

POLITECNICO DI TORINO



**Corso di laurea di 2° livello in
INGEGNERIA ENERGETICA E NUCLEARE**

**ANALISI ENERGETICA DI UNA POMPA DI CALORE
GEOTERMICA IN AMBITO RESIDENZIALE**

Tesi di Laurea Magistrale

Anno accademico 2020/2021

Relatore

Ing. Papurello Davide

Correlatore

Ing. Baralis Matteo

Candidato

Filippo Sterrantino

Marzo 2021

A mia madre

Sommario

Indice delle figure	6
Introduzione	8
Geotermia.....	11
Impianti Open Loop	13
Impianti Closed Loop.....	14
Disposizione verticale	14
Disposizione orizzontale	15
Quadro normativo	17
Pompe di calore.....	20
Principio di funzionamento	22
Fluido refrigerante.....	23
Ciclo termodinamico.....	24
Impianto geotermico con pompa di calore.....	25
Valvola a quattro vie	26
Il campo sperimentale	27
Fasi costruttive	27
Impianto	31
Sensoristica	32
Analisi energetica.....	33
I dati	33
Ipotesi.....	33
Regolazione.....	34
Prova di Raffrescamento	38
Calcolo dei COP.....	38
Calcolo delle potenze	40
Coolpack	41
Risultati	43
Prova di Riscaldamento	45
Calcolo dei COP.....	45
Calcolo delle potenze	46
Risultati	47
Analisi Economica di massima	50
Valutazione economica dell'investimento	50

Esempio.....	52
Fondazioni energetiche	55
Conclusioni	56
Bibliografia	57
APPENDICE.....	59

Indice delle figure

Figura 1: Triangolo della sostenibilità.	8
Figura 2: Green Deal europeo	9
Figura 3: Quote di energia proveniente da fonti rinnovabili per ciascun Paese dell'Unione Europea	10
Figura 4: Distribuzione della temperatura nel sottosuolo in funzione dei diversi mesi dell'anno.....	11
Figura 5: Diverse configurazioni per gli impianti Open Loop.....	13
Figura 6: Configurazione di impianto Closed Loop a sviluppo verticale.	14
Figura 7: Configurazioni di impianto Closed Loop a sviluppo orizzontale.....	15
Figura 8 : Configurazioni di impianto Closed Loop a sviluppo orizzontale (metodi "Slinky" e "Svec").	16
Figura 9: Estratto della Tavola 7 del Piano di Tutela delle Acque, zona di Torino.....	18
Figura 10: Unità vendute per paese, primi 11 paesi europei (EHPA, 2019).....	20
Figura 11: Sviluppo annuale delle vendite, 21 paesi europei (EHPA, 2019).	21
Figura 12: Stock e vendite di GSHP in Europa nel 2018.....	21
Figura 13: Schema di funzionamento di una pompa di calore generica (Messaggero-Casa, 2018)..	22
Figura 14: Fluidi refrigeranti, parametri di impatto ambientale.	23
Figura 15: Ciclo termodinamico.	25
Figura 16: Impianto geotermico con pompa di calore.	26
Figura 17: Schema valvola a quattro vie.....	26
Figura 18: Fasi costruttive, puntoni.	27
Figura 19: Fasi costruttive, livellazione.	28
Figura 20: Sistemazione finale delle serpentine.	29
Figura 21: Configurazione serpentine.....	29
Figura 22: Progetto impianto (GeoNovis-Energia-Geotermica, 2019).....	31
Figura 23: Pompa di calore (a destra), ventilconvettore (dietro), vaso di accumulo (a sinistra).	32
Figura 24: Curva di regolazione.....	34
Figura 25: Funzionamento compressore in funzione dei gradi minuto durante la prova di raffrescamento.....	35
Figura 26: Andamento della temperatura misurata dal sensore BT11 durante la giornata del 16/06/2020.	35
Figura 27: Andamento della temperatura misurata dal sensore BT12 durante la giornata del 28/10/2019.	36
Figura 28: Funzionamento compressore in funzione dei gradi minuto durante la prova di riscaldamento.	36
Figura 29: Pompa di calore in assetto estivo.....	38
Figura 30: Interfaccia Tool "Cycle Analysis" di Coolpack - Inserimento dati ciclo.....	41
Figura 31: Interfaccia Tool "Cycle Analysis" di Coolpack - Risultati	42
Figura 32: Tabella con i valori inseriti e confrontati in Coolpack per la data del 18/06/2020.	43
Figura 33: Simulazione del ciclo con i valori tipici del 18/06/2020.....	43
Figura 34: Confronto delle potenze scambiate lato sonde.	44
Figura 35: Confronto delle potenze scambiate lato impianto.	44
Figura 36: Pompa di calore in assetto invernale	45
Figura 37: Tabella con i valori inseriti e confrontati in Coolpack per la data del 28/10/2019.	47
Figura 38: Simulazione del ciclo con i valori tipici del 28/10/2019.....	47
Figura 39: Confronto delle potenze scambiate lato sonde.	48
Figura 40: Confronto delle potenze scambiate lato impianto.	48

Figura 41: Confronto dei valori di COP.....	49
Figura 42: Flusso di cassa differenziale.....	53
Figura 43: Schema fondazioni energetiche.....	55

Introduzione

Le risorse limitate rendono la terra un sistema chiuso. Realizzare un rapporto sostenibile con l'ambiente ed assicurare alla nostra specie la sopravvivenza sul pianeta significa considerare i sistemi umani funzionanti all'interno di un più grande ecosistema. Ogni risorsa naturale (cibo, acqua, legno, petrolio, ecc.) sfruttata dagli esseri umani è limitata sia dal punto di vista dell'approvvigionamento alla fonte che da quello della restituzione all'ambiente. Le materie prime non dovrebbero essere estratte con un ritmo maggiore di quello con cui si possano rigenerare né scaricate più velocemente di quanto possano essere assorbite. Un approccio sistemico richiede di comprendere che c'è soltanto una terra, composta da un gran numero di sottosistemi ciascuno interagente gli altri. Nell'ambito dello sviluppo sostenibile queste interazioni dovrebbero essere considerate, infatti secondo questo metodo sistemico, la sostenibilità può essere descritta come un triangolo, comprendente tre dimensioni:

- **Ecologica:** definisce sviluppo sostenibile quello che garantisce la protezione di lunga durata dell'ecosfera;
- **Economica:** presuppone uno sviluppo economico stabile e costante, basato su alti livelli di occupazione, basso tasso di inflazione e un commercio estero in equilibrio;
- **Sociale:** pone l'attenzione sugli aspetti della equa distribuzione delle possibilità di sviluppo tra le generazioni presenti, senza ridurre le potenzialità a disposizione delle generazioni future.

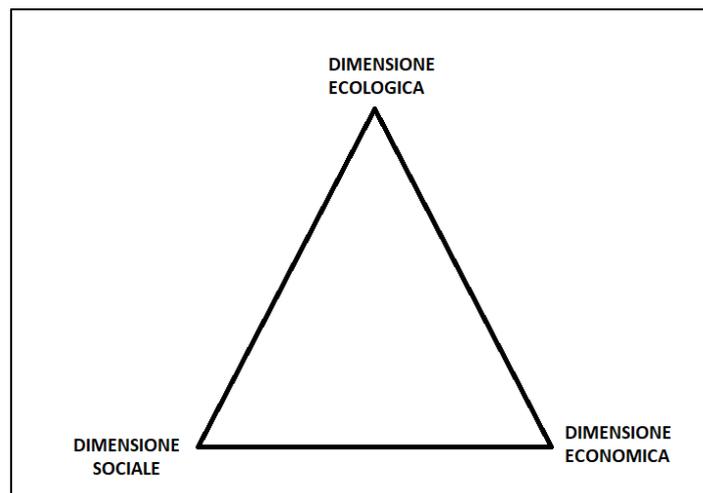


Figura 1: Triangolo della sostenibilità.

Gli ultimi anni hanno visto crescere sempre più la sensibilità verso l'ambiente e di conseguenza il problema dell'inquinamento è uno dei temi centrali della società contemporanea. La Rivoluzione Industriale ha rappresentato l'inizio dell'aumento delle emissioni di gas serra in atmosfera, che sono proseguite a ritmi esponenziali fino ai livelli che osserviamo oggi. Gli ultimi decenni del XX secolo hanno visto diffondersi un certo interesse verso il Pianeta su cui viviamo, infatti la Conferenza delle Nazioni Unite sull'Ambiente Umano tenutasi a Stoccolma nel 1972 ha gettato le basi per lo sviluppo di politiche ambientali al fine di limitare gli effetti dell'inquinamento. Nel 1987 Gro Harlem Brundtland, presidente della Commissione Mondiale su Ambiente e Sviluppo, su incarico delle Nazioni Unite, presenta un rapporto nel quale fornisce la definizione di sviluppo sostenibile: *“lo sviluppo che è in grado di soddisfare i bisogni della generazione presente, senza compromettere la possibilità che le generazioni future riescano a soddisfare i propri”*. Il rapporto si articola in tre sezioni nelle quali si prendono in esame le sfide che la popolazione mondiale dovrà affrontare: 1)

preoccupazioni comuni; 2) sfide collettive; 3) sforzi comuni. L'idea che il percorso per il raggiungimento di uno sviluppo sostenibile debba interessare tutto il mondo porta la comunità mondiale a riunirsi nel 1992 a Rio de Janeiro, in Brasile, in quello che è noto come “*Summit della Terra*”. In questa riunione viene adottata la Convenzione quadro, la quale pone l'obiettivo di riduzioni delle emissioni di gas serra in atmosfera per prevenire interferenze dannose per il sistema climatico. Il 1997 vede l'adozione del *Protocollo di Kyoto*, forse il più importante strumento attuativo, che stabilisce riduzioni o limitazioni in termini quantitativi delle emissioni di gas serra in atmosfera; viene sottoscritto da 38 Paesi industrializzati e dall'Unione Europea per entrare in vigore nel 2005. Attraverso la **Renewable Energy Directive (2009/28/EC)** l'Europa ha cercato di dare una risposta concreta alla questione ambientale. Il settore dell'energia è responsabile di oltre il 75% delle emissioni dei gas serra quindi il punto chiave per raggiungere l'obiettivo della neutralità climatica è l'incremento delle fonti rinnovabili nei differenti settori economici. Nel documento “*Comunicazione della Commissione al Parlamento Europeo, al Consiglio, al Comitato Economico e Sociale Europeo e al Comitato delle Regioni*” di Bruxelles del 11/12/2019 viene esposto la “**tabella di marcia iniziale delle politiche e misure principali necessarie per realizzare il Green Deal europeo**”. (CITAZIONE). La figura tratta dalla versione in lingua italiana del documento riporta in maniera sintetica i vari elementi del Green Deal.

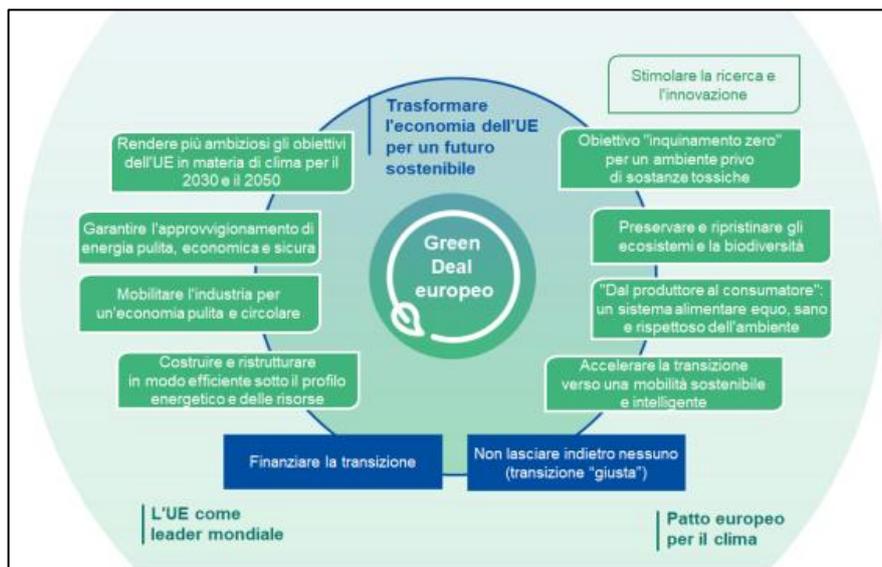


Figura 2: Green Deal europeo

L'idea principale è quella di un percorso che porterà la UE alla neutralità climatica entro il 2050 attraverso la profonda decarbonizzazione di tutti i settori dell'economia ed una maggiore riduzione di gas serra entro 2030. Particolare aspetto assume la transizione energetica “giusta” ovvero uno sviluppo inclusivo che non lasci nessuno dei Paesi dell'Unione indietro rispetto ad altri e la responsabilità di assumersi la responsabilità di finanziare economicamente la transizione.

Nel gennaio del 2020 *Eurostat* ha pubblicato un report che riporta le quote di energia proveniente da fonti rinnovabili per ciascun Paese dell'Unione, è possibile vedere come la Svezia sia il Paese capofila con un valore superiore al 50%. Tra i 28 Stati membri ben 12 (**Bulgaria, Repubblica Ceca, Danimarca, Estonia, Grecia, Croazia, Italia, Lettonia, Lituania, Cipro, Finlandia e Svezia**) hanno già raggiunto il target obbligatorio che si erano prefissati di raggiungere entro il 2020.

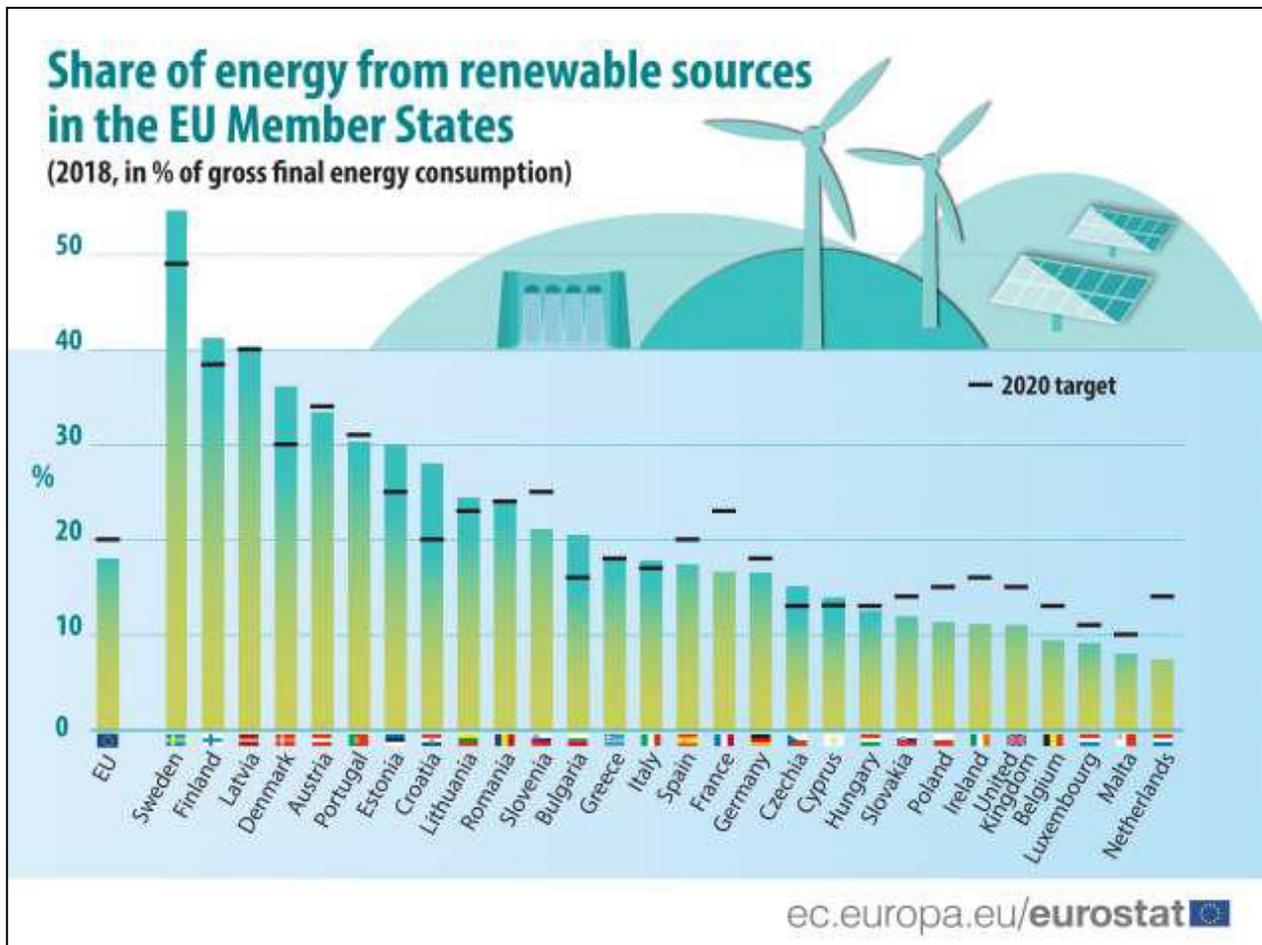


Figura 3: Quote di energia proveniente da fonti rinnovabili per ciascun Paese dell'Unione Europea

Geotermia

Il termine Geotermia deriva da due parole greche “geo” e “thermos” che significano rispettivamente “terra” e “caldo” ed indicano una delle forme di energia rinnovabile più diffusa. Il pianeta Terra emana in maniera costante energia sotto forma di calore: si tratta del cosiddetto **flusso di calore**, o **flusso geotermico** che dal centro del pianeta si propaga verso la superficie terrestre. Nonostante il Sole irradi la superficie terrestre con un flusso che è quasi 6000 volte superiore a quello prodotto dall’interno della Terra, il flusso geotermico rappresenta un’importante fonte di riscaldamento in quanto è costante e continuo. A causa delle diverse dispersioni nella crosta terrestre e delle diverse situazioni geologiche, che possono causare la risalita di materiale più caldo da zone più profonde, il *gradiente geotermico*, cioè l’aumento di temperatura all’aumentare della profondità, non è uguale in tutta la Terra: si considera un valore medio di 2-3 °C ogni 100 m di profondità. È opportuno distinguere due principali utilizzi dell’energia geotermica: sistemi ad alta entalpia e sistemi a bassa entalpia. I sistemi ad **alta entalpia** (*Deep Geothermal*) sfruttano il calore proveniente da fluidi caldi, come i sistemi idrotermali. In questi impianti le temperature sono molto elevate, da 100° a 350°C, poiché collocati a profondità che variano da decine di metri a chilometri e il calore viene convertito in energia elettrica tramite turbogeneratori.

I sistemi a **bassa entalpia** (*Entalpia Superficiale*) sfruttano il calore proveniente dallo strato superficiale del suolo, fino a 100-200m di profondità, dove le temperature generalmente non superano i 40 °C. in Italia il terreno presenta una temperatura costante di 12-14°C da 10m a 100m che aumenta con la profondità in base alle caratteristiche del sottosuolo ed alla presenza o meno di acqua. La figura sottostante mostra l’andamento della temperatura del terreno in funzione della profondità nei mesi estivi e invernali.

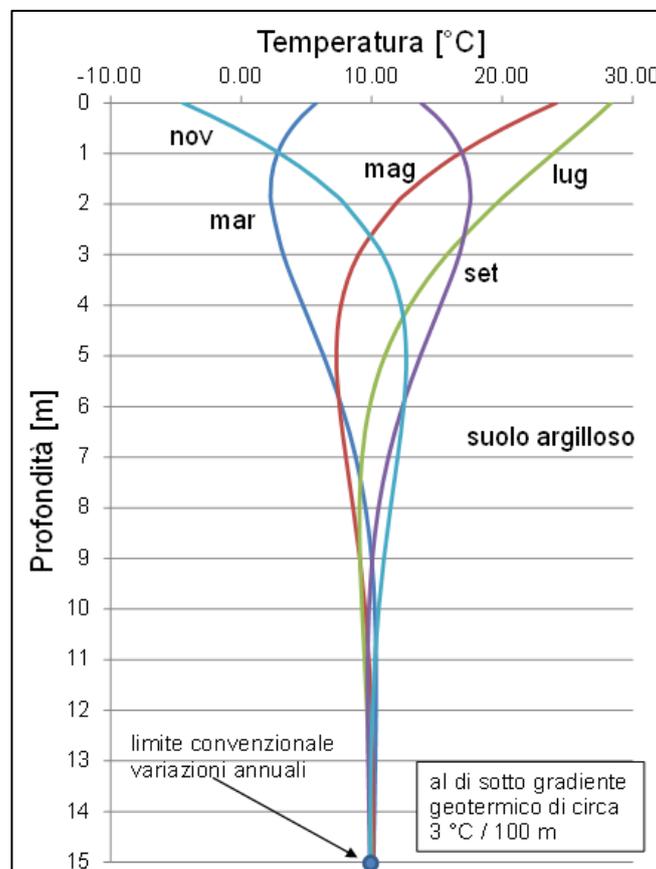


Figura 4: Distribuzione della temperatura nel sottosuolo in funzione dei diversi mesi dell'anno.

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

L'accoppiamento tra l'impianto geotermico e quello di condizionamento può essere realizzato con diverse modalità, a seconda di esse è possibile distinguere:

- Pompe di calore *ad acqua di falda*: sistema di collegamento a *circuito aperto (open loop)*.
- Pompe di calore *accoppiate al terreno*: sistema di collegamento a *circuito chiuso (closed loop)*.
- Pompe di calore *ad acqua superficiale*: possono essere di due tipi
 - a *circuito aperto* quando le acque superficiali vengono prelevate e successivamente reimmesse in laghi, fiumi e mare;
 - a *circuito chiuso* quando la rete di tubazioni è direttamente immersa nelle acque superficiali di stagni, laghi, fiumi e mare.

La preferenza di uno schema di interconnessione piuttosto che un altro è determinata dalle caratteristiche del sito quali condizioni climatiche, disponibilità e tipologia di suolo e costi di installazione.

Impianti Open Loop

La pompa di calore estrae energia dal sottosuolo estraendo l'acqua di falda e facendola circolare in uno scambiatore che può essere anche direttamente l'evaporatore stesso della macchina, quindi fisicamente avviene un'estrazione di acqua dal sottosuolo. L'utilizzo delle falde acquifere è soggetto a restrizioni e vincoli dettati da normative locali. Esistono diverse tecnologie che rientrano nella categoria degli open loop e si distinguono per il numero di pozzi, infatti si possono avere pozzi differenti per l'estrazione e la restituzione (a), si può utilizzare lo *standing column well* (c) ovvero un singolo pozzo per il prelievo e l'immissione oppure si può effettuare la restituzione in un fiume o un lago (b). 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, oltre certi limiti, 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 della 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 dovuta 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 cortocircuito 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 open loop permette di ridurre le superfici impiegate e la sua ottimizzazione dipende per lo più dal posizionamento del pozzo alla giusta profondità e dal collocamento dello scambiatore di calore. Gli impianti a circuito aperto sono spesso impiegati per edifici con elevati fabbisogni termici come centri commerciali, musei, cinema o grandi palazzine ad uso uffici.

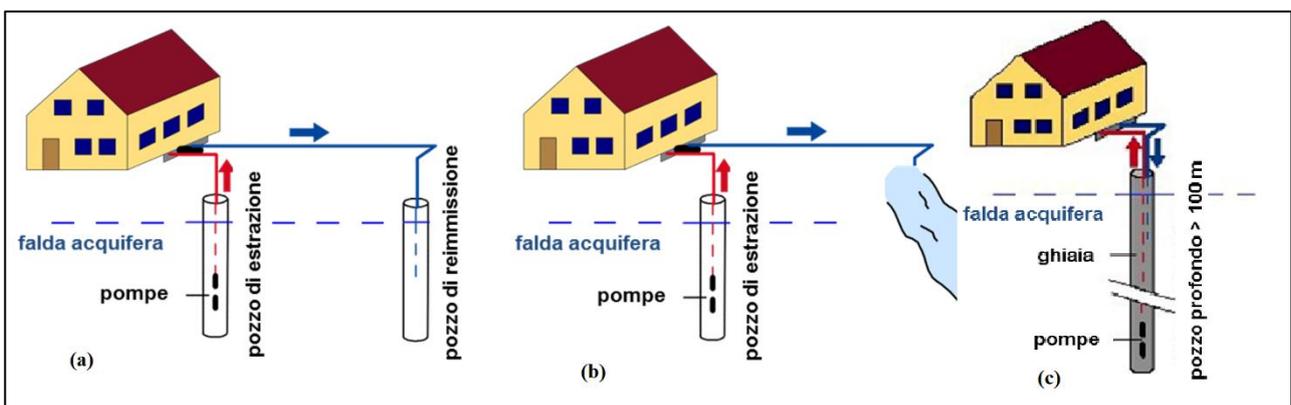


Figura 5: Diverse configurazioni per gli impianti Open Loop.

Impianti Closed Loop

La pompa di calore estrae energia dal sottosuolo tramite un circuito chiuso. Tale circuito è costituito da una rete di tubazioni direttamente sepolta nel terreno, generalmente di tubi di plastica termofusa (HDPE-polietilene ad alta densità) in cui circola acqua o più spesso una miscela di glicole propilenico, tipicamente al 20%÷30%, e acqua. La diversa disposizione delle tubazioni che realizzano lo scambio termico tra fluido e terreno permette di suddividere gli impianti closed loop in due macrocategorie:

- a sviluppo verticale;
- a sviluppo orizzontale.

Una possibile alternativa è il sistema ad espansione diretta: in questo caso le tubazioni sono in rame ed al loro interno circola direttamente il fluido refrigerante della pompa di calore. Il sistema di tubazioni, che generalmente è a sviluppo orizzontale, sostituisce di fatto l'evaporatore.

Disposizione verticale

Il sistema con tubazioni disposte verticalmente nel terreno più adatto è quello dei pozzi scambiatori (Borehole Heat Exchangers, BHE), spesso identificati con il nome di *sonde geotermiche*. In questo caso si perforano uno o più pozzi di diametro di circa 10÷15 cm nel terreno con profondità che variano dai 10 ai 350 m, anche se il 70% dei BHE realizzati ha profondità tra gli 80 e i 120 m. All'interno di questi pozzi si inseriscono dei tubi o preformati ad U (1,2 o anche 3) oppure tubi coassiali, che costituiscono lo scambiatore vero e proprio tra fluido termovettore e terreno. I tubi che fuoriescono dai pozzi sono poi collegati tra loro con tubazioni orizzontali che confluiscono nel collettore di distribuzione collegato a sua volta alla pompa di calore. Per mantenere i tubi in posizione verticale ed assicurare che avvenga lo scambio termico con il terreno nella zona compresa tra le tubazioni e le pareti del pozzo vengono interposti materiali con una conduttività termica pari o maggiore a quella del terreno come ad esempio le malte bentonitiche.

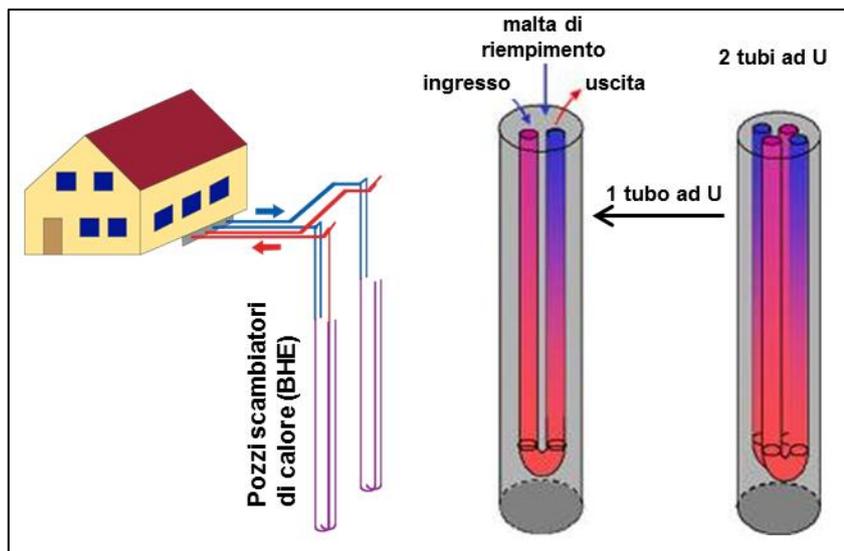


Figura 6: Configurazione di impianto Closed Loop a sviluppo verticale.

L'installazione degli scambiatori verticali è in genere più costosa rispetto ad altre soluzioni di scambio termico terreno-fluido termovettore, anche se richiede un'esigua dimensione delle tubazioni rispetto allo sviluppo orizzontale perché la temperatura del sottosuolo oltre i 15 metri è molto più stabile rispetto agli strati a contatto con la superficie. Mediamente la potenza termica estraibile

attraverso un singolo tubo ad U è un valore di circa 40 W/m di profondità del pozzo, tenendo bene a mente che questo parametro è fortemente influenzato dalle caratteristiche del terreno e dalla resistenza termica del materiale che riempie il pozzo. Un altro fattore che influenza la prestazione dello scambio termico è la distanza tra pozzi adiacenti. È infatti buona norma posizionare i pozzi oltre una distanza minima (generalmente 5-6 metri) al fine di evitare interferenze termiche tra pozzi adiacenti.

Disposizione orizzontale

La configurazione che prevede tubazioni disposte orizzontalmente nel terreno presenta una vasta gamma di tipologie.

Il sistema con tubazioni disposte in trincee è realizzato scavando ad una profondità di due metri al massimo e inserendo i tubi per lo scambio termico. Questo tipo di scavo è facilmente realizzabile in terreni non rocciosi, ciò rende il sistema economicamente il più conveniente soprattutto se si tratta di nuove costruzioni e se si possiede una quantità di terreno relativamente estesa da dedicare allo scopo. Le realizzazioni più semplici sono costituite da un solo tubo disposto ad anello in uno scavo (a), successivamente riempito con la terra precedentemente rimossa. Altre possibili disposizioni sono quella realizzata con due tubi inseriti nella stessa trincea a diverse profondità o alla stessa profondità distanziati tra loro.

Nel caso di ridotta disponibilità di superficie utilizzabile si può adottare una configurazione con più alta densità come serpentine o tubi in parallelo (b). In questo caso viene realizzato uno sbancamento poco profondo ma sufficientemente esteso da poter collocare tubazioni in serie o parallelo.

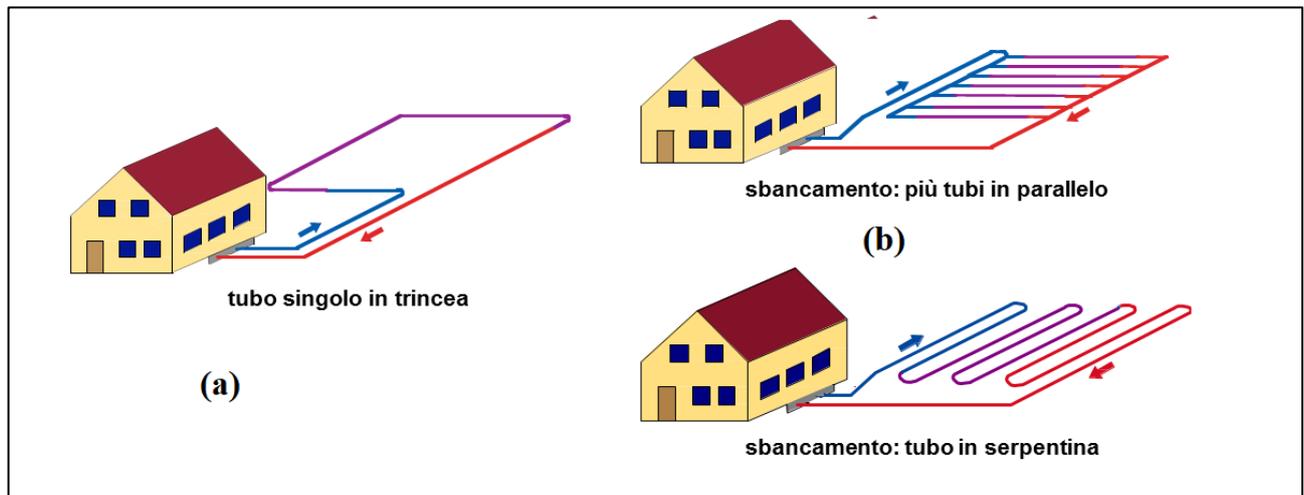


Figura 7: Configurazioni di impianto Closed Loop a sviluppo orizzontale.

Le prestazioni dei sistemi a tubi orizzontali in parallelo o a serpentina dipendono, oltre che dalle caratteristiche del terreno, anche dalla distanza tra i tubi in parallelo o tra le spire. Nel caso di tubi eccessivamente vicini, a distanza di alcuni centimetri, si verifica un effetto di schermatura con una conseguente riduzione del flusso termico asportabile, contrariamente, se troppo lontani, si osserva una diminuzione della potenza scambiabile per unità di superficie.

Una soluzione al problema dell'eccessiva superficie necessaria per l'installazione di sistemi orizzontali convenzionali è stata trovata dall'International Ground Source Heat Pump Association nel metodo "Slinky" (dal nome della molla a spirale giocattolo). Tale sistema consiste in una tubazione avvolta in spire disposte in modo piano sul fondo della trincea e consente di disporre una maggiore

quantità di tubo in trincee meno estese riducendo i costi di installazione. La configurazione caratteristica a spirale consente di avere una maggiore quantità di tubo per metro quadro di terreno, ma riduce l'efficienza dello scambio termico a causa della parziale sovrapposizione delle spire. Il riempimento della trincea, dopo aver posizionato le tubature, richiede particolare attenzione al fine di assicurare la corretta spaziatura tra le spire ed un buon contatto termico con il materiale di riempimento e il terreno. A tale scopo può risultare necessario ricoprire le spire con uno strato di sabbia sottile.

Un'alternativa al metodo "Slinky" è il metodo "Svec", sviluppato dal National Research Council of Canada, che consiste nell'inserire la tubazione a spirale verticalmente nel terreno piuttosto che orizzontalmente.

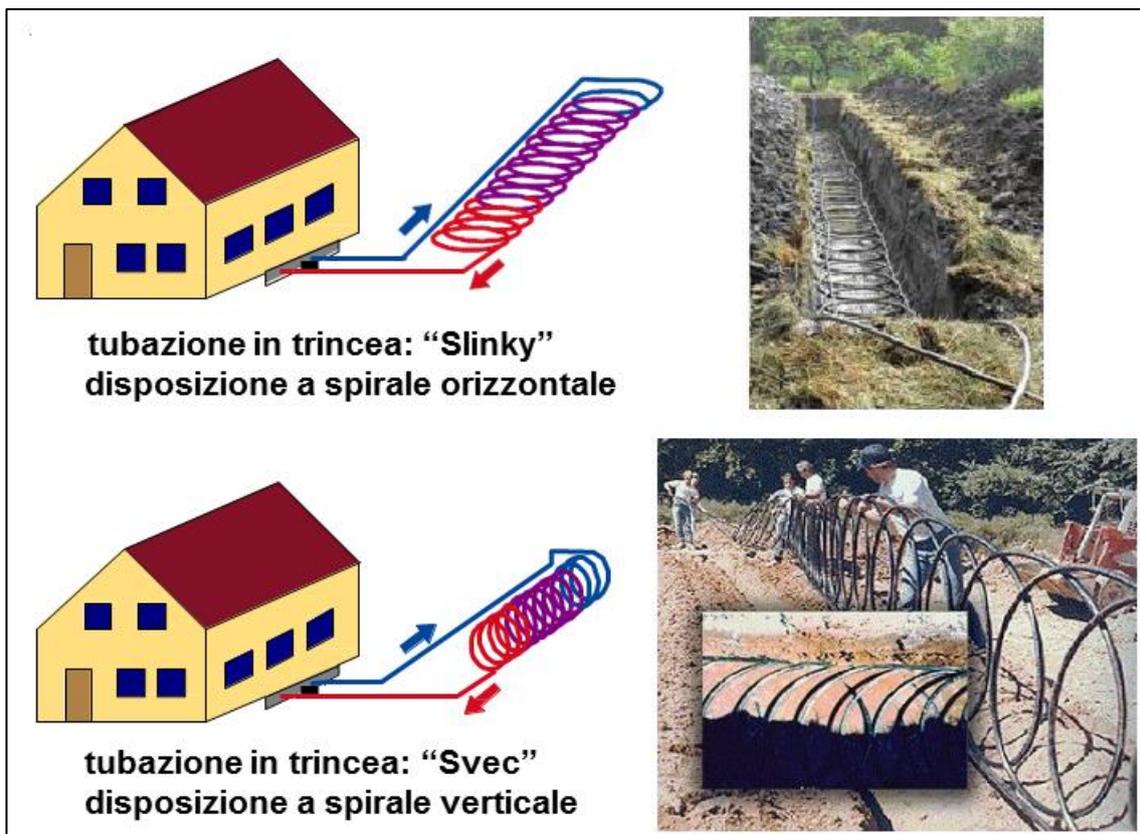


Figura 8 : Configurazioni di impianto Closed Loop a sviluppo orizzontale (metodi "Slinky" e "Svec").

Quadro normativo

La normativa italiana in ambito geotermico risulta ancora carente e varia da regione a regione in quanto attraverso il DECRETO LEGISLATIVO 11 febbraio 2010, n. 22 il Presidente della Repubblica ha stabilito che *“La ricerca e la coltivazione a scopi energetici delle risorse geotermiche effettuate nel territorio dello Stato, nel mare territoriale e nella piattaforma continentale italiana [], sono considerate di pubblico interesse e di pubblica utilità e sottoposte a regimi abilitativi ai sensi del presente decreto. Valgono le seguenti definizioni:*

- a) sono risorse geotermiche ad alta entalpia quelle caratterizzate da una temperatura del fluido reperito superiore a 150°C;*
- b) sono risorse geotermiche a media entalpia quelle caratterizzate da una temperatura del fluido reperito compreso tra 90 °C e 150°C;*
- c) Sono risorse geotermiche a bassa entalpia quelle caratterizzate da una temperatura del fluido reperito inferiore a 90°C.*

Sono d’interesse nazionale le risorse geotermiche ad alta entalpia, o quelle economicamente utilizzabili per la realizzazione di un progetto geotermico [] tale da assicurare una potenza erogabile complessiva di almeno 20MW. Sono d’interesse locale le risorse a media e bassa entalpia”.

Tuttavia, non tutte le regioni hanno adottato un piano legislativo per la progettazione e l’installazione di impianti geotermici, questo ha in parte ostacolato la diffusione di tale tecnologia.

La mancanza di una regolamentazione precisa ed unica comporta una grande confusione dovuta alla frammentarietà di informazioni, in quanto esistono diverse leggi del Codice civile in materia ambientale come

- Art. 840, Sottosuolo e spazio sovrastante al suolo;
- Art. 844, Immissioni;
- Art. 889, Distanze per pozzi, cisterne, fosse e tubi.

Parallelamente vi sono articoli e norme emanate dall’ente UNI come

- Normativa UNI EN 10349:1994, riguardante il riscaldamento e il raffrescamento degli edifici;
- Normativa UNI EN 10339:1994, dal titolo “Impianti aeraulici a fini di benessere”;
- Normativa UNI EN 11466:2012, riguardante i sistemi geotermici a pompa di calore, intitolata “Requisiti per il dimensionamento e la progettazione”;
- Normativa UNI EN 11467:2012, riguardante i sistemi geotermici a pompa di calore, intitolata “Requisiti per l’installazione”;
- Normativa UNI EN 11468:2012, riguardante i sistemi geotermici a pompa di calore, intitolata “Requisiti ambientali”;
- Normativa UNI EN TS 11300:2012, intitolata “Prestazioni energetiche degli edifici”.

In Piemonte la regolamentazione varia da provincia a provincia ed è differente a seconda della tecnologia a circuito chiuso o a circuito aperto. Per una qualsiasi perforazione, a fini idrici o di ingegneria civile, a profondità maggiori di 30m è necessario effettuare la comunicazione al *Servizio geologico della Direzione Generale delle Miniere del Ministero dello Sviluppo Economico* entro 30 giorni dall’inizio delle operazioni di perforazione. In seguito, va redatta una relazione contenente i

risultati geologici e geofisici ottenuti dalle prove in sito che sarà sottoposta al controllo del Servizio Geologico che ha la funzione di produrre carte geotecniche utili alla valutazione di fattibilità degli impianti geotermici in particolari tipologie di sottosuolo. La licenza per effettuare lavori di perforazione non è sempre necessaria, essa è richiesta solo nel caso in cui la perforazione potrebbe essere potenzialmente dannosa per la falda acquifera sotterranea. I sistemi a circuito chiuso rientrano, quasi in tutta Italia, all'interno della normativa per l'utilizzazione della risorsa idrica chiamata "Legge Galli" (L. 36-/94) e per lo scarico di acque per scopi energetici (Decreto Legislativo 152/2006).

Tra le direttive della regione Piemonte il Piano di Tutela delle Acque (PTA) ha lo scopo di salvaguardare le acque superficiali e sotterranee del territorio e favorire lo sviluppo sostenibile della comunità. È composto da otto parti

- Relazione generale;
- Programma della Misure di Piano;
- Norme di Piano e Allegati;
- Tavole di Piano;
- Rapporto Ambientale VAS;
- Piano di Monitoraggio VAS;
- Sintesi non Tecnica VAS;
- Dichiarazione di Sintesi.

La figura seguente mostra un estratto della Tavola di Piano 7, nel quale sono evidenti le diverse risorse idriche presenti nell'area della città di Torino.

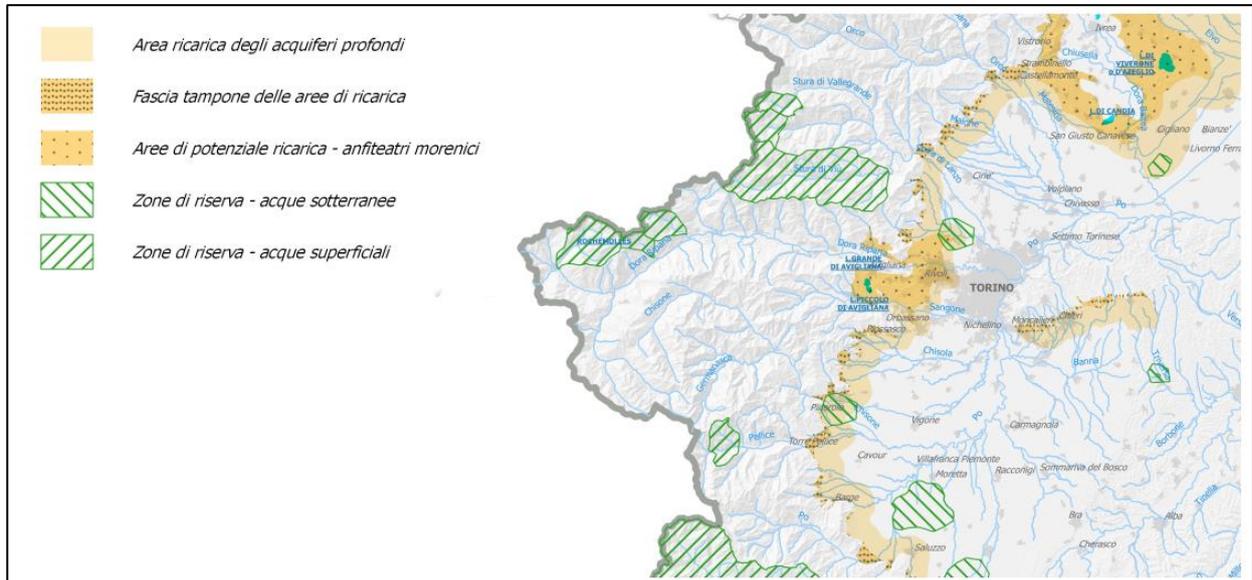


Figura 9: Estratto della Tavola 7 del Piano di Tutela delle Acque, zona di Torino.

Attraverso la **Determinazione dirigenziale n°66 del 3 marzo 2016**, sono stabilite le "Linee guida per l'installazione e la gestione delle sonde geotermiche". Nella premessa del documento vengono recepiti il Dlgs dell'11 febbraio 2010 per quanto riguarda la responsabilità delle regioni nel fornire la normativa e le direttive europee in materia di promozione dell'utilizzo di fonti rinnovabili. L'allegato contenente le linee guida è suddiviso in due sezioni principali riguardanti

- Le **modalità tecnico-operative per la progettazione, l'installazione, il collaudo, la gestione e la dismissione degli impianti**; vengono descritte la procedura e le buone norme da seguire per una corretta perforazione, quale tipo di tubazioni utilizzare, le tecniche di riempimento delle intercapedini, quali materiali usare per la cementazione e come effettuare il collaudo e il monitoraggio dei pozzi geotermici.
- Gli **elaborati progettuali necessari alla realizzazione di grandi e piccoli impianti**; per i piccoli impianti occorre fornire una relazione tecnica di progetto contenente: tipologia dell'impianto, geometria e volumetria, periodo di utilizzo, potenza termica e frigorifera, tipo di tubazioni e temperature di mandata del fluido, tecniche di perforazione da utilizzare. Per i grandi impianti invece, viene richiesta anche la caratterizzazione delle proprietà termiche dei terreni interessati dal progetto attraverso il GRT (Ground Response Test), la caratterizzazione litostratigrafica di una zona sufficientemente ampia nei dintorni dell'impianto.

Per gli elementi che non sono contemplati nelle suddette linee guida, generalmente si fa riferimento alla normativa UNI.

Pompe di calore

Il 1948 è l'anno in cui per la prima volta si scelse l'utilizzo di una pompa di calore in ambito residenziale ed esattamente durante la progettazione del Commonwealth Building a Portland in Oregon. L'edificio, di nuova concezione per l'epoca, presentava degli infissi che non permettevano il ricircolo di aria con l'ambiente esterno fu quindi indispensabile progettare un impianto di areazione. L'incarico fu affidato agli ingegneri J. Donald Kroeker e Ray C. Chewing, che decisero di adottare oltre al semplice ricircolo dell'aria anche una pompa di calore con funzione di condizionamento dell'aria. Il concetto teorico di pompa di calore era già stato descritto in un libro, pubblicato nel 1824, scritto da un giovane ufficiale dell'esercito francese, Sadi Carnot, ma questo era caduto nel dimenticatoio. L'impianto progettato dall'ingegner Kroeker si basava su quattro termopompe con altrettanti circuiti, due dei quali caricati con Freon 11 e gli altri due con Freon 113. A partire dagli anni Settanta 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 Novanta, il loro utilizzo si diffonde anche in Giappone e Nord Europa dove si adottano macchine termiche per il riscaldamento degli edifici che sfruttano il calore dell'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. Negli ultimi anni queste tipologie di sistemi si stanno diffondendo sempre di più anche in ambito residenziale andando a sostituire i vecchi impianti di riscaldamento. Ci si aspetta un raddoppio del mercato di vendita delle pompe di calore entro il 2024, solo nel 2018 esso è aumentato del 12% rispetto all'anno precedente. Le unità installate in Europa sono circa 11,8 milioni (maggio 2019), servendo circa il 10% degli edifici. Le pompe di calore sono indispensabili per raggiungere gli standard di consumo e ambientali imposti dall'Europa per il 2050, ossia una riduzione dei gas serra dell'80% rispetto al 1990. Inoltre, rappresentano un nuovo mercato poco esplorato e molto redditizio dal punto di vista dei potenziali investitori. Francia, Italia e Spagna sono i paesi con più alta diffusione di questa tecnologia rispetto a tutta l'Unione Europea (EHPA, 2019). La figura mostra le unità vendute nei primi undici paesi europei.

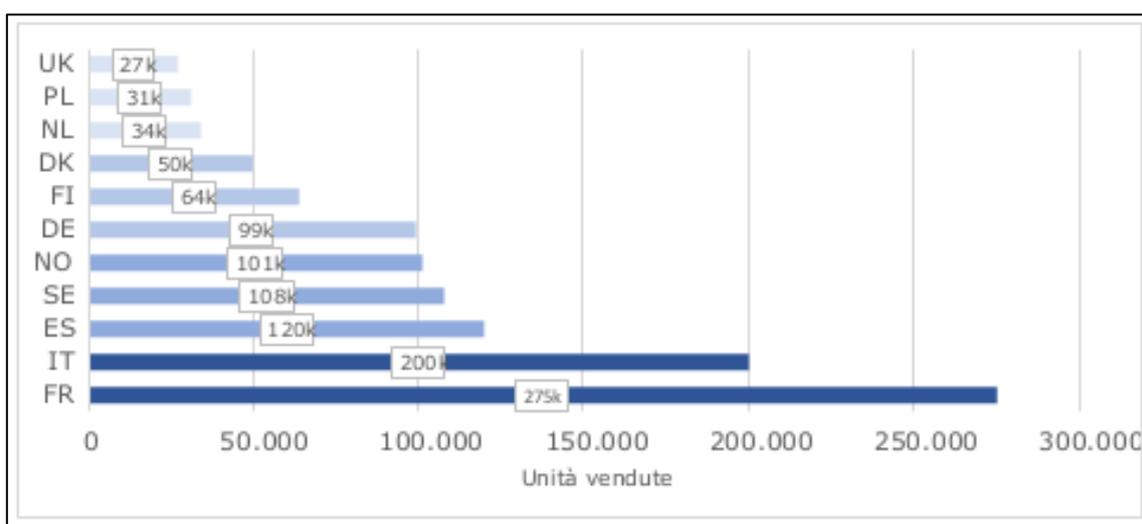


Figura 10: Unità vendute per paese, primi 11 paesi europei (EHPA, 2019).

La figura evidenzia l'incremento della crescita delle unità vendute in Europa a partire dal 2009.

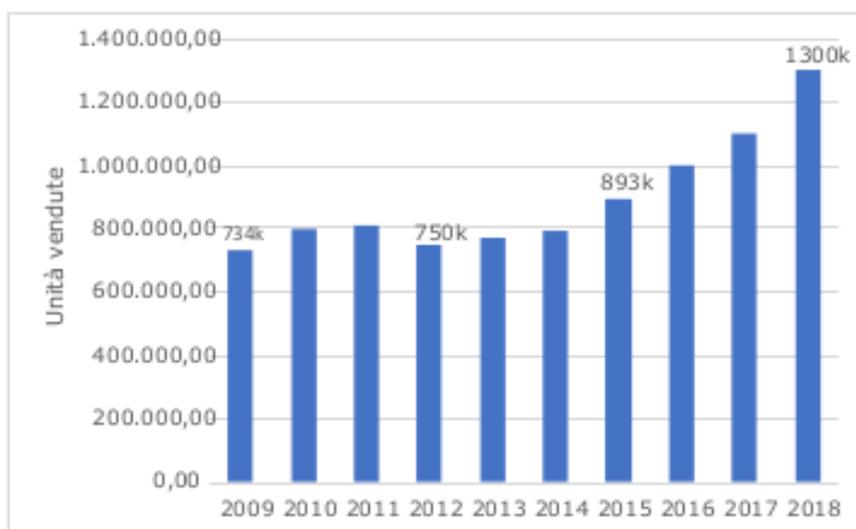


Figura 11: Sviluppo annuale delle vendite, 21 paesi europei (EHPA, 2019).

Risulta interessante citare l'European Geothermal Energy Council (EGEC), un'associazione senza scopo di lucro nata nel 1998 e con sede a Bruxelles, che conta circa 120 membri provenienti da tutta Europa. A partire dal dicembre 2011 l'EGCE pubblica un report con i dati e gli sviluppi del mercato geotermico per il raffrescamento, il riscaldamento e la produzione di elettricità. Il report è suddiviso in capitoli ciascuno dei quali analizza un diverso campo di applicazione della geotermia e riporta i dati relativi alle capacità installate e le previsioni di crescita. In rete è possibile scaricare gratuitamente una presentazione contenente i principali risultati, per il report completo occorre opportuna licenza. La pubblicazione del giugno 2020 riporta che nel 2019 è stato raggiunto il traguardo di mercato delle 2 milioni di pompe di calore geotermiche installate. La figura tratta dal report riporta le quantità di GSHP (ground source heat pump) vendute nei diversi paesi europei nel 2018.

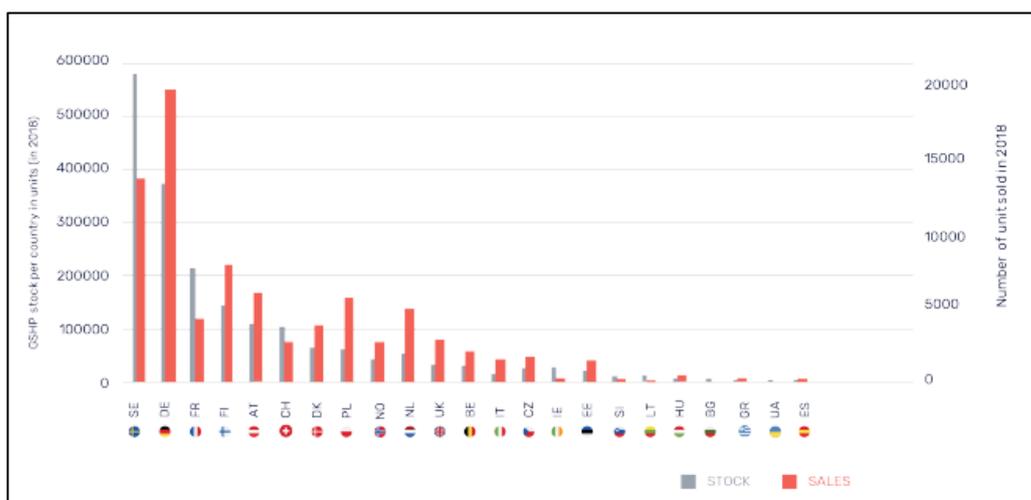


Figura 12: Stock e vendite di GSHP in Europa nel 2018

Principio di funzionamento

Il funzionamento della macchina è di tipo ciclico e si basa su quattro trasformazioni principali: evaporazione, compressione, condensazione ed espansione. È presente un circuito chiuso, detto circuito interno alla pompa di calore, nel quale scorre il fluido refrigerante, una sostanza che possiede particolari proprietà. Sul circuito sono interposti i quattro componenti fondamentali della macchina in ciascuno dei quali avviene una ben definita trasformazione.

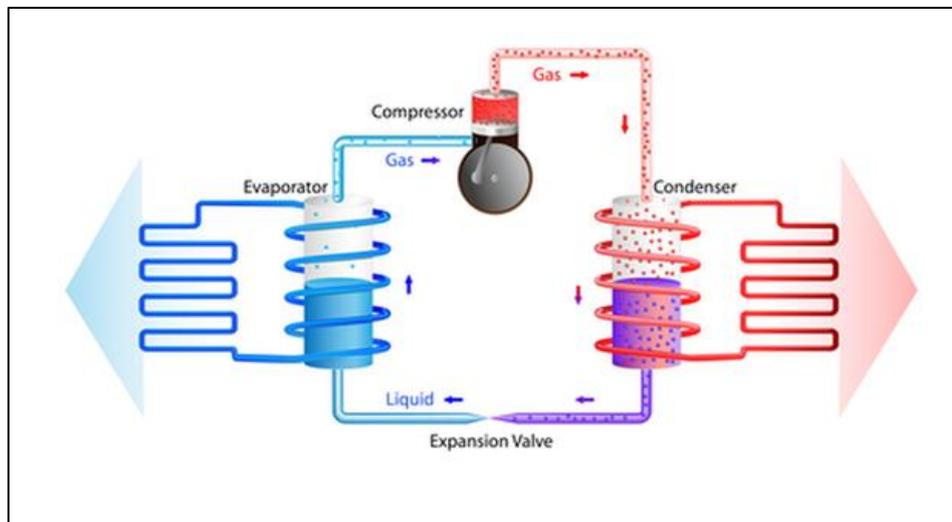


Figura 13: Schema di funzionamento di una pompa di calore generica (Messaggero-Casa, 2018).

I componenti sono:

- **Evaporatore:** è uno scambiatore di calore che ha la funzione di assorbire calore da un fluido esterno alla macchina per trasferirlo al fluido refrigerante. Il refrigerante viene riscaldato fino alla temperatura di saturazione di bassa pressione alla quale evapora;
- **Compressore:** è un dispositivo che incrementa la pressione, e di conseguenza la temperatura del fluido refrigerante. Il compressore assorbe potenza elettrica, generalmente fornita dalla rete o in alcuni casi da un generatore a combustione interna. I livelli di pressione in ingresso e in uscita sono dettati dai requisiti del sistema che necessita che il fluido refrigerante lavori entro determinati intervalli di pressione. I modelli di compressore più usati sono quelli alternativi, centrifughi e a vite; la scelta del tipo di compressore è legata ad aspetti tecnici come dimensioni, efficienza, costo, rumorosità capacità di modulazione e affidabilità. La continua evoluzione della tecnologia ha consentito di avere a disposizione compressore più efficienti e più economici rispetto al passato, ciò rende le pompe di calore sempre più convenienti dal punto di vista economico;
- **Condensatore:** è uno scambiatore di calore in cui il fluido refrigerante condensa cedendo il proprio calore latente ad un fluido esterno alla macchina;
- **Valvola di espansione:** detta anche valvola di laminazione è, anche se relativamente, il più semplice componente della pompa di calore. Analogamente al compressore separa la zona a bassa pressione del circuito da quella ad alta pressione, ma con funzione opposta. Infatti, genera una riduzione di pressione, e la diminuzione di temperatura che ne deriva, del fluido refrigerante. Nelle macchine di piccola taglia, è realizzata semplicemente con un tratto di tubazione a sezione minore che genera una caduta di pressione concentrata, proporzionale alla portata di refrigerante.

Fluido refrigerante

Il fluido refrigerante è uno degli elementi fondamentali per il funzionamento della pompa di calore. Questa sostanza deve possedere particolari proprietà tipo pressione di condensazione non troppo elevata alla temperatura di utilizzo, pressione di evaporazione non troppo bassa (generalmente maggiore di quella atmosferica), elevato calore di cambiamento di fase, limitata dannosità per l'ambiente. I fluidi refrigeranti sono raggruppati in diverse categorie, in relazione alle specie chimiche che li compongono, per esempio clorofluorocarburi (CFC), idroclorofluorocarburi (HCFC), idrofluorocarburi (HFC) e idrofluorolefine (HFO) e, nella notazione Standard Internazionale, si usa identificarli con la lettera R (che sta per Refrigerant) seguita da una serie di lettere e numeri che definiscono in maniera univoca il fluido. La tabella mostra alcuni fluidi refrigeranti e i relativi parametri, ritenuti importanti per la valutazione dell'impatto ambientale.

Product information (sorted by Product Type and Name)					
Type	Product R- Number	ODP ¹		GWP ²	
CFC	12	1	High	10900	High
	502	0,33	High	4657	High
HCFC	22	0,055	Medium	1810	Medium
	123	0,060	Medium	77	Low
	401A	0,033	Medium	1182	Medium
	401B	0,036	Medium	1288	Medium
	402A	0,019	Medium	2788	High
	402B	0,030	Medium	2416	Medium
	408A	0,024	Medium	3152	High
	409A	0,046	Medium	1909	Medium
	HFC	23	0	Zero	14800
32		0	Zero	675	Medium
134a		0	Zero	1430	Medium
404A		0	Zero	3922	High
407A		0	Zero	2107	Medium
407C		0	Zero	1774	Medium
407F		0	Zero	2088	Medium
417A		0	Zero	2346	Medium
422A		0	Zero	3143	High
422D		0	Zero	2729	High
423A		0	Zero	2280	Medium
424A		0	Zero	2440	Medium
427A		0	Zero	2138	Medium
428A		0	Zero	3607	High
434A		0	Zero	3245	High
437A		0	Zero	1805	Medium
438A		0	Zero	2265	Medium
442A		0	Zero	1888	Medium
507A		0	Zero	3985	High
508B		0	Zero	13396	High
M089	0	Zero	3805	High	
HFO	1234yf	0	Zero	4	Low
	1234ze	0	Zero	6	Low
Natural/Not in Kind	170	0	Zero	6	Low
	290	0	Zero	3	Low
	600a	0	Zero	3	Low
	717	0	Zero	0	Zero
	744	0	Zero	1	Low
	1150	0	Zero	4	Low
	1270	0	Zero	2	Low

Figura 14: Fluidi refrigeranti, parametri di impatto ambientale.

Gli effetti che vengono maggiormente presi in considerazione sono la riduzione dell'ozono e l'effetto serra. Il primo viene espresso tramite il parametro ODP ("Ozone Depletion Potential") che rappresenta il rapporto tra il contributo di degradazione dell'ozono del fluido considerato e quello del gas R22. Il secondo viene espresso tramite il GWP ("Ground Warming Potential"), che rappresenta

il rapporto tra il contributo al riscaldamento globale del gas considerato e quello dell'anidride carbonica.

La scelta del fluido refrigerante deve essere fatta tra le sostanze che non danneggino l'ozono stratosferico, come stabilito dal *Protocollo di Montreal*, e che abbiano un contenuto ridotto di cloro e fluoro per minimizzare l'impatto sull'ambiente, come evidenzia il *Protocollo di Kyoto*, evitando anche problemi di infiammabilità. Per esempio, a partire dal 1° gennaio 2015, l'utilizzo dei gas refrigeranti che rientrano i CFC e HCFC è vietato. Negli ultimi anni sono state intraprese numerose ricerche sull'utilizzo di nuovi fluidi con limitato impatto ambientale e spesso vengono utilizzati liquidi refrigeranti naturali. A seconda del tipo di applicazione, il fluido refrigerante per le pompe di calore viene scelto per le caratteristiche termodinamiche e per la possibilità di ottenere prestazioni relativamente alte. Generalmente per il condizionamento vengono utilizzati i fluidi R32, R134a, R410a (miscela costituita dal 50% di R32 e dal 50% R125), R407C, R1234yf.

Nella pompa di calore Nibe F1155 circola il fluido refrigerante R407C, una miscela costituita da tre componenti HFC: R32, R125 e R134a, nelle proporzioni 23%, 25%, 52% in peso (con una tolleranza di 2% ammessa per ciascun componente). L'R407C è una miscela di tipo zeotropica, ciò significa che quando in qualunque condizione di saturazione liquido-vapore, la composizione del vapore differisce da quella del liquido. La conseguenza principale è l'effetto "glide" (scivolamento) sulla temperatura; il valore del "glide" di temperatura per un refrigerante è, per convenzione, la differenza di temperatura tra la temperatura del vapore saturo alla pressione di evaporazione e la temperatura all'ingresso dell'evaporatore.

Ciclo termodinamico

Percorrendo il circuito della pompa di calore il fluido refrigerante cambia, in maniera ciclica, le proprie condizioni di pressione, temperatura, entalpia, densità e stato fisico. Durante il passaggio da uno stato fisico ad un altro si mettono in gioco grandi quantità di energia, come è noto dalla termodinamica, quindi è possibile avere macchine di potenze termiche consistenti e mantenere dimensioni ridotte. Il diagramma entalpico, che ha in ascissa l'entalpia specifica ed in ordinata la pressione, detto anche "piano termodinamico del frigorista" viene utilizzato per tracciare il ciclo termodinamico. Su questo piano per ciascun fluido è possibile individuare la curva detta "campana del vapore saturo" che permette di distinguere le tre zone nelle quali la sostanza si trova nei tre diversi stati fisici della materia.

La figura mostra, in maniera semplificata, la campana (nero) ed il ciclo termodinamico a cui è soggetto il refrigerante in una pompa di calore.

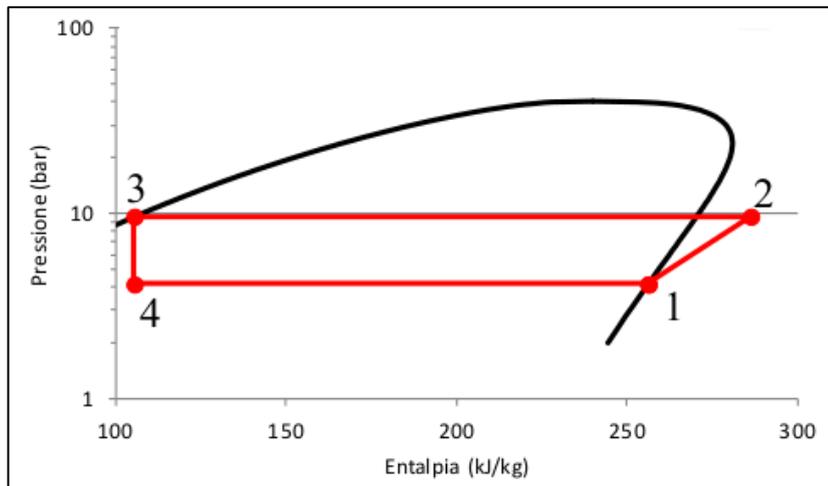


Figura 15: Ciclo termodinamico.

- Tratto 1-2: rappresenta il compressore in quanto si ha un incremento della pressione;
- Tratto 2-3: rappresenta la trasformazione di condensazione, supponendo che avvenga a pressione costante. Il punto di fine trasformazione si trova sulla curva limite inferiore dove tutte le molecole del fluido si trovano allo stato liquido; il calore viene ceduto verso l'esterno (effetto di riscaldamento nella stagione invernale);
- Tratto 3-4: rappresenta la valvola di espansione, infatti la pressione del fluido si abbassa conservando la propria entalpia;
- Tratto 4-1: rappresenta la trasformazione di evaporazione, supponendo che avvenga a pressione costante. Il punto di fine trasformazione si trova sulla curva limite superiore dove tutte le molecole del fluido si trovano allo stato gassoso; il calore viene sequestrato dall'esterno (effetto di raffreddamento nella stagione estiva).

Impianto geotermico con pompa di calore

Un impianto geotermico accoppiato ad una pompa di calore per il riscaldamento e il raffreddamento di un edificio è l'insieme di tre macro-componenti

- Il circuito geotermico;
- La pompa di calore;
- Il sistema di condizionamento.

Il circuito geotermico, che può avere una delle configurazioni precedentemente descritte, assume la funzione di sorgente termica o pozzo termico a seconda se il sistema viene utilizzato per il riscaldamento o il condizionamento. La pompa di calore rappresenta il luogo di interazione tra edificio e terreno, infatti durante l'inverno assorbe calore dalle sonde geotermiche tramite l'evaporatore in modo che il calore derivante dal condensatore sia utilizzato dall'impianto di condizionamento per riscaldare l'ambiente domestico. Nel corso dell'estate avviene esattamente l'opposto il calore viene assorbito dall'ambiente domestico, che di conseguenza si raffresca, per essere smaltito nel terreno.

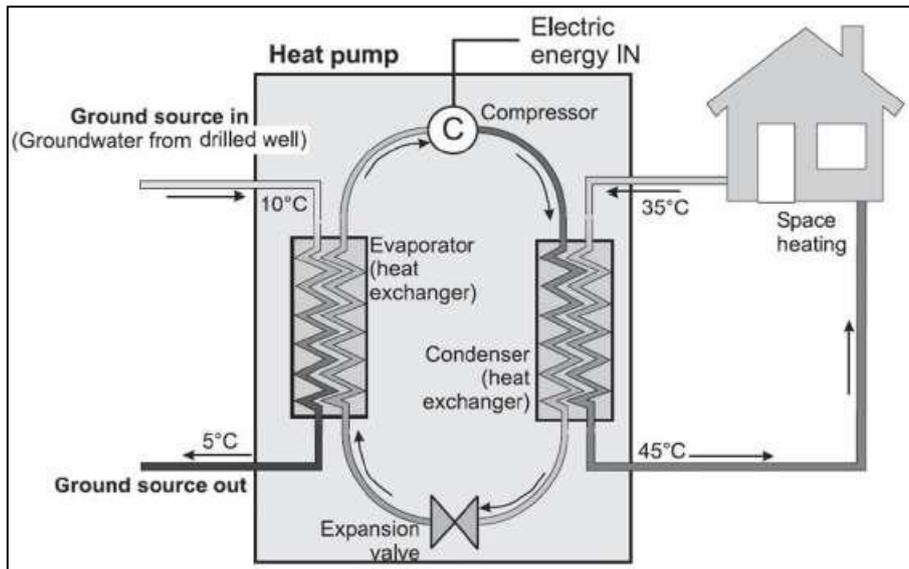


Figura 16: Impianto geotermico con pompa di calore.

Valvola a quattro vie

La valvola a quattro vie permette di passare dal funzionamento per riscaldamento al funzionamento per raffreddamento. Nello specifico consente l'inversione tra la linea di ritorno dalle sonde e quella di ritorno del fluido riscaldante/raffrescante, in modo che durante l'estate il circuito primario (lato sonde) assorbe il calore del condensatore per smaltirlo nel terreno mentre in inverno è lo scambio di calore del circuito primario avviene con l'evaporatore che assorbe calore dal terreno.

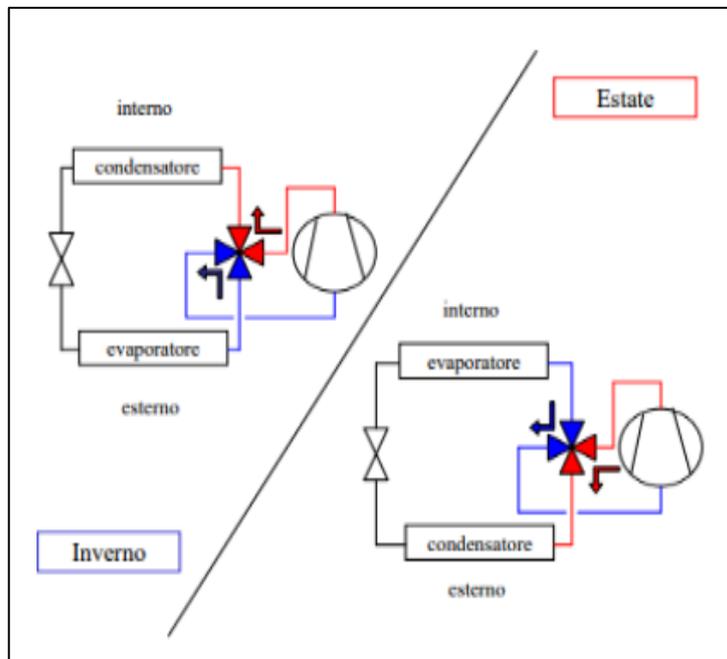


Figura 17: Schema valvola a quattro vie.

Il campo sperimentale

Il campo sperimentale è costituito da 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. L'Energy Center 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 transnazionali riguardanti le tecnologie energetiche più innovative. La struttura di 7mila metri quadrati, di cui 5mila destinati al centro e 2mila al parcheggio, è stata finanziata dalla Regione Piemonte attraverso, dalla Compagnia di San Paolo e dalla fondazione CRT.

Fasi costruttive

Tramite un escavatore è stato possibile movimentare la porzione di terreno coinvolta e procedere alla sua frantumazione. Dopo aver effettuato uno scavo con profondità di 80-120cm, è stata disposta l'armatura tramite infissione nel terreno e sono stati installati i puntoni di contrasto. I pannelli che costituiscono l'armatura sono posizionati tramite un meccanismo di infissione: la benna dell'escavatore spinge i moduli dei pannelli nel terreno. In maniera alternata tutti i pannelli sono stati spinti verso il basso lungo i montanti con l'aiuto della benna dell'escavatore. I puntoni sono elementi che resistono agli sforzi di trazione e compressione che si generano in tali strutture, se realizzati in acciaio risultano più vantaggiosi rispetto a quelli in legno per diversi motivi: possono essere posizionati facilmente e riutilizzati più volte, si adattano maggiormente in quanto sono caratterizzati da forme geometriche e dimensioni differenti. Il materiale metallico degli stessi conferisce un peso

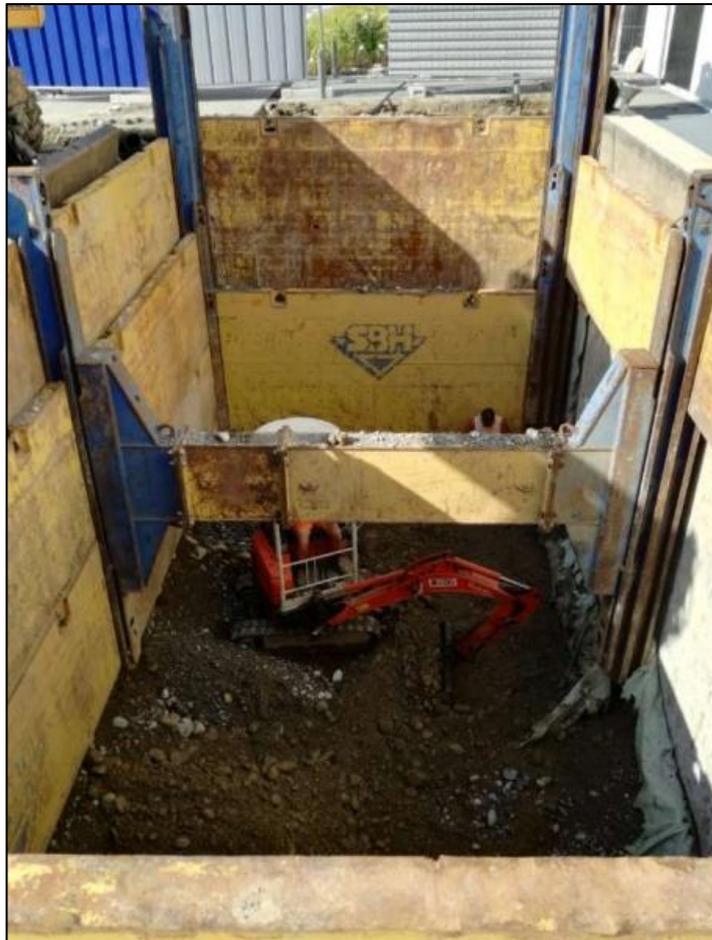


Figura 18: Fasi costruttive, puntoni.

ridotto, una maggiore durabilità anche in ambienti in cui è presente acqua e la facilità di posa. Inoltre, vi è la possibilità di inserire puntoni di ancoraggio con lo scopo di limitare la flessibilità della struttura. Dopo l'infissione di tutti i pannelli si è proceduto, tramite autopompa, con il getto e la livellazione di uno strato di magrone a 4,70m di profondità. Lo strato di calcestruzzo magro ha lo scopo di creare un piano orizzontale al fine di rendere più comode le operazioni di posizionamento delle sonde nella corretta configurazione impiantistica.



Figura 19: Fasi costruttive, livellazione.

Per collegare le sonde all'impianto di sensoristica sono stati eseguiti alcuni fori sul muro mediante carotatrice ad acqua. Si tratta di una macchina utensile portatile costituita da una parte abrasiva chiamata "corone" 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. In seguito, sono stati inseriti tutti i sensori necessari e collegati all'impianto attraverso i fori precedentemente realizzati. Al termine delle operazioni di posizionamento delle sonde, il terreno precedentemente spostato è stato ripristinato in modo tale da procedere con l'attivazione termica dell'intera struttura.

Di seguito si riporta un'immagine della sistemazione finale delle serpentine.



Figura 20: Sistemazione finale delle serpentine.

Le serpentine sono costituite da tubazioni di polietilene reticolato che viene trattato ad alte temperature e alte pressioni che conferiscono un'elevata resistenza e flessibilità al materiale. Le sonde presentano un diametro di 20 mm ed uno spessore di 2,0 mm. All'interno delle serpentine scorre una miscela di acqua e glicole propilenico in percentuali pari al 25%.

Il muro in esame si estende per 7,50 m e raggiunge una profondità di 4,6 m. È stato suddiviso in tre moduli da 2,50 m, due dei quali sono caratterizzati dalla medesima disposizione orizzontale delle

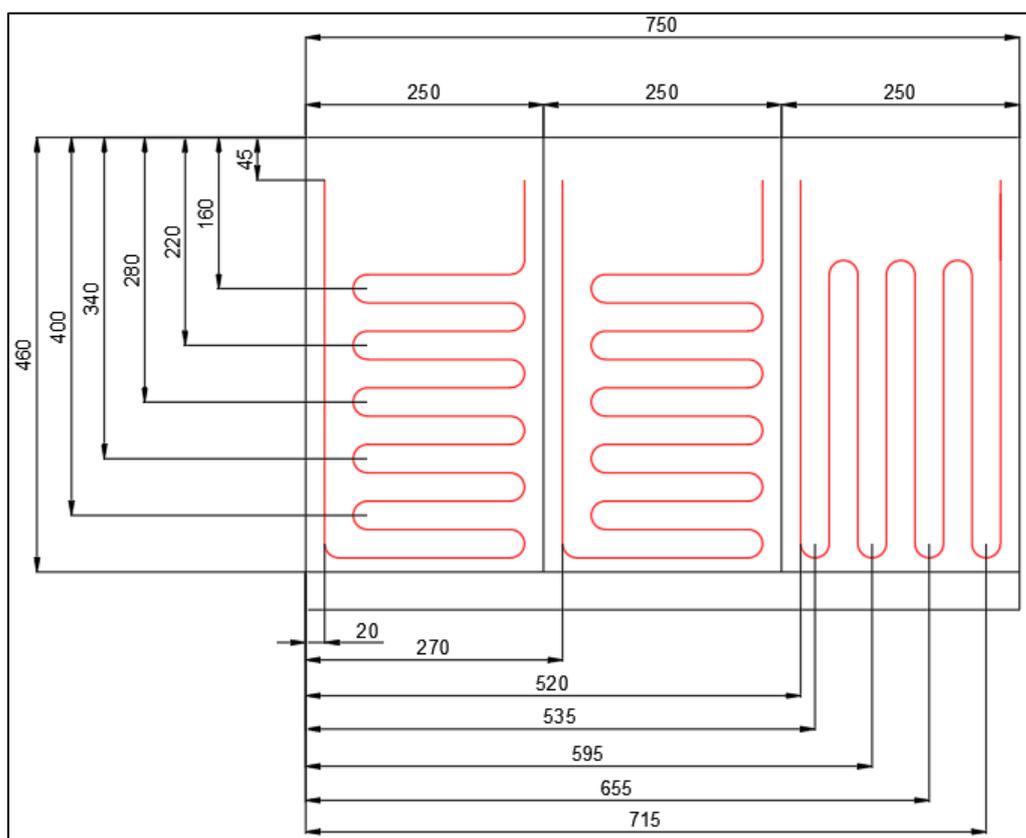


Figura 21: Configurazione serpentine.

serpentine; per l'ultimo modulo, a scopo sperimentale, le tubazioni sono state inserite in senso verticale. In figura si riportano le principali misure per la realizzazione delle configurazioni (le quote sono in millimetri).

Le serpentine grazie ad un sistema di valvole hanno la possibilità di essere percorse selettivamente in serie o in parallelo dal fluido.

Impianto

All'interno dell'Energy Center sono collocati la 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 litri e un ventilconvettore che riscalda o raffresca l'ambiente a seconda della tipologia di prova. La pompa di calore geotermica, avviata il 19/07/2019, funziona per mezzo di tre circuiti visibili in figura:

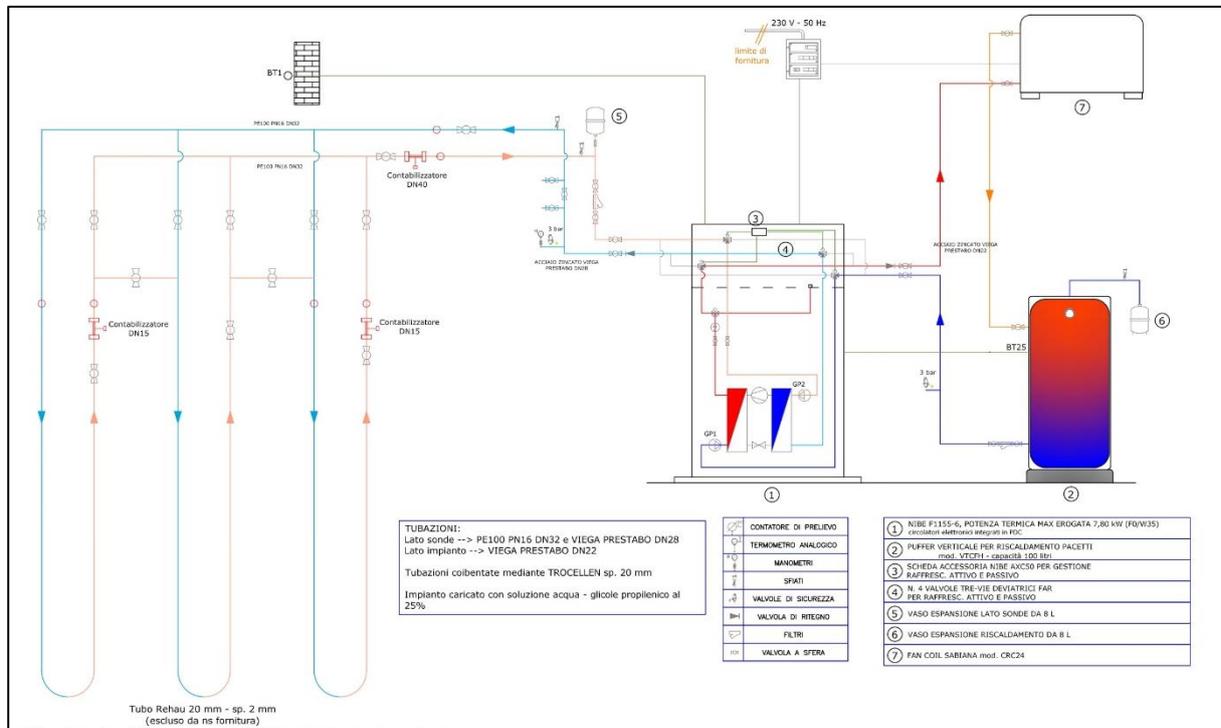


Figura 22: Progetto impianto (GeoNovis-Energia-Geotermica, 2019).

- Il circuito primario è quel ramo caricato con soluzione acqua-glicole propilenico al 25%. Esso ha il compito di estrarre calore dal sottosuolo per permettere l'evaporazione del fluido refrigerante all'interno della pompa di calore in assetto di riscaldamento e il compito di smaltire il calore proveniente dalla pompa di calore in assetto di raffrescamento. La portata è gestita da una pompa (GP2).
- Il "circuito secondario" è la parte di impianto che ha la funzione di trasportare il fluido riscaldante/raffrescante verso l'utenza finale, in questo caso un ventilconvettore Sabiana modello CRC24. Questo ramo di circuito può essere impiegato anche per altri scopi, quali il trasporto di acqua calda verso i sanitari presenti nell'edificio, il riscaldamento di una piscina ecc. Il fluido che lo caratterizza è acqua. In serie al ventilconvettore è collegato anche un vaso di accumulo Pacetti modello VTCFH da 100 litri, con funzione di volano termico. Anche qui la portata è gestita da una pompa (GP1).
- Il circuito della pompa di calore è caricato con refrigerante R407C. Su questo circuito sono installati tutti i componenti che servono per sfruttare l'energia contenuta nel refrigerante. Sono presenti un condensatore ed un evaporatore, necessari per lo scambio termico con il fluido riscaldante/raffrescante e con il "fluido primario", un compressore e una valvola di laminazione. La pompa Nibe è anche dotata di resistenze che permettono di soddisfare la richiesta di calore qualora quello estratto dal terreno non sia sufficiente.

L'impianto è anche corredato da una serie di valvole, che ne permettono il controllo e le varie funzioni normative di sicurezza per la sua salvaguardia e la sicurezza delle persone che potrebbero trovarsi nelle sue vicinanze.



Figura 23: Pompa di calore (a destra), ventilconvettore (dietro), vaso di accumulo (a sinistra).

Sensoristica

I sensori che caratterizzano l'impianto geotermico Nibe sono principalmente sensori di temperatura. Di seguito sono elencati quelli utili ai fini di questo studio:

- temperatura esterna, BT1;
- temperatura di ritorno del fluido riscaldante/raffrescante, BT3;
- temperatura del fluido di ritorno dalle sonde, BT10;
- temperatura del fluido di mandata dall'evaporatore, BT11;
- temperatura di mandata dal condensatore, BT12;
- temperatura gas caldo, BT14;
- temperatura gas in aspirazione, BT17.

Nel ramo del circuito primario è inoltre presente un flussimetro che permette una misurazione della portata della soluzione acqua-glicole propilenico, utilizzata nell'estrazione/smaltimento del calore dal terreno. La macchina può inoltre misurare la velocità delle pompe a servizio del circuito primario e di quello secondario.

Analisi energetica

L'obiettivo di quest'analisi è il confronto dei valori calcolati, partendo dai dati disponibili con, con i risultati ottenuti inserendo gli stessi dati all'interno del software Coolpack, per capire se effettivamente ci siano degli inconvenienti a livello di funzionamento che precludano l'utilizzo di una pompa di calore di questo tipo in ambito residenziale. Tutti i valori energetici, le potenze scambiate, le portate, le efficienze sono stati calcolati come grandezze istantanee per ciascuna misurazione a compressore acceso. Successivamente tali grandezze sono state mediate secondo determinati criteri, che variano da caso a caso.

I dati

I dati utilizzati per lo studio derivano quasi totalmente dal file ".txt" generato in automatico dalla centralina di gestione elettronica della Nibe F1155. Per l'interpretazione del file, non essendoci alcuna indicazione sul manuale dell'installatore, è stato fatto riferimento ad un file reperito online (Lourie,2018); la centralina effettua una misurazione a cadenza regolare impostabile (in questo caso ogni 30s) nella quale memorizza i valori misurati dalla sensoristica presente all'interno della macchina. I valori utili ai fini dello studio sono le velocità di funzionamento delle pompe GP1 e GP2, espresse in percentuale, e le temperature descritte in precedenza. Nello stato attuale della macchina non si hanno sensori che permettono una misurazione istantanea della pressione (è necessario l'acquisto di un accessorio), ma l'azienda produttrice ha dichiarato che il ramo di alta pressione deve lavorare con una pressione compresa tra i 16bar e i 30 bar, mentre il ramo di bassa pressione in un intervallo di 7 – 11bar. Sono stati ipotizzati i valori di 16bar e 7bar rispettivamente per il ramo di alta e bassa pressione (Rondina, 2020). Per il valore di portata sono stati sfruttati i valori di 460 l/h (Tofalo, 2019) per la prova di riscaldamento e 0,435 m³/h, per la prova di raffreddamento entrambi derivanti dai valori medi misurati dai flussimetri installati sull'impianto.

Ipotesi

Sono state necessarie varie ipotesi per procedere con l'analisi, innanzitutto per qual che riguarda le pressioni dei due rami: si è considerata una pressione costante, in quanto tramite la sensoristica attualmente installata non è stato possibile avere delle misurazioni istantanee di pressione. Riguardo ai calori specifici a pressione costante (c_p) bisogna distinguere i tre differenti circuiti. Nel circuito primario, si è visto che la variabilità del c_p , per la miscela acqua-glicole al 25%, non è così accentuata e perciò si è preso indicativamente un valore costante di 3,9 kJ/kgK. Lo stesso discorso vale sul circuito secondario, quello del fluido riscaldante/raffreddante, in quanto si ha a che fare con acqua con un c_p costante di 4,186 kJ/kgK. Nel circuito interno della pompa di calore il c_p viene utilizzato nel conteggio di potenza elettrica necessaria al compressore. Esso lavora con temperature e pressioni molto diverse durante la giornata e ad ognuno di questi punti di funzionamento corrisponde un calore specifico differente. Si è proceduto quindi ad individuare i valori massimi e minimi di temperatura per ciascun livello di pressione considerando l'arco temporale di una giornata e calcolare il c_p per ciascun punto di lavoro. Infine, è stata fatta una media, sempre su base giornaliera sui valori individuati. Il calore specifico medio verrà quindi considerato costante nell'arco dell'intera giornata di riferimento. Sulle densità del fluido del fluido secondario e primario può essere speso lo stesso discorso: la loro variabilità è molto limitata e per questo vengono considerate costanti. Le portate del circuito primario, come quella del secondario, è ritenuta costante per tutto il tempo di funzionamento, in quanto dipende solo dalla pompa. Nelle impostazioni della macchina si può scegliere come far lavorare le pompe dei due circuiti e, nel caso specifico di questo studio, le pompe erano impostate in

modalità manuale, con velocità costante fissa al 100%, indipendentemente dallo stato di accensione o spegnimento del compressore. Altra assunzione fondamentale è che il fluido refrigerante non subisca alcun sotto-raffreddamento: il punto all'uscita del condensatore si trova esattamente sulla curva limite inferiore del diagramma ($\log(p) - h$). È necessario fare questa ipotesi in quanto non si hanno dati di temperatura su questo punto del ciclo non essendo installato nessun sensore in questa specifica posizione. Per ultimo, non si assumono perdite di alcun genere, né perdite di pressione lungo le condotte, né perdite energetiche o di calore negli scambiatori, nel compressore e nelle tubature. Nella prova di raffrescamento, considerato che il fluido refrigerante R407C è una miscela di tipo zeotropica, in uscita dall'evaporatore è stata ipotizzata una temperatura minore della temperatura di saturazione alla pressione di 7 bar. La caduta di temperatura è stata ipotizzata di circa 2 °C in base al controllo che viene effettuato sulle temperature affinché le misure utilizzabili siano circa il 75% del totale.

Regolazione

La pompa di calore geotermica Nibe F1155 non è attiva in modo continuativo, ma accende o spegne il compressore quando la temperatura di mandata dell'impianto raggiunge un determinato valore; tale valore può essere impostato manualmente a un valore costante (come nelle prove oggetto di questa tesi) oppure tramite il settaggio di una curva (di raffrescamento o di riscaldamento) in funzione della temperatura dell'ambiente. Come riportato nel manuale dell'Installatore, *“la curva ha il compito di assicurare una temperatura interna omogenea, indipendentemente dalla temperatura esterna, e pertanto un funzionamento energeticamente efficiente”*. All'interno del computer della pompa di calore sono presenti una serie di curve preimpostate, ed in particolare 16 per il riscaldamento e 10 per il raffrescamento; sarà compito dell'installatore scegliere quella più adatta alla specifica applicazione. La figura mostra un esempio di curva di riscaldamento in cui sono evidenziata la pendenza: una curva con pendenza più ripida fa sì che la pompa di calore fornisca una temperatura di mandata più alta a parità di temperatura esterna.

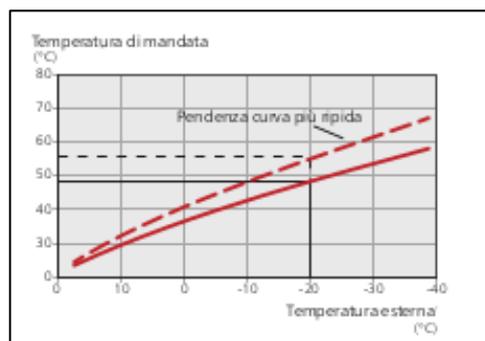


Figura 24: Curva di regolazione

Il controllo sulla temperatura di mandata viene effettuato attraverso i Gradi Minuti (“Degree Minute”) che scandiscono l'accensione e lo spegnimento del compressore. I Gradi Minuto sono una grandezza empirica che esprime la cumulata delle differenze tra una temperatura misurata ad intervalli di tempo regolare ed una data temperatura. Per esempio, per la caratterizzazione climatica delle diverse zone geografiche vengono utilizzati i Gradi Giorno calcolando la cumulata tra la temperatura media giornaliera ed una temperatura fissata convenzionalmente per ciascun Paese. Nel caso della pompa di calore vengono utilizzati i Gradi Minuto valutati con la seguente formula:

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

dove, DM , degree minute ($^{\circ}C \cdot min$), T_s , temperatura di set point della curva di riscaldamento/raffrescamento, T_a , temperatura del fluido nelle attuali condizioni di funzionamento ($^{\circ}C$), t_i , tempo trascorso (min). Quando il valore cumulativo di DM raggiungerà un certo numero calcolato dalla centralina della macchina, il compressore si attiverà.

Nel caso della prova di raffreddamento si può osservare che a partire dalle ore 11:52:07 del 16 giugno, quando il valore dei gradi minuto raggiunge i $120^{\circ}Cmin$, il compressore si attiva in modo continuativo fino alla fine del periodo preso in considerazione.

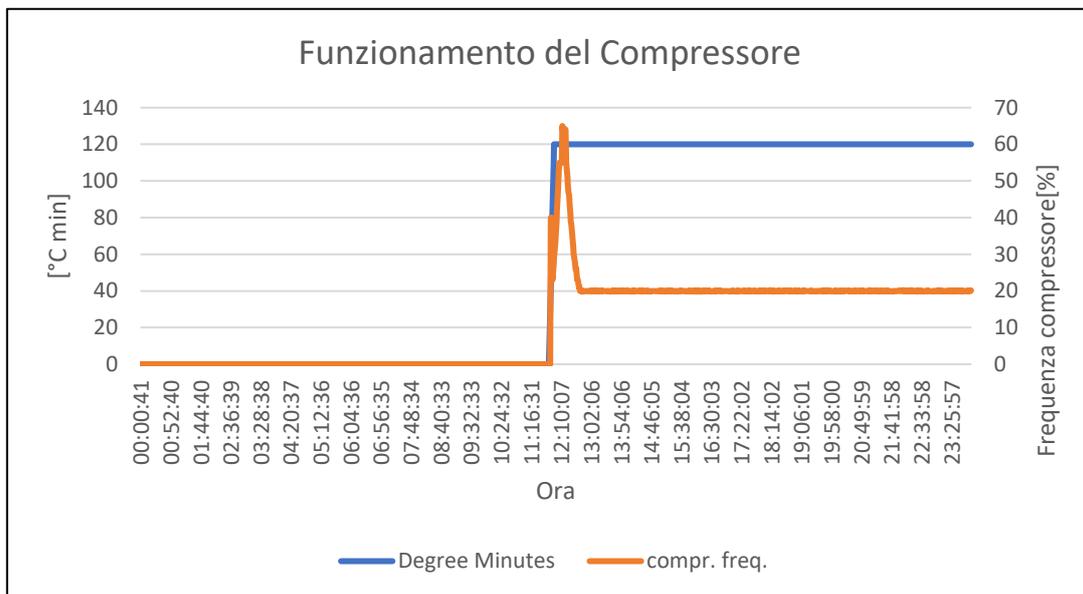


Figura 25: Funzionamento compressore in funzione dei gradi minuto durante la prova di raffreddamento.

Il grafico mostra l'andamento della temperatura di mandata misurata dal sensore BT11, si può osservare che dal momento in cui si accende il compressore, e conseguentemente si attiva la pompa

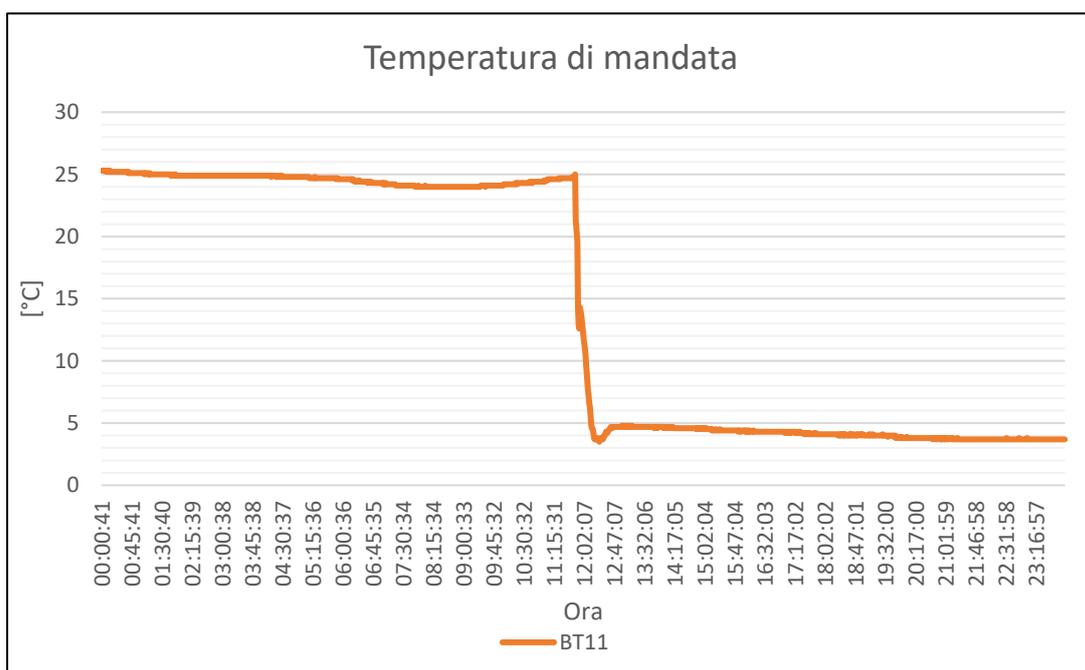


Figura 26: Andamento della temperatura misurata dal sensore BT11 durante la giornata del 16/06/2020.

di calore la temperatura di mandata all'impianto di condizionamento si mantiene pressoché costante intorno ai 5° C. In assetto estivo, la temperatura di mandata è settata al valore costante di 5°C.

Nel caso della prova di riscaldamento il valore costante della temperatura di mandata impostato è pari a 45°C ed infatti osservando l'andamento della temperatura misurata dal sensore BT12 durante la giornata del 28/10/2019 si nota chiaramente che essa oscilla tra i 41°C (all'inizio del ciclo di funzionamento del compressore) e i 51°C (momento in cui il compressore si spegne).

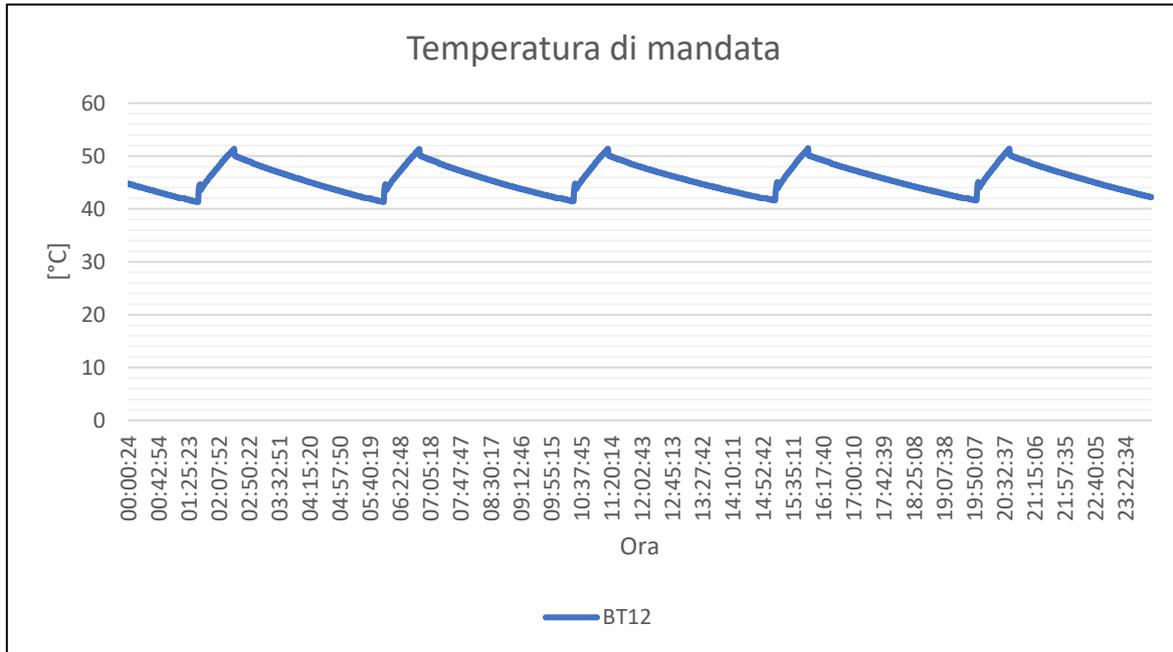


Figura 27: Andamento della temperatura misurata dal sensore BT12 durante la giornata del 28/10/2019.

La figura mostra il funzionamento del compressore in funzione del valore dei Gradi Minuto, sull'asse verticale di destra sono riportati i valori dei Gradi Minuto, mentre su quello di sinistra le frequenze di rotazione del compressore. È possibile osservare un andamento di tipo ciclico, infatti si nota che

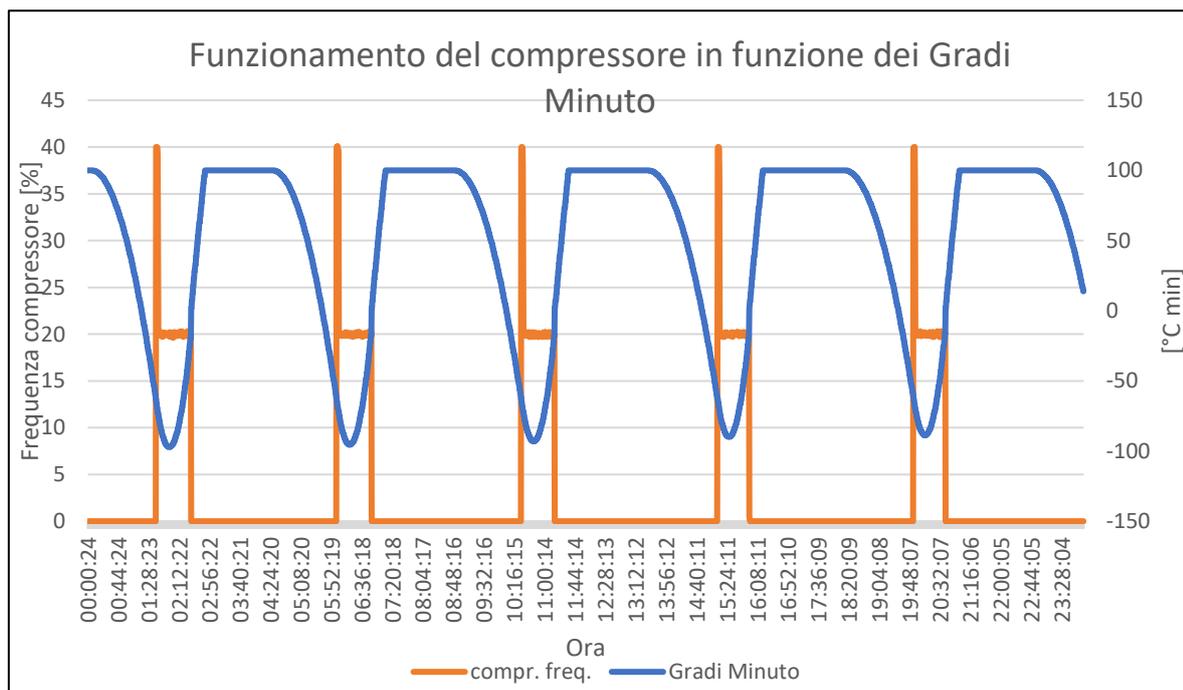


Figura 28: Funzionamento compressore in funzione dei gradi minuto durante la prova di riscaldamento.

appena il valore della cumulata dei DM scende sotto i $100\text{ }^{\circ}\text{C min}$ si attiva il compressore fino a quando viene raggiunto nuovamente tale valore.

Prova di Raffrescamento

Per la prova di raffrescamento è stato preso in analisi il periodo che va dalle ore 11:52 del 16 giugno 2020, momento di accensione del compressore della pompa di calore, alle ore 09:47:39 del 26 giugno 2020 quando il compressore si spegne. La figura seguente mostra la disposizione dei sensori di temperatura precedentemente descritti rispetto alle componenti della pompa di calore.

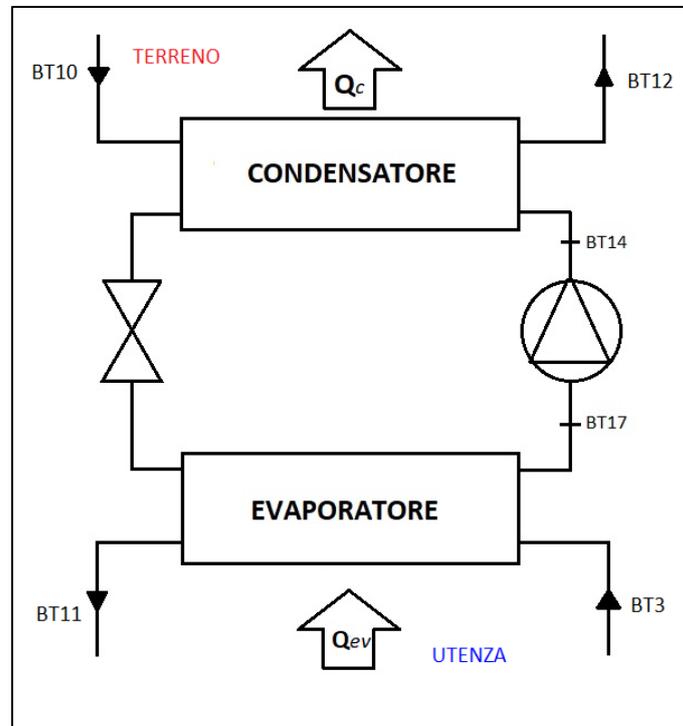


Figura 29: Pompa di calore in assetto estivo

Il condensatore cede calore al terreno attraverso lo scambio di calore con il circuito primario, mentre l'evaporatore assorbe calore dal fluido raffrescante del circuito secondario che raffresca l'ambiente interno.

Calcolo dei COP

In assetto di raffrescamento il COP (o EER, *Energy Efficiency Ratio*) è dato dal rapporto:

$$COP = \frac{Q_{ev}}{L_i} = \frac{q_{ev_R407C}}{l_{i_R407C}} \quad (2)$$

Si vuole quindi quantificare queste grandezze, e poiché non si conosce il valore di portata del fluido refrigerante all'interno della pompa di calore si è scelto di proseguire lasciando il rapporto sotto forma di potenze. Gli elementi interessati da queste grandezze sono l'evaporatore, in cui avviene lo scambio q_{ev_R407C} e il compressore per il cui funzionamento occorre fornire l_{i_R407C} . Per quel riguarda il compressore e il lavoro si hanno già a disposizione tutti i dati per poter utilizzare il primo principio applicato ai sistemi aperti. Trascurando le perdite di calore e andando ad approssimare il compressore come un sistema adiabatico, si può considerare che il compressore lavori solo sulla pressione e la temperatura del fluido, mantenendone invariata la velocità, infine siccome la macchina non si muove durante il suo funzionamento, anche la differenza di energia gravitazionale può considerarsi nulla. Quindi:

$$l_{i,R407C} = c_{p,R407C} \cdot (T_{BT14} - T_{BT17}) \quad (3)$$

È importante effettuare un controllo sulle temperature del sensore BT17, perché osservando i dati disponibili e confrontandoli con il diagramma ($\log(p) - h$) si vede come alcuni punti di funzionamento all'ingresso del compressore (determinati da temperature e pressione) siano all'interno della curva limite. Questo significa che, per lo meno in un tratto della trasformazione, il compressore potrebbe ritrovarsi a lavorare con del fluido in parte liquido, anziché totalmente gassoso, il che causerebbe malfunzionamenti o disservizi. Questo fatto dipende dall'ipotesi di pressione costante, obbligatoria per mancanza di dati, ma che inevitabilmente porta ad avere delle criticità. Il reale funzionamento del compressore avrebbe un transitorio iniziale, durante il quale la pressione crescerebbe gradualmente, permettendogli di lavorare sempre con del fluido totalmente gassoso. Detto ciò attraverso la pressione del ramo a bassa pressione si determina il punto sulla curva limite superiore al quale corrisponderà una temperatura T_{satBP} . A questo punto se $T_{BT17} > T_{satBP}$ allora sicuramente il compressore lavorerà con fluido completamente gassoso. Tutti i punti che non rispettano tale condizione dal calcolo di $l_{i,R407C}$ e quindi del COP. Allo stesso modo sarà necessario effettuare un controllo anche sulla temperatura rilevata dal sensore BT14: si applica la stessa procedura seguita sul ramo di bassa pressione. Si considera la pressione del ramo di alta pressione, sul diagramma ($\log(p) - h$) si legge la temperatura (T_{satAP}) del punto all'intersezione fra l'isobara e la curva di saturazione e, se $T_{BT14} > T_{satAP}$ allora significa che il compressore lavora anche in questo caso con fluido completamente gassoso. Ancora una volta i punti di funzionamento rilevati dai sensori, le cui temperature non rispettano tale disequaglianza, non dovranno essere considerati nel calcolo di $l_{i,R407C}$ e del COP.

Si passa poi a considerare l'evaporatore, in cui avviene uno scambio di calore $q_{ev,R407C}$. Nell'evaporatore si verifica una trasformazione di stato, per cui bisogna necessariamente lavorare con le entalpie:

$$q_{ev,R407C} = h_{sat,liq} - h_{BT17} \quad (4)$$

L'entalpia di inizio trasformazione ($h_{sat,liq}$), all'ingresso dell'evaporatore, corrisponde all'entalpia di fine condensazione considerata isoentalpica la valvola di laminazione; il valore costante è ricavato dal punto di intersezione tra l'isobara di alta pressione e la curva di saturazione inferiore. L'entalpia del punto in uscita dall'evaporatore invece si trova attraverso il diagramma ($\log(p) - h$), in funzione di temperatura e pressione. Non avendo a disposizione software che permettessero una valutazione puntuale di questa entalpia per tutte le misurazioni effettuate ogni 30s dalla centralina Nibe, si è dovuto procedere in un modo differente. Sono stati individuati casualmente dei punti di funzionamento, dei quali è stata valutata manualmente, tramite lo strumento "Refrigerant Calculator" del software Coolpack, attraverso il diagramma ($\log(p) - h$). sfruttando una interpolazione lineare si sono poi ottenuti tutti i valori di entalpie degli altri punti, in maniera automatizzata attraverso i fogli di calcolo. Infine, facendo dei controlli a campione, si è visto che il metodo seguito ha portato ad avere valori di entalpie che si discostano molto poco da quelli reali, quindi valori pienamente accettabili per procedere con l'analisi. In conclusione, è stato calcolato il COP come rapporto tra calore scambiato e lavoro per tutti quei punti in cui il compressore era acceso e per tutti quei punti che rispettassero i controlli sulle temperature descritti precedentemente.

Calcolo delle potenze

Anche per il calcolo delle potenze valgono le stesse affermazioni fatte per il COP: vengono esclusi i punti di funzionamento che comportano la presenza di fluido allo stato liquido all'interno del compressore e i calcoli vengono effettuati solo per i punti di lavoro durante i quali il compressore è acceso. Sarebbe inutile calcolare i valori di potenza termica scambiata mentre il compressore è spento, perché la portata di refrigerante è in quella determinata situazione sarebbe nulla. In questa parte di analisi entra in gioco il valore di portata misurata attraverso i flussimetri. L'unico circuito di cui si conosce la portata è il circuito primario, di cui sono note sia la temperatura di ingresso che quella di uscita, per questo motivo il calcolo delle potenze deve partire dal condensatore. Il calore scambiato sarà:

$$Q_c = \dot{m}_{glic} \cdot c_{p_{glic}} \cdot (T_{BT12} - T_{BT10}) = \dot{m}_{glic} \cdot q_c \quad (5)$$

Senza considerare particolari perdite energetiche, si può affermare che il calore Q_c assorbito dal glicole, è lo stesso che verrà assorbito dal refrigerante R407C. Sfruttando il bilancio delle potenze sarà possibile calcolare la portata di refrigerante nel circuito interno alla pompa di calore:

$$Q_{ev} + L_i = Q_c \quad (6)$$

Esplicitando

$$\dot{m}_{R407C} \cdot q_{ev_{R407C}} + \dot{m}_{R407C} \cdot l_{i_{R407C}} = \dot{m}_{glic} \cdot q_c \quad (7)$$

Ricavo

$$\dot{m}_{R407C} = \frac{\dot{m}_{glic} \cdot q_c}{(q_{ev_{R407C}} + l_{i_{R407C}})} \quad (8)$$

Impostando l'uguaglianza sul Q_{ev} fra il calore assorbito dal refrigerante e quello ceduto dal fluido riscaldante si può facilmente trovare anche la portata di acqua nel circuito secondario, che risulta costante (come ci si aspettava dato che la pompa GP1 ha funzionamento costante).

$$Q_{ev} = \dot{m}_{R407C} \cdot q_{ev_{R407C}} = \dot{m}_{acqua} \cdot c_{p_{acqua}} \cdot (T_{BT3} - T_{BT11}) \quad (9)$$

Da cui ricavo

$$\dot{m}_{acqua} = \frac{Q_{ev}}{c_{p_{acqua}} \cdot (T_{BT3} - T_{BT11})} \quad (10)$$

Coolpack

Coolpack è un software per frigoristi realizzato dal dipartimento di ingegneria energetica dell'Università di Danimarca, in cui sono presenti differenti tools utili alla progettazione o al controllo di frigoriferi, condizionatori, pompe di calore, tutto ciò che funziona per mezzo di un fluido refrigerante, ad esempio un R407C come in questo caso studio. Per questa analisi sono stati usati il tool "Refrigerant Calculator", che permette di conoscere le grandezze caratteristiche di un punto sul diagramma ($\log(p) - h$) avendo note ad esempio temperatura e pressione, "Refrigerant Utilities", con la funzione di disegnare cicli sui diagrammi ($\log(p) - h$), "Heat transfert fluids calculator", con il quale si possono calcolare le caratteristiche del fluido del circuito primario quali ad esempio la densità, coefficienti di scambio termico o altre, "Cycle analysis", con cui è stato possibile analizzare le grandezze energetiche e le efficienze di un ciclo termodinamico. Il Refrigerant Calculator è stato fondamentale nell'analisi dei COP per identificare le entalpie notevoli, su cui costruire l'interpolazione lineare, i c_p per la trasformazione che avviene nel compressore e i valori dei punti posti sulle curve limite. Si è utilizzato l'Heat transfert fluids calculator per verificare che le caratteristiche del fluido primario (acqua-glicole) rimanessero effettivamente costanti nel range di utilizzo. Attraverso il Cycle Analysis è stato possibile il confronto delle potenze calorifiche e delle potenze elettriche calcolate su Excel, con le grandezze calcolate dal programma stesso. Il tool offre varie possibilità di inserimento dati, nel nostro caso studio sono state inserite le grandezze di portata in massa del fluido refrigerante, potenza elettrica necessaria al compressore, temperatura di ingresso e uscita dal compressore. Avendo i dati puntuali dalle misurazioni ogni 30 s è stato necessario effettuare la media giornaliera. Il programma calcola le potenze scambiate nel condensatore e nell'evaporatore, il COP e i vari rendimenti.

The screenshot displays the 'CYCLE SPECIFICATION' window of the Coolpack software. The interface is organized into several sections with input fields and calculated values:

- TEMPERATURE LEVELS:** T_E [°C]: 10,2; ΔT_{SH} [K]: 0; T_C [°C]: 41,8; ΔT_{SC} [K]: 0.
- PRESSURE LOSSES:** Δp_{SL} [K]: 0; Δp_{DL} [K]: 0.
- SUCTION GAS HEAT EXCHANGER:** No SGHX (dropdown); 0,00.
- REFRIGERANT:** R407C (dropdown).
- CYCLE CAPACITY:** Mass flow \dot{m} [kg/s]: 0,07041; \dot{Q}_E : 11,37 [kW]; \dot{Q}_C : 13,23 [kW]; \dot{m} : 0,07041 [kg/s]; \dot{V}_s : 9,61 [m³/h].
- COMPRESSOR PERFORMANCE:** Power consumption \dot{W} [kW]: 2,986; η_{IS} : 0,532 [-]; \dot{W} : 2,986 [kW].
- COMPRESSOR HEAT LOSS:** Discharge temperature T_2 [°C]: 54,45; f_Q : 38,6 [%]; T_2 : 54,5 [°C]; \dot{Q}_{LOSS} : 1,151 [kW].
- SUCTION LINE:** Outlet temperature T_1 [°C]: 10,6; \dot{Q}_{SL} : 21 [W]; T_8 : 10,6 [°C]; $\Delta T_{SH,SL}$: 0,3 [K].

At the bottom, a status bar shows calculated values: COP: 3,808 and COP*: 3,816. Navigation buttons include Calculate, Print, Help, Home, Auxiliary, and State Points.

Figura 30: Interfaccia Tool "Cycle Analysis" di Coolpack - Inserimento dati ciclo

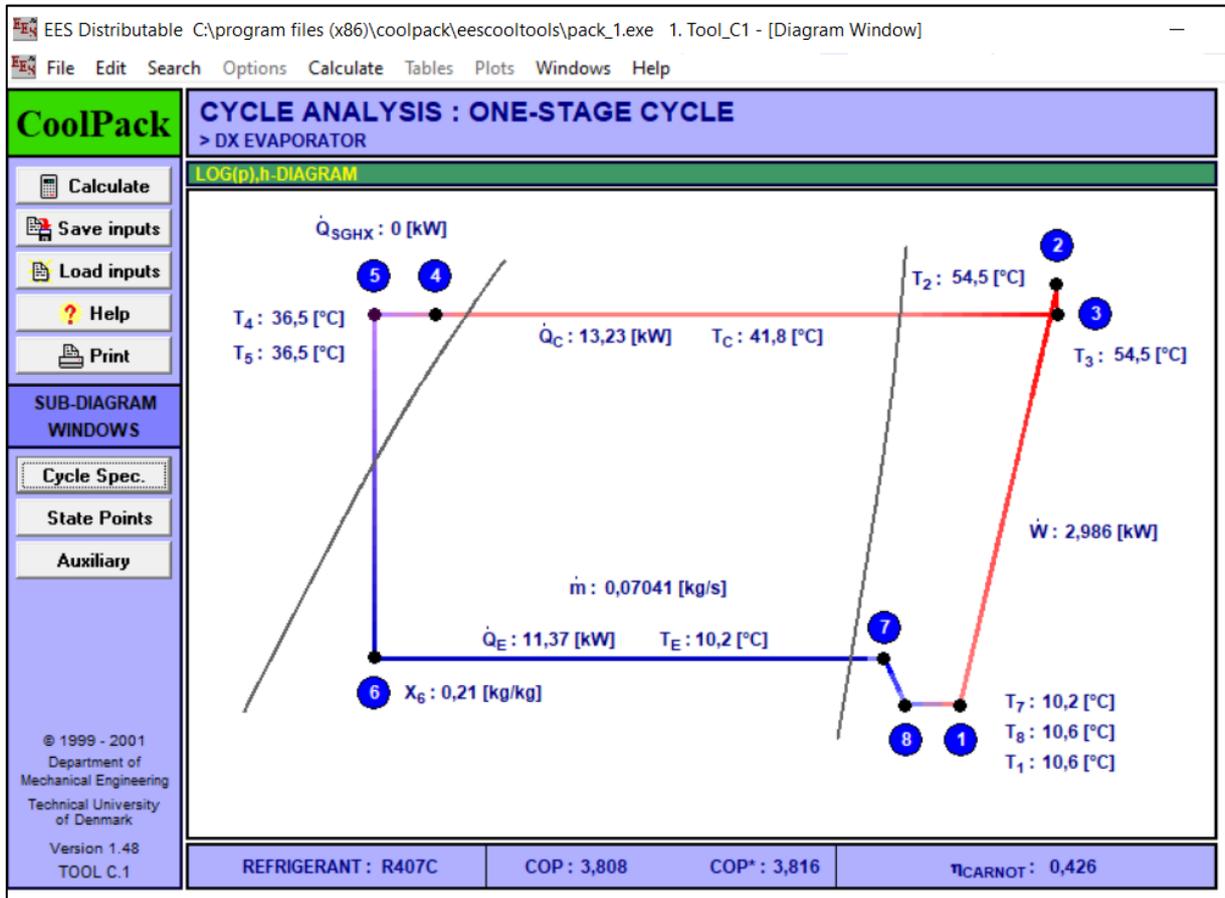


Figura 31: Interfaccia Tool "Cycle Analysis" di Coolpack - Risultati

Risultati

L'analisi viene effettuata per ogni giorno del periodo considerato, quindi le grandezze sono state opportunamente mediate: per la temperatura in ingresso ed in uscita dal compressore è stata effettuata la media aritmetica dei valori misurati ogni 1 min. Anche per i valori di potenza elettrica assorbita dal compressore, potenza termica scambiata al condensatore, potenza termica scambiata all'evaporatore, portata del refrigerante e COP sono stati calcolati i valori istantanei ed in seguito è stata calcolata la media aritmetica dei valori giornalieri. La tabella riporta, per la giornata del 18/06/2020, i valori di temperatura, potenza e portata che sono stati inseriti nel software Coolpack e quelli calcolati teoricamente da confrontare con l'output del programma.

		valori medi del 18/06					
		CONFRONTARE	Coolpack	scostamento	INSERITI IN COOLPACK		
	COP medio	4,139002	4,203	1,5%	T14 media	506,5939 [°C]	50,65939
QE	Pi, media [kW]	10,14373	10,31	1,6%	T17 media	105,5657 [°C]	10,55657
QC	Pf, media [kW]	11,51105	11,74	2,0%	m407 media	[kg/s]	0,063844
					Wi medio	[kW]	2,453269

Figura 32: Tabella con i valori inseriti e confrontati in Coolpack per la data del 18/06/2020.

La potenza QE è la potenza scambiata all'evaporatore, mentre la QC è quella scambiata al condensatore.

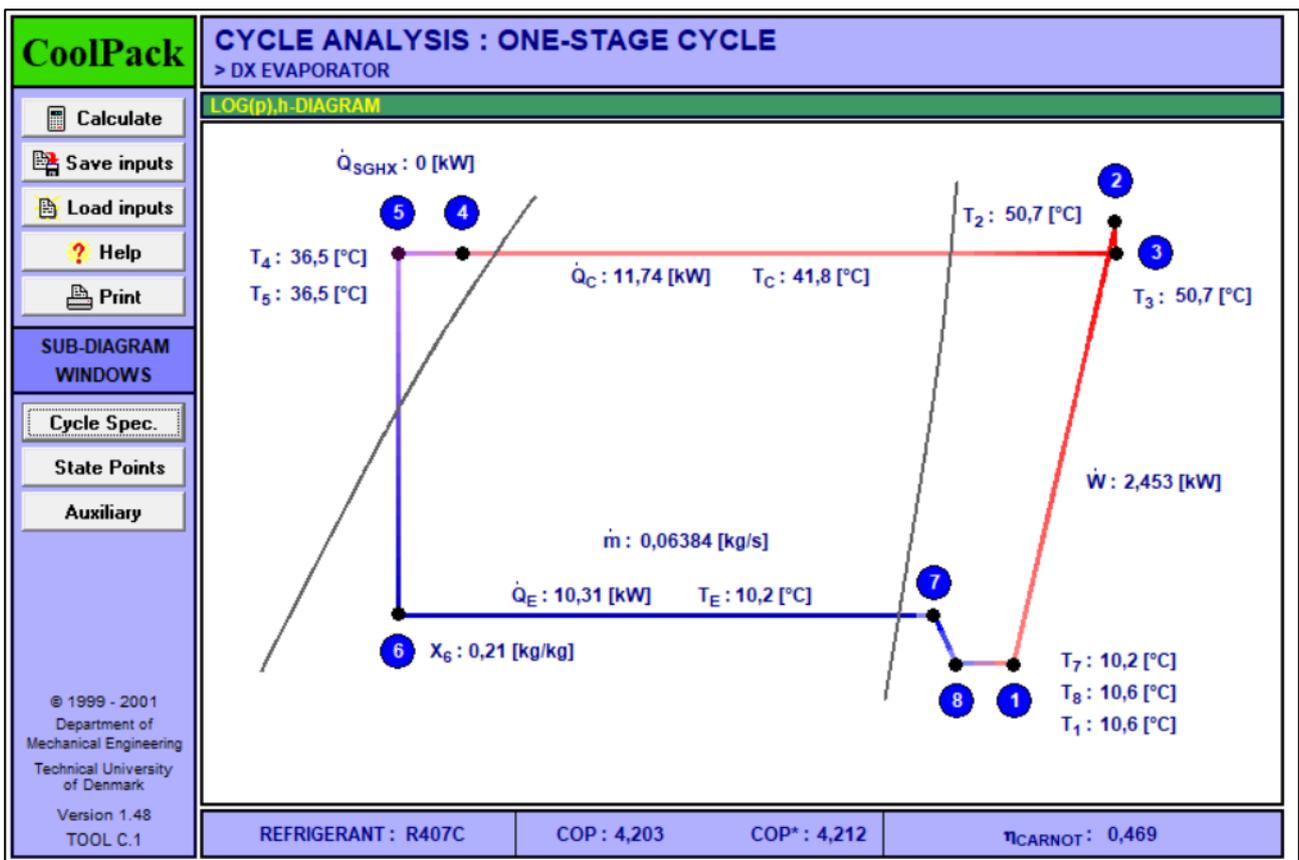


Figura 33: Simulazione del ciclo con i valori tipici del 18/06/2020.

Osservando nell'insieme i valori ottenuti dalla simulazione del software e dal calcolo teorico precedentemente descritto è possibile riassumere graficamente i valori di potenza calcolata e simulata ed i relativi scostamenti percentuali in valore assoluto.

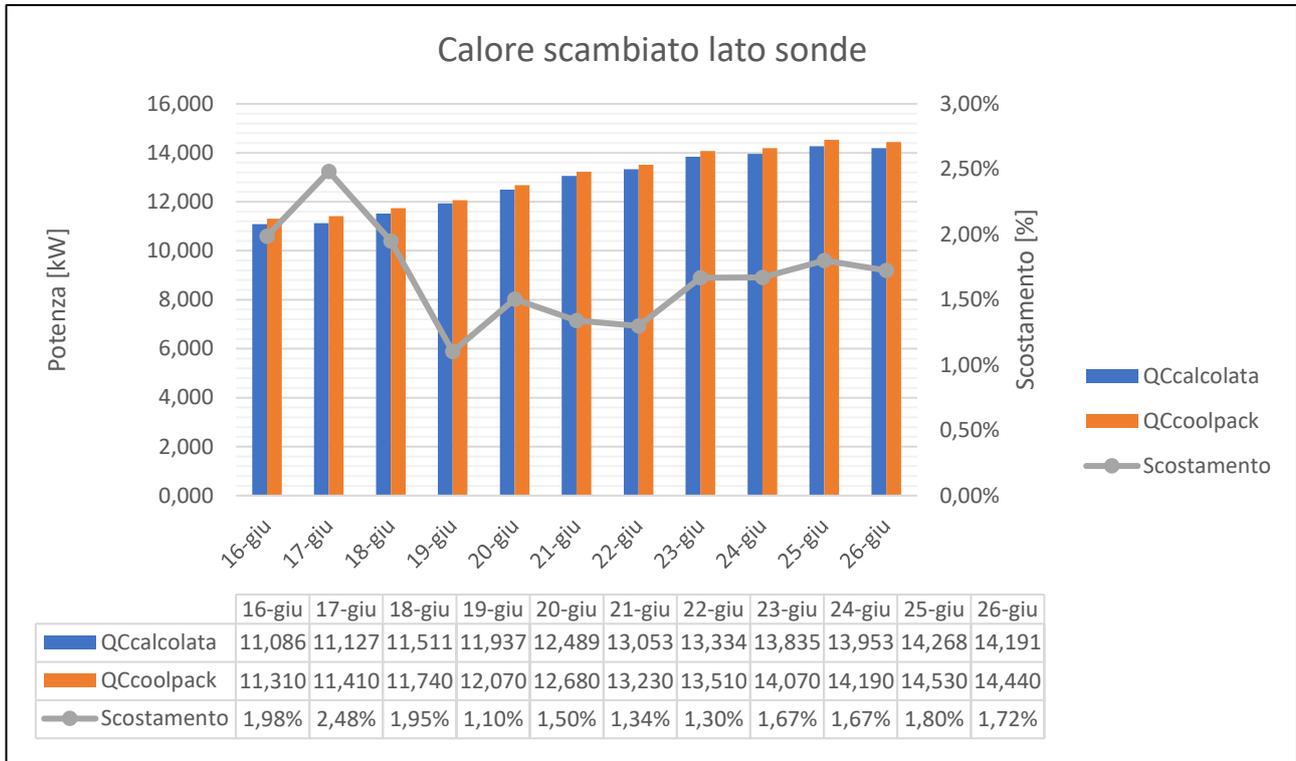


Figura 34: Confronto delle potenze scambiate lato sonde.

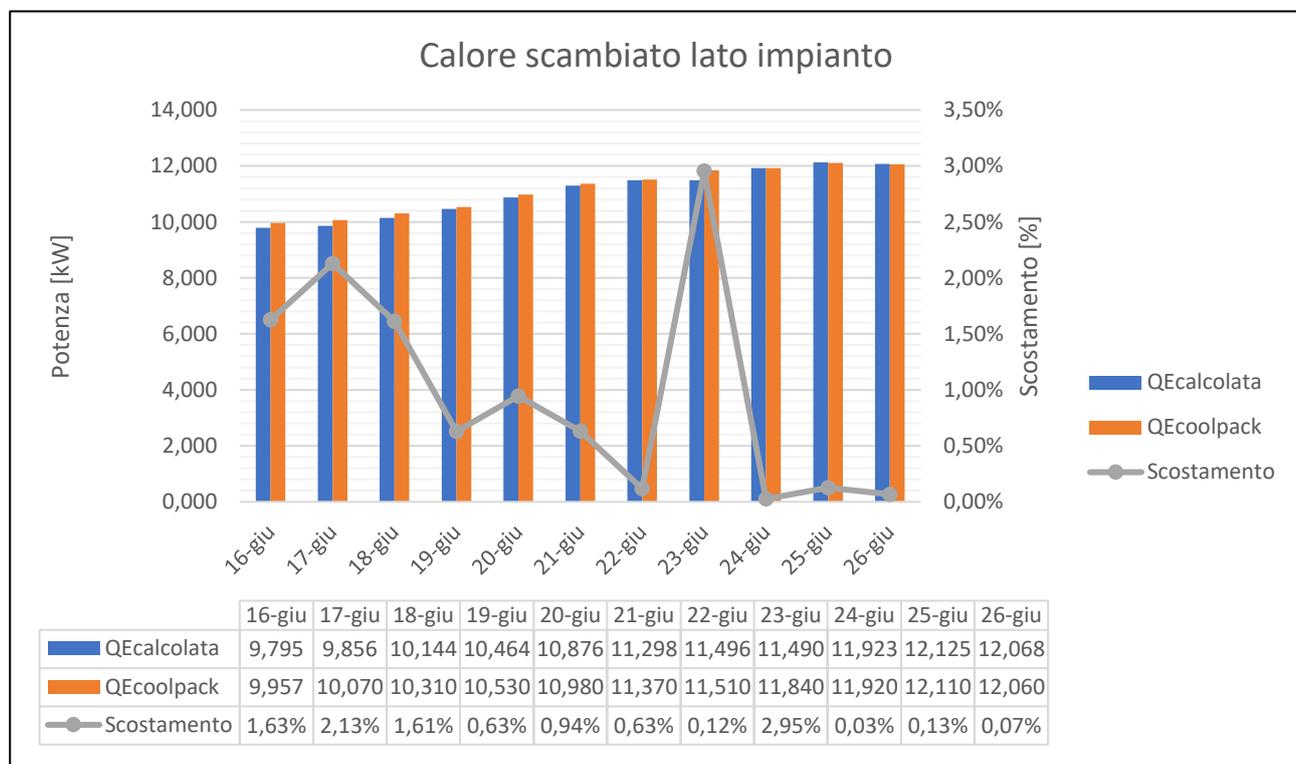


Figura 35: Confronto delle potenze scambiate lato impianto.

Prova di Riscaldamento

Per la prova di riscaldamento è stato preso in analisi il periodo che va dalle ore 11:24 del 24 ottobre 2019, momento di accensione del compressore della pompa di calore, alle ore 14:32 del 31 ottobre 2019 quando il compressore si spegne. La figura seguente mostra la disposizione dei sensori di temperatura precedentemente descritti rispetto alle componenti della pompa di calore.

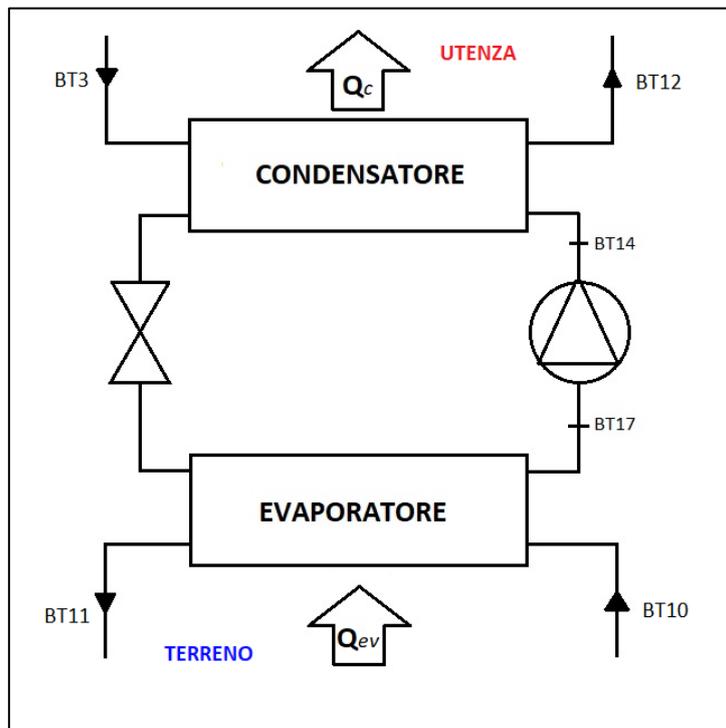


Figura 36: Pompa di calore in assetto invernale

L'evaporatore assorbe calore dal terreno attraverso lo scambio di calore con il circuito primario, mentre l'evaporatore cede calore al fluido raffrescante del circuito secondario che va a riscaldare l'ambiente interno.

Calcolo dei COP

In assetto di riscaldamento il COP è dato dal rapporto:

$$COP = \frac{Q_c}{L_i} = \frac{q_{c_R407C}}{l_{i_R407C}} \quad (11)$$

Analogamente al caso del raffrescamento si vogliono valutare queste grandezze. Gli elementi interessati il condensatore, in cui avviene lo scambio q_{c_R407C} e il compressore per il cui funzionamento occorre fornire l_{i_R407C} . Per quel riguarda il compressore e il lavoro si hanno già a disposizione tutti i dati per poter utilizzare il primo principio applicato ai sistemi aperti. Quindi:

$$l_{i_R407C} = c_{p_R407C} \cdot (T_{BT14} - T_{BT17}) \quad (12)$$

Sono stati effettuati i controlli sui sensori di temperatura, al fine di garantire che nel compressore circoli fluido completamente allo stato gassoso. Dovranno essere verificate le condizioni $T_{BT17} > T_{satBP}$ e $T_{BT14} > T_{satAP}$ tutti i punti che non rispettano tale condizione saranno esclusi dal calcolo di l_{i_R407C} e quindi del COP.

Si passa poi a considerare il condensatore, in cui avviene uno scambio di calore $q_{c,R407C}$. Nell'evaporatore si verifica una trasformazione di stato, per cui bisogna necessariamente lavorare con le entalpie:

$$q_{c,R407C} = h_{BT14} - h_{sat,liq} \quad (13)$$

L'entalpia di fine trasformazione ($h_{sat,liq}$), all'uscita del condensatore, corrisponde a quella del punto di intersezione tra l'isobara di alta pressione e la curva di saturazione inferiore. L'entalpia del punto all'ingresso del condensatore invece si trova attraverso il diagramma ($\log(p) - h$), in funzione di temperatura e pressione. Non avendo a disposizione software che permettessero una valutazione puntuale di questa entalpia per tutte le misurazioni effettuate ogni 30s dalla centralina Nibe, si è dovuto procedere analogamente alla prova di raffrescamento cioè individuando manualmente i punti per poi sfruttare un'interpolazione lineare. Il COP è stato calcolato come rapporto tra calore scambiato e lavoro per tutti quei punti in cui il compressore era acceso e per tutti quei punti che rispettassero i controlli sulle temperature descritti precedentemente.

Calcolo delle potenze

Anche per il calcolo delle potenze valgono le stesse affermazioni fatte per il COP: vengono esclusi i punti di funzionamento che comportano la presenza di fluido allo stato liquido all'interno del compressore e i calcoli vengono effettuati solo per i punti di lavoro durante i quali il compressore è acceso. In questa parte di analisi entra in gioco il valore di portata misurata attraverso i flussimetri. L'unico circuito di cui si conosce la portata è il circuito primario, di cui sono note sia la temperatura di ingresso che quella di uscita, per questo motivo il calcolo delle potenze deve partire dall'evaporatore. Il calore scambiato sarà:

$$Q_{ev} = \dot{m}_{glic} \cdot c_{p,glic} \cdot (T_{BT10} - T_{BT11}) = \dot{m}_{glic} \cdot q_{ev} \quad (14)$$

Senza considerare particolari perdite energetiche, si può affermare che il calore Q_{ev} ceduto dal glicole, è lo stesso che verrà assorbito dal refrigerante R407C. Sfruttando il bilancio delle potenze sarà possibile calcolare la portata di refrigerante nel circuito interno alla pompa di calore:

$$Q_{ev} + L_i = Q_c \quad (15)$$

Esplicitando

$$\dot{m}_{glic} \cdot q_{ev} + \dot{m}_{R407C} \cdot l_{i,R407C} = \dot{m}_{R407C} \cdot q_{c,R407C} \quad (16)$$

Ricavo

$$\dot{m}_{R407C} = \frac{\dot{m}_{glic} \cdot q_{ev}}{(q_{c,R407C} - l_{i,R407C})} \quad (17)$$

Impostando l'uguaglianza sul Q_c fra il calore ceduto dal refrigerante e quello assorbito dal fluido riscaldante si può facilmente trovare anche la portata di acqua nel circuito secondario, che risulta costante (come ci si aspettava dato che la pompa GP1 ha funzionamento costante).

$$Q_c = \dot{m}_{R407C} \cdot q_{c,R407C} = \dot{m}_{acqua} \cdot c_{p,acqua} \cdot (T_{BT12} - T_{BT3}) \quad (18)$$

Da cui ricavo

$$\dot{m}_{acqua} = \frac{Q_c}{c_{p_acqua} \cdot (T_{BT12} - T_{BT3})} \quad (19)$$

Risultati

Analogamente alla prova di raffreddamento anche per la prova di riscaldamento l'analisi viene effettuata per ogni giorno del periodo considerato e di conseguenza tutte le grandezze sono state opportunamente mediate. La tabella riporta, per la giornata del 28/10/2019, i valori di temperatura, potenza e portata che sono stati inseriti nel software Coolpack e quelli calcolati teoricamente da confrontare con l'output del programma.

		valori del 28/10/19						
CONFRONTARE		Coolpack		scostamento	INSERITI IN COOLPACK			
	COP medio	4,77	3,835	19,6%	T14 media	640,3708 [°C]	64,03708	
QC	Pi,media [kW]	1,961566	1,959	0,1%	T17media	205,25 [°C]	20,525	
QE	Pf,media [kW]	1,539515	1,615	4,9%	m407 media	[kg/s]	0,009911	
					Wi medio	[kW]	0,42108	

Figura 37: Tabella con i valori inseriti e confrontati in Coolpack per la data del 28/10/2019.

La potenza QE è la potenza scambiata all'evaporatore, mentre la QC è quella scambiata al condensatore.

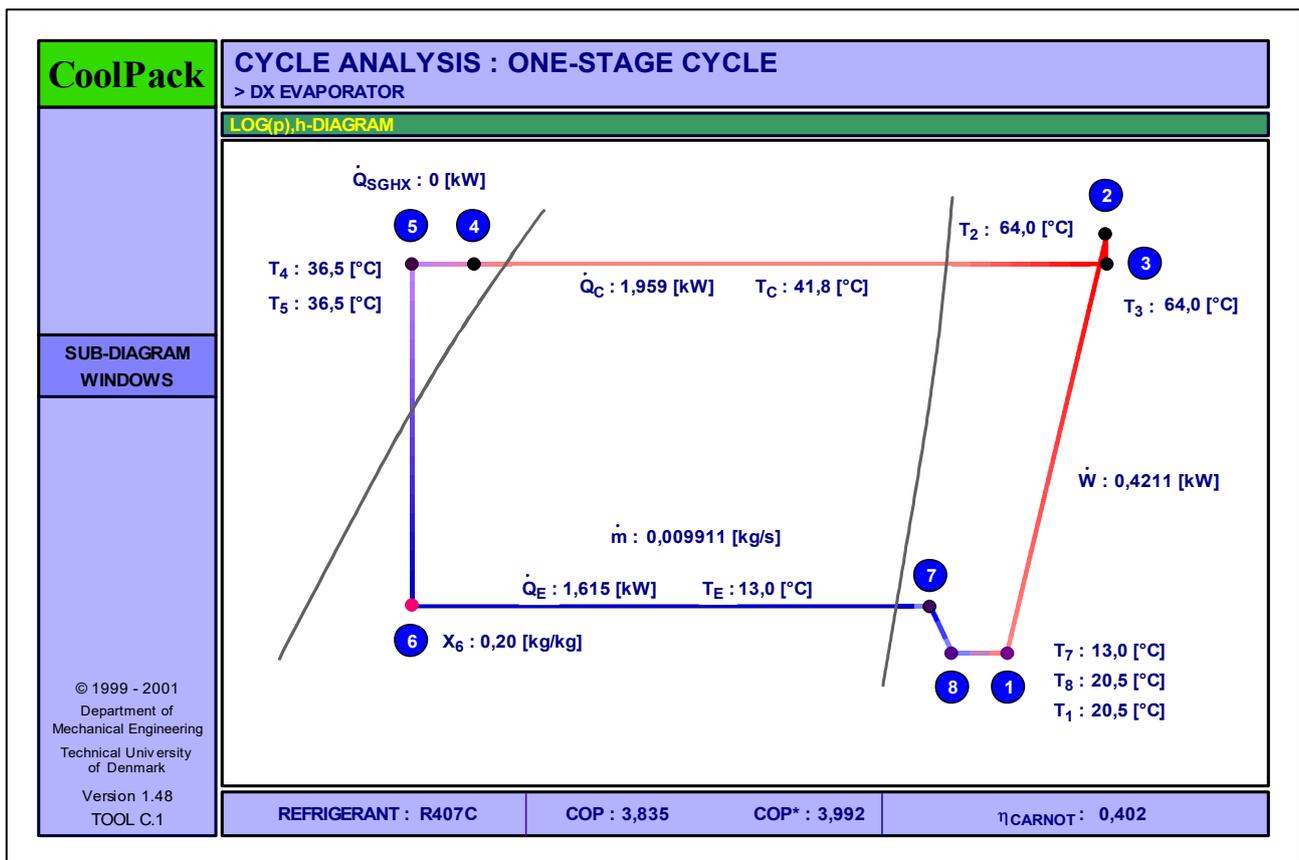


Figura 38: Simulazione del ciclo con i valori tipici del 28/10/2019.

Osservando nell'insieme i valori ottenuti dalla simulazione del software e dal calcolo teorico precedentemente descritto è possibile riassumere graficamente i valori di potenza calcolata e simulata ed i relativi scostamenti percentuali in valore assoluto.

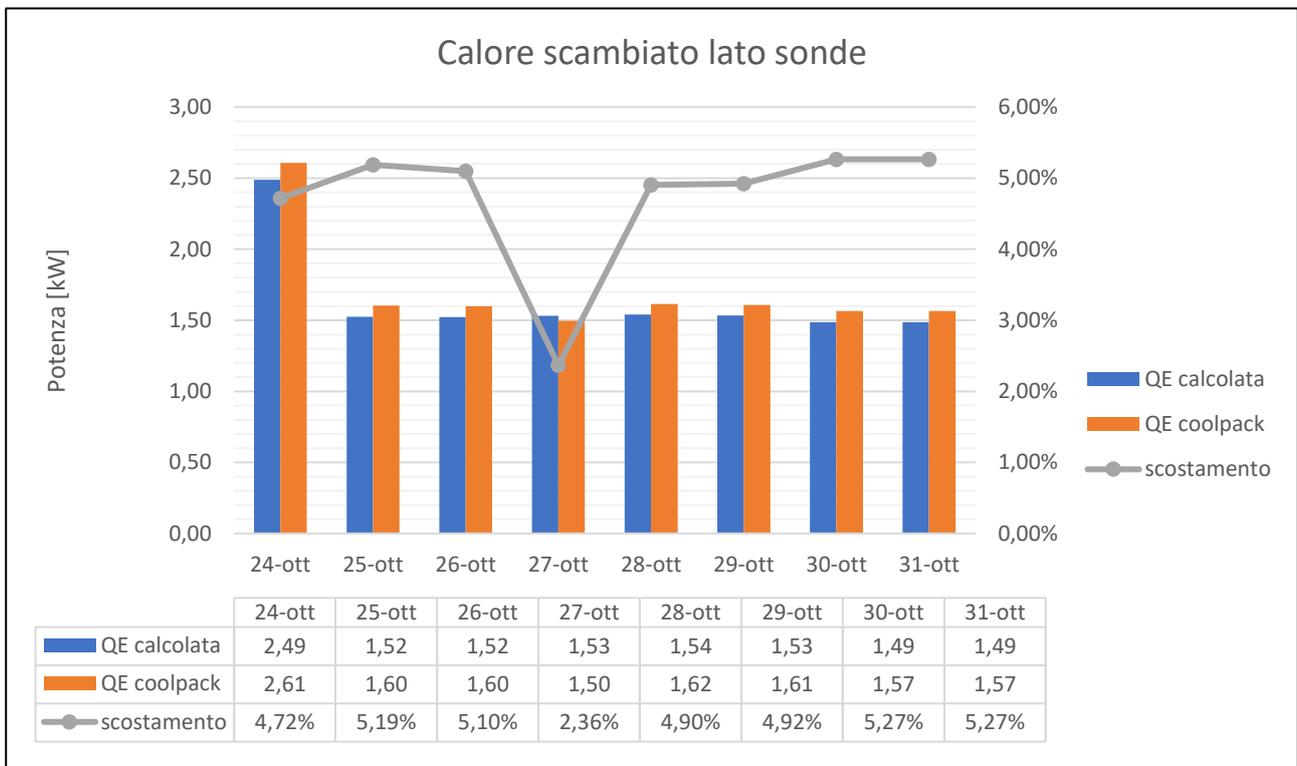


Figura 39: Confronto delle potenze scambiate lato sonde.

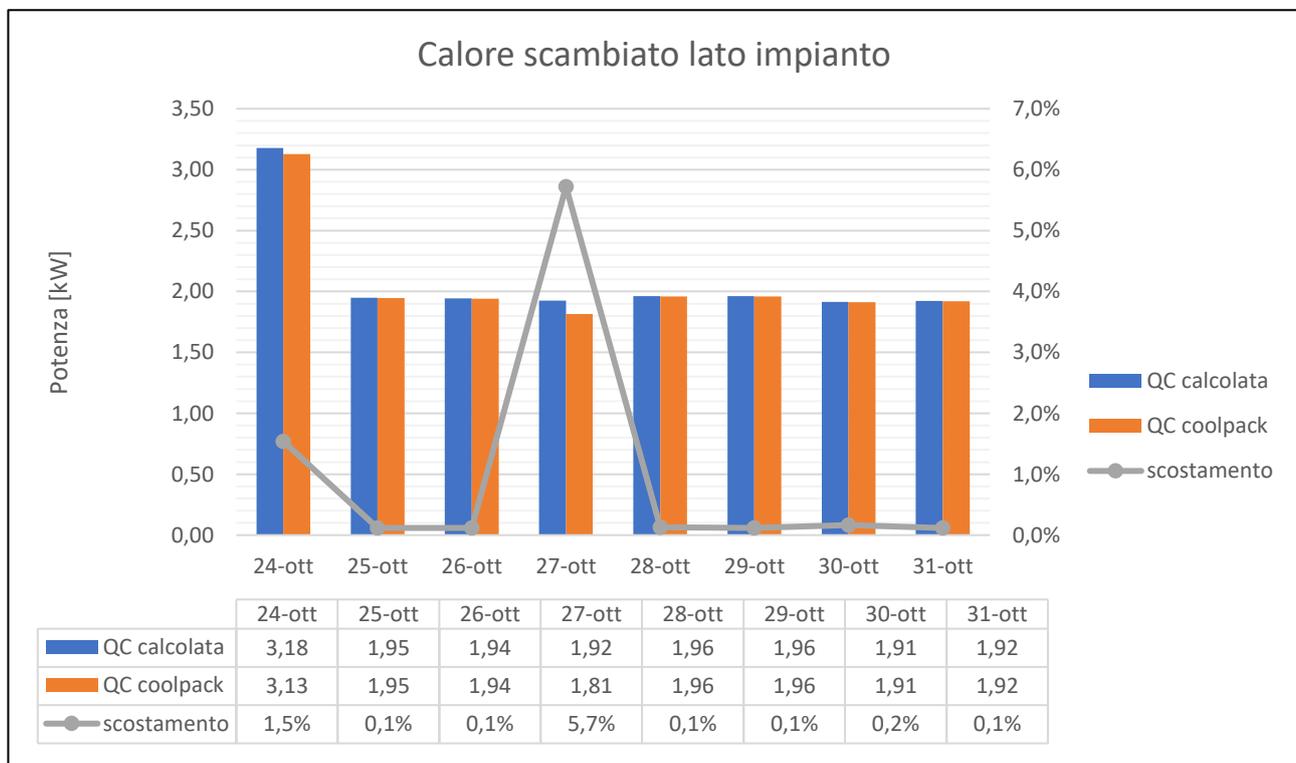


Figura 40: Confronto delle potenze scambiate lato impianto.

Il confronto tra i valori calcolati teoricamente e quelli ottenuti dalla simulazione è stato fatto anche per il COP.

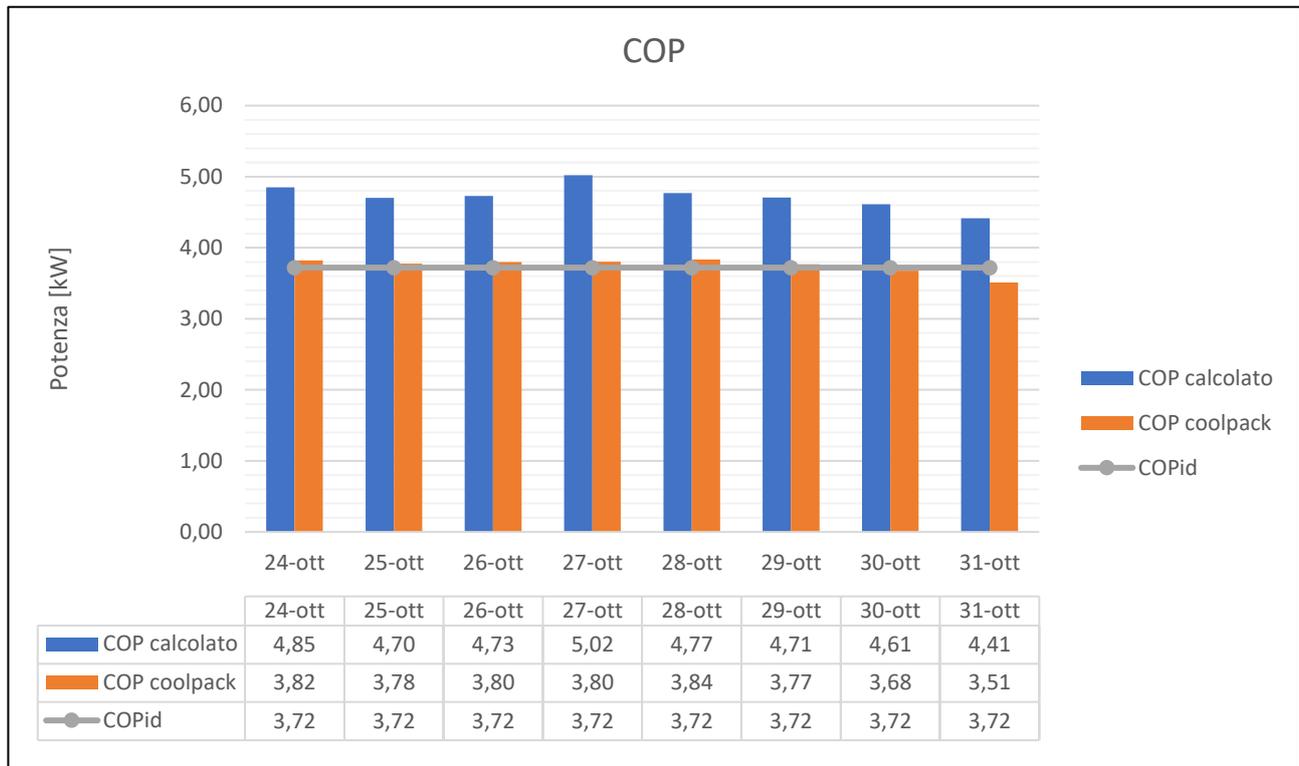


Figura 41: Confronto dei valori di COP.

Osservando il grafico si nota che il valore di COP simulato è minore del valore calcolato teoricamente, inoltre se si considera il valore ideale riportato nel *Manuale della pompa di calore Nibe F1155* (linea in grigio) questo valore si interpone quasi sempre tra gli altri due.

Analisi Economica di massima

Un sistema geotermico necessita di un'accurata fase di progettazione, infatti lo studio preliminare del terreno sul quale si ha intenzione di realizzare l'impianto è fondamentale. L'ideale sarebbe ottenere un sistema che estragga la massima quantità di energia possibile dal terreno, che mantenga bassi i consumi di energia elettrica del compressore e delle pompe di circolazione e che abbia un costo iniziale contenuto. Il vero tallone d'Achille della scelta di un impianto geotermico è rappresentato dall'investimento iniziale, questo infatti è di molto superiore alle quote dei costi di gestione e mantenimento. Una fetta importante della spesa iniziale è rappresentata dai costi per lo studio di fattibilità che dipende dalle proprietà termiche del terreno come ad esempio

- porosità equivalente del terreno;
- temperatura media del terreno indisturbato;
- capacità termica equivalente del terreno;
- conduttività termica equivalente del terreno.

I valori che esprimono le suddette proprietà del terreno spesso vengono soltanto stimate in quanto derivano da prove effettuate in sito, come ad esempio il Test di Risposta Termica e la misura del profilo termico lungo sonda verticale. I dati ottenuti attraverso queste prove sono relativi ad uno specifico punto del terreno, ma vengono poi presi come riferimento per tutto il campo geotermico; la natura variabile delle caratteristiche fisiche nei diversi strati del terreno causa l'incertezza nei risultati fondamentali per la progettazione.

Valutazione economica dell'investimento

La valutazione economica di un investimento geotermico si basa su due aspetti fondamentali:

1. l'investimento iniziale;
2. i costi di esercizio.

L'incertezza nella scelta dei parametri di progettazione si ripercuote anche sull'aspetto economico poiché tutte le considerazioni su efficienza e i relativi consumi vengono fatte sulla base di un impianto che con buona probabilità dovrebbe lavorare in certe condizioni. L'investimento iniziale, che rappresenta la maggiore quota parte del costo dell'impianto, comprende il costo della pompa di calore, della posa delle sonde geotermiche e di tutti gli impianti di trasmissione necessari. Nel caso di nuove costruzioni tra i costi iniziali vanno inseriti anche le spese per la realizzazione degli impianti di condizionamento dell'edificio. Per sfruttare al meglio un sistema geotermico è indispensabile utilizzare soluzioni che sfruttano modeste differenze di temperatura per riscaldare e raffrescare gli ambienti: molto utilizzati sono i pannelli radianti a soffitto, i ventilconvettori ed i sistemi di riscaldamento a pavimento. Data la vasta gamma di tecnologie presenti sul mercato la quota dell'investimento iniziale legata al sistema di captazione geotermica rende il costo totale variabile. La scelta della tecnologia da utilizzare sarà la sintesi delle valutazioni energetiche relative al fabbisogno dell'edificio, economiche legate al costo dello scavo piuttosto che al costo delle serpentine ed ambientali connesse alla tipologia di terreno, alla superficie disponibile ed alla normativa vigente. I costi di esercizio sono principalmente costituiti dai consumi elettrici e dalla manutenzione ordinaria e straordinaria. Il compressore della pompa di calore e le pompe che permettono la circolazione dei fluidi ai diversi livelli del sistema consumano energia elettrica. Nel caso in esame della pompa di calore Nibe F1155 installata presso l'Energy Center, utilizzata principalmente per la ricerca e l'analisi

dei dati, è stata installata a posteriori rispetto alla realizzazione dell'edificio, quindi i costi affrontati per posa delle serpentine è stato maggiore in quanto è stato necessario effettuare lo scavo da zero; il costo calcolato è pari a 35€ per metro quadrato attrezzato quindi circa 420€ per ciascun modulo di larghezza 2,50m per un totale di 1260€. Le serpentine si trovano ad una profondità piuttosto modesta, poco sotto il livello strada, di conseguenza le temperature sono notevolmente influenzate dalle condizioni atmosferiche. Per una pompa di calore di taglia simile alla Nibe F1155 (6kW), nel caso in cui si opterebbe per un sistema a circuito chiuso verticale, sarebbe necessario una sonda geotermica di circa 90m di profondità. Considerando un costo di 45€-65€ per metro lineare di perforazione ai quali vanno aggiunti altri 6,50€ per metro lineare per la posa e la cementazione si raggiungerebbe un costo di 4635 €-6435€. I costi di esercizio, con buona approssimazione, possono essere assimilati all'energia elettrica utilizzata dal compressore e dalle pompe di circolazione al prezzo di circa 0,20 € al kWh.

La valutazione di un investimento può essere condotta seguendo varie tecniche: quella comunemente più utilizzata è la metodologia del Valore Attuale Netto (VAN). Altri metodi utilizzati sono il Tasso Interno di Rendimento (IRR o TIR), Indice di profittabilità (IP) e il Periodo di Recupero (PB). Il metodo VAN prevede il calcolo del guadagno (o perdita) netto dell'investimento attraverso l'attualizzazione al tempo t_0 di tutti i flussi di cassa in ingresso ed in uscita utilizzando un tasso di rendimento adeguato. Il VAN è definito tramite la formula:

$$VAN = -K_0 + \sum_{j=1}^n \frac{K_j}{(1+i)^j} \quad (20)$$

dove K_0 rappresenta l'investimento iniziale, K_j il costo dell'anno j -esimo, i è il tasso di rendimento ed n è la durata della vita utile in anni.

Tipicamente il criterio di scelta della metodologia è quello di $VAN > 0$, infatti se vale questa condizione per il periodo di vita utile considerata significa che l'investimento darà un certo ritorno economico.

Nella maggior parte dei casi l'analisi economica viene condotta, tramite la metodologia VAN o altre, con l'obiettivo di effettuare una scelta tra diverse soluzioni tecnologiche, in particolare per confrontarne la convenienza. A tal fine è particolarmente interessante l'utilizzo del VAN differenziale espresso dalla formula:

$$VAN = -\Delta K_0 + \sum_{j=1}^n \frac{\Delta K_j}{(1+i)^j} \quad (21)$$

Dove il simbolo delta sta ad indicare la differenza di investimento iniziale (ΔK_0) e costi all'anno j -esimo (ΔK_j) delle due soluzioni tecnologiche oggetto del confronto.

Il tasso di rendimento è il costo del capitale, ovvero il tasso con cui l'investitore si aspetta un ritorno del capitale. Attraverso il calcolo del Valore Attuale Netto abbiamo la possibilità di valutare se un certo investimento rende più o meno rispetto ad un certo valore preso come soglia. Se il VAN è positivo, fissato una certa soglia di tasso di rendimento, significa che l'investimento avrà una resa

maggiore di tale valore. Per definire adeguatamente il valore soglia occorre un'accurata di tipo finanziario.

Viene definito TIR, Tasso interno di Rendimento, il valore di i per il quale il VAN risulta uguale a zero.

Esempio

Nell'esempio seguente è stata fatto un confronto tra due soluzioni tipo per la climatizzazione di un "Nuovo edificio residenziale superficie 150 m², classe energetica B".

La soluzione 1 prevede l'installazione di una pompa di calore accoppiata ad un impianto geotermico, nello specifico:

- 2 sonde da 80m;
- Pompa di calore da 7 kW;
- Ventilconvettori;
- Costo energia elettrica: 0,2 €/kWh.

I consumi stimati sono 2210 kWh_e per il riscaldamento e 269 kWh_e per il raffrescamento.

Investimento		Consumi e costi d'esercizio	
Impianto sonde	10.500 €	Costi riscaldamento	442 €/a
Collegamenti	1.200 €	Costi raffrescamento	54 €/a
Pompa di calore	4.500 €	Costo manutenzione	25 €/a
Collegamenti idraulici	2.300 €		
TOTALE	18.500 €	TOTALE	521 €/a

La soluzione 2 prevede l'installazione di un sistema con caldaia e gruppo frigorifero, nello specifico:

- Caldaia a gas da 20kW;
- Gruppo frigorifero da 7 kW;
- Ventilconvettori;
- Pannelli solari per il 50% di ACS;
- Costo gas: 0,78 €/m³.

I consumi stimati sono 982 m³ di gas per il riscaldamento e 807 kWh_e per il raffrescamento.

Investimento		Consumi e costi d'esercizio	
Caldaia a gas	2.500 €	Costi riscaldamento	766 €/a
Allacciamento gas	1.500 €	Costi raffrescamento	161 €/a
Gruppo frigo	2.000 €	Costo manutenzione	150 €/a
Pannelli solari	4.200 €		
Collegamenti idraulici	2.000 €		
TOTALE	12.200 €	TOTALE	1077 €/a

Riassumendo

	Soluzione 1	Soluzione 2	Differenza
Investimento	18.500 €	12.200 €	+6.300 €
Gestione	521 €/a	1077 €/a	-556 €/a

Si osserva che il sistema geotermico necessita di un investimento maggiore, ma comporta una spesa minore nella gestione.

Per avere una migliore visione è stata condotta un'analisi tramite il calcolo del VAN differenziale, nella quale ΔK_0 è la differenza tra gli investimenti iniziali e ΔK_j è la differenza tra i costi annuali di gestione e manutenzione. La tabella mostra il risultato finale dell'analisi.

	i=4%	i=TIR=6%
VAN	1.256 €	0

Considerato che la differenza tra gli investimenti iniziali è stata calcolata come $I_{0_soluzione1} - I_{0_soluzione2}$ con il meno della formula assume valore negativo, mentre la differenza di costo, calcolata come $C_{j_soluzione1} - C_{j_soluzione2}$, assume valore positivo. Quindi il metodo del VAN differenziale conferma l'idea che la soluzione con impianto geotermico sia più conveniente nella valutazione di 20 anni nonostante l'esborso iniziale maggiore.

Un ulteriore elemento utile da valutare potrebbe essere il Tempo di Recupero (PBT, Pay Back Time), ovvero il tempo necessario affinché ci sia il ritorno dell'investimento. È stato preso in considerazione il flusso di cassa differenziale: all'anno zero è stata conteggiata la differenza tra i due investimenti iniziali (valore negativo) e per ogni anno successivo è stata sommata la differenza tra i costi di gestione (valore positivo).

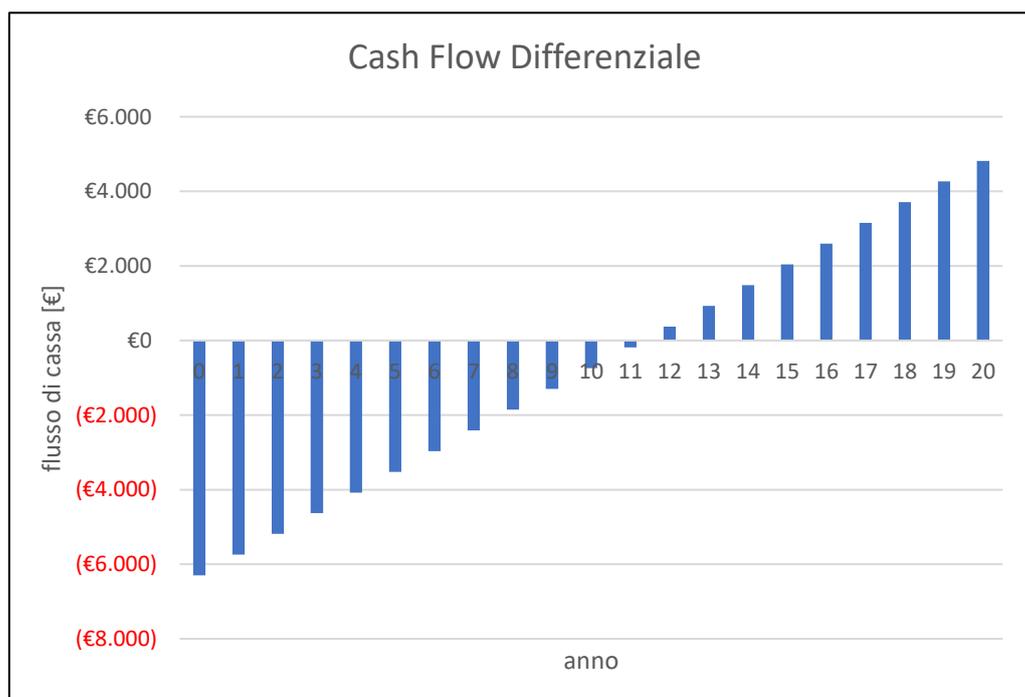


Figura 42: Flusso di cassa differenziale

Osservando il grafico che mostra l'andamento dei flussi di cassa si nota che a partire dal dodicesimo anno i flussi sono positivi, ciò significa che l'investimento iniziale è stato ripagato. È possibile stabilire che il tempo di ritorno dell'investimento (Pay Back Time, PBT) è compreso tra gli undici e i dodici anni.

In letteratura sono riportati valori tipici di Pay Back Time che variano tra 3 e 7 anni a seconda del luogo in cui vengono realizzati gli impianti geotermici per il condizionamento. Infatti, risultano essere meno convenienti in zone estremamente calde nelle quali il fabbisogno di riscaldamento è quasi nullo, mentre risultano estremamente convenienti in zone dal clima freddo dove è richiesta un'importante quota di energia termica per il riscaldamento invernale.

Riassumendo è possibile affermare che nella valutazione di un certo impianto, sistema, componente da un punto di vista economico ed energetico occorre:

1. definire un volume di controllo, input e output del sistema per sviluppare un modello;
2. definire le prestazioni energetiche del volume di controllo;
3. definire i costi di ciascun componente e di ogni flusso (energia o materia) in ingresso e in uscita dal volume di controllo;
4. Eseguire un'analisi del flusso di cassa;
5. Valutare come i fattori in ingresso (costo della tecnologia, costo dell'energia, incentivi, tempi di manutenzione, ecc.) condizionano il PBT dell'investimento ed il VAN alla fine della vita utile. Risulta essenziale un'analisi di sensitività.
6. Effettuare analisi comparative tra tecnologia competitiva tra loro.

Fondazioni energetiche

Una soluzione per ridurre i costi di installazione di scambiatori verticali potrebbe essere quella di utilizzare perforazioni già presenti, in quanto necessarie ad altri scopi, come ad esempio i pali di fondazione laddove la conformazione del terreno (terreno cedevole) ne impongono l'utilizzo. Tale soluzione tecnologica è conosciuta come “*pali energetici*”.

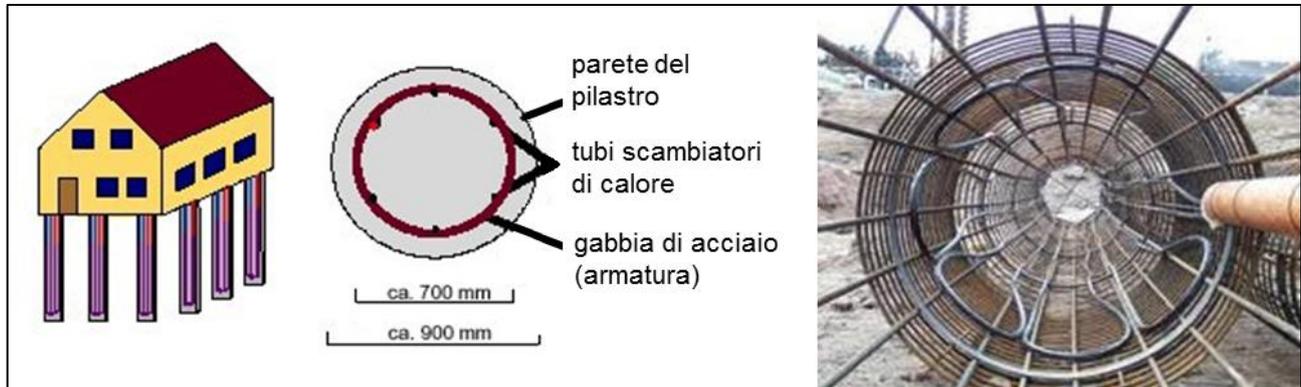


Figura 43: Schema fondazioni energetiche.

Come è possibile vedere in figura, il compito di scambiatore di calore terreno-fluido è assunto da tubazioni disposte all'interno degli stessi pali di fondazione. Il sistema di pali può essere realizzato tramite la posa di pali prefabbricati o pali gettati in loco. Tipicamente i pali hanno dei diametri compresi tra $0.4m$ e $1.5m$, mentre la loro lunghezza può variare da valori minori di un metro a lunghezze di $25-30m$, ciò dipende dalle necessità strutturali. I valori di energia termica fornita oscillano tra i 30 e i $50 W/m$.

Svantaggi

- devono essere concepiti in fase di progettazione;
- occorre effettuare i controlli di tipo geologico in maniera congiunta a quelli di tipo meccanico al fine di mantenere contenuti i costi;
- occorre mantenere le temperature del fluido che percorre le serpentine sempre superiori a quella di congelamento, per non compromettere la stabilità delle palificazioni nel terreno ad opera di ghiaccio superficiale.

Vantaggi

- si sviluppa in profondità, quindi richiede piccole estensioni di terreno;
- buone efficienze dovute alla stabilità delle temperature negli strati più profondi del sottosuolo;
- possibilità di realizzazione in quasi tutti i siti, adeguando le tecniche di perforazione;
- costi d'investimento inferiori rispetto alle sonde verticali classiche.

Conclusioni

L'analisi condotta fornisce gli strumenti per poter affermare che l'utilizzo di una pompa di calore accoppiata ad un sistema di captazione geotermico per il condizionamento di un edificio in ambito residenziale è più che adatto, in quanto il suo funzionamento non presenta anomalie in assetto di riscaldamento né in assetto di raffrescamento. Un ulteriore punto di forza di questo tipo di soluzione si può riscontrare nel livello di emissioni nocive per l'ambiente, infatti, al netto della fase di installazione e scavo, la macchina ha pressoché emissioni zero. Il fattore delle emissioni è molto importante da valutare se si considera l'applicazione di questa tecnologia nelle aree metropolitane, caratterizzate da un elevato tasso di inquinamento atmosferico. Tuttavia, l'aspetto economico ed in particolare l'elevato costo iniziale da sostenere è il principale deterrente alla diffusione di questa tecnologia; attraverso l'analisi economica si è cercato di mostrare che il ritorno economico sia maggiore di quello percepito.

Passando all'aspetto analitico dello studio relativo all'analisi energetica, occorre notare che alcune ipotesi, come ad esempio quella della costanza della pressione, si sono dimostrate vincolanti, una possibile miglioria per studi futuri potrebbe essere quella di dotare la pompa di calore di sensori di pressione sul circuito interno; con questo accorgimento si riuscirebbe anche a tener conto dei transitori presenti all'accensione del compressore. In questa nuova configurazione potrebbe essere effettuato anche uno studio sulla possibilità di utilizzare un diverso fluido refrigerante al fine di incrementare ulteriormente l'efficienza dell'impianto.

L'aspetto economico è stato valutato a grandi linee in quanto le informazioni sui costi di realizzazione, gestione e manutenzione non erano completi. Per esempio, la parte lato impianto (ovvero il sistema che provvede al condizionamento) era già presente nel momento dell'installazione della pompa di calore geotermica, i costi di realizzazione erano stati affrontati in fase di costruzione dell'Energy Center, oppure è non è stato possibile valutare il consumo di energia elettrica in quanto l'impianto non dispone di un contatore dedicato.

Risulta chiaro che la realizzazione di un impianto geotermico, concepito già in fase di progettazione, presso un edificio di nuova costruzione sia molto più conveniente e il monitoraggio risulti migliore in quanto è possibile mettere in pratica tutti gli accorgimenti necessari.

Bibliografia

EHPA. (2019). *Market overview*. Retrieved from <https://www.ehpa.org/market-data/market-overview/>

SITO UFFICIALE DELL'UNIONE EUROPEA. *Comunicazione della Commissione al Parlamento Europeo, al Consiglio, al Comitato Economico e Sociale Europeo e al Comitato delle Regioni* di Bruxelles del 11/12/2019.

Ahmed, K., Fadejev, J., & Kurnitski, J. (2019). Modeling an alternate operational ground source heat pump for combined space heating and domestic hot water power sizing.

ASME. (1980). *The equitable building*. Retrieved from <https://www.asme.org/wwwasmeorg/media/resourcefiles/aboutasme/who%20we%20are/engineering%20history/landmarks/46-commonwealth-building-heat-pump.pdf>

EGEC (Nineth Edition, June 2020). GEOTHERMAL MARKET REPORT, Key Findings.

GeoNovis-Energia-Geotermica. (2019). *Schema esecutivo impianto geotermico terra/acqua con pompa di calore nibe mono compressore a servizio impianto di riscaldamento/raffreddamento*. [Disegno].

Lourie, T. (2018). *Log.set*. Retrieved from <https://www.varmepumpsforum.com/vpforum/index.php?action=dlattach;ts=1537684329;topic=61496.0;attach=68183>

Messaggero-Casa, I. (2018). *Pompe di calore aria-acqua: il riscaldamento rinnovabile*. Retrieved from https://www.ilmessaggero.it/casa/news/casa-news/pompe_calore_aria_acqua_riscaldamento_energia_rinnovabile/3824154.html

Nibe-Industrier. (n.d.). *Manuale dell'installatore nibe f1155* [Manuale tecnico].

Renewable energy in the EU in 2018. Retrieved from <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/2995521/10335438/8-23012020-AP-EN.pdf/292cf2e5-8870-4525-7ad7-188864ba0c29>

Tofalo, F. (2019). *Sperimentazione di muri energetici* (Tesi).

Rondina R. (2020). *Analisi sperimentale di una pompa di calore geotermica in ambito residenziale* (Tesi).

Tinti F. (2012). *La caratterizzazione probabilistica del sottosuolo come strumento per l'ottimizzazione della progettazione integrata dei sistemi geotermici* (Dottorato di ricerca).

Prof. Ing. L. Mazzarella. *Geotermia a bassa entalpia*.

Test_Detail.pdf [Operatore Matteo Baralis].

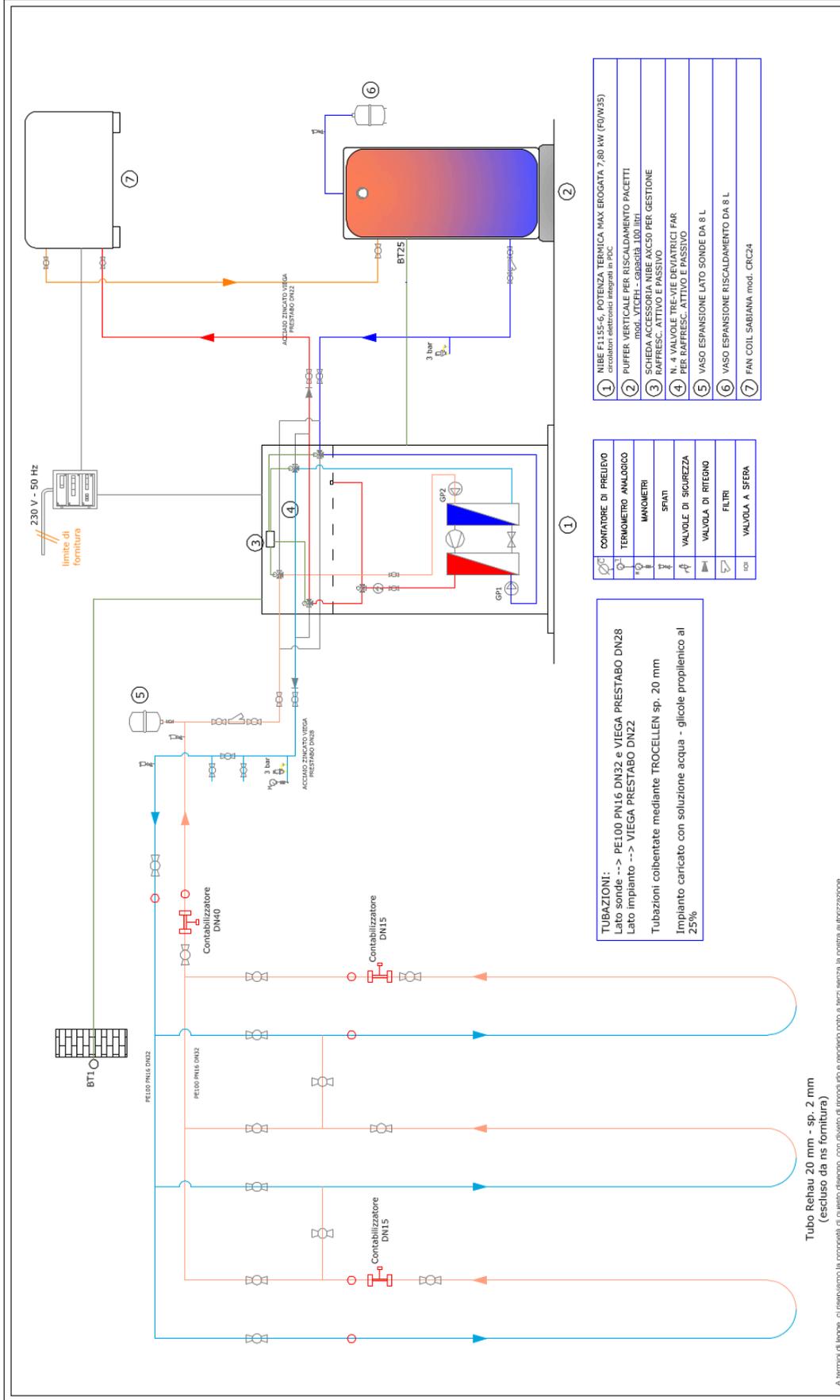
Hossein Yousefi, Maryam Hamlehdar, Sanaz Tabasi, Younes Noorollahi (2017). *Economic and Thermodynamic Evaluations of Using Geothermal Heat Pumps in Different Climate Zone (Case Study: Iran)*.

Tinti F. (2010). *L'analisi di fattibilità tecnico-economica e ambientale degli impianti geotermici*. Convegno: Energie rinnovabili per la climatizzazione, Geoscambio in provincia di Venezia, Sostenibilità e regolamentazione.

Decreto Legislativo 11 febbraio 2010, n. 22.

Regione Piemonte (2016). Determinazione dirigenziale n°66 del 3 marzo 2016, Approvazione delle *“Linee guida per l’installazione e la gestione delle sonde geotermiche”*.

Regione Piemonte (2018). Piano di Tutela delle Acque (TAVOLE DI PIANO).



Tubo Rehau 20 mm - sp. 2 mm
(escluso da ns fornitura)

- ① NIBE F1155-6, POTENZA TERMICA MAX EROGATA 7.80 KW (FQW35) circolatori elettronici integrati in PCC
- ② PUFFER VERTICALE PER RISCALDAMENTO PACETTI MOD. VICEH - GRABER 100 LITRI
- ③ SCHEDA ACCESSORIA NIBE AXCSO PER GESTIONE RAPPRES. ATTIVO E PASSIVO
- ④ N. 4 VALVOLE TRÉ-VIE DEVIATRICI FAR PER RAPPRES. ATTIVO E PASSIVO
- ⑤ VASO ESPANSIONE LATO SONDE DA 8 L
- ⑥ VASO ESPANSIONE RISCALDAMENTO DA 8 L
- ⑦ FAN COIL SABIANA mod. CRC24

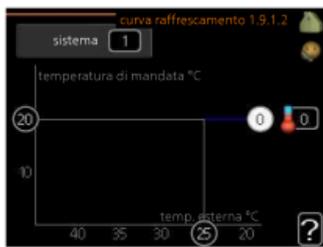
CONTORE DI PRELUDIO	TERMOCONTATTORE
MANOMETRI	SPINTI
VALVOLE DI SICUREZZA	VALVOLA DI RITEGNO
FILTRI	VALVOLA A SFERA

TUBAZIONI:
Lato sonda --> PE100 PN1.6 DN32 a VIEGA PRESTABO DN28
Lato impianto --> VIEGA PRESTABO DN22
Tubazioni colbenatate mediante TROCELLEN sp. 20 mm
Impianto caricato con soluzione acqua - glicole propilenico al 25%

A sinistra di legge, di riservare la proprietà e questo disegno, con diritto di riprodotto e ristampato, non si farà senza la nostra autorizzazione.

	Ubicazione: Torino (TO) Energy Center - via Borsellino, 38/16	Oggetto: Schema esecutivo impianto geotermico terra/acqua con pompa di calore NIBE mono compressore a servizio impianto di riscaldamento/raffrescamento.
	Cliente: Spett.le POLITECNICO DI TORINO	
	Disegnatore: Ing. Eugenio Andorno	
	Data avviamento: 19/07/2019	
0161/427407 info@geonovis.com www.geonovis.com		

Impostazione della curva di raffreddamento/riscaldamento



curva riscaldamento

Intervallo selezionabile: 0 – 15

Valore predefinito: 9

curva raffreddamento (accessorio richiesto)

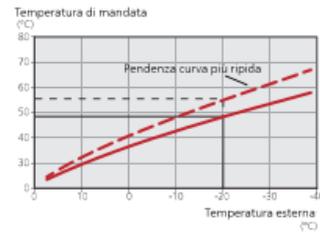
Intervallo selezionabile: 0 – 9

Valore predefinito: 0

È possibile selezionare il riscaldamento o il raffreddamento nel menu **curva**. Il menu successivo (curva di riscaldamento/curva di raffreddamento) indica le curve di riscaldamento e raffreddamento per gli ambienti. La curva ha il compito di assicurare una temperatura interna omogenea, indipendentemente dalla temperatura esterna, e pertanto un funzionamento energeticamente efficiente. È a partire da queste curve di riscaldamento che il computer della pompa di calore determina la temperatura dell'acqua dell'impianto, la temperatura di mandata e, quindi, la temperatura interna. Selezionare qui la curva e vedere in che modo la temperatura di mandata cambia in funzione delle diverse temperature esterne. Il numero all'estrema destra di "sistema" visualizza per quale sistema è stata selezionata la curva di riscaldamento/curva di raffreddamento.

Coefficiente della curva

Le pendenze delle curve di riscaldamento/raffreddamento indicano di quanti gradi aumentare/ridurre la temperatura di mandata quando la temperatura esterna scende/sale. Una pendenza ripida significa una temperatura di mandata superiore per il riscaldamento o una temperatura di mandata inferiore per il raffreddamento ad una determinata temperatura esterna.



La pendenza ottimale dipende dalle condizioni climatiche del posto, dalla presenza o meno di radiatori o di riscaldamento a pavimento nell'abitazione e dal grado di isolamento dell'abitazione.

La curva viene impostata al momento di installare il riscaldamento, ma potrebbe richiedere delle regolazioni successive. Normalmente, la curva non necessita di ulteriori regolazioni.

ATTENZIONE

Durante le regolazioni della temperatura interna, la curva di riscaldamento dovrà essere regolata in alto o in basso, all'interno del menu 1.1 **temperatura**.

Offset della curva

Un offset della curva indica che la temperatura di mandata cambia della stessa quantità indipendentemente dalle temperature esterne, ad esempio un offset della curva di +2 incrementi aumenta la temperatura di mandata di 5 °C con qualsiasi temperatura esterna.

Temperatura di mandata: valori minimi e massimi

Dato che la temperatura di mandata calcolata non può essere superiore al valore massimo impostato o inferiore al valore minimo impostato, la curva di riscaldamento si appiattisce in corrispondenza di queste temperature.

ATTENZIONE

Gli impianti di riscaldamento a pavimento sono normalmente **temperatura mandata max** impostati tra 35 e 45 °C.

Deve essere limitato con il raffreddamento a pavimento temp. mandata min. per impedire la condensa.

Controllare la temperatura massima del proprio pavimento con il relativo installatore/prodotto-re.

Il valore al termine della curva indica la pendenza della curva. Il valore accanto al termometro riporta l'offset della curva. Per impostare un nuovo valore, usare la manopola di controllo. Confermare la nuova impostazione premendo il pulsante OK.

La curva 0 è una curva personalizzata creata nel menu 1.9.7.

Per selezionare un'altra curva (pendenza):



NOTA!

Se si dispone di un solo sistema di climatizzazione, il numero della curva sarà già indicato all'apertura della finestra di menu.

1. Selezionare il sistema di climatizzazione (se più di uno) per il quale la curva deve essere modificata.
2. Quando la selezione del sistema di climatizzazione è stata confermata, il numero della curva verrà indicato.
3. Premere il pulsante OK per accedere alla modalità di impostazione.
4. Selezionare una nuova curva. Le curve vengono numerate da 0 a 15, maggiore è il numero e più ripida sarà la pendenza, oltre che maggiore la temperatura di mandata. La curva 0 implica l'utilizzo di **curva personalizzata** (menu 1.9.7).
5. Premere il pulsante OK per uscire dall'impostazione.

Per leggere una curva:

1. Ruotare la manopola di controllo in modo che venga selezionato l'anello sull'albero con la temperatura esterna.
2. Premere il pulsante OK.
3. Seguire la linea grigia su fino alla curva e fuori a sinistra per leggere il valore relativo alla temperatura di mandata alla temperatura selezionata esternamente.
4. È possibile selezionare di effettuare letture per le varie temperature esterne ruotando la manopola di controllo verso destra o sinistra e leggendo la temperatura di mandata corrispondente.
5. Premere il pulsante OK o Indietro per uscire dalla modalità di lettura.



SUGGERIMENTO

Prima di effettuare una nuova impostazione, attendere 24 ore per permettere alla temperatura ambiente di stabilizzarsi.

Se la temperatura esterna è fredda e quella ambiente troppo bassa, aumentare la pendenza della curva di un incremento.

Se la temperatura esterna è fredda e quella ambiente troppo elevata, ridurre la pendenza della curva di un incremento.

Se la temperatura esterna è calda e quella ambiente troppo bassa, aumentare l'offset della curva di un incremento.

Se la temperatura esterna è calda e quella ambiente troppo elevata, ridurre l'offset della curva di un incremento.

Con questo lavoro di tesi si conclude il mio percorso universitario, al termine del quale desidero ringraziare tutti coloro che hanno contribuito alla mia crescita personale e didattica. Innanzitutto, desidero ringraziare il mio relatore, Davide Papurello, per la disponibilità e la pazienza con le quali mi ha supportato durante tutto il periodo della stesura e allo stesso modo il mio correlatore, Matteo Baralis, per il supporto prestato. Desidero infine ringraziare tutti i miei cari che nonostante le difficoltà che la vita ci ha messo davanti hanno continuato ad incoraggiarmi per non mollare e ottenere questo importante risultato.