29	15:04:51	15,8	15,6	0,2	0,11
2019-10-29	15:05:21	15,9	15,6	0,3	0,16
2019-10-29	15:05:51	15,9	15,7	0,2	0,11
2019-10-29	15:06:21	15,9	15,7	0,2	0,11
2019-10-29	15:06:51	15,9	15,7	0,2	0,11
2019-10-29	15:07:21	16	15,7	0,3	0,16
2019-10-29	15:07:51	16	15,7	0,3	0,16
2019-10-29	15:08:21	16	15,7	0,3	0,16
2019-10-29	15:08:51	16	15,8	0,2	0,11

2019-10-29	15:09:21	16,1	15,8	0,3	0,16
2019-10-29	15:09:51	16,1	15,8	0,3	0,16
2019-10-29	15:10:21	16,1	15,9	0,2	0,11
2019-10-29	15:10:51	16,2	15,9	0,3	0,16
2019-10-29	15:11:21	16,2	15,9	0,3	0,16
2019-10-29	15:11:51	16,2	15,9	0,3	0,16
2019-10-29	15:12:21	16,2	16,1	0,1	0,05
2019-10-29	15:12:51	16,2	16,1	0,1	0,05
2019-10-29	15:13:21	16,3	16,1	0,2	0,11
2019-10-29	15:13:51	16,3	16,1	0,2	0,11
2019-10-29	15:14:21	16,3	16,1	0,2	0,11
2019-10-29	15:14:50	16,3	16,2	0,1	0,05
2019-10-29	15:15:20	16,3	16,1	0,2	0,11
2019-10-29	15:15:50	16,3	16,2	0,1	0,05
2019-10-29	15:16:20	16,3	16,2	0,1	0,05
2019-10-29	15:16:50	16,4	16,2	0,2	0,11
2019-10-29	15:17:20	16,4	16,2	0,2	0,11
2019-10-29	15:17:50	16,5	16,2	0,3	0,16
2019-10-29	15:18:20	16,5	16,2	0,3	0,16
2019-10-29	15:18:50	16,5	16,2	0,3	0,16
2019-10-29	15:19:20	16,5	16,3	0,2	0,11
2019-10-29	15:19:50	16,5	16,3	0,2	0,11
2019-10-29	15:20:20	16,5	16,3	0,2	0,11
2019-10-29	15:20:50	16,5	16,3	0,2	0,11
2019-10-29	15:21:20	16,5	16,3	0,2	0,11
2019-10-29	15:21:50	16,5	16,3	0,2	0,11
2019-10-29	15:22:20	16,5	16,3	0,2	0,11
2019-10-29	15:22:50	16,6	16,3	0,3	0,16
2019-10-29	15:23:20	16,6	16,4	0,2	0,11
2019-10-29	15:23:50	16,6	16,4	0,2	0,11
2019-10-29	15:24:20	16,6	16,4	0,2	0,11
2019-10-29	15:24:50	16,6	16,4	0,2	0,11
2019-10-29	15:25:20	16,6	16,4	0,2	0,11
2019-10-29	15:25:50	16,6	16,4	0,2	0,11
2019-10-29	15:26:20	16,7	16,4	0,3	0,16
2019-10-29	15:26:50	16,7	16,4	0,3	0,16
2019-10-29	15:27:20	16,7	16,4	0,3	0,16
2019-10-29	15:27:50	16,7	16,5	0,2	0,11
2019-10-29	15:28:20	16,7	16,5	0,2	0,11
2019-10-29	15:28:50	16,7	16,5	0,2	0,11
2019-10-29	15:29:20	16,7	16,5	0,2	0,11
2019-10-29	15:29:50	16,7	16,5	0,2	0,11
2019-10-29	15:30:20	16,8	16,5	0,3	0,16
2019-10-29	15:30:50	16,8	16,5	0,3	0,16
2019-10-29	15:31:20	16,8	16,5	0,3	0,16
2019-10-29	15:31:50	16,8	16,5	0,3	0,16

2019-10-29	15:32:20	16,8	16,5	0,3	0,16
2019-10-29	15:32:50	16,8	16,6	0,2	0,11
2019-10-29	15:33:20	16,8	16,6	0,2	0,11
2019-10-29	15:33:50	16,8	16,6	0,2	0,11
2019-10-29	15:34:20	16,8	16,6	0,2	0,11
2019-10-29	15:34:51	16,9	16,6	0,3	0,16
2019-10-29	15:35:20	16,9	16,6	0,3	0,16
2019-10-29	15:35:50	16,9	16,6	0,3	0,16
2019-10-29	15:36:20	16,9	16,6	0,3	0,16
2019-10-29	15:36:50	16,9	16,6	0,3	0,16
2019-10-29	15:37:20	16,9	16,6	0,3	0,16
2019-10-29	15:37:50	16,9	16,7	0,2	0,11
2019-10-29	15:38:20	16,9	16,6	0,3	0,16
2019-10-29	15:38:50	16,9	16,7	0,2	0,11
2019-10-29	15:39:20	16,9	16,7	0,2	0,11
2019-10-29	15:39:50	16,9	16,7	0,2	0,11
2019-10-29	15:40:20	16,9	16,7	0,2	0,11
2019-10-29	15:40:50	16,9	16,7	0,2	0,11
2019-10-29	15:41:20	16,9	16,7	0,2	0,11
2019-10-29	15:41:50	16,9	16,7	0,2	0,11
2019-10-29	15:42:20	17	16,7	0,3	0,16
2019-10-29	15:42:50	17	16,7	0,3	0,16
2019-10-29	15:43:20	17	16,7	0,3	0,16
2019-10-29	15:43:50	17	16,7	0,3	0,16
2019-10-29	15:44:20	17	16,8	0,2	0,11
2019-10-29	15:44:50	17	16,8	0,2	0,11
2019-10-29	15:45:21	17	16,9	0,1	0,05
2019-10-29	15:45:50	17	16,9	0,1	0,05
2019-10-29	15:46:20	17	16,9	0,1	0,05
2019-10-29	15:46:50	17	16,9	0,1	0,05
2019-10-29	15:47:20	17	16,9	0,1	0,05
2019-10-29	15:47:50	17,1	16,9	0,2	0,11
2019-10-29	15:48:20	17,1	16,9	0,2	0,11
2019-10-29	15:48:50	17,1	16,9	0,2	0,11
2019-10-29	15:49:21	17,1	16,9	0,2	0,11
2019-10-29	15:49:50	17,1	16,9	0,2	0,11
2019-10-29	15:50:21	17,1	16,9	0,2	0,11
2019-10-29	15:50:50	17,1	16,9	0,2	0,11
2019-10-29	15:51:20	17,1	16,9	0,2	0,11
2019-10-29	15:51:50	17,1	17	0,1	0,05
2019-10-29	15:52:20	17,1	17	0,1	0,05
2019-10-29	15:52:50	17,1	17	0,1	0,05
2019-10-29	15:53:20	17,1	17	0,1	0,05
2019-10-29	15:53:50	17,2	17	0,2	0,11
2019-10-29	15:54:20	17,2	17	0,2	0,11
2019-10-29	15:54:50	17,2	17	0,2	0,11

2019-10-29	15:55:20	17,2	17	0,2	0,11
2019-10-29	15:55:50	17,1	17	0,1	0,05
2019-10-29	15:56:20	17,2	17	0,2	0,11
2019-10-29	15:56:50	17,2	17	0,2	0,11
2019-10-29	15:57:20	17,3	17	0,3	0,16
2019-10-29	15:57:50	17,3	17	0,3	0,16
2019-10-29	15:58:20	17,3	17	0,3	0,16
2019-10-29	15:58:50	17,3	17	0,3	0,16
2019-10-29	15:59:20	17,3	17	0,3	0,16
2019-10-29	15:59:50	17,3	17	0,3	0,16
2019-10-29	16:00:20	17,3	17	0,3	0,16
2019-10-29	16:00:50	17,3	17	0,3	0,16
2019-10-29	16:01:20	17,3	17,1	0,2	0,11
2019-10-29	16:01:50	17,3	17,1	0,2	0,11
2019-10-29	16:02:20	17,3	17,1	0,2	0,11
2019-10-29	16:02:50	17,3	17,1	0,2	0,11
2019-10-29	16:03:20	17,3	17,1	0,2	0,11
2019-10-29	16:03:50	17,3	17,1	0,2	0,11
2019-10-29	16:04:20	17,3	17,1	0,2	0,11
2019-10-29	16:04:50	17,4	17,1	0,3	0,16
2019-10-29	16:05:20	17,4	17,1	0,3	0,16
2019-10-29	16:05:50	17,4	17,1	0,3	0,16
2019-10-29	16:06:20	17,4	17,1	0,3	0,16
2019-10-29	16:06:50	17,4	17,1	0,3	0,16
2019-10-29	16:07:20	17,4	17,1	0,3	0,16
2019-10-29	16:07:50	17,4	17,1	0,3	0,16
2019-10-29	16:08:20	17,4	17,1	0,3	0,16
2019-10-29	16:08:50	17,4	17,1	0,3	0,16
2019-10-29	16:09:20	17,4	17,1	0,3	0,16
2019-10-29	16:09:50	17,4	17,1	0,3	0,16
2019-10-29	16:10:20	17,4	17,1	0,3	0,16
2019-10-29	16:10:50	17,4	17,1	0,3	0,16
2019-10-29	16:11:20	17,4	17,1	0,3	0,16
2019-10-29	16:11:50	17,4	17,2	0,2	0,11
2019-10-29	16:12:20	17,4	17,1	0,3	0,16
2019-10-29	16:12:50	17,4	17,2	0,2	0,11
2019-10-29	16:13:20	17,4	17,1	0,3	0,16
2019-10-29	16:13:50	17,4	17,2	0,2	0,11
2019-10-29	16:14:20	17,4	17,1	0,3	0,16
2019-10-29	16:14:50	17,4	17,2	0,2	0,11
2019-10-29	16:15:20	17,4	17,2	0,2	0,11
2019-10-29	16:15:50	17,4	17,1	0,3	0,16
2019-10-29	16:16:21	17,4	17,2	0,2	0,11
2019-10-29	16:16:50	17,4	17,2	0,2	0,11
2019-10-29	16:17:20	17,4	17,2	0,2	0,11
2019-10-29	16:17:50	17,4	17,2	0,2	0,11

2019-10-29	16:18:20	17,4	17,2	0,2	0,11
2019-10-29	16:18:50	17,5	17,2	0,3	0,16
2019-10-29	16:19:20	17,5	17,2	0,3	0,16
2019-10-29	16:19:50	17,5	17,2	0,3	0,16
2019-10-29	16:20:20	17,5	17,2	0,3	0,16
2019-10-29	16:20:49	17,5	17,2	0,3	0,16
2019-10-29	16:21:19	17,5	17,2	0,3	0,16
2019-10-29	16:21:49	17,5	17,2	0,3	0,16
2019-10-29	16:22:19	17,5	17,2	0,3	0,16
2019-10-29	16:22:49	17,5	17,2	0,3	0,16
2019-10-29	16:23:19	17,5	17,3	0,2	0,11
2019-10-29	16:23:49	17,5	17,2	0,3	0,16
2019-10-29	16:24:19	17,5	17,3	0,2	0,11
2019-10-29	16:24:49	17,5	17,2	0,3	0,16
2019-10-29	16:25:19	17,5	17,2	0,3	0,16
2019-10-29	16:25:49	17,5	17,2	0,3	0,16
2019-10-29	16:26:19	17,5	17,2	0,3	0,16
2019-10-29	16:26:49	17,5	17,2	0,3	0,16
2019-10-29	16:27:19	17,5	17,3	0,2	0,11
2019-10-29	16:27:49	17,5	17,2	0,3	0,16
2019-10-29	16:28:19	17,5	17,2	0,3	0,16
2019-10-29	16:28:49	17,5	17,3	0,2	0,11
2019-10-29	16:29:19	17,5	17,3	0,2	0,11
2019-10-29	16:29:49	17,5	17,3	0,2	0,11
2019-10-29	16:30:19	17,5	17,3	0,2	0,11
2019-10-29	16:30:49	17,5	17,2	0,3	0,16
2019-10-29	16:31:19	17,5	17,3	0,2	0,11
2019-10-29	16:31:49	17,5	17,3	0,2	0,11
2019-10-29	16:32:19	17,5	17,3	0,2	0,11
2019-10-29	16:32:49	17,5	17,3	0,2	0,11
2019-10-29	16:33:19	17,5	17,3	0,2	0,11
2019-10-29	16:33:49	17,5	17,3	0,2	0,11
2019-10-29	16:34:19	17,5	17,3	0,2	0,11
2019-10-29	16:34:49	17,5	17,3	0,2	0,11
2019-10-29	16:35:19	17,6	17,3	0,3	0,16
2019-10-29	16:35:49	17,6	17,3	0,3	0,16
2019-10-29	16:36:19	17,6	17,3	0,3	0,16
2019-10-29	16:36:49	17,6	17,3	0,3	0,16
2019-10-29	16:37:19	17,6	17,3	0,3	0,16
2019-10-29	16:37:49	17,6	17,3	0,3	0,16
2019-10-29	16:38:19	17,5	17,3	0,2	0,11
2019-10-29	16:38:49	17,6	17,3	0,3	0,16
2019-10-29	16:39:19	17,6	17,3	0,3	0,16
2019-10-29	16:39:49	17,6	17,3	0,3	0,16
2019-10-29	16:40:19	17,6	17,3	0,3	0,16
2019-10-29	16:40:49	17,6	17,3	0,3	0,16

2019-10-29	16:41:19	17,6	17,3	0,3	0,16
2019-10-29	16:41:49	17,6	17,3	0,3	0,16
2019-10-29	16:42:19	17,6	17,3	0,3	0,16
2019-10-29	16:42:49	17,6	17,3	0,3	0,16
2019-10-29	16:43:19	17,6	17,3	0,3	0,16
2019-10-29	16:43:49	17,6	17,3	0,3	0,16
2019-10-29	16:44:19	17,6	17,3	0,3	0,16
2019-10-29	16:44:49	17,6	17,3	0,3	0,16
2019-10-29	16:45:19	17,6	17,4	0,2	0,11
2019-10-29	16:45:49	17,6	17,3	0,3	0,16
2019-10-29	16:46:19	17,6	17,3	0,3	0,16
2019-10-29	16:46:49	17,6	17,3	0,3	0,16
2019-10-29	16:47:19	17,6	17,3	0,3	0,16
2019-10-29	16:47:49	17,6	17,3	0,3	0,16
2019-10-29	16:48:19	17,6	17,4	0,2	0,11
2019-10-29	16:48:49	17,6	17,3	0,3	0,16
2019-10-29	16:49:19	17,6	17,4	0,2	0,11
2019-10-29	16:49:49	17,6	17,3	0,3	0,16
2019-10-29	16:50:19	17,6	17,3	0,3	0,16
2019-10-29	16:50:49	17,6	17,3	0,3	0,16
2019-10-29	16:51:19	17,6	17,4	0,2	0,11
2019-10-29	16:51:49	17,6	17,4	0,2	0,11
2019-10-29	16:52:19	17,6	17,3	0,3	0,16
2019-10-29	16:52:49	17,6	17,4	0,2	0,11
2019-10-29	16:53:19	17,6	17,3	0,3	0,16
2019-10-29	16:53:49	17,6	17,4	0,2	0,11
2019-10-29	16:54:19	17,6	17,4	0,2	0,11
2019-10-29	16:54:49	17,6	17,4	0,2	0,11
2019-10-29	16:55:19	17,6	17,3	0,3	0,16
2019-10-29	16:55:49	17,6	17,4	0,2	0,11
2019-10-29	16:56:19	17,6	17,4	0,2	0,11
2019-10-29	16:56:49	17,6	17,4	0,2	0,11
2019-10-29	16:57:19	17,6	17,4	0,2	0,11
2019-10-29	16:57:49	17,6	17,4	0,2	0,11
2019-10-29	16:58:19	17,6	17,4	0,2	0,11
2019-10-29	16:58:49	17,6	17,4	0,2	0,11
2019-10-29	16:59:19	17,6	17,4	0,2	0,11
2019-10-29	16:59:49	17,6	17,3	0,3	0,16
2019-10-29	17:00:19	17,6	17,4	0,2	0,11
2019-10-29	17:00:49	17,6	17,4	0,2	0,11
2019-10-29	17:01:19	17,7	17,4	0,3	0,16
2019-10-29	17:01:49	17,7	17,4	0,3	0,16
2019-10-29	17:02:19	17,6	17,4	0,2	0,11
2019-10-29	17:02:49	17,7	17,4	0,3	0,16
2019-10-29	17:03:19	17,7	17,4	0,3	0,16
2019-10-29	17:03:49	17,7	17,4	0,3	0,16

2019-10-29	17:04:19	17,6	17,4	0,2	0,11
2019-10-29	17:04:49	17,7	17,4	0,3	0,16
2019-10-29	17:05:19	17,7	17,4	0,3	0,16
2019-10-29	17:05:49	17,7	17,4	0,3	0,16
2019-10-29	17:06:19	17,6	17,4	0,2	0,11
2019-10-29	17:06:49	17,7	17,4	0,3	0,16
2019-10-29	17:07:19	17,7	17,4	0,3	0,16
2019-10-29	17:07:49	17,7	17,4	0,3	0,16
2019-10-29	17:08:19	17,7	17,4	0,3	0,16
2019-10-29	17:08:49	17,6	17,4	0,2	0,11
2019-10-29	17:09:19	17,7	17,4	0,3	0,16
2019-10-29	17:09:49	17,7	17,4	0,3	0,16
2019-10-29	17:10:19	17,7	17,4	0,3	0,16
2019-10-29	17:10:49	17,7	17,4	0,3	0,16
2019-10-29	17:11:19	17,7	17,4	0,3	0,16
2019-10-29	17:11:49	17,7	17,4	0,3	0,16
2019-10-29	17:12:19	17,7	17,4	0,3	0,16
2019-10-29	17:12:49	17,7	17,4	0,3	0,16
2019-10-29	17:13:19	17,7	17,4	0,3	0,16
2019-10-29	17:13:49	17,7	17,4	0,3	0,16
2019-10-29	17:14:19	17,7	17,4	0,3	0,16
2019-10-29	17:14:49	17,7	17,4	0,3	0,16
2019-10-29	17:15:19	17,7	17,4	0,3	0,16
2019-10-29	17:15:49	17,7	17,4	0,3	0,16
2019-10-29	17:16:19	17,7	17,4	0,3	0,16
2019-10-29	17:16:49	17,7	17,4	0,3	0,16
2019-10-29	17:17:19	17,7	16,7	1	0,53
2019-10-29	17:17:49	17,7	14,4	3,3	1,76
2019-10-29	17:18:19	17,7	13,3	4,4	2,35
2019-10-29	17:18:49	17,7	12,7	5	2,67
2019-10-29	17:19:19	17,7	12,5	5,2	2,77
2019-10-29	17:19:49	17,7	12,3	5,4	2,88
2019-10-29	17:20:19	17,7	12,6	5,1	2,72
2019-10-29	17:20:49	17,7	13,6	4,1	2,19
2019-10-29	17:21:19	17,7	14,3	3,4	1,81
2019-10-29	17:21:49	17,7	14,5	3,2	1,71
2019-10-29	17:22:19	17,7	14,7	3	1,60
2019-10-29	17:22:49	17,7	14,7	3	1,60
2019-10-29	17:23:19	17,7	14,7	3	1,60
2019-10-29	17:23:49	17,7	14,6	3,1	1,65
2019-10-29	17:24:19	17,7	14,6	3,1	1,65
2019-10-29	17:24:49	17,7	14,5	3,2	1,71
2019-10-29	17:25:19	17,7	14,5	3,2	1,71
2019-10-29	17:25:49	17,7	14,5	3,2	1,71
2019-10-29	17:26:18	17,7	14,5	3,2	1,71
2019-10-29	17:26:48	17,7	14,5	3,2	1,71

2019-10-29	17:27:18	17,8	14,5	3,3	1,76
2019-10-29	17:27:48	17,7	14,5	3,2	1,71
2019-10-29	17:28:18	17,8	14,5	3,3	1,76
2019-10-29	17:28:48	17,7	14,5	3,2	1,71
2019-10-29	17:29:18	17,7	14,5	3,2	1,71
2019-10-29	17:29:48	17,7	14,5	3,2	1,71
2019-10-29	17:30:18	17,7	14,4	3,3	1,76
2019-10-29	17:30:48	17,7	14,5	3,2	1,71
2019-10-29	17:31:18	17,5	14,4	3,1	1,65
2019-10-29	17:31:48	17,4	14,4	3	1,60
2019-10-29	17:32:18	17,1	14,3	2,8	1,49
2019-10-29	17:32:48	17	14,2	2,8	1,49
2019-10-29	17:33:18	16,8	14	2,8	1,49
2019-10-29	17:33:48	16,6	13,7	2,9	1,55
2019-10-29	17:34:18	16,5	13,6	2,9	1,55
2019-10-29	17:34:48	16,3	13,5	2,8	1,49
2019-10-29	17:35:18	16,2	13,4	2,8	1,49
2019-10-29	17:35:48	16,1	13,3	2,8	1,49
2019-10-29	17:36:18	16,1	13,2	2,9	1,55
2019-10-29	17:36:48	16,1	13,1	3	1,60
2019-10-29	17:37:18	16,1	13,1	3	1,60
2019-10-29	17:37:48	16,1	13,1	3	1,60
2019-10-29	17:38:18	16,1	13,1	3	1,60
2019-10-29	17:38:48	16,1	13,1	3	1,60
2019-10-29	17:39:18	16,1	13,1	3	1,60
2019-10-29	17:39:48	16,1	13,1	3	1,60
2019-10-29	17:40:18	16,1	13,1	3	1,60
2019-10-29	17:40:48	16,1	13,1	3	1,60
2019-10-29	17:41:18	16,1	13,1	3	1,60
2019-10-29	17:41:48	16,1	13,1	3	1,60
2019-10-29	17:42:18	16,1	13	3,1	1,65
2019-10-29	17:42:48	16,1	13	3,1	1,65
2019-10-29	17:43:18	16,1	13	3,1	1,65
2019-10-29	17:43:48	16,1	13,1	3	1,60
2019-10-29	17:44:18	16	13,1	2,9	1,55
2019-10-29	17:44:48	16,1	13	3,1	1,65
2019-10-29	17:45:18	16	13	3	1,60
2019-10-29	17:45:48	16	13,1	2,9	1,55
2019-10-29	17:46:18	16	13	3	1,60
2019-10-29	17:46:48	16	13	3	1,60
2019-10-29	17:47:18	16	13	3	1,60
2019-10-29	17:47:48	15,9	13	2,9	1,55
2019-10-29	17:48:18	15,9	13	2,9	1,55
2019-10-29	17:48:48	15,9	13	2,9	1,55
2019-10-29	17:49:18	15,8	13	2,8	1,49
2019-10-29	17:49:48	15,8	12,9	2,9	1,55

2019-10-29	17:50:18	15,7	12,9	2,8	1,49
2019-10-29	17:50:48	15,7	12,8	2,9	1,55
2019-10-29	17:51:18	15,5	12,8	2,7	1,44
2019-10-29	17:51:48	15,5	12,7	2,8	1,49
2019-10-29	17:52:18	15,5	12,6	2,9	1,55
2019-10-29	17:52:48	15,4	12,6	2,8	1,49
2019-10-29	17:53:18	15,4	12,6	2,8	1,49
2019-10-29	17:53:48	15,4	12,5	2,9	1,55
2019-10-29	17:54:18	15,4	12,5	2,9	1,55
2019-10-29	17:54:48	15,3	12,5	2,8	1,49
2019-10-29	17:55:18	15,3	12,5	2,8	1,49
2019-10-29	17:55:48	15,3	12,5	2,8	1,49
2019-10-29	17:56:18	15,3	12,5	2,8	1,49
2019-10-29	17:56:48	15,3	12,5	2,8	1,49
2019-10-29	17:57:18	15,3	12,5	2,8	1,49
2019-10-29	17:57:48	15,3	12,5	2,8	1,49
2019-10-29	17:58:18	15,3	12,4	2,9	1,55
2019-10-29	17:58:48	15,2	12,4	2,8	1,49
2019-10-29	17:59:18	15,2	12,4	2,8	1,49
2019-10-29	17:59:48	15,2	12,4	2,8	1,49
2019-10-29	18:00:18	15,2	12,4	2,8	1,49
2019-10-29	18:00:48	15,2	12,4	2,8	1,49
2019-10-29	18:01:18	15,2	12,4	2,8	1,49
2019-10-29	18:01:48	15,2	12,4	2,8	1,49
2019-10-29	18:02:18	15,2	12,4	2,8	1,49
2019-10-29	18:02:48	15,2	12,4	2,8	1,49
2019-10-29	18:03:18	15,2	12,4	2,8	1,49
2019-10-29	18:03:48	15,1	12,4	2,7	1,44
2019-10-29	18:04:18	15,1	12,4	2,7	1,44
2019-10-29	18:04:48	15,1	12,4	2,7	1,44
2019-10-29	18:05:18	15,1	12,3	2,8	1,49
2019-10-29	18:05:48	15,1	12,3	2,8	1,49
2019-10-29	18:06:18	15,1	12,3	2,8	1,49
2019-10-29	18:06:48	15,1	12,3	2,8	1,49
2019-10-29	18:07:18	14,9	12,3	2,6	1,39
2019-10-29	18:07:48	14,9	12,3	2,6	1,39
2019-10-29	18:08:18	14,9	12,4	2,5	1,33
2019-10-29	18:08:48	14,9	12,3	2,6	1,39
2019-10-29	18:09:18	14,9	12,3	2,6	1,39
2019-10-29	18:09:48	14,9	12,3	2,6	1,39
2019-10-29	18:10:18	14,8	12,2	2,6	1,39
2019-10-29	18:10:48	14,8	12,1	2,7	1,44
2019-10-29	18:11:18	14,8	12,1	2,7	1,44
2019-10-29	18:11:48	14,8	12,1	2,7	1,44
2019-10-29	18:12:18	14,8	12,1	2,7	1,44
2019-10-29	18:12:48	14,8	12,2	2,6	1,39

2019-10-29	18:13:18	14,8	12,1	2,7	1,44
2019-10-29	18:13:48	14,8	12,1	2,7	1,44
2019-10-29	18:14:18	14,7	12,1	2,6	1,39
2019-10-29	18:14:48	14,7	12,1	2,6	1,39
2019-10-29	18:15:18	14,7	12,1	2,6	1,39
2019-10-29	18:15:48	14,7	12,1	2,6	1,39
2019-10-29	18:16:18	14,7	12,1	2,6	1,39
2019-10-29	18:16:48	14,7	12,1	2,6	1,39
2019-10-29	18:17:18	14,7	12,1	2,6	1,39
2019-10-29	18:17:48	14,7	12	2,7	1,44
2019-10-29	18:18:18	14,7	12,1	2,6	1,39
2019-10-29	18:18:48	14,7	12,1	2,6	1,39
2019-10-29	18:19:18	14,7	12,1	2,6	1,39
2019-10-29	18:19:48	14,7	12	2,7	1,44
2019-10-29	18:20:18	14,6	12,3	2,3	1,23
2019-10-29	18:20:48	14,7	13,5	1,2	0,64
2019-10-29	18:21:18	14,6	14,3	0,3	0,16
2019-10-29	18:21:48	14,6	14,7	-0,1	-0,05
2019-10-29	18:22:18	14,6	14,8	-0,2	-0,11
2019-10-29	18:22:48	14,6	14,8	-0,2	-0,11
2019-10-29	18:23:18	14,6	15	-0,4	-0,21
2019-10-29	18:23:48	14,6	15	-0,4	-0,21

Tabella 9 – Potenze estraibili per il circuito “lato sonde”

7.2 TABELLA DELLE POTENZE ESTRAIBILI NEL TEMPO

Date	Time	BT10 [°C]	BT11 [°C]	BT10-BT11 [°C]	Q _{ESTR.} [kW]	Q _{ESTR.} dt
2019-10-29	17:17:19	17,7	16,7	1	0,53	16,00
2019-10-29	17:17:49	17,7	14,4	3,3	1,76	52,79
2019-10-29	17:18:19	17,7	13,3	4,4	2,35	70,39
2019-10-29	17:18:49	17,7	12,7	5	2,67	79,99
2019-10-29	17:19:19	17,7	12,5	5,2	2,77	83,19
2019-10-29	17:19:49	17,7	12,3	5,4	2,88	86,39
2019-10-29	17:20:19	17,7	12,6	5,1	2,72	81,59
2019-10-29	17:20:49	17,7	13,6	4,1	2,19	65,59
2019-10-29	17:21:19	17,7	14,3	3,4	1,81	54,39
2019-10-29	17:21:49	17,7	14,5	3,2	1,71	51,19
2019-10-29	17:22:19	17,7	14,7	3	1,60	47,99
2019-10-29	17:22:49	17,7	14,7	3	1,60	47,99
2019-10-29	17:23:19	17,7	14,7	3	1,60	47,99
2019-10-29	17:23:49	17,7	14,6	3,1	1,65	49,59
2019-10-29	17:24:19	17,7	14,6	3,1	1,65	49,59
2019-10-29	17:24:49	17,7	14,5	3,2	1,71	51,19
2019-10-29	17:25:19	17,7	14,5	3,2	1,71	51,19
2019-10-29	17:25:49	17,7	14,5	3,2	1,71	51,19
2019-10-29	17:26:18	17,7	14,5	3,2	1,71	51,19
2019-10-29	17:26:48	17,7	14,5	3,2	1,71	51,19
2019-10-29	17:27:18	17,8	14,5	3,3	1,76	52,79
2019-10-29	17:27:48	17,7	14,5	3,2	1,71	51,19
2019-10-29	17:28:18	17,8	14,5	3,3	1,76	52,79
2019-10-29	17:28:48	17,7	14,5	3,2	1,71	51,19
2019-10-29	17:29:18	17,7	14,5	3,2	1,71	51,19
2019-10-29	17:29:48	17,7	14,5	3,2	1,71	51,19
2019-10-29	17:30:18	17,7	14,4	3,3	1,76	52,79
2019-10-29	17:30:48	17,7	14,5	3,2	1,71	51,19
2019-10-29	17:31:18	17,5	14,4	3,1	1,65	49,59
2019-10-29	17:31:48	17,4	14,4	3	1,60	47,99
2019-10-29	17:32:18	17,1	14,3	2,8	1,49	44,79
2019-10-29	17:32:48	17	14,2	2,8	1,49	44,79
2019-10-29	17:33:18	16,8	14	2,8	1,49	44,79
2019-10-29	17:33:48	16,6	13,7	2,9	1,55	46,39
2019-10-29	17:34:18	16,5	13,6	2,9	1,55	46,39
2019-10-29	17:34:48	16,3	13,5	2,8	1,49	44,79
2019-10-29	17:35:18	16,2	13,4	2,8	1,49	44,79
2019-10-29	17:35:48	16,1	13,3	2,8	1,49	44,79
2019-10-29	17:36:18	16,1	13,2	2,9	1,55	46,39
2019-10-29	17:36:48	16,1	13,1	3	1,60	47,99
2019-10-29	17:37:18	16,1	13,1	3	1,60	47,99
2019-10-29	17:37:48	16,1	13,1	3	1,60	47,99
2019-10-29	17:38:18	16,1	13,1	3	1,60	47,99

2019-10-29	17:38:48	16,1	13,1	3	1,60	47,99
2019-10-29	17:39:18	16,1	13,1	3	1,60	47,99
2019-10-29	17:39:48	16,1	13,1	3	1,60	47,99
2019-10-29	17:40:18	16,1	13,1	3	1,60	47,99
2019-10-29	17:40:48	16,1	13,1	3	1,60	47,99
2019-10-29	17:41:18	16,1	13,1	3	1,60	47,99
2019-10-29	17:41:48	16,1	13,1	3	1,60	47,99
2019-10-29	17:42:18	16,1	13	3,1	1,65	49,59
2019-10-29	17:42:48	16,1	13	3,1	1,65	49,59
2019-10-29	17:43:18	16,1	13	3,1	1,65	49,59
2019-10-29	17:43:48	16,1	13,1	3	1,60	47,99
2019-10-29	17:44:18	16	13,1	2,9	1,55	46,39
2019-10-29	17:44:48	16,1	13	3,1	1,65	49,59
2019-10-29	17:45:18	16	13	3	1,60	47,99
2019-10-29	17:45:48	16	13,1	2,9	1,55	46,39
2019-10-29	17:46:18	16	13	3	1,60	47,99
2019-10-29	17:46:48	16	13	3	1,60	47,99
2019-10-29	17:47:18	16	13	3	1,60	47,99
2019-10-29	17:47:48	15,9	13	2,9	1,55	46,39
2019-10-29	17:48:18	15,9	13	2,9	1,55	46,39
2019-10-29	17:48:48	15,9	13	2,9	1,55	46,39
2019-10-29	17:49:18	15,8	13	2,8	1,49	44,79
2019-10-29	17:49:48	15,8	12,9	2,9	1,55	46,39
2019-10-29	17:50:18	15,7	12,9	2,8	1,49	44,79
2019-10-29	17:50:48	15,7	12,8	2,9	1,55	46,39
2019-10-29	17:51:18	15,5	12,8	2,7	1,44	43,20
2019-10-29	17:51:48	15,5	12,7	2,8	1,49	44,79
2019-10-29	17:52:18	15,5	12,6	2,9	1,55	46,39
2019-10-29	17:52:48	15,4	12,6	2,8	1,49	44,79
2019-10-29	17:53:18	15,4	12,6	2,8	1,49	44,79
2019-10-29	17:53:48	15,4	12,5	2,9	1,55	46,39
2019-10-29	17:54:18	15,4	12,5	2,9	1,55	46,39
2019-10-29	17:54:48	15,3	12,5	2,8	1,49	44,79
2019-10-29	17:55:18	15,3	12,5	2,8	1,49	44,79
2019-10-29	17:55:48	15,3	12,5	2,8	1,49	44,79
2019-10-29	17:56:18	15,3	12,5	2,8	1,49	44,79
2019-10-29	17:56:48	15,3	12,5	2,8	1,49	44,79
2019-10-29	17:57:18	15,3	12,5	2,8	1,49	44,79
2019-10-29	17:57:48	15,3	12,5	2,8	1,49	44,79
2019-10-29	17:58:18	15,3	12,4	2,9	1,55	46,39
2019-10-29	17:58:48	15,2	12,4	2,8	1,49	44,79
2019-10-29	17:59:18	15,2	12,4	2,8	1,49	44,79
2019-10-29	17:59:48	15,2	12,4	2,8	1,49	44,79
2019-10-29	18:00:18	15,2	12,4	2,8	1,49	44,79
2019-10-29	18:00:48	15,2	12,4	2,8	1,49	44,79
2019-10-29	18:01:18	15,2	12,4	2,8	1,49	44,79

2019-10-29	18:01:48	15,2	12,4	2,8	1,49	44,79
2019-10-29	18:02:18	15,2	12,4	2,8	1,49	44,79
2019-10-29	18:02:48	15,2	12,4	2,8	1,49	44,79
2019-10-29	18:03:18	15,2	12,4	2,8	1,49	44,79
2019-10-29	18:03:48	15,1	12,4	2,7	1,44	43,20
2019-10-29	18:04:18	15,1	12,4	2,7	1,44	43,20
2019-10-29	18:04:48	15,1	12,4	2,7	1,44	43,20
2019-10-29	18:05:18	15,1	12,3	2,8	1,49	44,79
2019-10-29	18:05:48	15,1	12,3	2,8	1,49	44,79
2019-10-29	18:06:18	15,1	12,3	2,8	1,49	44,79
2019-10-29	18:06:48	15,1	12,3	2,8	1,49	44,79
2019-10-29	18:07:18	14,9	12,3	2,6	1,39	41,60
2019-10-29	18:07:48	14,9	12,3	2,6	1,39	41,60
2019-10-29	18:08:18	14,9	12,4	2,5	1,33	40,00
2019-10-29	18:08:48	14,9	12,3	2,6	1,39	41,60
2019-10-29	18:09:18	14,9	12,3	2,6	1,39	41,60
2019-10-29	18:09:48	14,9	12,3	2,6	1,39	41,60
2019-10-29	18:10:18	14,8	12,2	2,6	1,39	41,60
2019-10-29	18:10:48	14,8	12,1	2,7	1,44	43,20
2019-10-29	18:11:18	14,8	12,1	2,7	1,44	43,20
2019-10-29	18:11:48	14,8	12,1	2,7	1,44	43,20
2019-10-29	18:12:18	14,8	12,1	2,7	1,44	43,20
2019-10-29	18:12:48	14,8	12,2	2,6	1,39	41,60
2019-10-29	18:13:18	14,8	12,1	2,7	1,44	43,20
2019-10-29	18:13:48	14,8	12,1	2,7	1,44	43,20
2019-10-29	18:14:18	14,7	12,1	2,6	1,39	41,60
2019-10-29	18:14:48	14,7	12,1	2,6	1,39	41,60
2019-10-29	18:15:18	14,7	12,1	2,6	1,39	41,60
2019-10-29	18:15:48	14,7	12,1	2,6	1,39	41,60
2019-10-29	18:16:18	14,7	12,1	2,6	1,39	41,60
2019-10-29	18:16:48	14,7	12,1	2,6	1,39	41,60
2019-10-29	18:17:18	14,7	12,1	2,6	1,39	41,60
2019-10-29	18:17:48	14,7	12	2,7	1,44	43,20
2019-10-29	18:18:18	14,7	12,1	2,6	1,39	41,60
2019-10-29	18:18:48	14,7	12,1	2,6	1,39	41,60
2019-10-29	18:19:18	14,7	12,1	2,6	1,39	41,60
2019-10-29	18:19:48	14,7	12	2,7	1,44	43,20
2019-10-29	18:20:18	14,6	12,3	2,3	1,23	36,80
2019-10-29	18:20:48	14,7	13,5	1,2	0,64	19,20

Tabella 10 – Potenze estraibili per il circuito “lato sonde” per il periodo di attivazione del compressore

8. BIBLIOGRAFIA

- Agenzia delle Entrate, *Le agevolazioni fiscali per il risparmio energetico*, Marzo 2019.
- Barla M. & di Donna A., *Gallerie energetiche per l'ambiente urbano*, 2015.
- Basta S. & Minchio F., *Geotermia e pompe di calore*, Guida pratica agli impianti geotermici di climatizzazione, 2008.
- Borgarello M & al., *Aspettative di comfort termico e domanda di climatizzazione in edifici residenziali*, febbraio 2017.
- Brandl H., *Energy foundations and other thermo-active ground structures*, 81-122, 2006.
- Bruno R. & Tinti F., *Lo sfruttamento termico del sottosuolo in Ecosistema*, numero 2, pag. 28-29, 2011.
- Capozza A., *Linee Guida per la progettazione dei campi geotermici per pompe di calore*, 2012.
- Claesson J. & Eskilson P., *Conductive heat extraction to a deep borehole: thermal analyses and dimensioning rules*, Università di Lund, Svezia, 1987.
- Corrado V. & al., *Fascicolo sulla Tipologia Edilizia Italiana*, luglio 2014.
- De Angelis K., *Fabbisogni e prestazioni energetiche*, ARPA Umbria.
- Dodinelli M. & M., *Impianti a pompe di calore geotermiche*, Caleffi S.P.A., 2010.
- EGEC Geothermal market report, key findings, June 2018 edition.
- Fracastoro G.V. & al., *Piano d'azione per l'energia sostenibile della provincia di Torino e della potenzialità di risparmio energetico e delle fonti rinnovabili in ambito urbano*, 2013.
- Gravina E., *Energia sostenibile e fonti rinnovabili: quadro generale della normativa, descrizione delle tecnologie, buone pratiche attuate dalle amministrazioni locali*, ISPRA, 2012.
- Hellsrom G., *Ground Heat storage, thermal analysis of duct storage systems*, Università di Lund, Svezia, 1991.

- Irace A. & al., *Geologia e idro stratigrafia profonda della Pianura Padana Occidentale*, 2009.
- Linee Guida Nazionali 26 giugno 2009.
- Lo Russo S., *Corso di Geothermal energy*, Politecnico di Torino, 2018
- Mauri L. & Sterpi D., *Analisi termo-meccanica di diaframmi energeticamente attivi*, Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica, 2015.
- Musto F. M. & Duca G., *La politica energetica europea dopo la prospettiva 2020*, 2017.
- NIBE Manuale utente NIBE F1155 *Pompa di calore geotermica*, Sweden, 2017.
- NIBE Manuale dell'installatore NIBE F1155 *Pompa di calore geotermica*, Sweden, 2017.
- Ruberto P., Tesi di Laurea Magistrale, *Campo sperimentale di una parete energetica*, 2019
- Sentek Pty Ltd SENTEK DRILL & DROP *Probe Manual Version 1.1*, Stepney, South Australia, 2014
- SIEMENS SITRANS F Energy calculator type SITRANS FUE950 *Operating instructions*, 2011.
- Tinti F., *Geotermia per la climatizzazione*, 1 ed., Palermo, Dario Flaccovio Editore, 2008.
- Winet s.r.l Winet Coordinator Node, Cesena, Italy, 2017.
- Winet s.r.l Winet Router Node, Cesena, Italy, 2017.

9. SITOGRAFIA

geonovis.com/geotermia

www.expoclima.net

www.egec.org

ec.europa.eu/eurostat

www.istat.it

www.teknoring.com

www.rehau.com

www.efficienzaenergetica.enea.it/

eneren.it

geothermie-schweiz.ch/

www.isprambiente.gov.it

www.sciencedirect.com/topics/engineering/diaphragm-wall

www.gazzettaufficiale.it

www.regione.piemonte.it

it.climate-data.org/europa/italia/piemonte/torino-1108/#climate-graph

www.comune.torino.it/regolamenti

www.bosettiegatti.eu

www.qualenergia.it

www.tgreen.it/dimensioni-dei-pannelli-fotovoltaici