



**Politecnico  
di Torino**

**Corso di Laurea di 2° Livello in Ingegneria Meccanica**

**Analisi dei dati di un impianto energetico residenziale  
di tipo geotermico contro-terra**

**Tesi di Laurea Magistrale**

---

**Anno 2023/2024**

**Relatore:**

**Prof. Davide Papurello**

**Candidati:**

**Davide Marino**

**Dicembre 2024**

## Indice

|  |    |
|--|----|
| Abstract .....   | 1  |
| 1. Introduzione alla Geotermia .....   | 2  |
| 1.1. Geotermia a bassa entalpia .....  | 3  |
| 1.2. Geotermia a media entalpia .....  | 3  |
| 1.3. Geotermia ad alta entalpia .....  | 4  |
| 2. Il contesto Nazionale .....   | 5  |
| 3. Fonti e utilizzi dell'energia geotermica .....                            | 7  |
| 3.1. Fonti geotermiche .....   | 7  |
| 3.2. Utilizzi dell'energia Geotermica .....                                  | 8  |
| 4. Scambio termico con il suolo e il sottosuolo .....                        | 10 |
| 4.1. Conduzione .....  | 10 |
| 4.2. Convezione .....  | 10 |
| 4.3. Irraggiamento .....   | 11 |
| 4.4. Applicazione alle sonde Geotermiche .....                               | 11 |
| 5. Layout di impianto Geotermico a bassa entalpia .....                      | 12 |
| 5.1. Scambiatori a terreno .....   | 12 |
| 5.1.1. Scambiatori Closed-Loop .....   | 12 |
| 5.1.2. Impianti Open-Loop .....  | 15 |
| 5.2. Pompe di calore .....   | 17 |
| 5.2.1. Prestazioni energetiche della pompa di calore – Il COP e l'PEER ..... | 20 |
| 5.3. Terminali di impianto .....   | 21 |
| 5.3.1. Radiatori .....   | 21 |
| 5.3.2. Pannelli radianti .....   | 21 |
| 5.3.3. Ventilconvettori .....  | 22 |
| 6. Campo Sperimentale .....  | 23 |
| 6.1. Fasi costruttive .....  | 24 |
| 6.2. Descrizione del funzionamento dell'impianto .....                       | 26 |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 6.3.   | Circuito Primario.....                                     | 26 |
| 6.4.   | Pompa di calore.....                                       | 28 |
| 6.5.   | Circuito secondario.....                                   | 29 |
| 6.6.   | Sensoristica nell'intera configurazione impiantistica..... | 30 |
| 6.6.1. | Sensoristica a bordo macchina (pompa di calore).....       | 30 |
| 6.6.2. | Sensoristica lato terreno.....                             | 30 |
| 6.7.   | Logiche di funzionamento.....                              | 32 |
| 6.7.1. | Riscaldamento invernale.....                               | 32 |
| 6.7.2. | Raffrescamento estivo.....                                 | 32 |
| 6.7.3. | Riscaldamento/Raffrescamento attivo e passivo.....         | 33 |
| 7.     | Obiettivo dello studio.....                                | 34 |
| 7.1.   | Coolpack.....  | 34 |
| 7.2.   | Ipotesi iniziali e regolazione della PdC.....              | 36 |
| 7.2.1. | Ipotesi iniziali.....                                      | 36 |
| 7.2.2. | Regolazione della PdC.....                                 | 37 |
| 7.3.   | Prova di riscaldamento.....                                | 41 |
| 7.3.1. | Risultati prova di riscaldamento.....                      | 45 |
| 7.4.   | CONCLUSIONE.....   | 56 |
| 8.     | Ringraziamenti.....  | 58 |
|        | Nomenclatura, acronimi e abbreviazioni.....                | 59 |
|        | Bibliografia.....  | 61 |
|        | Allegati.....  | 63 |

## Indice delle Figure

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Andamento della Temperatura nel sottosuolo.....   | 2  |
| Figura 2 - Diagramma dell'andamento della Temperatura nel sottosuolo - Fonte: <a href="http://www.expoclima.it">www.expoclima.it</a> .....         | 3  |
| Figura 3 - Impianto geotermico di Larderello (Fonte: Archivio storico di Enel Green Power).....  | 4  |
| Figura 4 - Fonte geotermica: suolo e bacino idrico superficiale. Fonte: <a href="http://www.ingenio-web.it">www.ingenio-web.it</a> .....           | 7  |
| Figura 5 - Fonte geotermica: acque di falda. Fonte: <a href="http://www.expoclima.net">www.expoclima.net</a> .....                                 | 8  |
| Figura 6 - Schema di un impianto geotermico a circuito chiuso con sonda geotermica.....  | 12 |
| Figura 7 - Sezioni trasversali delle sonde geotermiche: tubo a U singola (A), tubo a U doppia (B), sonda coassiale (C) .....                       | 13 |
| Figura 8 - Classificazione delle sonde geotermiche orizzontali: posa lineare con tubo.....   | 14 |
| Figura 9 - Schema di un impianto geotermico a circuito aperto e del disturbo termico.....  | 15 |
| Figura 10 - Configurazioni impianti Open - Loop .....  | 15 |
| Figura 11 – Schema di funzionamento di una pompa di calore .....   | 17 |
| Figura 12. Funzionamento di una pompa di calore - Fonte: <a href="https://nuovisistemienergetici.it/">https://nuovisistemienergetici.it/</a> ..... | 19 |
| Figura 13. Ciclo termodinamico su Diagramma p-v. Fonte: Zanichelli editore S.p.A. Bologna .....  | 19 |
| Figura 14 - layout delle sonde geotermiche (quotate in cm) .....   | 23 |
| Figura 15 - lay-out sonde completato .....   | 24 |
| Figura 16 - Layout impiantistico del sistema geotermico dell'Energy Center.....  | 25 |
| Figura 17 - Collettori circuito primario Geothermskin.....   | 27 |
| Figura 18 - lay-out impianto lato utenza .....   | 29 |
| Figura 19 - schema di posizionamento estensimetri e celle di pressione.....  | 31 |
| Figura 20 - Coolpack gruppo "ESCoolTools: Cycle Analysis – Cycle specification" per la giornata del 25/10/2019 .....                               | 35 |
| Figura 21 - Coolpack gruppo "ESCoolTools: Cycle Analysis" per la giornata del 25/10/2019.....  | 35 |
| Figura 22 - Andamento della temperatura di mandata tra due valori max e min impostati dall'utente ...  | 37 |
| Figura 23 - Esempio di curve di riscaldamento/raffrescamento .....   | 38 |
| Figura 24 - Andamento della temperatura di mandata dell'impianto (BT12) nella giornata del 26/10/2019 .....  | 38 |
| Figura 25 - Andamento delle temperature di aspirazione e mandata del compressore in un ciclo completo di funzionamento.....                        | 39 |
| Figura 26 - Funzionamento del compressore in funzione dei gradi minuto nella giornata del 26/10/2019 .....   | 40 |
| Figura 27 -Durata del ciclo di accensione/spengimento del compressore .....  | 40 |
| Figura 28 - Impianto nella configurazione di riscaldamento invernale.....  | 41 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 29 - Confronto COP con scostamento % .....  | 46 |
| Figura 30 - Confronto Potenza termica scambiata nel condensatore .....   | 46 |
| Figura 31 - Confronto Potenza termica scambiata nell'evaporatore .....   | 47 |
| Figura 32 - Andamento della temperatura esterna BT1 nelle due campagne di raccolta dati .....                              | 48 |
| Figura 33 - Confronto dei dati disponibili nelle due campagne della BT 1 .....   | 48 |
| Figura 34 - Confronto del COP reale con quello calcolato tramite Coolpack .....  | 49 |
| Figura 35 - Confronto della Potenza termica scambiata al condensatore reale con quello calcolato tramite Coolpack .....    | 50 |
| Figura 36 - Confronto della Potenza termica scambiata all'evaporatore reale con quello calcolato tramite Coolpack .....    | 50 |
| Figura 37 - Confronto dei COP reali tra Ott-2019 e Mar-2021 .....  | 51 |
| Figura 38 - Confronto dei COP calcolati su Coolpack tra Ott-2019 e Mar-2021 .....  | 52 |
| Figura 39 - Confronto delle Potenze termiche scambiate all'evaporatore reali tra Ott-2019 e Mar-2021 .....                 | 53 |
| Figura 40 - Confronto delle Potenze termiche scambiate all'evaporatore calcolate su Coolpack tra Ott-2019 e Mar-2021 ..... | 53 |
| Figura 41 - Confronto delle Potenze termiche scambiate al condensatore reali tra Ott-2019 e Mar-2021 .....                 | 54 |
| Figura 42 - Confronto delle Potenze termiche scambiate al condensatore calcolate su Coolpack tra Ott-2019 e Mar-2021 ..... | 54 |
| Figura 43 - Confronto del lavoro al compressore tra Ott 2019 e Mar 2021 .....  | 55 |
| Figura 44 - Estratto del manuale installatore della Pompa di Calore NIBE F1155-6 .....                                     | 63 |
| Figura 45 - Ciclo termodinamico nel range di pressioni fisse 7 - 16 bar estratto da Coolpack .....                         | 64 |

## **Indice delle Tabelle**

|   |    |
|---|----|
| Tabella 1 – Potenza installata in Europa - Fonte: <a href="http://www.unionegeotermica.it">www.unionegeotermica.it</a> .....    | 6  |
| Tabella 2 - Produzione geotermica in Europa - Fonte: <a href="http://www.unionegeotermica.it">www.unionegeotermica.it</a> ..... | 6  |
| Tabella 3 . Tabella di sintesi delle tipologie di impianto Open - Loop .....  | 16 |
| Tabella 4 - Dettaglio sensoristica impianto lato sonde .....  | 30 |
| Tabella 5 - Risultati per la giornata del 28/10/2019 range di pressioni 7-16 bar .....  | 45 |
| Tabella 6 - Estratto della tabella dei dati del 27/10/2019 con le colonne delle tre ipotesi iniziali .....                      | 66 |

## Abstract

A Seguito dell'incessante corsa al fabbisogno energetico degli ultimi anni, le politiche energetiche nazionali e internazionali hanno favorito lo sviluppo dell'energia pulita da risorse rinnovabili come eolico e fotovoltaico in particolare. Infatti non è difficile vedere dei grossi campi fotovoltaici in giro per la nostra Nazione, ed è sempre più comune vedere capannoni industriali e case private dotate di impianto fotovoltaico/solare. Oltre alle note fonti energetiche rinnovabili, negli ultimi anni c'è stata la volontà scientifica, da parte di centri di ricerca e università, di approfondire lo studio su nuove tipologie di rinnovabili come il trasferimento energetico dalle onde del mare e il geotermico che era già una fonte conosciuta ma poco studiata/approfondita. L'energia geotermica non spicca in termini di diffusione, perché è un sistema ancora poco noto alla massa e dispendioso da installare. In questo lavoro di tesi, dopo un iniziale excursus sulle varie tipologie di energia geotermica e varie tipologie di impianto esistenti, ci si concentra sullo studio di un sistema energetico esistente presso l'energy center del Politecnico di Torino. Il sistema GeothermSkin, è un brevetto del Politecnico e consiste in un sistema di tubi da ancorare alle fondazioni, in modo da trasformarle in uno sistema di geo-scambiatori controterra. Ciò permette una riduzione di costi in fase di esecuzione, poiché lo scavo non sarà più dedicato al solo impianto termico ma sarà unico (sia per le fondazioni che per la posa del sistema di scambio termico), inoltre questa soluzione impiantistica è applicabile anche a costruzioni esistenti. Lo studio svolto in questo lavoro permette il confronto dei risultati ottenuti con l'ausilio di un software dedicato (Coolpack) con i risultati ottenuti prendendo i dati dalle centraline presenti in impianto. Da questo confronto è possibile verificare se e di quanto si discosti la simulazione rispetto ai risultati reali.

# 1. Introduzione alla Geotermia

L'energia geotermica, fa parte delle varie tipologie di energie rinnovabili di cui si parla negli ultimi anni come sostituti alla sorgente fossile. Nello specifico, l'energia geotermica è l'energia termica immagazzinata sotto la superficie terrestre. È una fonte rinnovabile, disponibile tutto l'anno, ecocompatibile e sostenibile dal punto di vista ambientale.

Il calore accumulato sotto la crosta terrestre deriva da due sorgenti:

- 1) In parte dal calore residuo legato alla formazione del nostro pianeta;
- 2) In parte dai processi di decadimento degli elementi radioattivi di Th, U, e K presenti nel mantello.

Preso un sistema di riferimento con l'origine sulla crosta terrestre e verso positivo diretto verso il centro della terra, si vede che la temperatura aumenta in maniera progressiva all'aumentare della profondità. Si nota anche che la curva ha diverse pendenze e la differenza che più salta all'occhio è quella tra la crosta terrestre e il resto della profondità. Infatti il gradiente geotermico medio sulla crosta terrestre è molto più accentuato rispetto a profondità più elevate, ovvero si ha un aumento di 30 °C per ogni Km di profondità. Superata la crosta terrestre e andando verso il mantello, il gradiente ha una pendenza molto più dolce, ovvero circa 1°C/km, come si vede dalla Figura 1.

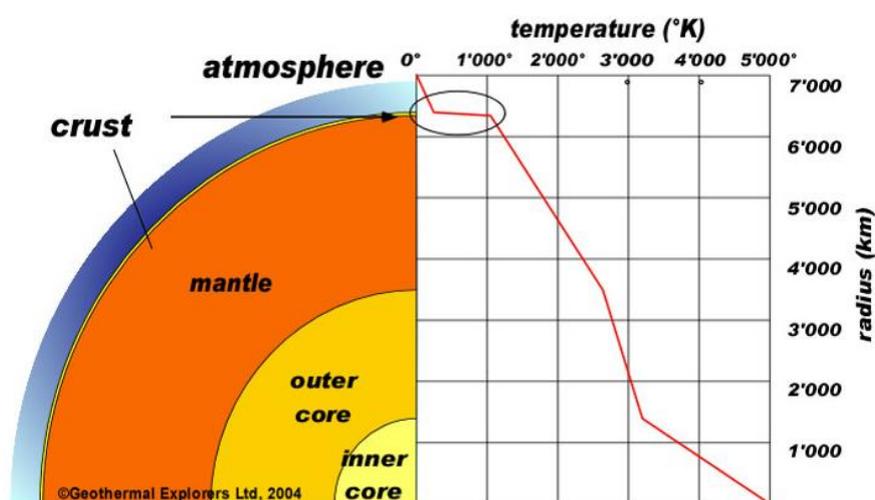


Figura 1 - Andamento della Temperatura nel sottosuolo

L'energia geotermica è utilizzata convenzionalmente per:

- La produzione di energia elettrica (risorse ad alta-media entalpia);
- Usi diretti del calore (risorse a bassa-media entalpia) quali climatizzazione degli edifici, teleriscaldamento e molteplici applicazioni agrarie, alimentari e industriali.

## 1.1. Geotermia a bassa entalpia

I sistemi a bassa entalpia ( $T < 90 \text{ }^\circ\text{C}$ ) possono essere utilizzati in ogni parte del territorio italiano, in quanto è possibile sfruttare il gradiente termico a scopo diretto già da 10 metri di profondità in poi, infatti dopo tale quota la temperatura del terreno comincia ad avere oscillazioni di temperatura molto piccole rispetto alle variazioni meteorologiche, dunque è possibile ipotizzarla circa costante al variare delle stagioni già a quelle quote, come si vede dalla figura sottostante.

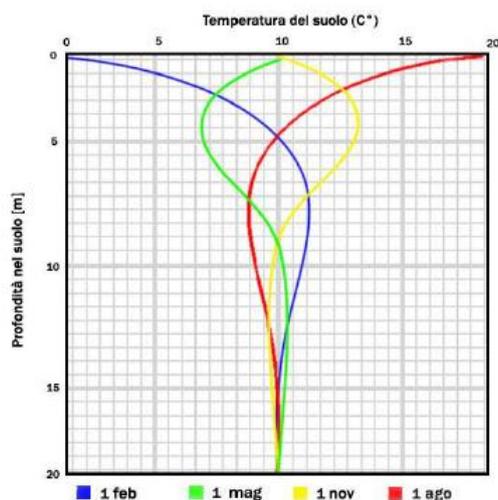


Figura 2 - Diagramma dell'andamento della Temperatura nel sottosuolo - Fonte: [www.expoclima.it](http://www.expoclima.it)

Dunque, la geotermia a bassa entalpia è

- Disponibile ovunque sulla superficie terrestre;
- Una forma di energia rinnovabile e sicura nel tempo;
- Dà la possibilità ad un uso diretto del calore, ovvero: climatizzazione e riscaldamento residenziale, acqua calda sanitaria, usi agricoli e industriali.

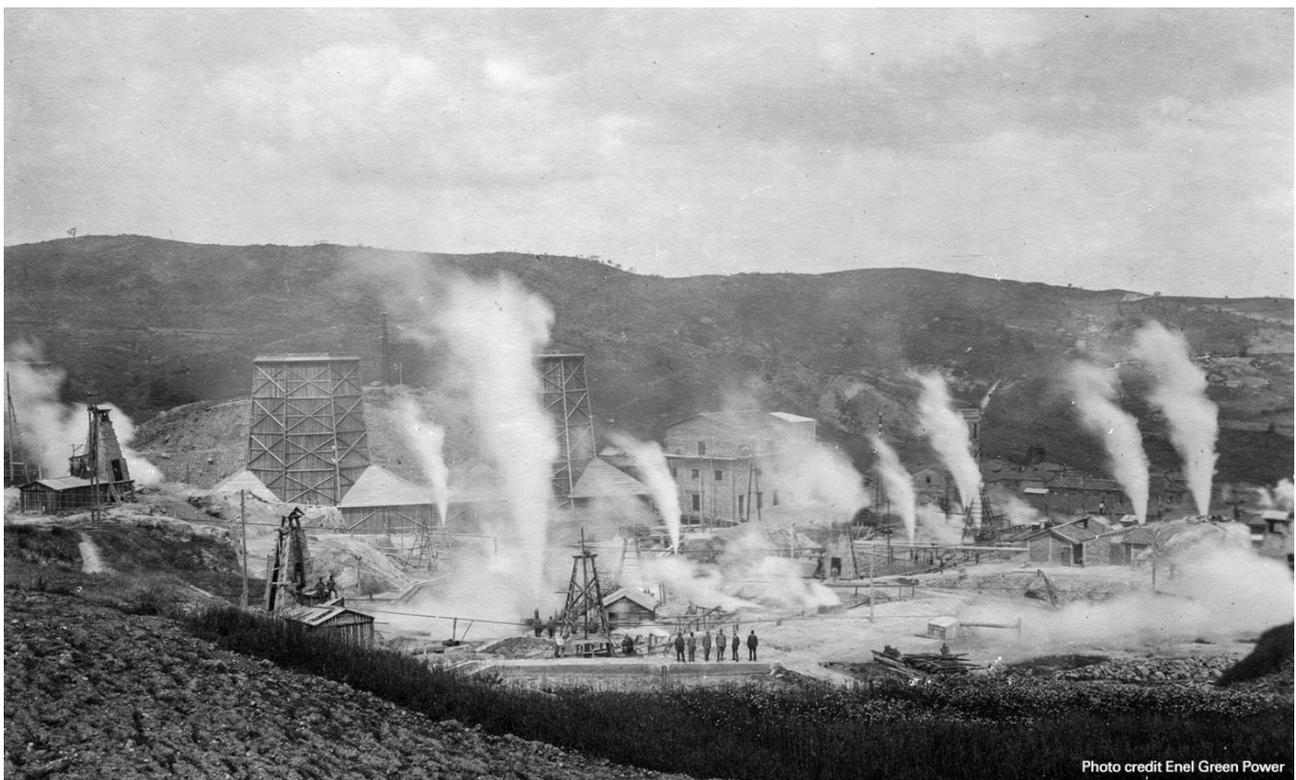
## 1.2. Geotermia a media entalpia

La temperatura delle fonti energetiche a media entalpia è compresa nel range di  $90^\circ\text{C} < T < 150^\circ\text{C}$ . Le risorse a media entalpia sono tipicamente associate ad usi indiretti dell'energia termica, ad esempio possono essere accoppiati a dei cicli termodinamici a ciclo chiuso. Gli usi finali della geotermia a media entalpia possono essere sia produzione di energia elettrica che termica (ad esempio per il teleriscaldamento).

### 1.3. Geotermia ad alta entalpia

Le risorse geotermiche ad alta entalpia hanno temperature elevate ( $T > 150^{\circ}\text{C}$ ) e il calore estratto viene utilizzato per la produzione di energia elettrica in modo diretto ovvero: il vapore proveniente dal sottosuolo viene immesso direttamente in un circuito di lavoro e portato in turbina. Per l'estrazione del vapore dal sottosuolo, sono necessari dei pozzi molto profondi (alcuni anche di 5 km) che una volta finiti, devono "sopportare" alte pressioni e temperature (ordine di grandezza di circa 15 bar e  $200^{\circ}\text{C}$ ). Dunque la costruzione di questi pozzi non consiste nella sola fase di perforazione, ma successivamente ci sarà la fase di rivestimento delle pareti dei pozzi con un primo strato di cemento e altri strati di rivestimento utili sia a non far cedere le pareti del pozzo appena scavato sia a resistere alle forti pressioni di esercizio durante il prelievo dell'acqua o del vapore.

Un esempio italiano è la centrale geotermoelettrica di Larderello (PI) che è descritta al capitolo successivo.



*Figura 3 - Impianto geotermico di Larderello (Fonte: Archivio storico di Enel Green Power)*

## 2. Il contesto Nazionale

Secondo un articolo del sito [www.enelgreenpower.com](http://www.enelgreenpower.com), l'Italia ha un potenziale geotermico vasto ma non omogeneo. Le stime delle potenzialità energetiche presenti nel sottosuolo sono tra i 5.800 e 116.000 terawattora, nella sola fascia superficiale (ovvero i primi 5 km).

Secondo i dati di Terna, l'azienda che gestisce la rete di distribuzione dell'energia elettrica, il fabbisogno annuo medio dell'Italia è di circa 300 TWh. Dall'analisi di questi due dati si evince che basterebbe estrarre un'esigua quantità di energia dal sottosuolo per soddisfare le esigenze di energia elettrica dell'intero paese.

Anche se ad oggi, l'energia geotermica non è sfruttata al massimo delle sue potenzialità, l'Italia può vantare il fatto di essere uno dei principali produttori di energia geotermica nel panorama europeo inoltre, l'Italia è stato il primo paese al mondo a costruire una centrale geotermica di utilità pubblica, ovvero, la centrale di Larderello in provincia di Pisa.

La centrale di Larderello, agli inizi del '900 si poneva l'obiettivo di utilizzare il vapore naturale della terra, come alternative al vapore prodotto dalle macchine a carbone. Con l'avanzare del tempo e della tecnica, la centrale ha subito delle modifiche costruttive per poter trasformare il calore in energia elettrica da immettere poi in rete.

Nel corso degli anni, nella regione Toscana, dall'esperienza di Larderello è aumentato il numero delle centrali, tanto da arrivare ad una produzione di energia elettrica da fonte geotermica in grado di soddisfare circa il 25% del fabbisogno elettrico della Regione. Nel resto d'Italia, le risorse geotermiche sono presenti in altre zone fuori dalla Toscana, ad esempio nelle zone attorno a Napoli, ad Alcamo nella provincia di Trapani dove sono presenti delle terme naturali con acque sulfuree, in Emilia-Romagna e altri.

Se si guardano i dati di produzione di energia interni del paese, sui 300 TWh di fabbisogno energetico interno, il geotermico contribuisce per circa 6 TWh ovvero circa il 2%, a fronte di una potenza installata di circa 1000 megawatt.

Dalle tabelle riportate qui di seguito, è possibile confrontare l'Italia con altri paesi sia europei che extra UE.

In termini di produzione di energia geotermica, nel contesto Europeo l'Italia con i suoi 6 TWh è seconda alla Turchia e avanti rispetto all'Islanda e alla Russia. Fino agli inizi degli anni 2000, l'Italia produceva il 75% di energia geotermica di quella prodotta dall'intera Europa. Negli ultimi 20 anni, l'Italia ha incrementato la produzione di geotermico di circa il 38%, ma altre nazioni come Turchia e Islanda hanno aumentato la loro produzione rispettivamente del 6700% e 420% circa facendo così scendere la percentuale di produzione dell'Italia nel contesto europeo a circa il 28% totale.

Come nei termini di produzione di energia geotermica, anche per la potenza installata, l'Italia con i suoi circa 900 Mw è seconda alla Turchia e avanti rispetto al resto d'Europa.

| Potenza Installata in Europa        |                |              |                |              |                |              |                |              |                |             |
|-------------------------------------|----------------|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------|----------------|-------------|
| $MW_e$                              | 2000           | 2005         | %              | 2010         | %              | 2015         | %              | 2020         |                |             |
| Austria                             | 0,0            | 1,0          |                | 1,4          |                | 1,2          |                | 1,2          |                |             |
| Belgio                              | 0,0            | 0,0          |                | 0,0          |                | 0,0          |                | 0,8          |                |             |
| Croazia                             | 0,0            | 0,0          |                | 0,0          |                | 0,0          |                | 16,5         |                |             |
| Francia<br>(Guadalupa &<br>Alsazia) | 4,2            | 15,0         |                | 16,0         |                | 16,0         |                | 17,0         |                |             |
| Germania                            | 0,0            | 0,2          |                | 6,6          |                | 27,0         |                | 43,0         |                |             |
| Islanda                             | 170,0          | 322,0        |                | 575,0        |                | 665,0        |                | 755,0        | 344,12         |             |
| <b>Italia</b>                       | <b>788,5</b>   | <b>790,5</b> | 0,25           | <b>842,5</b> | 6,85           | <b>915,5</b> | 16,11          | <b>915,5</b> | <b>16,11</b>   |             |
| Portogallo<br>(Azzorre)             | 16,0           | 16,0         |                | 29,0         |                | 29,0         |                | 33,0         |                |             |
| Romania                             | 0,0            | 0,0          |                | 0,0          |                | 0,1          |                | -            |                |             |
| Russia                              | 23,0           | 79,0         |                | 82,0         |                | 82,0         |                | 82,0         |                |             |
| Turchia                             | 20,4           | 20,4         |                | 82,0         |                | 397,0        |                | 1.549,0      | 7493,14        |             |
| Ungheria                            | 0,0            | 0,0          |                | 0,0          |                | 0,0          |                | 3,0          |                |             |
| <b>Europa</b>                       | <b>1.022,1</b> | <b>77,1</b>  | <b>1.244,1</b> | <b>63,5</b>  | <b>1.634,5</b> | <b>51,5</b>  | <b>2.132,8</b> | <b>42,9</b>  | <b>3.416,0</b> | <b>26,8</b> |

Tabella 1 – Potenza installata in Europa - Fonte: [www.unionegeotermica.it](http://www.unionegeotermica.it)

| Produzione Geotermoelettrica in Europa |                |                |                |                |                 |                |                 |                |                 |             |
|--|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|-------------|
| $GWh_e$                                | 2000           | 2005           | %              | 2010           | %               | 2015           | %               | 2020           |                 |             |
| Austria                                | 0,0            | 3,2            |                | 3,8            |                 | 2,2            |                 | 2,2            |                 |             |
| Belgio                                 | 0,0            | 0,0            |                | 0,0            |                 | 0,0            |                 | 2,0            |                 |             |
| Croazia                                | 0,0            | 0,0            |                | 0,0            |                 | 0,0            |                 | 76,0           |                 |             |
| Francia<br>(Guadalupa &<br>Alsazia)    | 24,6           | 102,0          |                | 95,0           |                 | 115,0          |                 | 136,0          |                 |             |
| Germania                               | 0,0            | 1,5            |                | 50,0           |                 | 35,0           |                 | 165,0          |                 |             |
| Islanda                                | 1.138,0        | 1.483,0        |                | 4.597,0        |                 | 5.245,0        |                 | 6.010,0        | 428,12          |             |
| <b>Italia</b>                          | <b>4.403,0</b> | <b>5.340,0</b> | 21,28          | <b>5.520,0</b> | 25,37           | <b>5.660,0</b> | 28,55           | <b>6.100,0</b> | <b>38,54</b>    |             |
| Portogallo<br>(Azzorre)                | 94,0           | 90,0           |                | 175,0          |                 | 196,0          |                 | 216,0          |                 |             |
| Romania                                | 0,0            | 0,0            |                | 0,0            |                 | 0,4            |                 | -              |                 |             |
| Russia                                 | 85,0           | 85,0           |                | 441,0          |                 | 441,0          |                 | 441,0          |                 |             |
| Turchia                                | 119,7          | 105,0          |                | 490,0          |                 | 3.127,0        |                 | 8.168,0        | 6722,02         |             |
| Ungheria                               | 0,0            | 0,0            |                | 0,0            |                 | 0,0            |                 | 5,3            |                 |             |
| <b>Europa</b>                          | <b>5.864,3</b> | <b>75,1</b>    | <b>7.209,7</b> | <b>74,1</b>    | <b>11.371,8</b> | <b>48,5</b>    | <b>14.821,6</b> | <b>38,2</b>    | <b>21.321,5</b> | <b>28,6</b> |

Tabella 2 - Produzione geotermica in Europa - Fonte: [www.unionegeotermica.it](http://www.unionegeotermica.it)

### 3. Fonti e utilizzi dell'energia geotermica

#### 3.1. Fonti geotermiche

Gli impianti geotermici a bassa entalpia possono utilizzare varie tipologie di fonti, che vediamo qui di seguito descritte:

- a) Terreno: sono tipicamente impianti a circuito chiuso, ovvero hanno delle sonde dove all'interno scorre un fluido vettore che scambia calore direttamente con il terreno;
- b) Acqua di Falda: sono tipicamente impianti a circuito aperto che utilizzano l'acqua di falda come fluido termovettore, con re-immissione nella stessa falda oppure senza re-immissione;
- c) Acque superficiali: laghi naturali/artificiali, fiumi e/o torrenti. Sono impianti che possono essere sia a circuito aperto che chiuso.

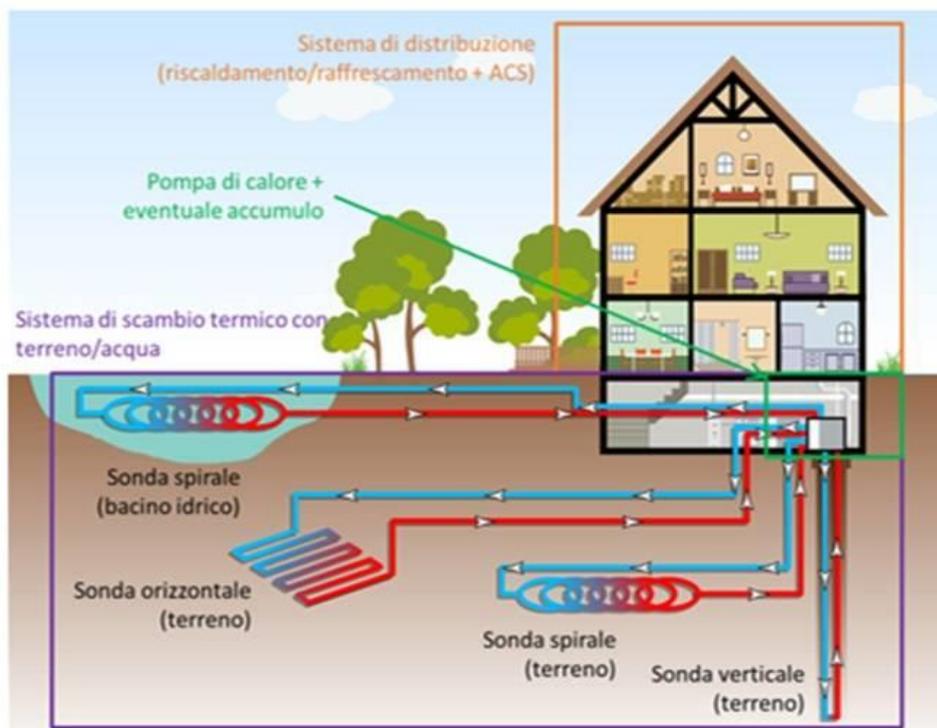


Figura 4 - Fonte geotermica: suolo e bacino idrico superficiale. Fonte: [www.ingenio-web.it](http://www.ingenio-web.it)

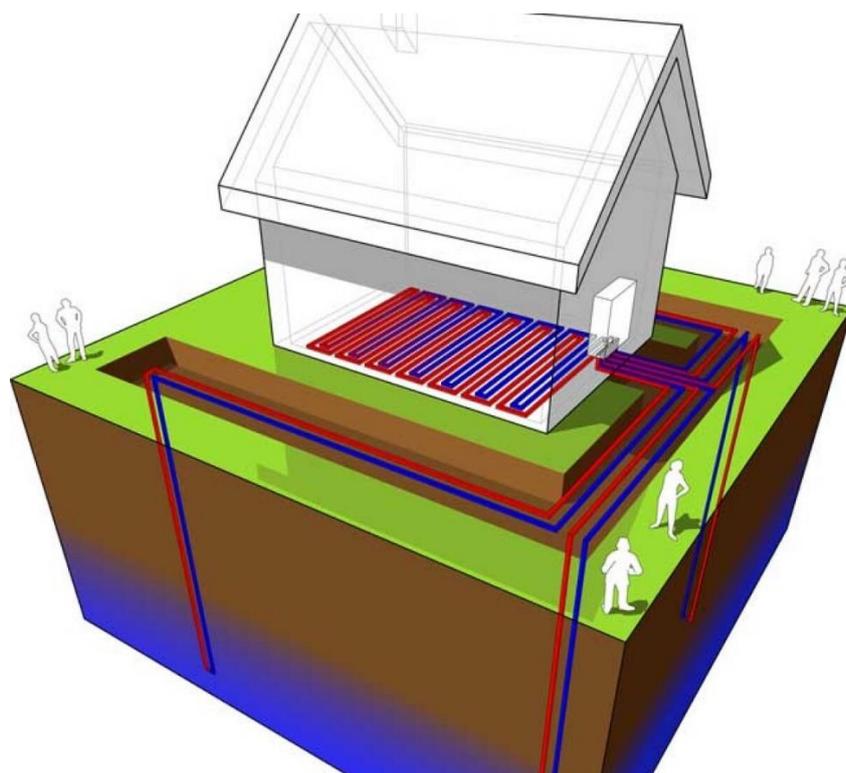


Figura 5 - Fonte geotermica: acque di falda. Fonte: [www.expoclima.net](http://www.expoclima.net)

### 3.2. Utilizzi dell'energia Geotermica

#### a) Produzione di Energia Elettrica

Per la produzione di energia elettrica, sono necessari impianti a media o meglio ad alta entalpia. L'impianto tipico per la produzione di energia elettrica, sfrutta le elevate pressioni del vapore acqueo presente nel sottosuolo, per muovere delle turbine in superficie (le più utilizzate sono le Rankine) che a loro volta movimentano un generatore elettrico. Se le temperature dell'acquifero sotterraneo, sono inferiori a quelle necessarie per avere vapore acqueo allora si utilizza un ciclo binario, ovvero si fa passare il fluido geotermico in uno scambiatore di calore, dove è presente un fluido termovettore con una temperatura di ebollizione più bassa dell'acqua. Questo fluido passando dallo scambiatore di calore, acquista calore dalle risorse geotermiche ed evapora, successivamente passa in turbina e comincia a seguire il suo percorso di ciclo.

*b) Produzione di energia Termica*

Quando le temperature del sottosuolo sono molto basse per essere utilizzate dalle macchine per la produzione di energia elettrica, ne possiamo recuperare il calore per esigenze termiche civili. Per lo sfruttamento di questa tipologia di energia, si utilizzano degli scambiatori particolari, chiamati “sonde geotermiche” che vengono collegate ad una pompa di calore in grado di sfruttare l’energia geotermica sia per climatizzare in estate, riscaldare in inverno e scaldare l’acqua calda sanitaria.

## 4. Scambio termico con il suolo e il sottosuolo

Lo scambio termico all'interno degli impianti geotermici segue le leggi della trasmissione del calore, ovvero il trasporto di energia termica tra due sistemi a due diverse temperature.

Le modalità di trasmissione del calore sono principalmente tre: conduzione, convezione e irraggiamento.

### 4.1. Conduzione

La trasmissione per conduzione, avviene o all'interno di uno stesso corpo che ha due punti posti a temperature diverse, oppure tra corpi in qualsiasi forma della materia a differente temperatura, che siano a contatto tra di loro. In assenza di agenti esterni e in accordo con il secondo principio della termodinamica, il calore si trasferisce naturalmente da un corpo a  $T$  maggiore verso un corpo a  $T$  minore. La conseguenza è che il corpo più caldo si raffredda e il corpo più freddo si scalda, raggiungendo ad un certo punto, l'equilibrio termico. L'indice della capacità di un corpo a trasferire calore per conduzione, viene indicato solitamente con " $\lambda$ " e si misura in  $(W/mK)$ , questo viene chiamato "conduttività termica del materiale". Più è elevata la conduttività termica del materiale, più è la quantità di calore trasmessa attraverso questo nell'unità di tempo.

### 4.2. Convezione

La trasmissione per convezione avviene durante il movimento di materia tra un fluido e un corpo solido a contatto tra di loro e a differente temperatura. La convezione si divide in:

- a) Convezione Naturale: Quando il moto del fluido dipende dalla sola differenza di densità e temperatura tra fluido e solido (esempio le correnti ascensionali di aria calda);
- b) Convezione Forzata: Quando il moto è dovuto a cause esterne dovute a differenze di pressioni come l'installazione di una pompa o di un ventilatore che spingono il fluido a contatto con il solido.

Similmente alla conduzione, l'indice della capacità di trasmissione del calore per convezione è indicato con " $h$ " e si misura in  $(W/m^2K)$  e viene chiamato "conduttanza unitaria liminare". Questo, a differenza della conduzione, non dipende dal solo materiale ma anche dal moto del fluido, e quindi dalla direzione e dalla velocità di esso.

### **4.3. Irraggiamento**

La trasmissione del calore per irraggiamento avviene per la propagazione delle onde elettromagnetiche da un corpo verso l'altro. Dipende dalla posizione dei corpi uno in confronto all'altro, in letteratura esistono delle tabelle che identificano i "Fattori di vista" a seconda dei quali il calore si propaga più o meno velocemente. Per questa modalità di trasmissione del calore non c'è bisogno di contatto e neanche di un mezzo di propagazione, questo perché le onde elettromagnetiche possono propagarsi anche nel vuoto.

### **4.4. Applicazione alle sonde Geotermiche**

Nel caso di sonde geotermiche, la fonte di calore può essere o il terreno o l'acqua di falda a seconda del tipo di impianto. Vediamo a seconda dei casi, come si trasmette il calore:

- Impianti open-loop: utilizzano come sorgente termica l'acqua di falda, dunque l'energia termica viene acquisita dall'acqua di falda e ceduta al fluido refrigerante presente nel circuito della pompa di calore per convezione.
- Impianti closed-loop: la sorgente è il terreno che si trova a contatto con la sonda dove all'interno circola il fluido termovettore. Dunque lo scambio avviene per conduzione dal terreno al tubo e convezione dall'acqua presente tra il terreno e la sonda.

## 5. Layout di impianto Geotermico a bassa entalpia

Lo studio di questa tesi si basa su un impianto a bassa entalpia presente all'Energy Center del Politecnico di Torino. Questa tipologia di impianto è composta da 3 componenti fondamentali:

- 1) Sistema di scambio con il terreno;
- 2) Pompa di calore;
- 3) Sistema di distribuzione termica all'utenza.

Qui di seguito sono descritti i componenti e le varie categorie:

### 5.1. Scambiatori a terreno

Esistono due categorie di tipologia di scambiatore:

- 1) Scambiatori con circuito "Closed - Loop";
- 2) Scambiatori con circuito "Open - loop".

#### 5.1.1. Scambiatori Closed-Loop

In questa tipologia di impianti non c'è prelievo e scarico di acque di falda, poiché il circuito di scambio di calore è chiuso e all'interno di esso passa un fluido termovettore, solitamente fatto da acqua e glicole o altre miscele. Oltre al fatto che le tubazioni non arrivino alla falda per il prelievo di acqua, questa tipologia di impianto non ha particolari esigenze geologiche. Questo è un punto a favore per l'iter autorizzativo che risulta più rapido.

Gli impianti a circuito chiuso hanno diversi layout, principalmente dividiamo in:

1. Sonde verticali;
2. Sonde Orizzontali



Figura 6 - Schema di un impianto geotermico a circuito chiuso con sonda geotermica

### a) Impianti closed - loop a sonde verticali

Il circuito a sonde verticali (un esempio è visibile in Figura 4) può avere diverse configurazioni:

- sonde geotermiche ottenute tramite perforazione di pozzi;
- pali geotermici ottenuti tramite costruzione di pali nel sottosuolo;
- muri geotermici solitamente ottenuti sotto o paralleli alle fondazioni, in cui si installano i tubi dove passa il fluido termovettore.

Le perforazioni possono variare dai 20 ai 200 metri, questo grosso gap è dato da vari fattori (normative del territorio, tipologie di terreno).

Oltre alla configurazione geometrica dell'impianto, possiamo distinguere anche tipologie di tubi utilizzati:

- Ad "U" singola con all'interno un tubo di mandata e uno di ritorno collegati sul fondo;
- A doppia "U", differente dal precedente per via della presenza di quattro tubi (e non due) collegati a due a due sul fondo;
- Tripla e Quadrupla U con a loro volta sei (tripla) o otto (quadrupla) tubi collegati sul fondo a due a due;
- Sonda Coassiale ad anello interno ed anello esterno.

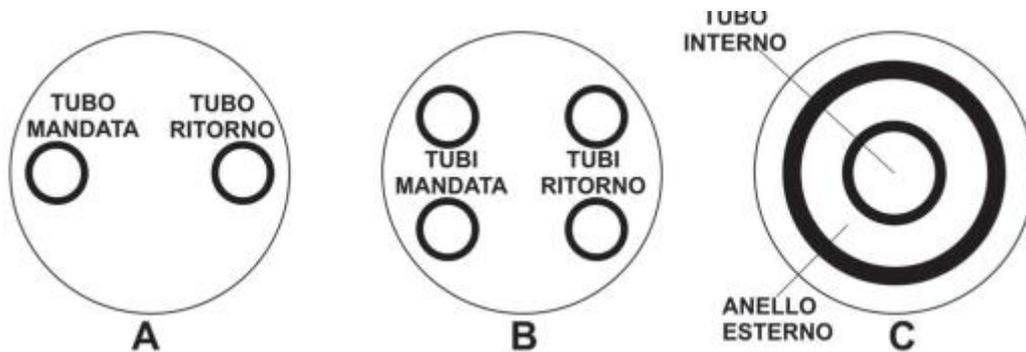


Figura 7 - Sezioni trasversali delle sonde geotermiche: tubo a U singola (A), tubo a U doppia (B), sonda coassiale (C)

## b) Impianti closed loop a sonde orizzontali

La disposizione orizzontale delle sonde, nasce dall'esigenza di non scavare in profondità sia per un notevole risparmio economico rispetto allo scavo verticale, sia per l'iter autorizzativo che risulta più snello.

Lo scavo per un circuito orizzontale ha una profondità variabile tra 1.5 e i 2.5 metri circa, per evitare sia un eventuale congelamento del fluido termovettore sia la compressione dei tubi da un eventuale carico posto erroneamente sul terreno soprastante l'impianto. Per la posa dei tubi è necessario formare un letto di posa di circa 10 cm di sabbia fine sotto ai tubi e altrettanti 10 cm sopra i tubi per evitare corpi estranei presenti nella terra che possono danneggiare l'impianto (pietre, rami e pezzetti di legno e altri tipi di corpi grossolani che sono generalmente presenti durante gli scavi di un terreno).

La fonte primaria dello scambio termico viene dalla radiazione solare sul terreno, infatti mentre le sonde verticali possono essere posizionate al di sotto dell'edificio, per quelle orizzontali è errato.

Configurazioni di impianto:

- Tubo singolo ad anello (A);
- Tubo doppio ad anello (B)
- Tubo singolo a serpentina in serie (C);
- Tubo singolo a serpentina in parallelo (D);
- Bobine o earth coils (E);
- Basket geotermici (F)

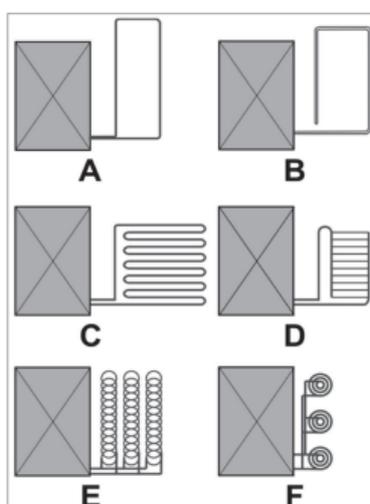


Figura 8 - Classificazione delle sonde geotermiche orizzontali: posa lineare con tubo

### 5.1.2. Impianti Open-Loop

Negli impianti open-loop, c'è uno scambio diretto tra la pompa di calore e il fluido termovettore, che nel caso specifico è l'acqua di falda oppure di bacini idrici superficiali come laghi, fiumi ecc. Le acque però, non sono disponibili ovunque e l'utilizzazione è soggetta ad autorizzazioni da parte degli enti preposti, a meno di vincoli o restrizioni di carattere ambientale.

Nel caso di acqua di falda, la struttura del pozzo consiste in un foro realizzato per trivellazione ed incamiciato con un tubo in pvc o acciaio zincato, quest'ultimo fissato alle pareti del pozzo con una miscela di malta cementizia. Suddetto tubo si estende fino alla zona saturata della falda e nella parte terminale vi è montato un filtro per contenere la parte solida in sospensione presente nelle acque di falda.

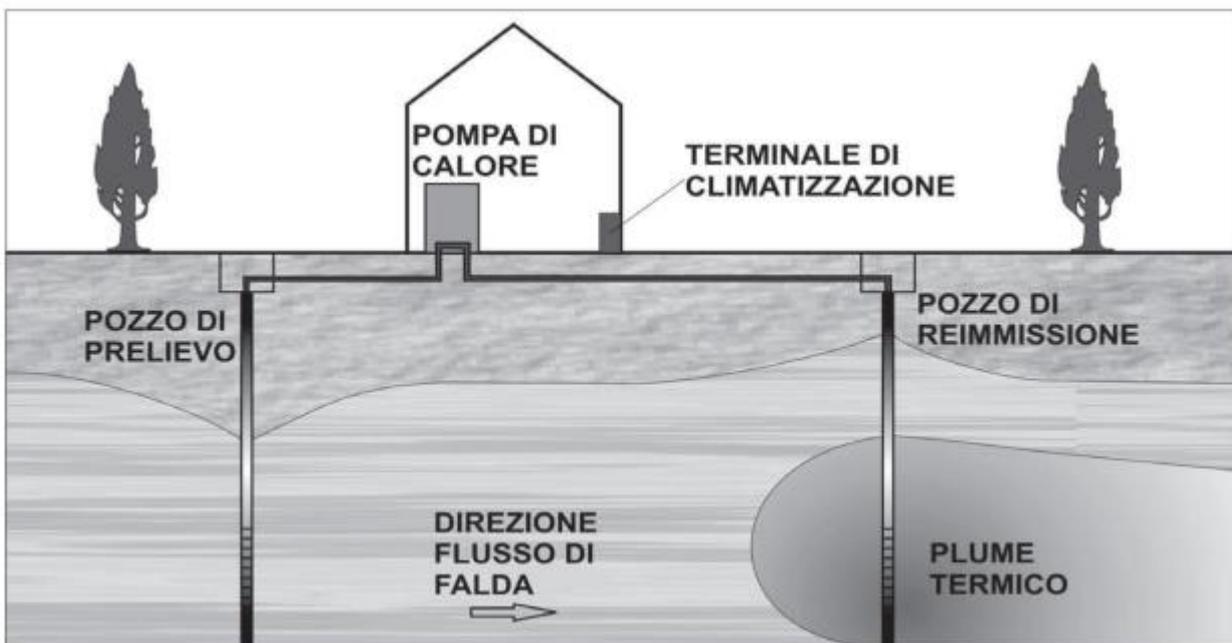


Figura 9 - Schema di un impianto geotermico a circuito aperto e del disturbo termico

Esistono vari tipi di layout di impianto a seconda se i pozzi siano diversi o uguali e a seconda se l'acqua utilizzata sia quella di falda o di acquifero superficiale. È possibile sintetizzare con una tabella le varie possibilità:

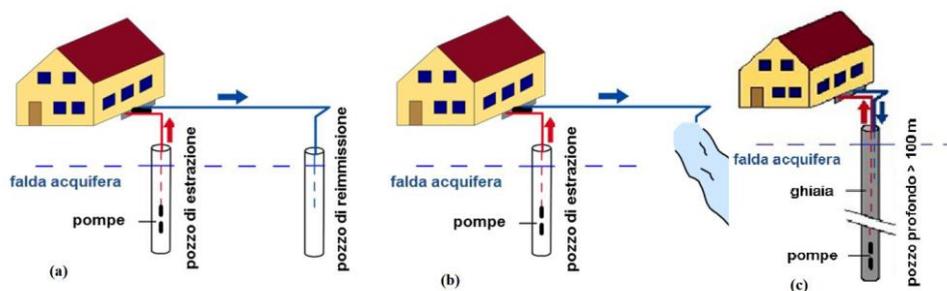


Figura 10 - Configurazioni impianti Open - Loop

| Lettera riferimento alla Figura 10 | Nome layout impianto | Fonte          | Pozzi    | Aspirazione                              | Scarico  |
|------------------------------------|----------------------|----------------|----------|--|--|
| a                                  | Well Doublet         | Acqua di falda | Separati | In Falda                                 | In falda   |
| a                                  | Well Doublet         | Acqua di falda | Separati | In Falda                                 | In falda diversa                                 |
| c                                  | Single well          | Acqua di falda | Unico    | In falda dalla parte terminale del pozzo | Nella stessa falda nella parte mediana del pozzo |
| b                                  | Standing column well | Aqua di Falda  | Uno solo | In falda                                 | In acquifero superficiale                        |

*Tabella 3 . Tabella di sintesi delle tipologie di impianto Open - Loop*

A loro volta queste due categorie hanno vari tipi di layout di seguito descritti:

**a) Impianto Well Doublet:**

I pozzi di aspirazione e scarico sono distinti e separati. L'acqua prelevata può essere scaricata o nella stessa sorgente di approvvigionamento o in un acquifero differente. Il primo caso si utilizza per non impoverire la falda, nel secondo caso invece c'è uno spostamento di acqua tra acquiferi differenti e indipendenti. È necessario quindi fare le dovute analisi di compatibilità idraulica, termica e chimica dei due acquiferi (Questa pratica non è consentita in Italia);

**b) Impianto Standing column well:**

Unico pozzo di aspirazione e scarico. La particolarità di questo pozzo è la geometria di aspirazione e scarico. Lungo la colonna del pozzo vi sono due valvole a differente altezza. L'aspirazione dell'acqua avviene alla parte inferiore, mentre lo scarico avviene nella parte superiore. Ciò avviene perché, l'acqua di scarico che viene scaricata superiormente, fluisce verso il basso e scambia calore con le pareti a contatto con la falda, arrivando in immissione quasi alla temperatura dell'acqua di prelievo. Una volta arrivato in falda, per miscelazione omogenizza quasi completamente la temperatura.

**c) Single well:**

in questo layout di impianto esiste un solo pozzo di prelievo, poiché lo scarico avviene in acquiferi superficiale, come fiumi, laghi ecc. questa modalità di scarico, riduce i costi di impianto e la complessità di installazione, tuttavia a livello ambientale ha due grandi criticità: potrebbe impoverire la falda di prelievo e danneggiare/modificare l'acquifero superficiale di scarico. Un'alternativa potrebbe essere lo scarico nella rete fognante previo consenso dell'ente gestore della rete fognaria e un'attenta analisi sulla reperibilità idraulica del sistema fognante urbano.

## 5.2. Pompe di calore

Le pompe di calore, sono delle macchine termiche che tramite un lavoro fornito, riescono a trasferire calore, da una sorgente fredda, ad una sorgente calda. Distinguiamo il funzionamento estivo da quello invernale:

- Riscaldamento invernale: la pompa di calore estrae calore dalla sorgente fredda (l'ambiente esterno) e lo cede all'ambiente da scaldare (casa);
- Raffrescamento estivo: la pompa di calore estrae calore dalla sorgente da raffreddare (casa) e lo cede all'ambiente caldo (ambiente esterno).

Dunque il principio di funzionamento rimane lo stesso, ma tra inverno ed estate vengono invertiti i pozzi termici con le sorgenti termiche.

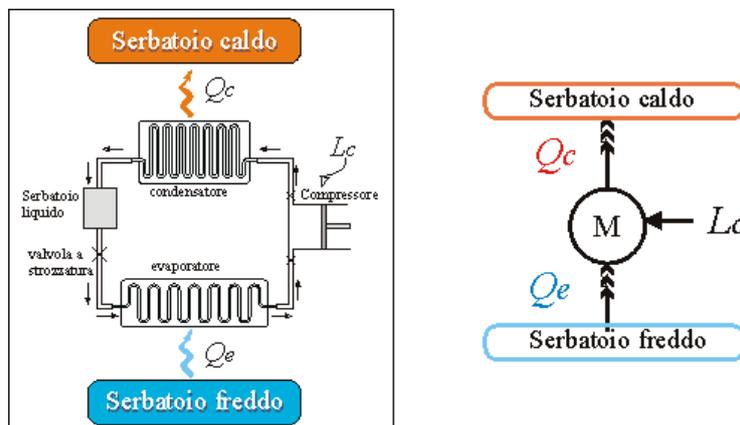


Figura 11 – Schema di funzionamento di una pompa di calore

Le pompe di calore in commercio sono di svariate tipologie e possono essere classificate per diversi criteri: refrigerante utilizzato, tipo di compressione, per tipologia di sorgente termica, ecc.

Degli esempi possono essere i seguenti:

- 1) Aria – aria → Questa tipologia di pompa di calore è molto semplice, estrae calore dall'aria esterna per riscaldare l'edificio (in inverno), invece estrae calore dall'edificio e lo manda all'ambiente esterno per raffreddare l'edificio (in estate);
- 2) Aria – Acqua → Questa tipologia di pompa di calore, preleva il calore dall'ambiente per riscaldare un fluido (acqua). Ai fini dell'applicazione del riscaldamento residenziale l'acqua riscaldata, può alimentare o una serie di radiatori o un sistema radiante (a pavimento o parete che sia);
- 3) Terra – Aria → Questa tipologia di pompa di calore, è comunemente chiamata “Pompa geotermica” ed è oggetto di questo studio di tesi. Questo tipo di pompe di calore, prendono calore dal terreno (che ha una temperatura circa costante tutto l'anno) e lo trasferiscono a qualsiasi

sistema di riscaldamento o di raffrescamento. Il sistema più efficiente tra tutti è il sistema radiante poiché fa sia da riscaldamento invernale che da raffrescamento estivo;

Nel caso delle pompe di calore geotermiche, vediamo quali sono nello specifico le singole sorgenti:

### **Riscaldamento invernale**

- 1) Sorgente termica da cui sottrarre calore: possono essere il suolo e le acque (sia sotterranee che superficiali).
- 2) Sorgente termica a cui cedere calore: Ambiente da riscaldare.
- 3) Lavoro: Energia elettrica.

### **Raffrescamento estivo**

- 1) Sorgente termica da cui sottrarre calore: l'ambiente interno da raffrescare
- 2) Serbatoio termico a cui cedere calore: il suolo o le acque che in inverno fungono da sorgente.
- 3) Lavoro: Energia elettrica.

Una delle scelte fondamentali per il dimensionamento della pompa è il fluido termovettore, ovvero quello che scorre nelle sonde inserite nella sorgente termica. Questo perché a seconda delle temperature dell'ambiente in cui si trova l'impianto, il fluido termovettore potrebbe congelare e la macchina di conseguenza andare in blocco.

Il circuito interno della pompa di calore è costituito da vari componenti. Nel caso di ciclo termodinamico INVERNALE, lo schema di funzionamento dei componenti è il seguente:

- L'Evaporatore → messo dal lato della sorgente fredda (terreno), assorbe calore dal terreno e lo cede al fluido refrigerante per farlo evaporare;
- Il Compressore → a questo componente viene fornito lavoro (elettricità) affinché comprima il fluido evaporato nell'evaporatore per portarlo ad alte pressioni e temperature;
- Il Condensatore → il fluido precedentemente compresso, arriva a questo componente ad alte temperature e pressione. Qui, cede calore all'ambiente da scaldare (serbatoio caldo) e passa allo stato liquido;
- Una Valvola di laminazione → Riporta il fluido alla pressione di inizio ciclo.

Nel caso di ciclo termodinamico ESTIVO, questo viene invertito ma le pompe sono meno efficienti perché il lavoro del motore elettrico viene ceduto all'esterno e quindi perso. Mentre nel ciclo invernale, il lavoro contribuisce al riscaldamento dell'ambiente.

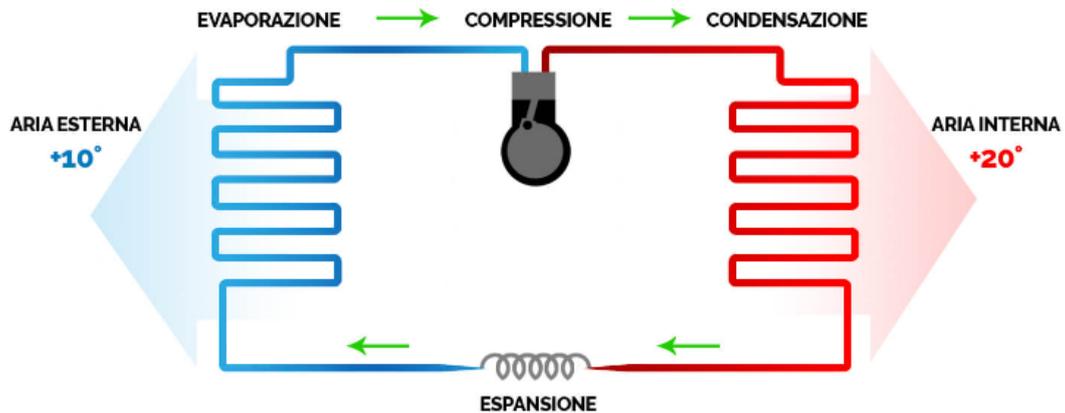


Figura 12. Funzionamento di una pompa di calore - Fonte: <https://nuovisistemienergetici.it/>

Quello che accomuna tutte le pompe di calore dunque è il ciclo e le trasformazioni termodinamiche principali che sono: compressione, condensazione, espansione ed evaporazione.

Analizzando il ciclo termodinamico di una pompa di calore, come quello riportato qui sotto, ne descriviamo le trasformazioni, le grandezze in gioco e dove agire affinché il ciclo sia più efficiente possibile.

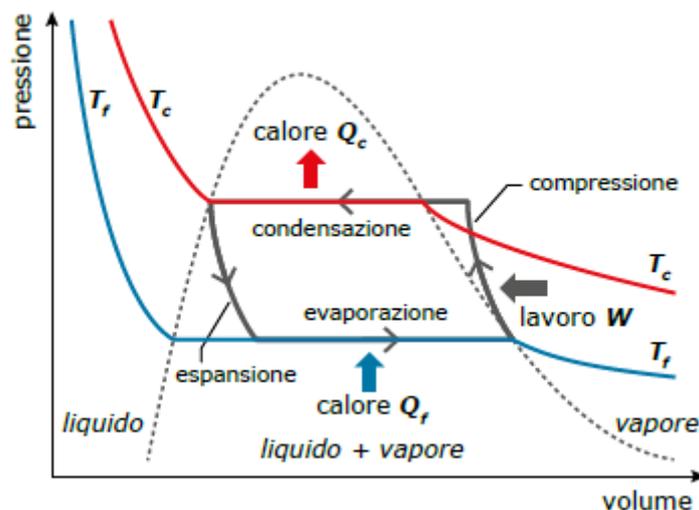


Figura 13. Ciclo termodinamico su Diagramma p-v. Fonte: Zanichelli editore S.p.A. Bologna

Dal Grafico dunque vediamo le trasformazioni che qui di seguito descriviamo.

1. Compressione (1-2): Si fornisce lavoro al compressore che fa aumentare la temperatura e la pressione del fluido;
2. Condensazione (2-3): Il fluido condensa e cede calore;
3. Espansione (3-4): tramite la valvola di laminazione, si riporta il fluido al ramo di bassa pressione;
4. Evaporazione (4-1): In questa trasformazione si fornisce calore al fluido aumentandone la temperatura fino a farlo evaporare completamente;

### 5.2.1. Prestazioni energetiche della pompa di calore – Il COP e l'EER

La pompa di calore come già detto nel paragrafo precedente, può funzionare sia per il riscaldamento invernale che per il raffrescamento estivo. Nei due casi, l'efficienza energetica, viene calcolata da due diversi coefficienti:

- COP: Coefficient of performance (in caso di riscaldamento invernale);
- EER: Energy efficiency ratio (in caso di raffrescamento estivo).

Entrambi definiscono quanta energia viene prodotta rispetto a quella consumata. La differenza tra i due indici è la quota di calore generato dal compressore, che in estate viene dissipata e quindi, mentre in inverno viene considerata come apporto termico al condensatore.

Definendo:

- $Q_1$ : calore ricevuto dal fluido refrigerante
- $Q_2$ : calore ceduto al fluido refrigerante
- $W$ : lavoro fornito al fluido refrigerante

Possiamo definire nei modelli ideali, il COP e dell'EER così:

$$COP = \frac{Q_1}{W} = \frac{Q_1}{Q_1 - Q_2} \quad (1)$$

$$EER = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} \quad (2)$$

### **5.3. Terminali di impianto**

Come le sonde determinano l'equilibrio termico dal lato terreno, i terminali d'impianto determinano l'equilibrio termico lato utenza. Dal punto di vista termico, dal lato dei terminali di impianto abbiamo due temperature: la temperatura dell'ambiente da riscaldare/raffrescare e la temperatura del fluido termovettore. Concettualmente i terminali sono degli scambiatori di calore, quindi valgono le regole generali per gli scambiatori, ovvero che a parità di energia termica da scambiare, al crescere della superficie di scambio (sia tubi che radiatori ecc.) diminuisce la differenza di temperatura tra ambiente e fluido termovettore.

Vediamo di seguito i terminali più utilizzati in ambito civile:

#### **5.3.1. Radiatori**

I radiatori, conosciuti anche come termosifoni, sono degli scambiatori a fascio tubiero, ovvero sia delle piastre dentro a cui scorre acqua calda. I radiatori sono prodotti in singoli elementi di acciaio zincato (verniciato per necessità di design) che possono essere aggiunti uno all'altro formando dei terminali più o meno grandi a seconda dell'ambiente da scaldare. Il calcolo di quanti elementi sono necessari per scaldare un ambiente, viene fatto considerando la potenza termica del singolo elemento e poi considerando una serie di coefficienti dati dalle case produttrici si arriva al numero di elementi per il fabbisogno termico del locale.

Dunque nei radiatori, l'energia viene scambiata per conduzione (fluido su acciaio) e convezione (acciaio su ambiente). Per questo motivo la posizione all'interno del locale da scaldare è fondamentale. Poiché l'aria calda tende a salire verso l'alto e quella fredda a rimanere verso il basso, se posizionassimo un radiatore nella parte alta del locale, questi non avrebbe effetto sugli strati bassi del locale.

#### **5.3.2. Pannelli radianti**

I pannelli radianti, si sviluppano su intere superfici che possono essere soffitti, pareti oppure appunto i pavimenti. L'impianto è molto semplice, costituito da una serie di serpentine all'interno di cui passa il fluido termovettore e possono essere utilizzati sia per riscaldamento che raffrescamento.

Come detto in premessa, a parità di energia termica da scambiare, una maggiore superficie di scambio diminuisce il salto di temperatura tra fluido e ambiente. Per questo i pannelli radianti, occupando una elevata superficie rispetto ai radiatori, hanno una temperatura di funzionamento del fluido bassa rispetto agli impianti tradizionali. Basta ragionare sul fatto che per aumentare la superficie di scambio basta aumentare la densità dei tubi passati e dunque diminuire ancora la temperatura di mandata del fluido termovettore.

Il pannello radiante dunque scambia energia per irraggiamento, per questo motivo rispetto ai radiatori, la posizione conta poco e spiega anche il fatto che possono essere utilizzati per il raffrescamento mentre per i radiatori non è possibile.

### **5.3.3. Ventilconvettori**

I Ventilconvettori a differenza dei due precedenti, lavorano tipicamente per convezione. La forma, che negli anni è diventata più o meno standard per la maggior parte dei ventilconvettori in commercio, permette la raccolta di eventuale condensa e quindi anche la deumidificazione dell'ambiente. Inoltre, lavorando come un ventilatore, e quindi spingendo meccanicamente l'aria, i ventilconvettori funzionano sia in posizione alta che bassa.

## 6. Campo Sperimentale

Il campo sperimentale oggetto di studio di questa tesi, consiste in una nuova tipologia di approvvigionamento del calore controterra. Questo sistema, prende il nome di “Geothermskin”, ed è un sistema brevettato dal Politecnico di Torino.

È stato installato nei pressi di un muro di contenimento esistente dell’Energy Center del Politecnico di Torino, sito in via Borsellino. L’Energy center è un nuovo edificio che ha la funzione di ospitare aziende, start-up e altri soggetti attivi nel campo di ricerca energetica.

Il sistema è costituito da tre circuiti, che sono stati disposti in due modi diversi, ovvero i primi due orientati orizzontalmente e il terzo orientato verticalmente a scopo di ricerca. Ad ogni modo, tutti i circuiti distano 20 cm dalle mura e 40 cm l’uno rispetto all’altro. L’area dell’intero sistema è lunga 7,50 mt e alta 4,60. Ogni circuito ha una lunghezza di 2,50 mt. I tubi delle serpentine sono in polietilene reticolato di diametro 20 mm e spessi 2 mm.

Oltre al sistema controterra, fa parte dell’impianto un locale che ospita la pompa di calore, l’utenza termica e l’accumulo.

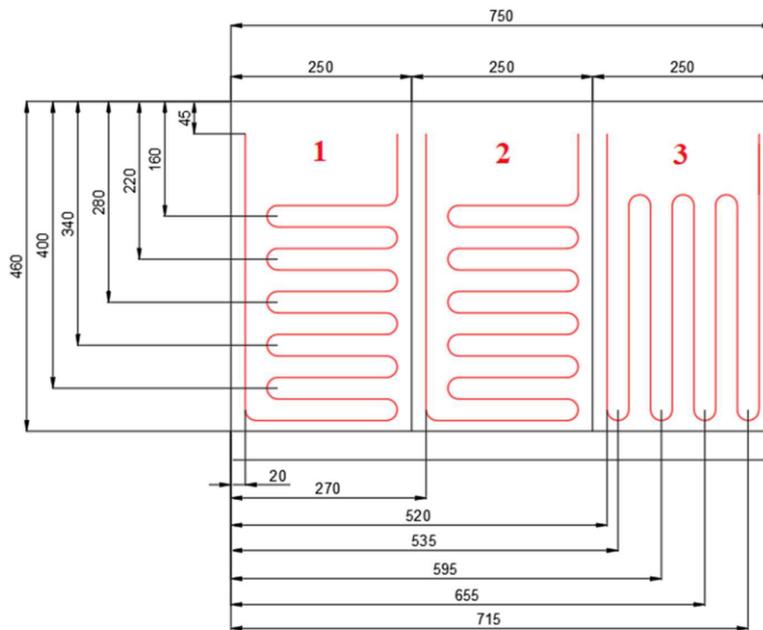


Figura 14 - layout delle sonde geotermiche (quotate in cm)

## 6.1. Fasi costruttive

All'interno del perimetro dell'Energy Center, in adiacenza del muro di contenimento è stato effettuato un primo scavo di circa 1 metro.

Successivamente sono stati installati i montanti dell'armatura di contenimento (rinforzati tramite l'utilizzo di puntoni in acciaio spinti nel terreno tramite l'escavatore), che accoglieranno tra di loro i pannelli laterali per contenere eventuali smottamenti di terra.

In questo modo è stato possibile continuare lo scavo fino ad una quota di (- 4,70) mt per poi gettare un massetto di calcestruzzo magro al fine di creare un piano di lavoro che è servito alla squadra di termotecnici per lavorare in sicurezza al corretto posizionamento delle sonde sulla parete in calcestruzzo esistente tramite tasselli idonei.

Ai fini del collegamento "sonde – pompa di calore" sono stati effettuati dei fori nella parete in calcestruzzo con la carotatrice ad acqua.

Alla fine dei lavori lo scavo è stato ripristinato e chiuso.



*Figura 15 - lay-out sonde completato*

Queste sonde sono poi collegate alla pompa di calore che si trova all'interno dei locali interrati dell'Energy Center. La pompa è la NIBE F1155 da 6 kW ed è affiancata ad un accumulatore da 100 litri Pacetti modello: VTCHF e un ventilconvettore Sabiana modello: CRC24.

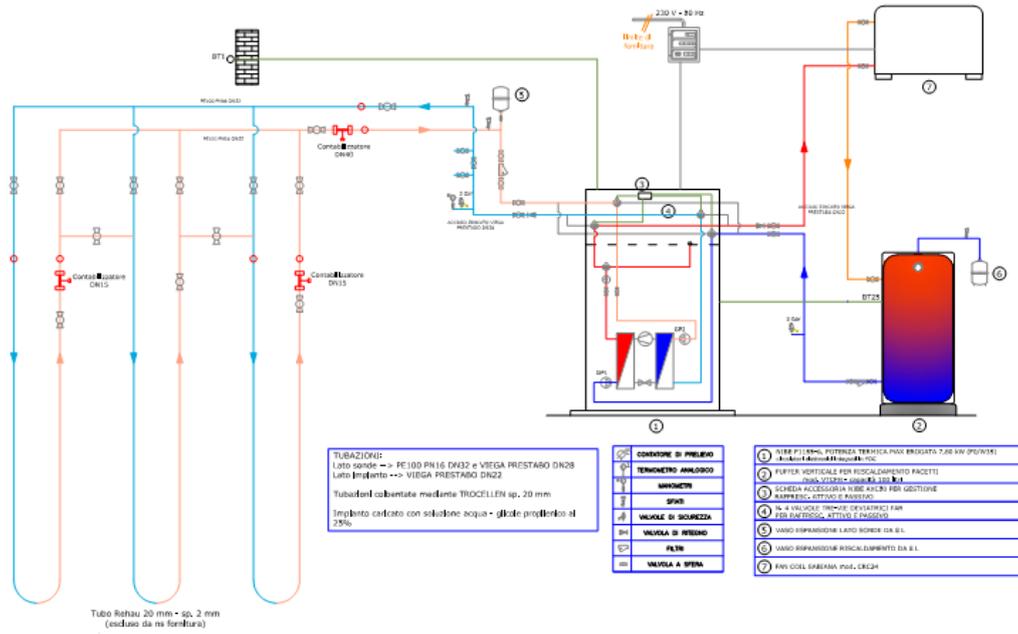


Figura 16 - Layout impiantistico del sistema geotermico dell'Energy Center

## 6.2. Descrizione del funzionamento dell'impianto

La pompa di calore geotermica elettrica presente nell'impianto, sottopone il fluido frigorigeno ad un ciclo termodinamico inverso, permettendo così lo scambio di calore tra il terreno e l'aria interna sfruttando un fluido termovettore, che nel caso specifico è una miscela di acqua e glicole.

Tramite il sistema di sonde "Geothermskin" descritto in precedenza, avviene lo scambio termico con terreno, mentre l'interazione termica con l'aria interna avviene con un ventilconvettore.

L'impianto è costituito da tre gruppi funzionali principali:

- a) **Circuito Primario:** Circuito dove scorre la miscela di acqua e glicole, formato dalle sonde Geothermskin che consentono lo scambio di calore con il terreno;
- b) **Pompa di calore elettrica:** macchina che opera tra i due circuiti ai fini dello scambio di calore tra ambiente interno ed esterno (terreno);
- c) **Circuito secondario:** circuito dove corre la stessa miscela di acqua e glicole che consente lo scambio di calore con l'aria interna attraverso un ventilconvettore che sarebbe il terminale di impianto.

## 6.3. Circuito Primario

Il circuito è percorso da una miscela di acqua e glicole al 25% grazie al circolatore GP2 installato sul braccio di ritorno e la portata media è di circa 0,46 m<sup>3</sup>/h ("Analisi dell'utilizzo di un sistema energetico contro terra per la climatizzazione di edifici" – Federica Tofalo). Possiamo distinguere due parti del circuito, il lato delle sonde installate a contatto con il terreno e il collegamento delle sonde alla pompa di calore. Come già spiegato al paragrafo 6.1 e come si vede dalla figura 10, le sonde sono staffate nel muro di contenimento in calcestruzzo armato e poi comunicano con l'altra parte del muro con dei fori precedentemente fatti con la carotatrice ad acqua. Dall'altra parte troviamo i collegamenti che portano il fluido del circuito primario alla pompa di calore.

Questa parte di impianto è realizzato con tubi in acciaio zincato di diametro 28 mm coibentati e lunghi 65m, per arrivare fino al locale dove è installata la pompa di calore.

Tra i tubi delle sonde e i tubi di trasporto al locale pompa di calore, troviamo della componentistica utile sia all'analisi dei dati che al funzionamento vero e proprio dell'impianto. Qui di seguito elenchiamo e descriviamo nel dettaglio tutto ciò che è presente.

### Sul condotto di mandata:

1. Valvola di sicurezza a molla con scarico convogliato tarata a 3 bar;
2. Valvola a sfera compresa tra le due valvole a sfera poste sulle derivazioni (necessarie per il rabbocco manuale della miscela di acqua e glicole);

### Sul condotto di ritorno

1. Vaso di espansione chiuso;
2. Filtro ad Y con cestello metallico; intercettato da due valvole per chiudere il ritorno e le derivazioni di collegamento con il circuito solare.
3. Una valvola a 3 vie miscelatrice affinché l'acqua calda per alimentare la pompa di calore sia inferiore a 30°C.

### Sui collettori di mandata e di ritorno delle sonde

1. Due contabilizzatori termici ad ultrasuoni (SITRANS FUE950 energy calculator) installati su due partenze differenti;
2. Un contabilizzatore dello stesso modello è installato sul collettore generale di mandata per misurare l'energia termica totale trasferita verso le sonde a terreno.

Questo layout fa sì che l'energia termica trasferita al terzo circuito debba essere calcolata come la differenza del secondo contabilizzatore meno il primo.



Figura 17 - Collettori circuito primario Geothermskin

## 6.4. Pompa di calore

La pompa di calore elettrica Nibe F1155 è posizionata nel seminterrato. Ha una potenza termica nominale di 3,15KW, dimensioni 1.5x0.6x0.62 m e peso di 150kg. L'alimentazione è monofase a 230 V e 50hZ.

Il fluido frigorigeno di ciclo utilizzato dalla pompa di calore è l'R407C. Questo segue un classico ciclo termodinamico nel caso di riscaldamento invernale e un ciclo termodinamico inverso, nel caso di raffrescamento estivo.

Passa dunque in un compressore a pistoncini con inverter e una volta compresso, scorre nel circuito chiuso della macchina con portata nominale di 0.08 l/s dove scambia calore con l'esterno fluendo al primario degli scambiatori a piastre a bordo macchina che rappresentano il condensatore e l'evaporatore. Al secondario di questi scorre una miscela di acqua e glicole al 25% in volume che consente, grazie ai circuiti idraulici primario e secondario, di trasferire il calore al circuito sonde ed il ventilconvettore che li scambieranno rispettivamente con il terreno e l'aria. La valvola di laminazione è di tipo elettronico. La pompa di calore è equipaggiata con i circolatori GP1 e GP2 che fanno circolare la miscela acqua-glicole rispettivamente sul circuito secondario e su quello primario e dal pressostato che protegge il circuito di macchina da variazioni anomale di pressione interrompendone il funzionamento se la pressione del frigorigeno supera i 32 bar o scende al di sotto di 1.5 bar. La macchina è collegata al circuito primario con tubazioni di mandata e ritorno  $\varnothing 22$ mm ed Al secondario con tubi  $\varnothing 28$  mm tutti in acciaio zincato e coibentati. L'inversione stagionale e la realizzazione del riscaldamento o raffrescamento passivo è realizzata sul circuito idraulico con quattro valvole a 3 vie deviatrici gestite dalla scheda accessoria NIBE AXC50. La pompa di calore può operare con una temperatura di ritorno del circuito secondario massima di 58 °C ed a una temperatura in uscita dalla pompa di calore di 65 °C con solo il compressore (70°C attivando la resistenza elettrica integrata).

La pompa, è caratterizzata dalla presenza di componenti a bordo macchina ed impianti ausiliari di tipo elettrico ed idraulico. Inoltre è presente un'infrastruttura di monitoraggio costituita da sensori per la misura dei principali parametri di funzionamento. Le configurazioni impiantistiche che derivano dalla diversa posizione delle valvole a tre vie differiscono per le diverse modalità di funzionamento e verranno approfondite nel capitolo 'logiche di funzionamento'. La modifica dei parametri di funzionamento e delle funzioni di macchina viene condotta dal pannello di controllo frontale a cui si accede aprendo lo sportello esterno della pompa di calore.

## 6.5. Circuito secondario

Come il primario, anche questo circuito è percorso da una miscela di acqua e glicole al 25% e ha una portata variabile nell'intervallo  $0.29 - 0.34 \text{ m}^3/\text{h}$ , sostenuta da un circolatore chiamato GP1, installato sul braccio di ritorno. I tubi di mandata e ritorno sono sempre realizzati in acciaio zincato e coibentati, ma rispetto a quelli del circuito primario, hanno un diametro di 22mm. Il ruolo di questi tubi è quello di collegare in serie la pompa di calore, il ventilconvettore e l'accumulo da 100 L. Si è deciso di installare un piccolo accumulo di 100L per aumentare la capacità termica dell'impianto e diminuire la frequenza di accensione del compressore della pompa di calore avendo così due risultati immediati, ovvero il risparmio in termini di energia elettrica e aumento della vita utile della pompa di calore. All'interno del ventilconvettore, il fluido attraversa un corpo alettato e lambito da una portata d'aria massima di  $340 \text{ m}^3/\text{h}$  data da un ventilatore elettrico.



Figura 18 - lay-out impianto lato utenza

## 6.6. Sensoristica nell'intera configurazione impiantistica

L'impianto nelle sue parti: sonde geotermiche, pompa di calore, ventilconvettore e accumulo più tutti i collegamenti, ha una moltitudine di sensoristica installata per l'approvvigionamento dei dati da analizzare.

### 6.6.1. Sensoristica a bordo macchina (pompa di calore)

Sui circuiti idraulici della pompa di calore, sono stati installati i seguenti sensori di temperatura:

- **BT1**: sensore di temperatura esterna
- **BT3**: sensore di temperatura di ritorno del fluido riscaldante/refrigerante
- **BT10**: sensore di temperatura di ritorno del fluido dalle sonde geotermiche
- **BT11**: sensore di temperatura di mandata dall'evaporatore
- **BT12**: sensore di temperatura di mandata dal condensatore
- **BT14**: sensore di temperatura gas uscita compressore
- **BT17**: sensore di temperatura gas aspirazione compressore

Le rilevazioni dei dati hanno una frequenza di un minuto e vengono memorizzati per giornata in una memoria fisica o cloud, a disposizione del Politecnico per poi essere analizzati.

### 6.6.2. Sensoristica lato terreno

Nella porzione di terreno dove è installato il sistema Geothermskin, è stato inserito un importante sistema di sensoristica ai fini di monitorare l'intero impianto dal lato delle sonde (e quindi dello scambio di calore con il terreno). Il predetto sistema è in grado di caratterizzare lo scambio di calore, analizzare gli effetti termo-meccanici indotti dall'attivazione del muro retrostante la geo-struttura e monitorare come l'evoluzione delle condizioni fisiche del terreno influiscano sull'interazione con GeothermSkin.

In dettaglio, il sistema è il seguente:

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

Tabella 4 - Dettaglio sensoristica impianto lato sonde

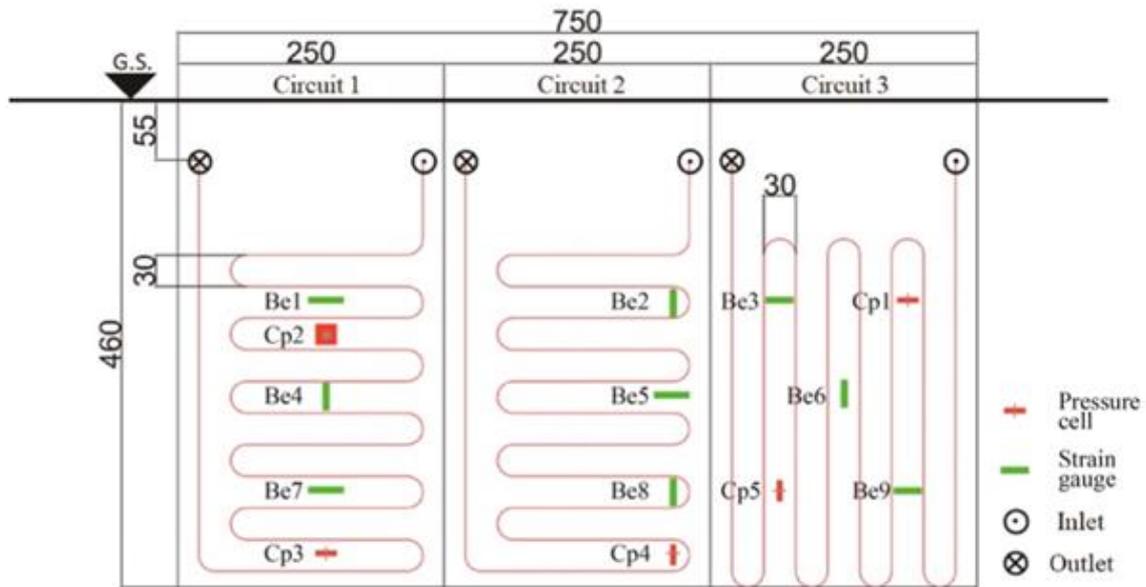


Figura 19 - schema di posizionamento estensimetri e celle di pressione

La misura delle temperature è condotta con diverse termoresistenze posizionate su quattro piani a profondità crescente in numero progressivamente più basso tanto maggiore è la profondità di installazione. Infatti all'aumentare della profondità è attesa una maggior stabilità termica e gradienti termici inferiori caratterizzabili con un numero inferiore di termoresistenze. Inoltre sono stati predisposti alcuni igrometri per la valutazione dell'umidità.

## **6.7. Logiche di funzionamento**

### **6.7.1. Riscaldamento invernale**

L'impianto è in grado di funzionare sia in modalità riscaldamento invernale, sia in raffrescamento estivo. La miscela di acqua e glicole scorrendo nel circuito primario sottrae calore al terreno ed aumenta la sua temperatura. Una volta aumentata la propria temperatura, attraversa la valvola 3 entrando dalla via "a" ed uscendo dalla "b", arrivando così nel condensatore dove cede calore al fluido frigorigeno (R407C) che scorre nel circuito interno della pompa di calore, raffreddandosi. Attraversa quindi la valvola 1 entrando dalla via "a" ed uscendo dalla "b" e viene reimpressa nelle sonde a terreno.

Il fluido frigorigeno, in condizioni bifase dopo la laminazione, attraversa il condensatore e assorbendo calore, evapora. L'R407C si surriscalda, viene compresso e raggiunge la pressione massima di ciclo in condizioni di vapore saturo.

Una volta in questo stato, attraversa l'evaporatore dove si desurriscalda, condensa e sottoraffredda cedendo calore all'acqua e glicole del circuito secondario d'utenza. L'acqua e glicole che attraversa il condensatore aumenta la sua temperatura, attraversa la valvola 2 entrando dalla via "a" ed uscendo dalla "b" ed attraversa la batteria alettata del ventilconvettore che cede calore all'aria ambientale. L'acqua a temperatura inferiore viene immessa nell'accumulo. L'acqua fredda prelevata dall'accumulo attraversa la valvola 4 entrando e uscendo rispettivamente dalla via "a" e "b" e torna nuovamente al condensatore.

### **6.7.2. Raffrescamento estivo**

L'acqua e glicole a bassa temperatura entra nel ventilconvettore dove attraversa la batteria alettata e si scalda sottraendo calore all'ambiente interno. All'uscita dal ventilconvettore viene immessa nell'accumulo da cui viene prelevata per essere nuovamente raffreddata. A tal proposito viene indirizzata sulla valvola 3, nella quale entra dalla via "c" ed esce dalla "b", che la devia all'ingresso dell'evaporatore da cui uscirà a temperatura inferiore avendo ceduto calore al frigorigeno che sta subendo la fase di evaporazione. L'acqua fredda in uscita attraversa la valvola 1 dalle vie "b" e "c" e viene deviata sulla mandata del ventilconvettore. Il frigorigeno esegue il ciclo nello stesso verso pertanto gli scambiatori a piastre ricoprono lo stesso ruolo della fase di riscaldamento. L'acqua e glicole di ritorno dal circuito sonde viene indirizzata alla valvola 4 in cui entra ed esce rispettivamente da "c" e "b" per essere deviata all'ingresso del condensatore dove riceverà il calore di condensazione del fluido frigorigeno. L'acqua e glicole a maggior temperatura in uscita dal condensatore viene immessa dalla valvola deviatrice 2 (ingresso da "a" ed uscita da "b") sulla mandata del circuito sonde, attraversa il geo-scambiatore e cede calore al terreno raffreddandosi. Infine fluisce nuovamente sul ritorno del circuito sonde. Interessante osservare che l'inversione stagionale è realizzata sul circuito idraulico pertanto non si verifica l'inversione del ruolo degli scambiatori e del verso di percorrenza del ciclo rispetto al funzionamento invernale.

### **6.7.3. Riscaldamento/Raffrescamento attivo e passivo**

La modalità di funzionamento passivo consente di climatizzare l'ambiente interno mantenendo il compressore della pompa di calore spento ed alimentando solo i circolatori dei circuiti acqua e glicole con conseguente riduzione dell'assorbimento di energia elettrica. Il riscaldamento passivo è perseguibile qualora siano verificate due contemporaneamente due condizioni:

- a. La temperatura del terreno sia sufficientemente alta da scaldare l'acqua e glicole a valori di temperatura adeguati a soddisfare il carico termico invernale;
- b. Il carico termico invernale sia sufficientemente basso in virtù della maggiore temperatura ambientale interna.

Queste due condizioni si verificano tipicamente nei mesi primaverili ed autunnali.

Il raffrescamento passivo è perseguibile qualora siano verificate contemporaneamente le seguenti condizioni:

- a. La temperatura del terreno sia sufficientemente bassa da raffreddare l'acqua e glicole a valori di temperatura adeguati a soddisfare il carico frigorifero;
- b. Il carico frigorifero sia sufficientemente basso in virtù della maggiore temperatura ambientale interna.

## 7. Obiettivo dello studio

Il fine ultimo di questo studio è un'analisi energetica che comprenda le potenze scambiate, i valori di COP della pompa e tutti i dati termodinamici dell'impianto partendo dai dati prelevati dalla sensoristica, dai dati ambientali e dai dati da noi imposti.

Dopo aver effettuato la prima analisi energetica eseguita utilizzando i metodi di calcolo tradizionale e supportata da strumenti elettronici come i fogli di calcolo, si procede ad un confronto con i risultati ottenuti tramite l'utilizzo del software Coolpack. In questo modo, si valuta quanto la macchina reale si avvicini ai risultati di una simulazione. I dati necessari per l'analisi vengono estratti dalle centraline presenti a bordo macchina che gestiscono la sensoristica. La centralina restituisce i dati in formato “.csv” quindi per essere lavorati devono essere importati in un foglio di calcolo e convertiti alle grandezze reali tramite appositi fattori presenti nel file originario.

### 7.1. Coolpack

CoolPack è un software con all'interno vari modelli di simulazione utilizzati per ottimizzare energeticamente dei sistemi a ciclo inverso. Il software è principalmente rivolto a frigoristi, ingegneri, studenti e in generale a tutte quelle figure che studiano il consumo energetico presente e futuro dei sistemi termodinamici inversi.

L'idea degli sviluppatori di CoolPack è stata quella di creare una raccolta di programmi di simulazione piccoli e intuitivi.

Nel tutorial scaricabile di Coolpack si legge “Il tipico programma di simulazione in CoolPack riguarda solo il tipo di sistema di refrigerazione e ha uno scopo di indagine specifico. Pertanto richiede solo gli input/selezioni dell'utente necessari per descrivere le condizioni operative ecc. e non alcun input per descrivere la progettazione del sistema o per specificare la struttura di input/output associata allo scopo della simulazione.”

Gli sviluppatori dei programmi per CoolPack si sono concentrati sulla semplificazione dei modelli di sistema. Infatti l'utente può selezionare il refrigerante, specificare gli input (come pressione e temperatura).

CoolPack si suddivide in tre gruppi principali che sono ‘Refrigerant Utilities’, ‘EESCoolTools’ e ‘Dynamic’. In questo studio sono stati utilizzati i primi due:

Dal primo gruppo “Refrigerant Utilities” sono stati utilizzati due Tools nel seguente modo:

- 1) “Refrigerant Utilities”: per trovare i valori delle variabili di stato del ciclo e tracciare quest’ultimo nel diagramma  $\log(p)$ - $h$
- 2) “Refrigerant Calculator”: Per trovare le variabili mancanti che non è stato possibile trovare con il tool precedente e per il calcolo del  $C_{pR407C}$ .

Dal secondo gruppo “EESCoolTools” è stato utilizzato il Tool “Cycle Analysis per il calcolo delle grandezze termodinamiche, rendimento e il COP. I valori di input del tool sono le temperature di saturazione nell’intervallo di pressione considerato e le grandezze calcolate nell’analisi tradizionale, ovvero: la portata del fluido refrigerante, la potenza del compressore e le temperature di mandata e aspirazione del compressore (BT14 eBT17). Dopo aver inserito tutti gli input e premuto il pulsante “Calculate”, il programma restituisce il ciclo completo, inoltre attraverso il comando “State Points” restituisce le coordinate di Pressione, Temperatura, Entalpia e densità di tutti i punti del ciclo.

| CYCLE SPECIFICATION              |          |                      |       |                            |        |                        |          |                                 |      |
|----------------------------------|----------|----------------------|-------|----------------------------|--------|------------------------|----------|---------------------------------|------|
| TEMPERATURE LEVELS               |          | PRESSURE LOSSES      |       | SUCTION GAS HEAT EXCHANGER |        | REFRIGERANT            |          |                                 |      |
| $T_E$ [°C]:                      | 13,0     | $\Delta T_{SH}$ [K]: | 0     | $\Delta p_{SL}$ [K]:       | 0      | No SGHX                | 0,30     | R407C                           |      |
| $T_C$ [°C]:                      | 41,8     | $\Delta T_{SC}$ [K]: | 0     | $\Delta p_{DL}$ [K]:       | 0      |                        |          |                                 |      |
| CYCLE CAPACITY                   |          |                      |       |                            |        |                        |          |                                 |      |
| Mass flow $\dot{m}$ [kg/s]       | 0,009854 | $\dot{Q}_E$ [kW]     | 1,605 | $\dot{Q}_C$ [kW]           | 1,95   | $\dot{m}$ [kg/s]       | 0,009854 | $\dot{V}_S$ [m <sup>3</sup> /h] | 1,28 |
| COMPRESSOR PERFORMANCE           |          |                      |       |                            |        |                        |          |                                 |      |
| Power consumption $\dot{W}$ [kW] | 0,4223   | $\eta_{IS}$          | 0,493 | $\dot{W}$ [kW]             | 0,4223 |                        |          |                                 |      |
| COMPRESSOR HEAT LOSS             |          |                      |       |                            |        |                        |          |                                 |      |
| Discharge temperature $T_2$ [°C] | 64,22    | $f_Q$                | 33,5  | $T_2$ [°C]                 | 64,2   | $\dot{Q}_{LOSS}$ [kW]  | 0,1413   |                                 |      |
| SUCTION LINE                     |          |                      |       |                            |        |                        |          |                                 |      |
| Outlet temperatur $T_8$ [°C]     | 20,2     | $\dot{Q}_{SL}$ [W]   | 63    | $T_8$ [°C]                 | 20,2   | $\Delta T_{SH,SL}$ [K] | 7,3      |                                 |      |

Figura 20 - Coolpack gruppo "EESCoolTools: Cycle Analysis – Cycle specification" per la giornata del 25/10/2019

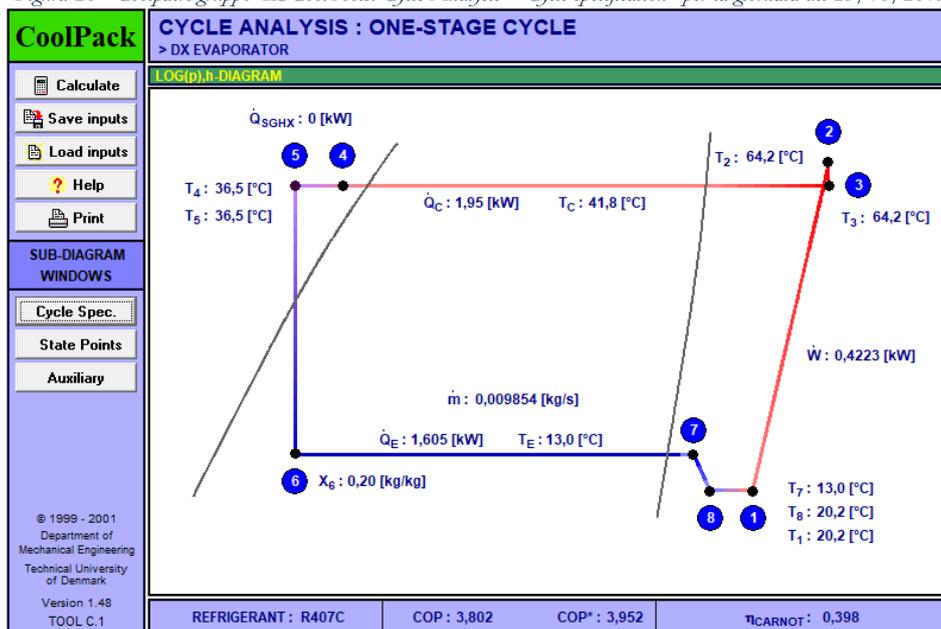


Figura 21 - Coolpack gruppo "EESCoolTools: Cycle Analysis" per la giornata del 25/10/2019

## 7.2. Ipotesi iniziali e regolazione della PdC

### 7.2.1. Ipotesi iniziali

Come descritto al paragrafo 6.6.1. a bordo della PdC sono presenti vari sensori di Temperatura collegati ad una centralina che raccoglie i dati e li salva su una memoria in formato “.csv” o “.txt” e la frequenza di campionamento può essere regolata a step di 30 secondi o più. Oltre ai sensori di temperatura, sono presenti due sensori che misurano la percentuale di funzionamento dei circolatori GP1 e GP2. Risultano assenti i sensori di pressione sul compressore. Per questo motivo è stato necessario ipotizzare costanti le pressioni a monte e valle del compressore tenendo conto di ciò che dice il manuale della pompa, ovvero si consiglia di lavorare nei seguenti range:

- Per il ramo di alta pressione:  $16 \text{ bar} < P_{\text{alta}} < 30 \text{ bar}$ ;
- Per il ramo di bassa pressione:  $7 \text{ bar} < P_{\text{bassa}} < 11 \text{ bar}$ .

Per il seguente studio, come descritto nel prossimo capitolo, sono state adottate come pressioni di esercizio: 7 bar per il ramo di bassa pressione e 16 bar per il ramo di alta pressione.

Per la fase di riscaldamento, da un lavoro di tesi precedentemente svolto nel 2019 (“Analisi dell’utilizzo di un sistema energetico contro terra per la climatizzazione di edifici” – Federica Tofalo), dai flussimetri è stata rilevata una portata di acqua e glicole al circuito primario di 460 l/h (0,12987 kg/s) durante la fase di incremento della temperatura.

Le altre ipotesi riguardano il calore specifico a pressione costante nei tre circuiti.

- Circuito primario, fluido refrigerante: miscela di acqua e glicole al 25%  $\rightarrow c_p = 3,9 \frac{KJ}{kgK}$ ;
- Circuito secondario, fluido refrigerante: acqua  $\rightarrow c_p = 4,186 \frac{KJ}{kgK}$ ;
- Circuito interno alla PdC, Fluido: R407C  $\rightarrow c_p$  non costante poiché lavora a Temperature e pressioni molto diverse durante la giornata. Ai fini dei calcoli, serve conoscere il  $C_p$  nel ramo di compressione del fluido, quindi tra le temperature BT14 e BT17. Quindi, sono stati calcolati i valori di massima e di minima di entrambe le temperature e i relativi  $C_p$  tramite l’estensione “Refrigerant Calculator” del software Coolpack.

La densità dei fluidi dei circuiti primario e secondario viene considerata costante:

- Circuito primario:  $\rho_{\text{acqua e glicole}} = 1016,37 \frac{Kg}{m^3}$
- Circuito secondario:  $\rho_{\text{acqua}} = 1000 \frac{Kg}{m^3}$

Un altro sensore mancante è quello della temperatura del fluido refrigerante all'uscita del condensatore. Per questo motivo, è necessario ipotizzare che il fluido in quel punto si trovi sulla curva limite inferiore nel ramo di alta pressione e che non subisca alcun sotto-raffreddamento.

### 7.2.2. Regolazione della PdC

La Pompa di calore oggetto di questo studio di tesi, accende e spegne il compressore a seconda di come è stata regolata dall'utente. Le possibili funzioni di regolazione sono due:

1. Si fissa la Temperatura di mandata dell'impianto ad un determinato valore costante;
2. Dalle impostazioni della PdC si setta una curva in base alla temperatura dell'ambiente.

Nel primo caso, quando la temperatura di mandata raggiunge il valore massimo impostato, spegne il compressore e viceversa lo accende quando raggiunge il valore minimo impostato.

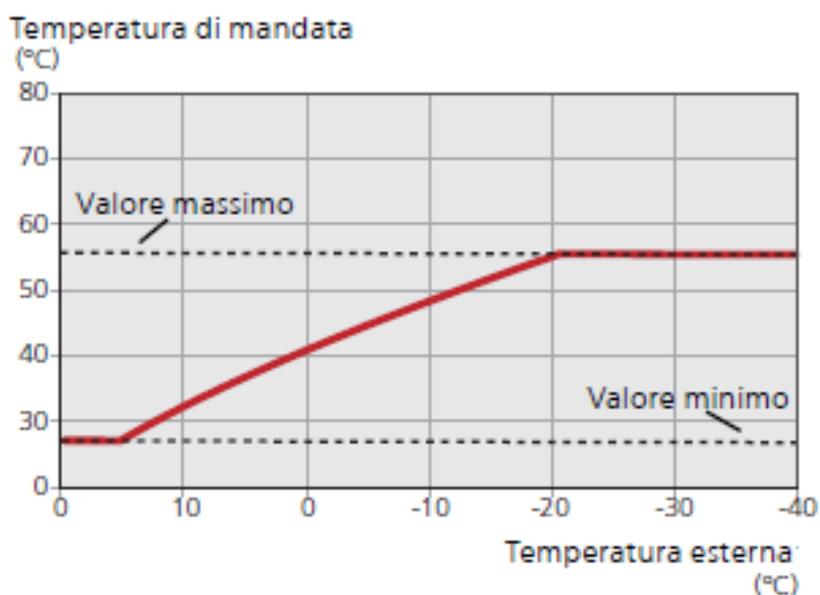


Figura 22 - Andamento della temperatura di mandata tra due valori max e min impostati dall'utente

Nel secondo caso, si legge dal manuale utente della PdC: "È possibile selezionare il riscaldamento o il raffrescamento nel menu curva. Il menu successivo (curva di riscaldamento/curva di raffrescamento) indica le curve di riscaldamento e raffrescamento 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.

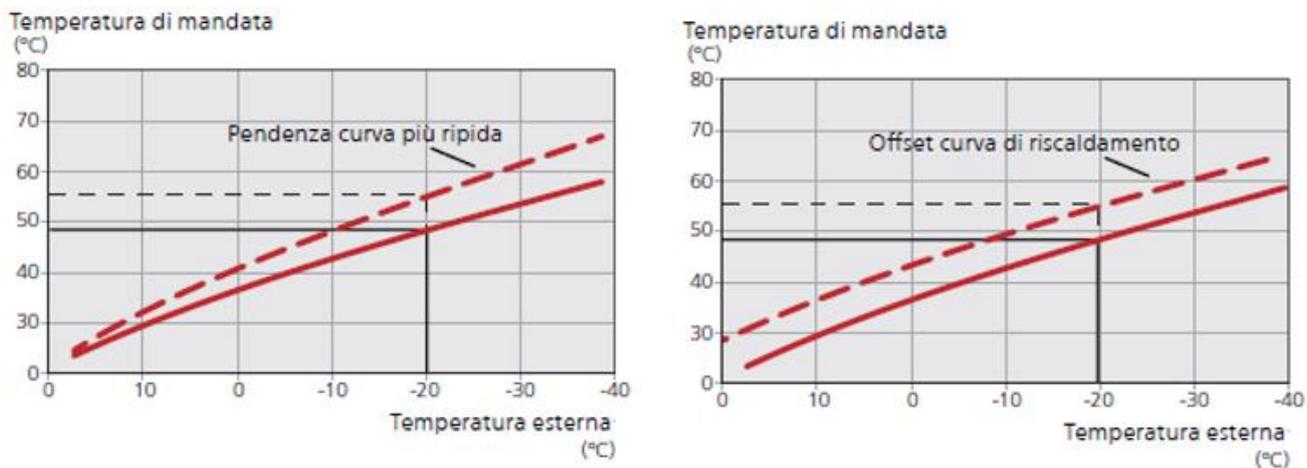


Figura 23 - Esempio di curve di riscaldamento/raffrescamento

I grafici di figura 23 sono semplici da interpretare, nel caso di variazione positiva della pendenza della curva di riscaldamento, si aumenta più velocemente la temperatura di mandata rispetto alla variazione di temperatura esterna. Nel caso di offset (verso l'alto) della curva di riscaldamento, si incrementa la temperatura di mandata dello stesso valore indipendentemente dalla variazione di temperatura esterna.

Nella prova di riscaldamento è stata scelta la prima modalità di regolazione, ovvero è stata impostata una temperatura di mandata dell'impianto costante pari a 45°C. Come si vede nel grafico sottostante.

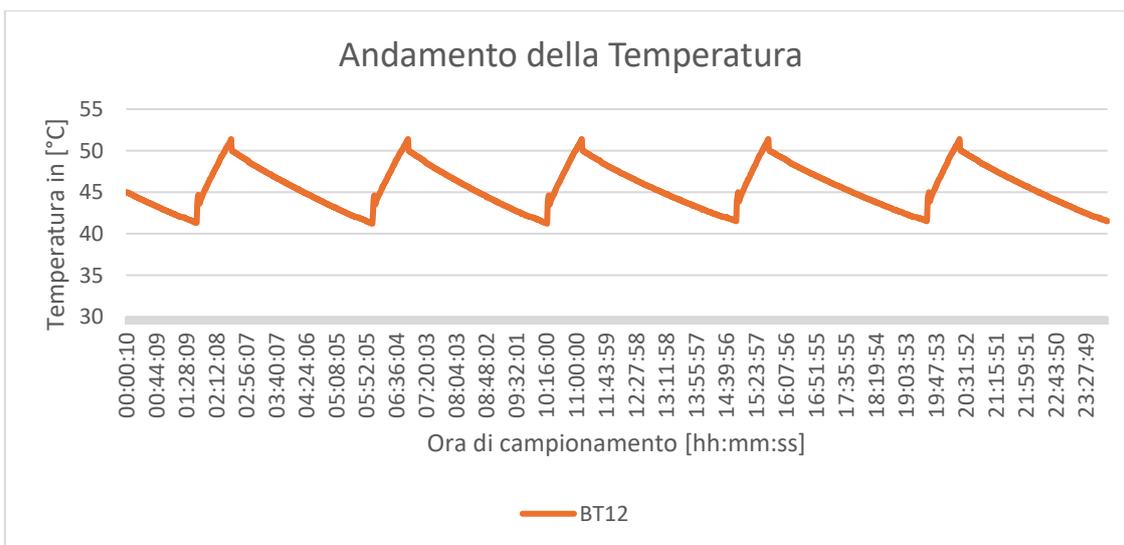


Figura 24 - Andamento della temperatura di mandata dell'impianto (BT12) nella giornata del 26/10/2019

Dal seguente grafico invece possiamo notare come le temperature di mandata e di aspirazione del compressore. Quando questo è spento le temperature risultano distanti tra di loro per poi avvicinarsi quando il compressore viene acceso e infine tendono allo stesso valore quando il compressore termina il suo ciclo.

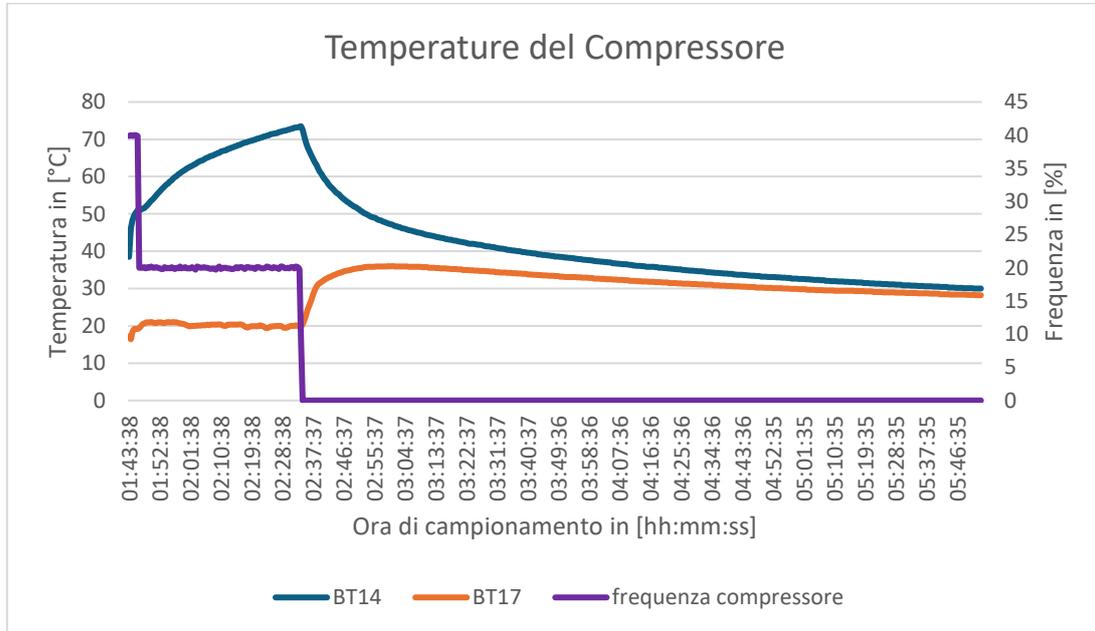


Figura 25 - Andamento delle temperature di aspirazione e mandata del compressore in un ciclo completo di funzionamento

In realtà però, la grandezza responsabile dell'accensione/spegnimento della PdC e quindi del compressore non è la Temperatura di mandata di impianto ma una grandezza nuova chiamata “Gradi Minuto” che esprime la cumulata della differenza tra la temperatura di mandata dell’acqua  $T_a$  e la sua temperatura di set point  $T_s$  misurata ogni minuto  $t_i$ . Nel dettaglio il compressore parte quando  $DM = -100^\circ C \cdot min$  e si arresta quando  $DM = +100^\circ C \cdot min$ . L’unità di misura dei gradi minuto è  $(^\circ C \cdot min)$ .

$$DM = \sum_{i=1}^{t_i} (T_a - T_s) t_i \quad (3)$$

Dai dati presi dalle centraline, i gradi minuto hanno già una loro colonna, quindi non c’è bisogno di calcolarli. Nella giornata del 26/10/2019 si vede l’andamento della frequenza del compressore a seconda dall’andamento dei Gradi minuto.

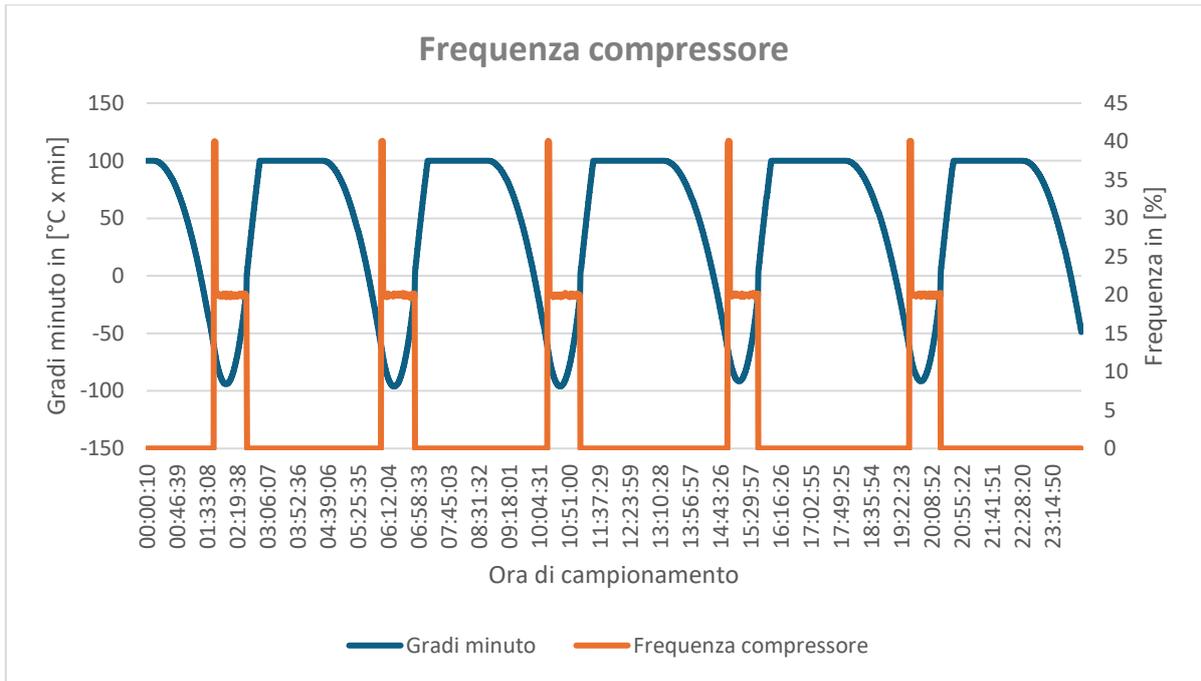


Figura 26 - Funzionamento del compressore in funzione dei gradi minuto nella giornata del 26/10/2019

Se ci si sofferma su una singola accensione come nel grafico di sotto, si nota che dall'accensione allo spegnimento passano circa 45/50 minuti. Quindi il compressore, considerando le 5 accensioni giornaliere con una media di 50 minuti per volta, rimane acceso per circa 4 ore al giorno.

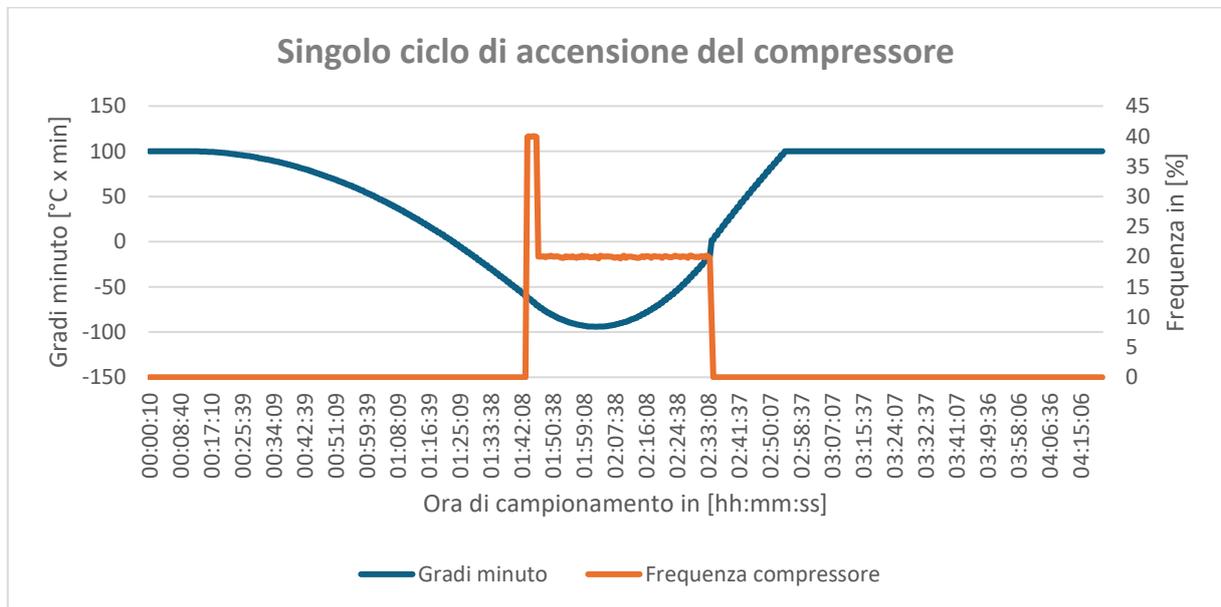


Figura 27 -Durata del ciclo di accensione/ spegnimento del compressore

### 7.3. Prova di riscaldamento

Le prove di riscaldamento oggetto di questo studio sono due e saranno messe a confronto. Rispettivamente sono state effettuate nel periodo dal 25/10/2019 al 31/10/2019 e dal 26/03/2021 al 29/03/2021.

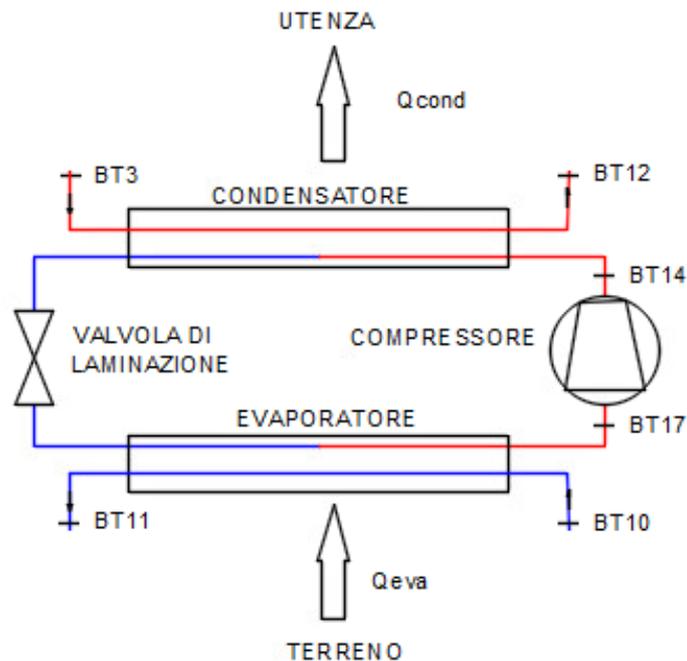


Figura 28 - Impianto nella configurazione di riscaldamento invernale

Come spiegato al paragrafo 4.2. nella fase di riscaldamento invernale, il sistema geotermico prende il calore dal terreno e lo cede all'interno dell'ambiente da riscaldare. Questo non avviene in modo diretto, ma tramite 3 circuiti:

1. Il circuito primario prende il calore dal terreno e lo cede al circuito refrigerante (circuito interno della pompa di calore)
2. All'interno del circuito refrigerante, passa il fluido (nel nostro caso l'R407c). Questo, investito dal calore che arriva dal circuito primario, evapora.
3. Il circuito secondario passa dal condensatore dove arriva anche l'R407c allo stato di gas compresso da cui prende il calore e lo cede all'ambiente tramite il ventilconvettore.

Prima di passare all'analisi energetica bisogna ragionare su dati che arrivano dalla centralina che per uno step di campionamento di 30 sec e l'intera giornata di 24h sono circa 2880 dati da validare. Dunque,

affinché un intero campionamento di dati sia valido per l'analisi energetica, deve rispettare tre ipotesi iniziali qui di seguito illustrate:

1. Nella colonna “compressor frequency activity” il valore deve essere  $\neq 0$  poiché i dati a compressore spento non possono far parte dell'analisi energetica;
2.  $T_{BT17} > T_{sat,BP,gas}$ , poiché il fluido all'interno del compressore non può essere bifase, ciò comporterebbe guasti meccanici al compressore;
3.  $T_{BT14} > T_{sat,AP,gas}$ , poiché il fluido dentro al compressore (dall'ipotesi precedente) si trova in fase di vapore surriscaldato, all'uscita sarà anche nella medesima fase ma nel ramo di alta pressione.

Le ipotesi 2 e 3 si riferiscono ai valori istantanei di temperatura, poiché è bene non fare entrare mai il fluido bi-fasico all'interno del compressore.

L'insieme di queste tre ipotesi, fa ridurre le stringhe di dati di un buon 70%. Come si vede dalla Figura 22 infatti, il compressore durante la giornata del 26/10/2019 si accende 5 volte durante l'arco della giornata e rimane acceso per circa 4 ore e mezza.

Per calcolare il COP della pompa di calore, teniamo in considerazione il fatto che non è nota nessuna portata e dunque inizialmente effettuiamo dei calcoli in termini specifici.

$$COP = \frac{Q_{cond}}{W_i} = \frac{q_{cond}}{l_i} \quad (4)$$

qui di sotto sono indicati gli step di calcolo:

- 1) Calcolo del lavoro del compressore (primo principio per sistemi aperti).

Hyp:

- Si trascurano le perdite di calore (adiabaticità);
- Si trascura l'energia potenziale gravitazionale;
- Si trascura l'energia cinetica;

$$l_i = c_{p,R407C}(T_{BT14} - T_{BT17}) \quad (5)$$

Per la stima del  $c_{p,R407C}$  sono state presi valori massimi e minimi di  $T_{BT14}$  e di  $T_{BT17}$  ed è stato valutato il calore specifico a pressione costante in questi quattro punti presi dalle tabelle di valori e successivamente è stato mediato il valore sulle quattro misurazioni.

2) Calcolo del calore specifico scambiato nel condensatore.

Hyp:

- Si trascurano le perdite di calore;

$$q_{cond} = h_{BT14} - h_{sat,AP,liq} \quad (6)$$

3) Calcolo del COP con i termini specifici:

$$COP = \frac{q_{cond}}{l_i} \quad (7)$$

## CALCOLO DELLA PORTATA DI FLUIDO REFRIGERANTE R407C

Per dare una visione quantitativa alle grandezze in gioco, vediamo questi passaggi:

1) Calcolo della portata del fluido refrigerante all'interno della pompa.

Per fare questo calcolo, si parte dal bilancio delle potenze:

$$Q_{eva} + W_i = Q_{cond} \quad (8)$$

Ipotizzando perdite energetiche pari a zero nel condensatore, è possibile esprimere la potenza termica del condensatore in due modi diversi:

- Calore assorbito dal R407c;
- Calore ceduto dal primario.

$$Q_{eva} = \dot{m}_{(acq+gl)} q_{eva} = m_{acq+gl} \dot{c}_{p(acq+gl)} (T_{BT10} - T_{BT11}) \quad (9)$$

$$W_i = \dot{m}_{R407C} l_i \quad (10)$$

$$Q_{cond} = \dot{m}_{R407C} q_{cond} \quad (11)$$

Sostituendo nell'equazione del bilancio delle potenze si ottiene:

$$m_{acq+gl} \dot{c}_{p(acq+gl)} (T_{BT10} - T_{BT11}) + \dot{m}_{R407C} l_i = \dot{m}_{R407C} q_{cond} \quad (12)$$

Esplicitando la portata di R407C

$$\dot{m}_{R407C} = \frac{m_{acq+gl} \dot{c}_{p(acq+gl)} (T_{BT10} - T_{BT11})}{(q_{cond} - l_i)} \quad (13)$$

## CALCOLO DELLA PORTATA DI ACQUA NEL CIRCUITO SECONDARIO

Partendo dalla potenza termica del condensatore:

$$Q_{cond} = \dot{m}_{R407C} q_{cond} = \dot{m}_{acq} c_{p,acq} (T_{BT12} - T_{BT3}) \quad (14)$$

E quindi:

$$\dot{m}_{acq} = \frac{Q_{cond}}{c_{p,acq} (T_{BT12} - T_{BT3})} \quad (15)$$

### 7.3.1. Risultati prova di riscaldamento

Il range di pressione considerato per il seguente confronto è 7-16 bar. Le singole grandezze sono state calcolate sulla media delle temperature.

La Tabella riporta i dati medi della giornata del 28/10/2019 preso come giornata campione.

| 28/10/2019              |         |                      |       |             |         |
|-------------------------|---------|----------------------|-------|-------------|---------|
| Calcolo con Excel       |         | Calcolo con Coolpack |       | Scostamento | %       |
| COP medio               | 4,65916 | COP coolpack         | 3,992 |             | -14,32% |
| Qcond medio [kW]        | 1,92824 | Qcond coolpack [kW]  | 1,966 |             | 1,96%   |
| Qeva medio [kW]         | 1,54579 | Qeva coolpack [kW]   | 1,62  |             | 4,80%   |
| Wi medio [kW]           | 0,42244 |                      |       |             |         |
| mH2O media [kg/s]       | 0,27862 |                      |       |             |         |
| mR407C media [kg/s]     | 0,00994 |                      |       |             |         |
| Tmedia BT17 [°C]        | 20,525  |                      |       |             |         |
| Tmedia BT14 [°C]        | 64,0371 |                      |       |             |         |
| Cp medio R407C [Kj/KgK] | 0,97633 |                      |       |             |         |

Tabella 5 - Risultati per la giornata del 28/10/2019 range di pressioni 7-16 bar

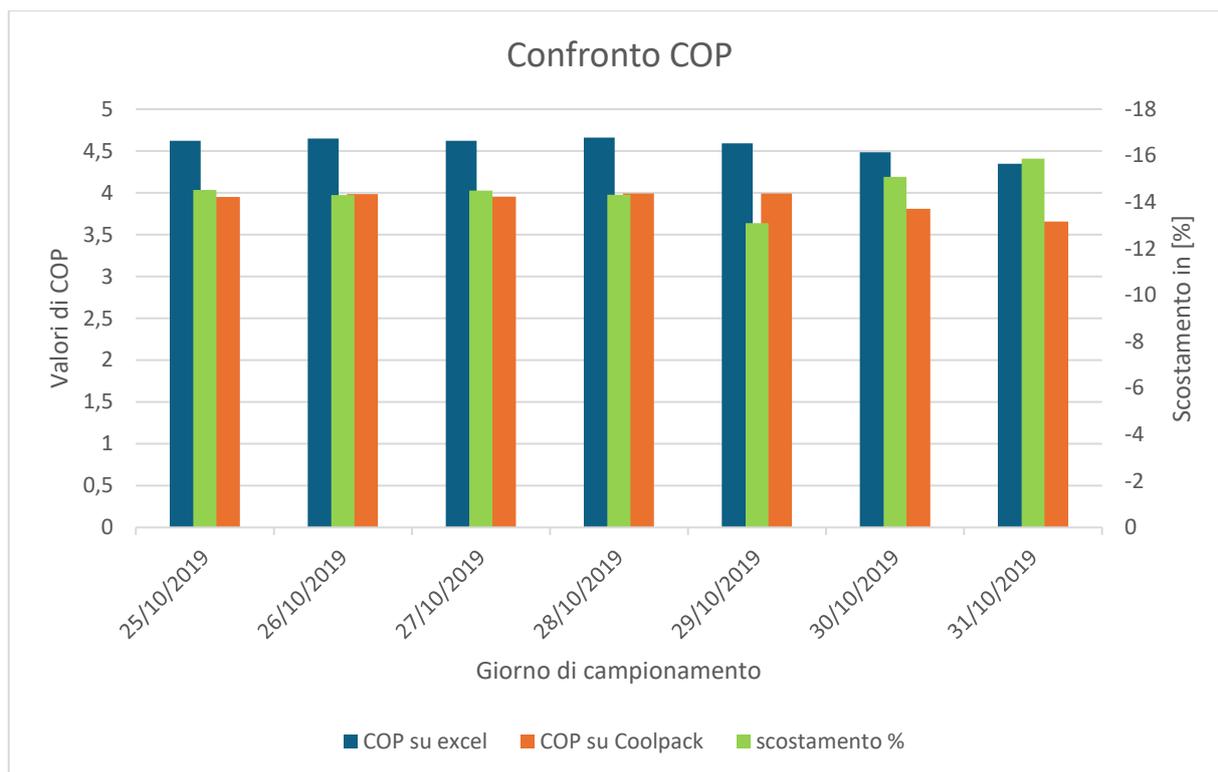


Figura 29 - Confronto COP con scostamento %

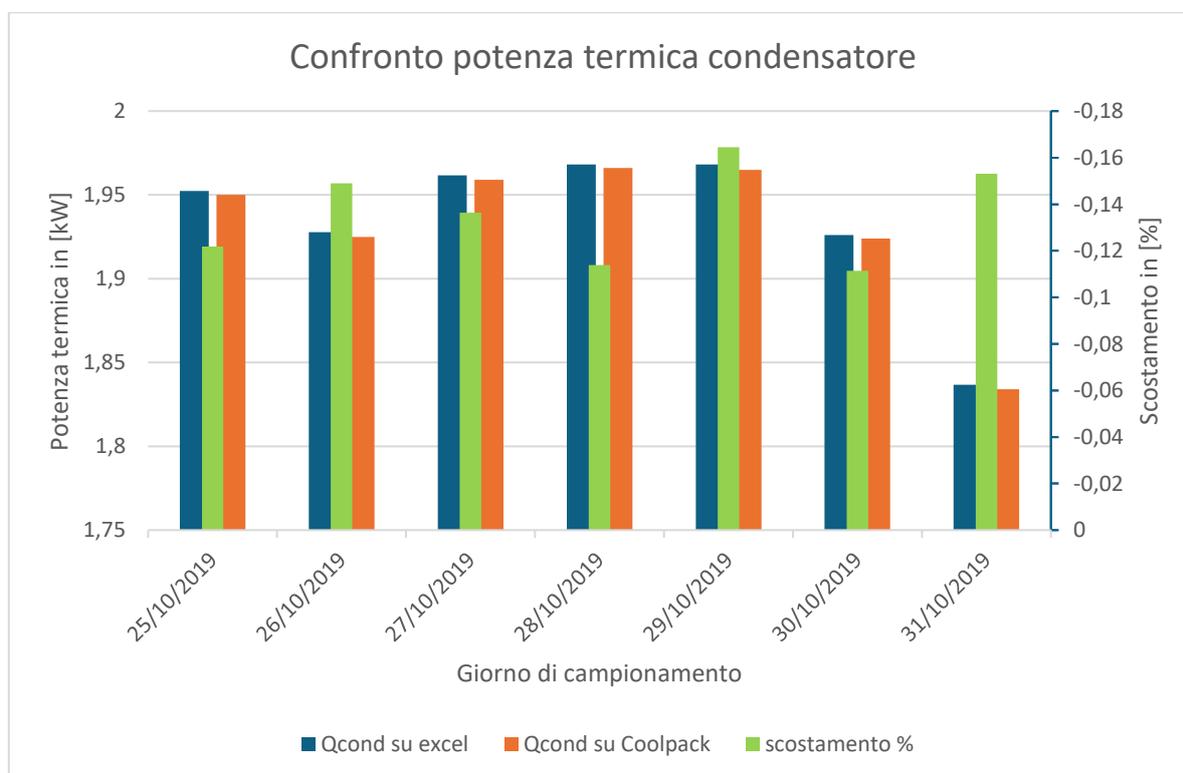


Figura 30 - Confronto Potenza termica scambiata nel condensatore

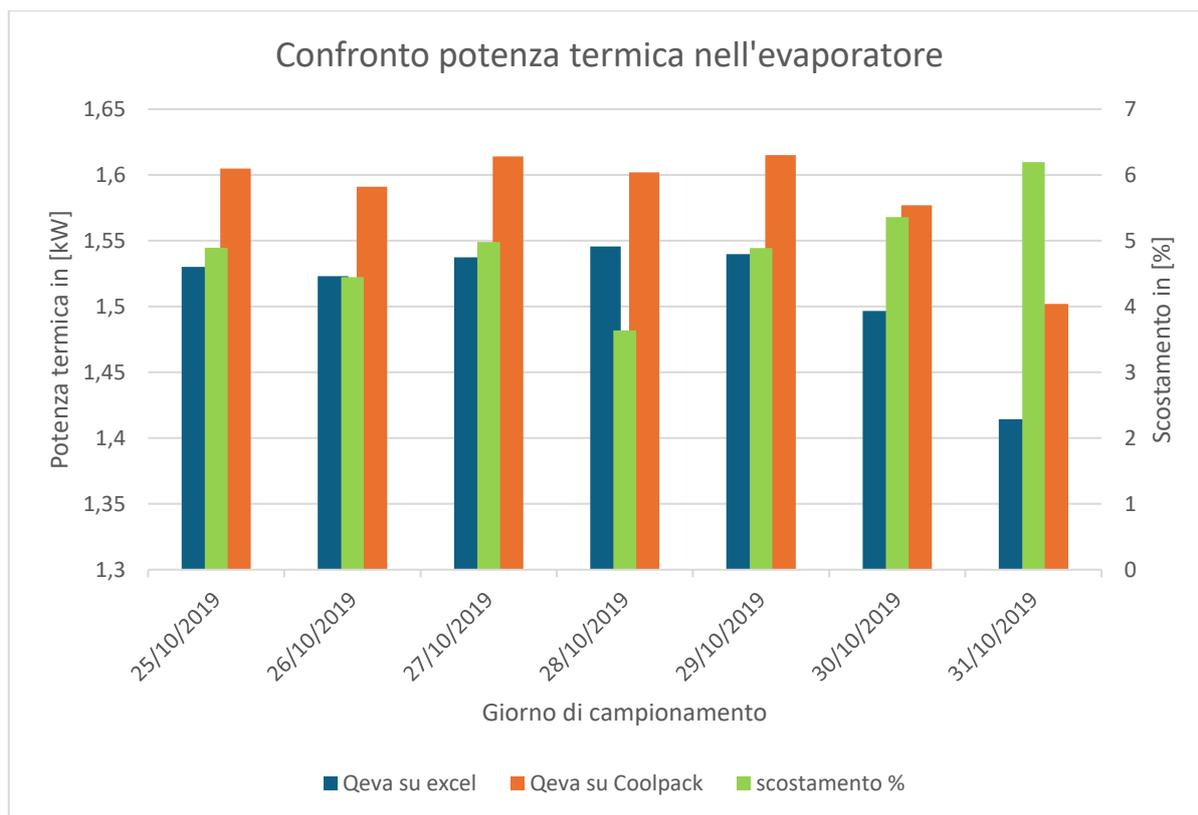


Figura 31 - Confronto Potenza termica scambiata nell'evaporatore

### CONCLUSIONI SULLA PROVA DI OTTOBRE 2019

Nei grafici riportati di sopra sono visibili i confronti tra le grandezze calcolate secondo il metodo tradizionale su Excel, le grandezze restituite dalla simulazione su Coolpack e gli scostamenti in [%]. Da questi è possibile notare che lo scostamento più elevato è quello del COP (Figura 25) dell'ordine del 14%. Mentre sono molto inferiori (dell'ordine tra il 3% e il 6%) per le potenze termica del condensatore e dell'evaporatore (Figura 26 e 27).

L'elevato scostamento tra il COP calcolato su Excel e simulato su Coolpack, è dovuto alle ipotesi fatte inizialmente sullo stato termodinamico del fluido refrigerante all'uscita del compressore e l'approccio a pressioni fisse che è stato fatto per mancanza di sensori di pressione sull'impianto.

È stata fatta la medesima analisi nel periodo di Marzo 2021 per confrontarla con la precedente, visto che la temperatura di set di mandata di impianto è la medesima (45°C) e la differenza di temperatura esterna differisce di poco come si vede dal grafico successivo che sovrappone la BT della campagna di ottobre 2019 con quella di marzo 2021.

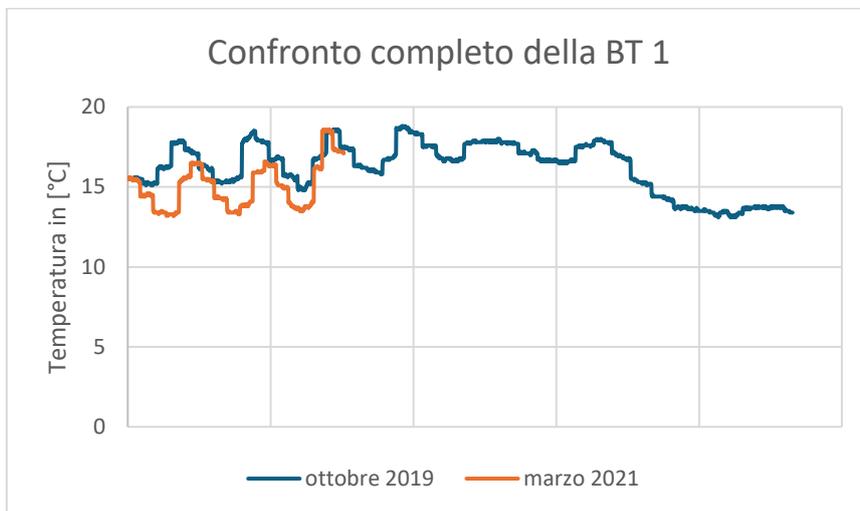


Figura 32 - Andamento della temperatura esterna BT1 nelle due campagne di raccolta dati

Ma come si vede dal grafico di Figura 28, i giorni disponibili della campagna di raccolta dati di Marzo 2021 sono solamente 4. Allora si è deciso confrontare i giorni con un profilo della BT1 simile con uno scostamento piccolo (circa 1°C).

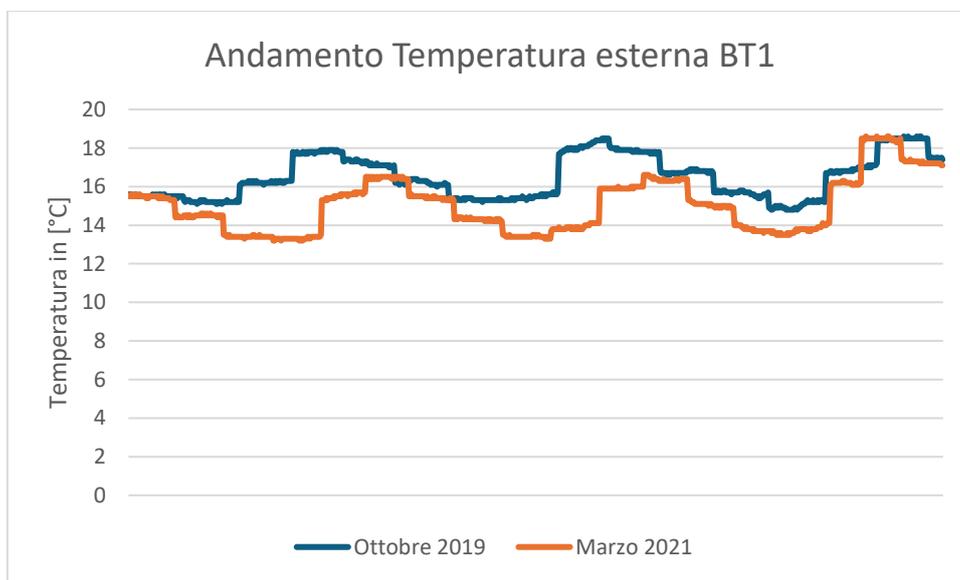


Figura 33 - Confronto dei dati disponibili nelle due campagne della BT 1

Si procede allo stesso modo della campagna di ottobre 2019, si riportano di seguito i risultati della campagna Marzo 2021 e successivamente si procederà al confronto.

| 26/03/2021              |          |                      |       |             |         |
|-------------------------|----------|----------------------|-------|-------------|---------|
| Calcolo con Excel       |          | Calcolo con Coolpack |       | Scostamento | %       |
| COP medio               | 4,781549 | COP coolpack         | 4,16  |             | -12.99% |
| Qcond medio [kW]        | 1,677175 | Qcond coolpack [kW]  | 1,677 |             | -0.010% |
| Qeva medio [kW]         | 1,326415 | Qeva coolpack [kW]   | 1,436 |             | 8.26%   |
| Wi medio [kW]           | 0,35076  |                      |       |             |         |
| mH2O media [kg/s]       | 0,251144 |                      |       |             |         |
| mR407C media [kg/s]     | 0,008816 |                      |       |             |         |
| Tmedia BT17 [°C]        | 15,91163 |                      |       |             |         |
| Tmedia BT14 [°C]        | 56,73256 |                      |       |             |         |
| Cp medio R407C [Kj/KgK] | 0,974705 |                      |       |             |         |

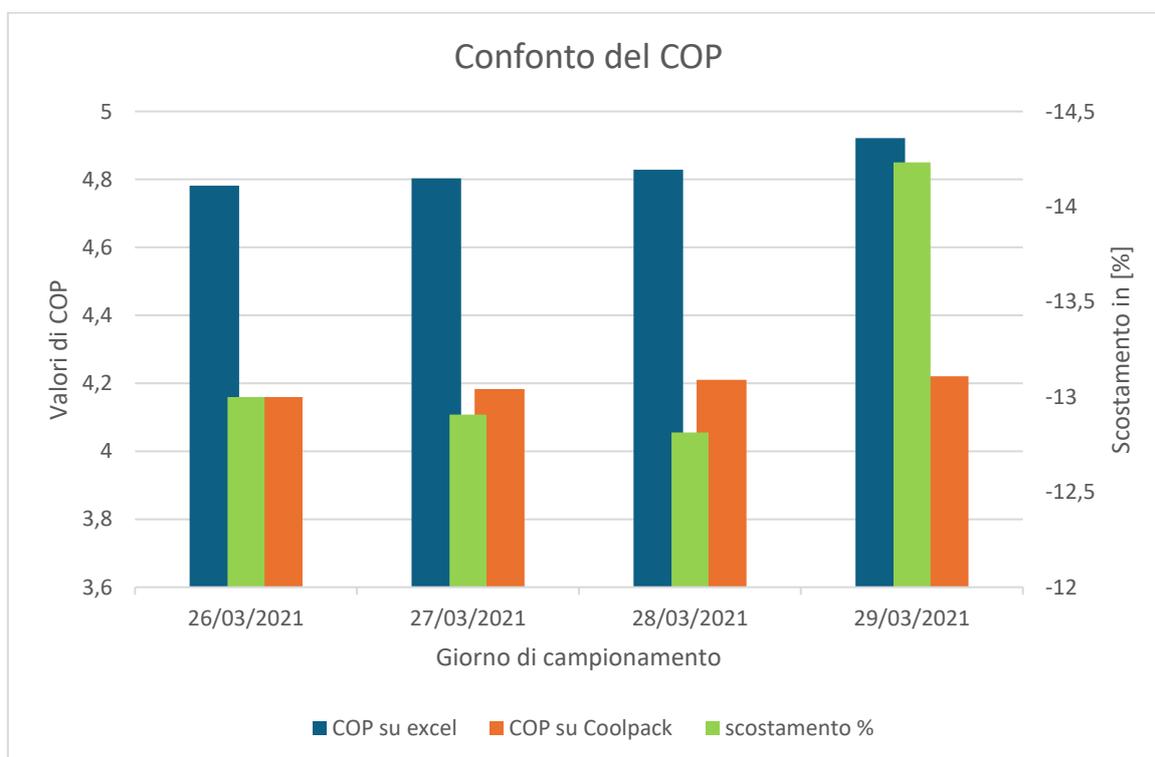


Figura 34 - Confronto del COP reale con quello calcolato tramite Coolpack

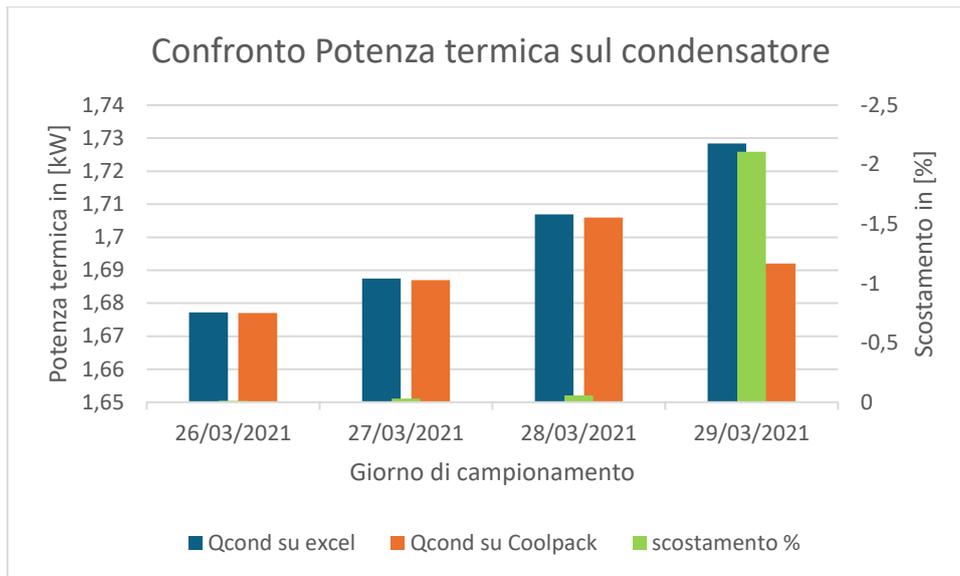


Figura 35 - Confronto della Potenza termica scambiata al condensatore reale con quello calcolato tramite Coolpack

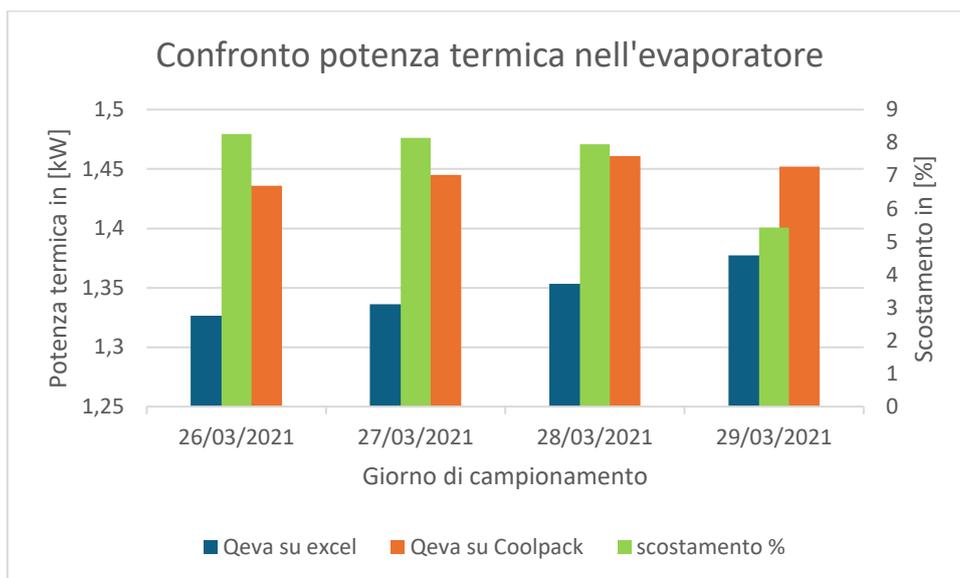


Figura 36 - Confronto della Potenza termica scambiata all'evaporatore reale con quello calcolato tramite Coolpack

### CONCLUSIONI SULLA PROVA DI MARZO 2021

Anche in questo caso sono visibili scostamenti dello stesso ordine di grandezza, per il COP circa il 14%. Mentre per la potenza termica del condensatore, lo scostamento è dell'ordine dello 0,03% circa per i primi giorni e ha un picco del 2% il quarto giorno e quello dell'evaporatore è di circa l'8%.

La motivazione per lo scostamento del COP è la medesima della prova di Ottobre 2019 ovvero le ipotesi iniziali sullo stato termodinamico del fluido refrigerante all'uscita del compressore e all'approccio a pressioni fisse che è stato fatto per mancanza di sensori di pressione sull'impianto.

## CONFRONTO TRA LE DUE CAMPAGNE

Sono state scelte le due campagne in precedenza illustrate perché per fare un confronto, più reale possibile, dell'efficienza della PdC c'è bisogno di una differenza piccola della temperatura esterna, mantenendo settata la temperatura di mandata dell'impianto allo stesso valore per entrambe le campagne.

Infatti la temperatura di mandata di impianto è rimasta settata a 45°C e la temperatura esterna media, differisce di circa 1 °C come indicato qui di seguito:

- $T_{BT1media}(Ott\ 2019) = 16.1853^{\circ}C$
- $T_{BT1media}(Mar\ 2021) = 15.0419^{\circ}C$

Si elencano di seguito i confronti delle grandezze: COP, potenza termica scambiata al condensatore e potenza termica scambiata all'evaporatore sia reali (calcolati su Excel) che simulati su software Coolpack, tra la campagna di Ottobre 2019 e Marzo 2021.

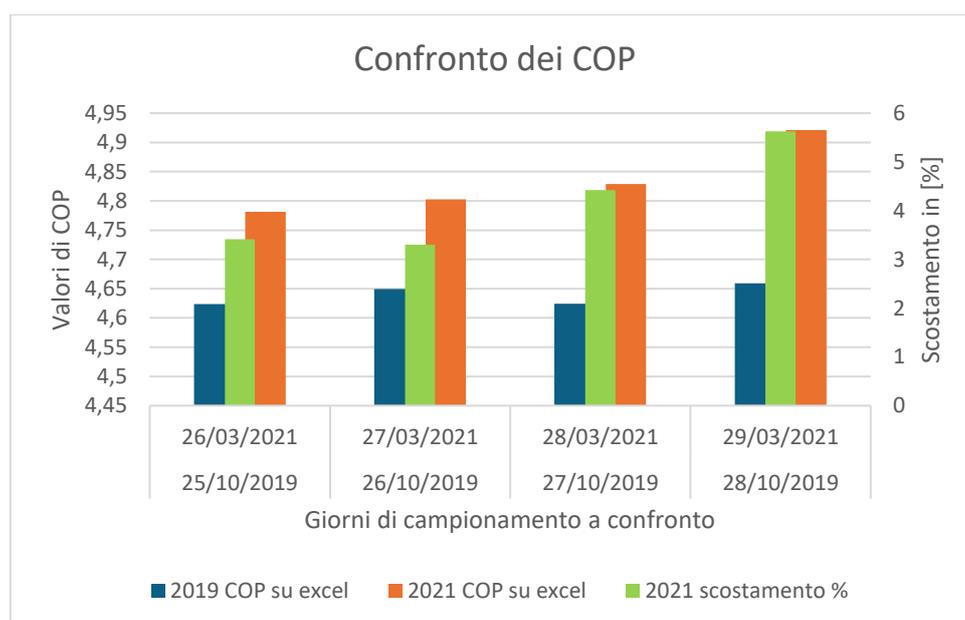
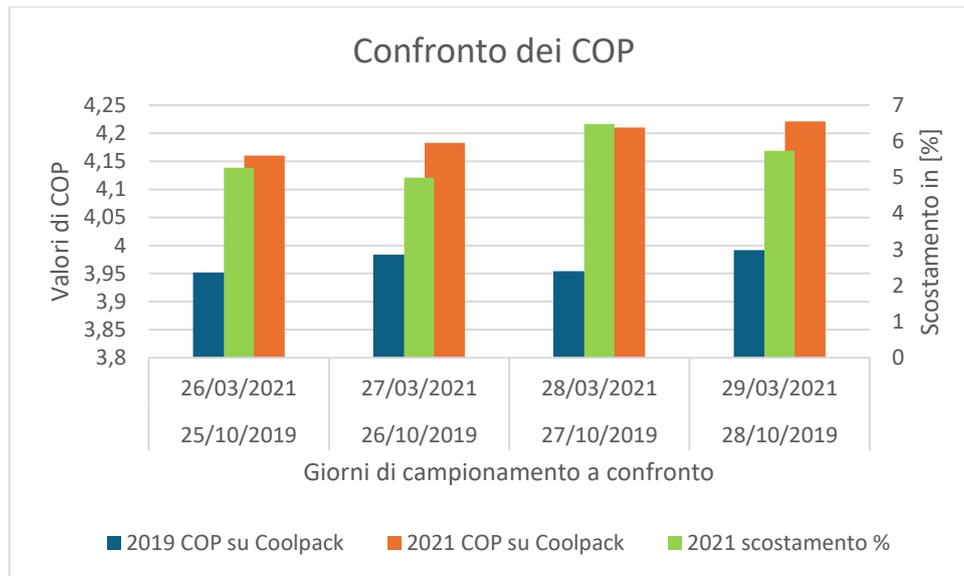


Figura 37 - Confronto dei COP reali tra Ott-2019 e Mar-2021



*Figura 38 -Confronto dei COP calcolati su Coolpack tra Ott-2019 e Mar-2021*

Dai grafici si vede che lo scostamento dei COP sia calcolati tradizionalmente su Excel e quelli simulati su Coolpack, tra il 2019 e il 2021 è nel range del (3,5% – 5,5%). Inoltre il COP del 2021 è più elevato rispetto a quello del 2019.

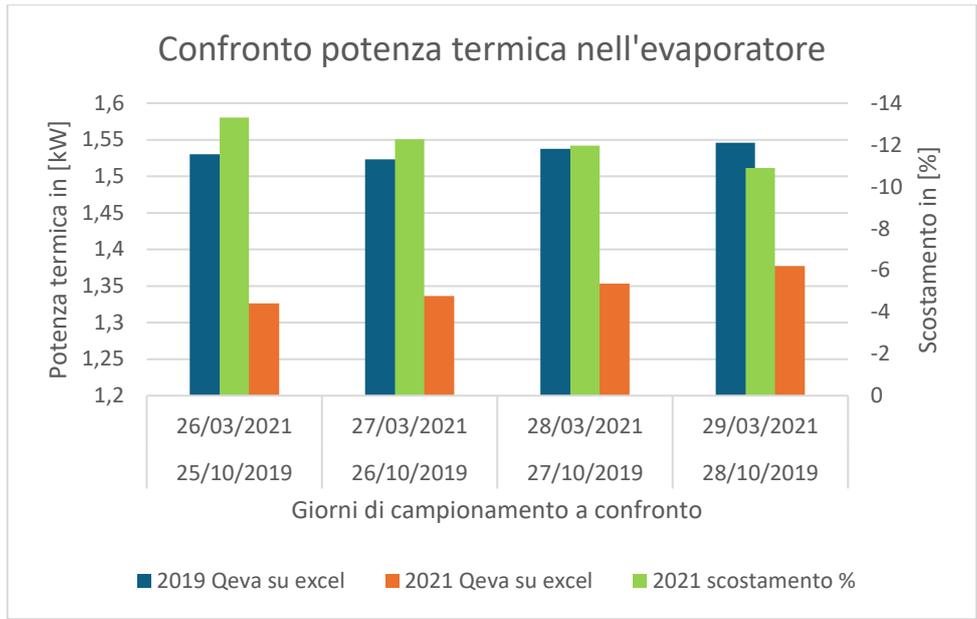


Figura 39 -Confronto delle Potenze termiche scambiate all'evaporatore reali tra Ott-2019 e Mar-2021

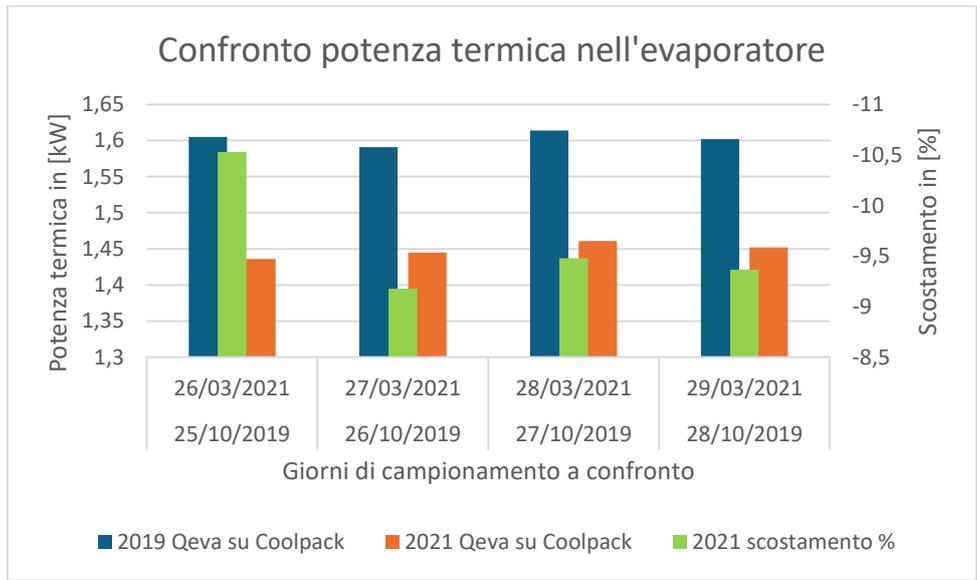


Figura 40-Confronto delle Potenze termiche scambiate all'evaporatore calcolate su Coolpack tra Ott-2019 e Mar-2021

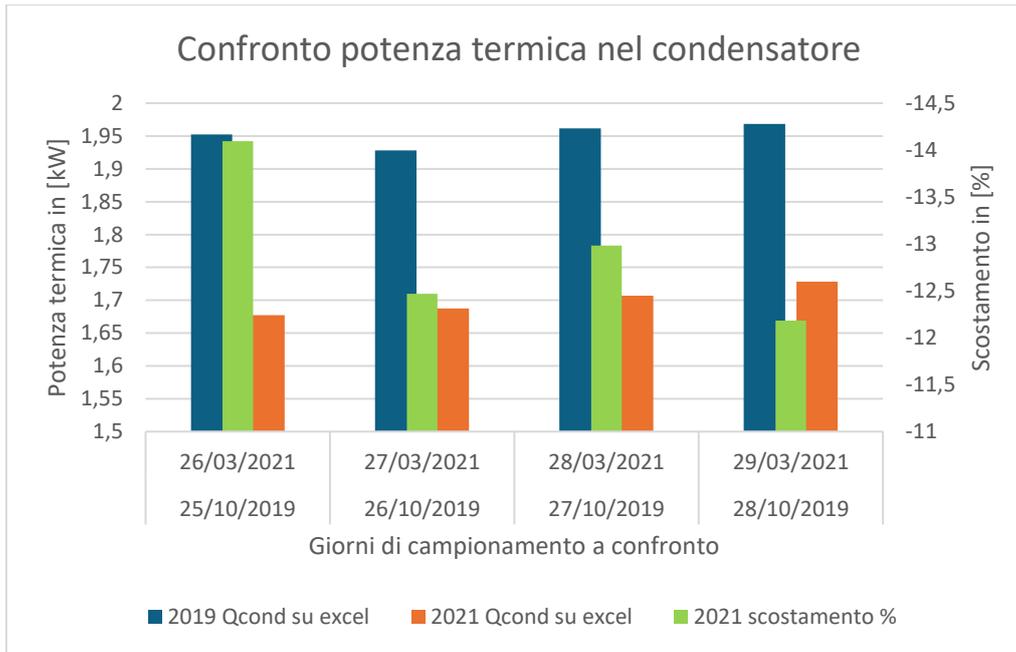


Figura 41 -Confronto delle Potenze termiche scambiate al condensatore reali tra Ott-2019 e Mar-2021

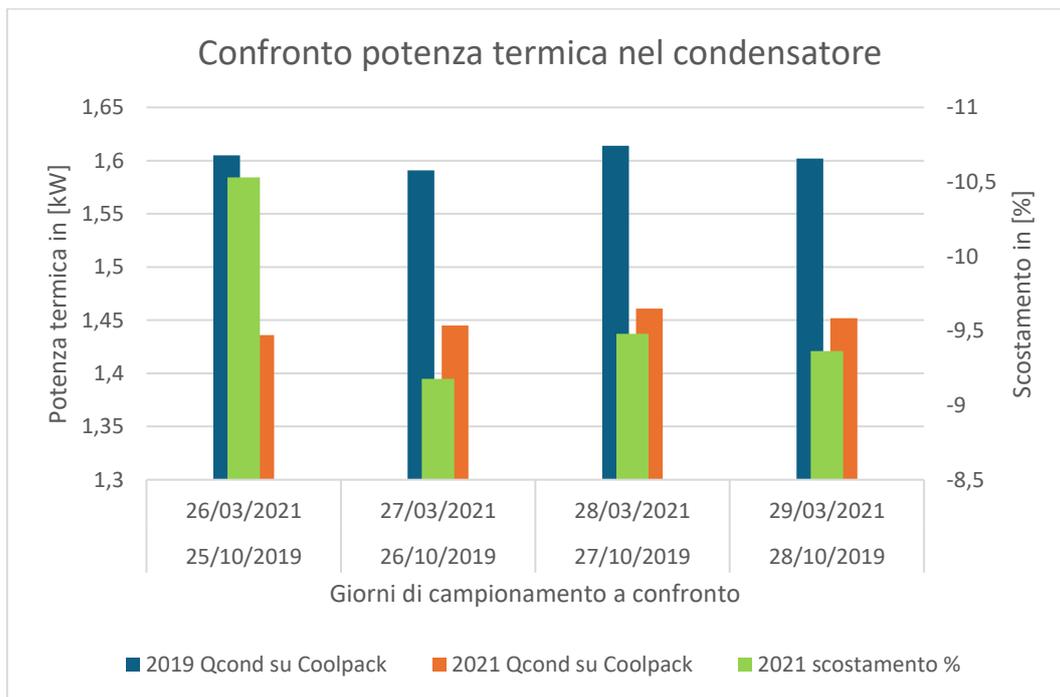


Figura 42 -Confronto delle Potenze termiche scambiate al condensatore calcolate su Coolpack tra Ott-2019 e Mar-2021

A dispetto del fatto che il COP del 2021 sia più elevato rispetto a quello del 2019, si nota che le potenze termiche scambiate nel 2021, sia al condensatore che all'evaporatore sono inferiori a quelle del 2019 e con percentuali di scostamento anche abbastanza importanti (il picco di differenza del 14,1% è dato dalla

differenza tra le giornate del 25/10/2019 e il 26/03/2021 nella potenza termica scambiata al condensatore).

Allora la motivazione dell'aumento del COP nel 2021 si può cercare nell'unica grandezza che manca al confronto, ovvero il lavoro al compressore.

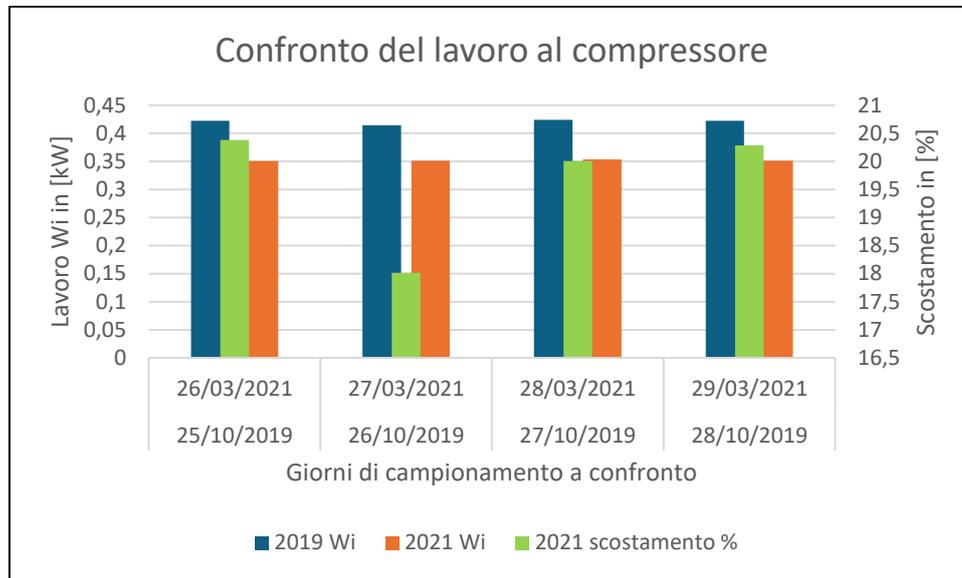


Figura 43 - Confronto del lavoro al compressore tra Ott 2019 e Mar 2021

Si vede dal precedente grafico, come il lavoro al compressore nel 2021 sia diminuito con scostamenti anche del 20%. Dunque riprendendo l'equazione (4) e calcolandone le variazioni in percentuale come di seguito:

$$COP = \frac{Q_{cond}}{W_i}$$

$$\Delta COP = \frac{\Delta Q_{cond}}{\Delta W_i} = \frac{100\% - 14\%}{100\% - 20\%} = \frac{86\%}{80\%} = 1.014\%$$

Si nota che a decrementi di potenze termiche possono corrispondere anche incrementi di COP.

## 7.4. CONCLUSIONE

Lo studio di questa tesi ha l'obiettivo di valutare se il sistema contro – terra brevettato dal Politecnico di Torino sia una soluzione efficace per l'efficienza energetica degli edifici e inoltre si è voluto valutare di quanto i dati reali si discostano dalle simulazioni effettuate con Coolpack.

Dopo aver effettuato una prima analisi statistica su quanto la geotermia sia utilizzata nel panorama europeo e italiano si è proceduto ad illustrare i layout di impianto a bassa entalpia conosciuti.

Successivamente è stato descritto il campo sperimentale oggetto di studio, presente al Politecnico di Torino presso l'Energy center.

Infine si è proceduto all'elaborazione dei dati prelevati dalle centraline, ovvero in primo luogo alla loro epurazione dai dati non conformi ai fini del calcolo, in secondo luogo sono stati mediati e infine sono stati effettuati i calcoli descritti al “Paragrafo 7.3. – Prova di riscaldamento”. Successivamente sono stati confrontati con i risultati del software Coolpack.

In conclusione del presente lavoro, si può dire che il sistema Geothermskin si è dimostrato essere una soluzione efficace ed alternativa ai sistemi geotermici tradizionali. Dal “paragrafo 6.1 – Fasi costruttive” si evince che questa soluzione è applicabile ad edifici esistenti e quindi in grado di migliorare l'efficienza energetica degli edifici con impianti termici a fonte fossile. Dall'analisi dei dati, mettendo a confronto i risultati ottenuti con quelli dichiarati dalla macchina nel manuale installatore a pagina 80, nella scheda dei dati tecnici, si vede che il COP dichiarato (per una temperatura esterna di 12°C) è di 4,86 e i COP medi calcolati delle due campagne sono  $COP_{medio\_calcolato\_2019}=4,569$  e  $COP_{medio\_calcolato\_2021}=4,833$ . Dunque l'analisi dimostra che la PdC funziona secondo quanto dichiarato nei dati di targa. Mentre i COP medi calcolati con il software Coolpack sono  $COP_{medio\_coolpack\_2019} = 3,905$  e  $COP_{medio\_coolpack\_2021} = 4,194$ . Questi risultati sono il segno delle ipotesi fatte prima del calcolo, ovvero dell'approccio a pressioni fisse e dell'entalpia del fluido in uscita del compressore. Per avere dei risultati più veritieri dalla simulazione su Coolpack, sarebbe necessaria l'installazione di due sensori di pressione in modo da poter calcolare i valori istantanei di saturazione del fluido (sia gas che liquido) e poi farne la media per procedere al calcolo.

Le due campagne di riscaldamento hanno come temine comune la Temperatura di mandata settata a 45°C, il profilo della  $T_{BT1}$  (Temperatura esterna) simile con una differenza di circa 1°C. Con queste premesse, dai grafici salta all'occhio una diminuzione della potenza termica del condensatore, della potenza termica dell'evaporatore e del lavoro al compressore. Tutte le grandezze diminuiscono nei loro valori assoluti ma il COP della PdC aumenta. Questo è spiegato alla fine del sottoparagrafo “7.3.1. – Risultati prova di riscaldamento”, ovvero, le diminuzioni hanno percentuali diverse, quindi il COP della

campagna Marzo 2021 risulta più elevato rispetto alla campagna di Marzo 2019 perché la variazione di potenza termica al condensatore è inferiore rispetto alla variazione di lavoro al compressore.

Gli scostamenti tra i valori reali calcolati e quelli simulati su Coolpack risultano dello stesso ordine di grandezza tra la campagna di Ottobre 2019 e quella di Marzo 2021 quindi si può dire che Coolpack, tenendo conto della percentuale di scostamento risulta un software affidabile per le simulazioni.

## 8. Ringraziamenti

Alla fine di questo percorso, è doveroso da parte mia ringraziare le persone che mi sono state vicine e mi hanno dato qualunque tipo di supporto necessario per portare a termine gli studi.

In primo luogo mi preme ringraziare tutta la mia famiglia, colonna portante di ogni percorso fin qui intrapreso.

Gli amici e i colleghi sono stati fondamentali nei vari sfoghi degli anni e in particolare ma non in ordine di importanza dico:

Grazie a Leo, R\*\*\*\*\*o totale. Non ho nulla da aggiungere.

Grazie ad Alessandro, il Capitano, per tutto.

Grazie ad Alberto, che anche se sono passati anni da quando bazzicavamo assieme per le aule studio in cerca di posto, quando ci rivediamo è come se non fosse cambiato nulla.

Grazie a Mirko, che anche se fa finta di odiarmi, in fondo, il tempo per una pizza lo trova sempre.

Grazie a Greta e Dimitri che trovano sempre il tempo di ascoltare i miei sfoghi senza senso davanti ad una patata ripiena quando vengo su a Torino.

Grazie a Chiara che senza peli sulla lingua, ad ogni parola mi ha sempre riportato con i piedi per terra.

Grazie ad Alessia che nonostante non risponda mai al telefono, sia sempre in giro per il mondo, non è ancora passata da casa a trovarmi. Nonostante siano 12 anni che ci proviamo, continuiamo a riderci sopra.

Grazie ad Elena dimostrazione che la citazione “Fanno dei giri immensi e poi ritornano” vale anche tra amici.

Grazie a Fabio, che in tempo di trincea non conosceva notte e giorno per preparare gli esami insieme e tutt'ora è stato di grande aiuto.

Grazie inoltre a tutti gli amici degli anni Torinesi e ai colleghi del Politecnico, ognuno ha contribuito in modo unico alla mia formazione umana.

Un grande Grazie agli amici di una vita, quelli di infanzia che anche se hanno seguito tutti percorsi diversi, durante questi anni sono sempre stati una spalla su cui confidarsi, sfogarsi e appoggiarsi. Grazie a Ninni, Nino, Paolo, Morris, Giovanni il Mastro, Piero e Maria, Enrico e Carola, Valentina, Vanessa, Federica e Chiara.

Grazie a Maurizio De Pasquale, in questi anni è stato fondamentale.

Grazie a Francesco Motta, che negli ultimi anni mi ha insegnato tanto, spero di saper far fruttare le conoscenze acquisite nel tempo.

## Nomenclatura, acronimi e abbreviazioni

- COP: coefficient of performance (coefficiente di prestazione invernale) [Numero puro];
- EER: Energy efficiency (coefficiente di prestazione estivo) [Numero puro];
- Q1= calore ricevuto dal fluido refrigerante in [kW]
- Q2: calore ceduto al fluido refrigerante in [kW]
- W: lavoro fornito al fluido refrigerante in [kW]
- $C_{p, R407C}$ : Calore specifico a pressione costante del fluido refrigerante  $\left[\frac{KJ}{KgK}\right]$ ;
- $C_{p, (acq+gli)}$ : Calore specifico a pressione costante della soluzione di acqua e glicole  $\left[\frac{KJ}{KgK}\right]$ ;
- $C_{p, (acqua)}$ : Calore specifico a pressione costante dell'acqua in  $\left[\frac{KJ}{KgK}\right]$ ;
- $\rho_{acqua e glicole}$ : densità della soluzione acqua e glicole in  $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$ ;
- $\rho_{acqua}$  : densità dell'acqua  $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$ ;
- $DM$ : Gradi minuto in  $[^{\circ}C \times min]$ ;
- $T_a$ : Temperatura di mandata dell'acqua in  $[^{\circ}C]$ ;
- $T_s$ : Temperatura di set point in  $[^{\circ}C]$ ;
- $t_i$ : variabile temporale in [min];
- $T_{sat, BP, Vap}$ : Temperatura di saturazione del vapore sul ramo di bassa pressione in  $[^{\circ}C]$ ;
- $T_{sat, AP, Vap}$ : Temperatura di saturazione del vapore sul ramo di alta pressione in  $[^{\circ}C]$ ;
- $T_{sat, BP, Liq}$ : Temperatura di saturazione del liquido sul ramo di bassa pressione in  $[^{\circ}C]$ ;
- $T_{sat, AP, Liq}$ : Temperatura di saturazione del liquido sul ramo di alta pressione in  $[^{\circ}C]$ ;
- $T_{BT1}$ : Temperatura misurata dal sensore posto all'esterno in  $[^{\circ}C]$ ;
- $T_{BT3}$ : Temperatura misurata dal sensore posto sul ritorno del fluido riscaldante/refrigerante in  $[^{\circ}C]$ ;
- $T_{BT10}$ : Temperatura misurata dal sensore posto sul ritorno del fluido delle sonde geotermiche in  $[^{\circ}C]$ ;
- $T_{BT11}$ : Temperatura misurata dal sensore posto sulla mandata dell'evaporatore in  $[^{\circ}C]$ ;
- $T_{BT12}$ : Temperatura misurata dal sensore posto sulla mandata del condensatore in  $[^{\circ}C]$ ;
- $T_{BT14}$ : Temperatura misurata dal sensore posto sull'uscita del gas del compressore in  $[^{\circ}C]$ ;
- $T_{BT17}$ : Temperatura misurata dal sensore posto sull'aspirazione del gas del compressore in  $[^{\circ}C]$ ;
- $q_{cond}$ : Calore scambiato al condensatore per unità di massa in  $\left[\frac{KJ}{Kg}\right]$ ;

- $q_{eva}$ : Calore scambiato all'evaporatore per unità di massa in  $\left[\frac{KJ}{Kg}\right]$ ;
- $l_i$ : lavoro per unità di massa compressore in  $\left[\frac{KJ}{Kg}\right]$
- $Q_{conda}$ : Calore Scambiato al condensatore in [kW];
- $Q_{eva}$ : Calore scambiato all'evaporatore in [kW];
- $W_i$ : Potenza elettrica al compressore in [kW]
- $h_{sat,AP,liq}$ : Entalpia del liquido saturo nel ramo di alta pressione in  $\left[\frac{KJ}{Kg}\right]$ ;
- $\dot{m}_{(acq+gl)}$  : Portata massica della soluzione di acqua e glicole in  $\left[\frac{Kg}{s}\right]$ ;
- $\dot{m}_{acq}$  : Portata massica della soluzione di acqua in  $\left[\frac{Kg}{s}\right]$ ;
- $\dot{m}_{R407C}$  : Portata massica del fluido refrigerante in  $\left[\frac{Kg}{s}\right]$ ;
- $\lambda$ : Conduttività termica del materiale in  $\left[\frac{W}{mK}\right]$ ;
- $h$ : conduttanza unitaria liminare in  $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$ ;
- PdC: Pompa di Calore;

## Bibliografia

“Studio preliminare di applicabilità di sorgente geotermica a bassa entalpia ad un caso studio con pompa di calore” - A.C. Violante, G. Boccardi, L.M. Falconi, A. Lattanzi, C. Menale, M. Morlacca, L. Simonetti, M. Proposito, R. Trinchieri – ENEA. 2019;

La produzione geotermoelettrica nel mondo Geothermal Power Generation in the World 2015-2020 Update Report di Gerald W. Hutterer, Post Office Box 2425, Frisco, Colorado, USA

“Tecnologia e potenzialità dei sistemi geotermici a bassa entalpia” di Alessandro Casasso e Rajandrea Sethi del dipartimento di ingegneria per l'ambiente, il territorio e le infrastrutture del Politecnico di Torino. Pubblicazione su rivista “GEAM – Georingegneria e attività estrattiva” – Aprile 2013

Progetto Vigor – “Quadro normativo e iter autorizzativo per la ricerca e la coltivazione di risorse geotermiche” - Aprile 2013

“Il ciclo kalina in condizioni di lavoro italiane alimentato da fonte geotermica a media entalpia” - Ing. Riccardo Fiorillo, ing. Lorenzo De Pascalis, prof. ing. Giuseppe Starace. Del Dipartimento di ingegneria dell'innovazione - Università del Salento Via per Arnesano, I-73100 LECCE

Manuale Utente, Nibe F1155, Pompa Di Calore Geotermica

GSHP geotermia a sonde verticali – Riccardo Delmastro e Guido Noce (2009);

Geotermia e pompe di calore – Savino Basta e Fabio Minchio (2008);

Laboratorio di Impianti Energetici (LIE) – Davide Papurello – Politecnico di Torino;

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

Paolo Ruberto (2019). “Campo sperimentale di una parete energetica” (Tesi);

Rapisarda Matteo (2020) – “Fabbisogni energetici per la climatizzazione: analisi dei dati di monitoraggio di un sistema polivalente geotermico” (Tesi);

Maria Romana Alvi (2021). “Valutazione delle potenzialità geotermiche della galleria di base della Torino-Lione” (Tesi)

Manuel Ciccullo (2021) - “Applicazione e studio in campo sperimentale di una pompa di calore geotermica” (Tesi)

Sterrantino Filippo (2021) – “Analisi energetica di una pompa di calore geotermica in ambito residenziale” (Tesi)

Planesio Federico (2022) – “Analisi sperimentale di una Pompa di Calore Geotermica” (Tesi)

Gaudiano, C. D. (2023). Studio e applicazione Pompa di calore geotermica in campo sperimentale (Tesi);

Alessandro Poveromo (2023) “Applicazione di reti neurali artificiali a supporto della progettazione di muri energetici”. (Tesi)

[www.expoclima.it](http://www.expoclima.it)

[www.fire-italia.org](http://www.fire-italia.org)

[www.infobuildenergia.it](http://www.infobuildenergia.it)

[www.unionegeotermica.it](http://www.unionegeotermica.it)

<https://www.edutecnica.it/macchine/frigo/frigo.htm>

<https://corporate.enel.it/storie/articoli/2018/05/geotermia-anniversario-200-anni-larderello>

<https://www.ohga.it/cose-la-geotermia-a-bassa-entalpia-e-cosa-centra-con-il-riscaldamento-della-tua-casa/>

<https://www.cosvig.it/nellultimo-anno-rinnovabili-in-calo-in-italia-ma-geotermia-sostanzialmente-stabile/>

<https://www.esg360.it/sustainability-management/geotermia-a-emissioni-nulle-una-risorsa-per-la-decarbonizzazione/>

<https://indicatoriambientali.isprambiente.it/it/georisorse/siti-di-estrazione-di-risorse-energetiche-geotermia>

<https://www.enelgreenpower.com/it/learning-hub/energie-rinnovabili/energia-geotermica/italia>

<https://www.unionegeotermica.it/la-geotermia-nel-mondo/>

# Allegati

|   |   |        |     |   |                      |      |                   |
|---|---|--------|-----|---|----------------------|------|-------------------|
| <b>Modello</b>  |   |        |     | <b>F1155-6 1x230V</b>   |                      |      |                   |
| <b>Modello bollitore dell'acqua calda</b>   |   |        |     | <b>VPB 300</b>  |                      |      |                   |
| <b>Tipo di pompa di calore</b>  |   |        |     | <input type="checkbox"/> Aria-acqua<br><input type="checkbox"/> Aria esausta-acqua<br><input checked="" type="checkbox"/> Glicole-acqua<br><input type="checkbox"/> Acqua-acqua |                      |      |                   |
| <b>Pompa di calore a bassa temperatura</b>  |   |        |     | <input type="checkbox"/> Sì <input checked="" type="checkbox"/> No  |                      |      |                   |
| <b>Resistenza elettrica integrata per riscaldamento supplementare</b>                                 |   |        |     | <input checked="" type="checkbox"/> Sì <input type="checkbox"/> No  |                      |      |                   |
| <b>Riscaldatore combinato con pompa di calore</b>   |   |        |     | <input checked="" type="checkbox"/> Sì <input type="checkbox"/> No  |                      |      |                   |
| <b>Clima</b>  |   |        |     | <input checked="" type="checkbox"/> Medio <input type="checkbox"/> Freddo <input type="checkbox"/> Caldo  |                      |      |                   |
| <b>Applicazione della temperatura</b>   |   |        |     | <input checked="" type="checkbox"/> Media (55 °C) <input type="checkbox"/> Bassa (35 °C)  |                      |      |                   |
| <b>Standard applicati</b>   |   |        |     | EN-14825 & EN-16147   |                      |      |                   |
| <b>Potenza termica nominale</b>   | Prated  | 5,5    | kW  | <b>Efficienza energetica stagionale del riscaldamento degli ambienti</b>  |                      |      | $\eta_s$ 150 %    |
| <i>Capacità dichiarata per il riscaldamento ambiente a carico parziale e a temperatura esterna Tj</i> |   |        |     | <i>Coefficiente di prestazioni dichiarato per il riscaldamento ambiente a carico parziale e a temperatura esterna Tj</i>  |                      |      |                   |
| Tj = -7 °C  | Pdh   | 5,0    | kW  | Tj = -7 °C  | COPd                 | 3,06 | -                 |
| Tj = +2 °C  | Pdh   | 3,0    | kW  | Tj = +2 °C  | COPd                 | 3,97 | -                 |
| Tj = +7 °C  | Pdh   | 2,0    | kW  | Tj = +7 °C  | COPd                 | 4,63 | -                 |
| Tj = +12 °C   | Pdh   | 1,2    | kW  | Tj = +12 °C   | COPd                 | 4,86 | -                 |
| Tj = blv  | Pdh   | 5,4    | kW  | Tj = blv  | COPd                 | 2,84 | -                 |
| Tj = TOL  | Pdh   | 5,4    | kW  | Tj = TOL  | COPd                 | 2,84 | -                 |
| Tj = -15 °C (se TOL < -20 °C)   | Pdh   |        | kW  | Tj = -15 °C (se TOL < -20 °C)   | COPd                 |      | -                 |
| <b>Temperatura bivalente</b>  | T <sub>blv</sub>  | -10    | °C  | <b>Temperatura dell'aria esterna min.</b>   | TOL                  | -10  | °C                |
| <b>Capacità degli intervalli di ciclo</b>   | P <sub>psych</sub>  |        | kW  | <b>Efficienza degli intervalli di ciclo</b>   | COP <sub>psych</sub> |      | -                 |
| <b>Coefficiente di degradazione</b>   | Cdh   | 0,99   | -   | <b>Temperatura massima di mandata</b>   | WTOL                 | 65   | °C                |
| <b>Consumo energetico nelle modalità diverse da quella attiva</b>                                     |   |        |     | <b>Riscaldamento supplementare</b>  |                      |      |                   |
| <b>Modalità Off</b>   | P <sub>off</sub>  | 0,002  | kW  | <b>Potenza termica nominale</b>   | P <sub>sup</sub>     | 0,1  | kW                |
| <b>Modalità termostato off</b>  | P <sub>to</sub>   | 0,007  | kW  |   |                      |      |                   |
| <b>Modalità standby</b>   | P <sub>sb</sub>   | 0,007  | kW  | <b>Tipo di ingresso energetico</b>  | Elettrico            |      |                   |
| <b>Modalità di resistenza carter</b>  | P <sub>cx</sub>   | 0,009  | kW  |   |                      |      |                   |
| <b>Altri elementi</b>   |   |        |     |   |                      |      |                   |
| <b>Controllo della capacità</b>   | Variabile   |        |     | <b>Portata d'aria nominale (aria-acqua)</b>   |                      |      | m <sup>3</sup> /h |
| <b>Livello di potenza acustica, interno/esterno</b>   | L <sub>WA</sub>   | 42 / - | dB  | <b>Portata nominale del fluido termovettore</b>   |                      |      | m <sup>3</sup> /h |
| <b>Consumo energetico annuo</b>   | Q <sub>HE</sub>   | 2.875  | kWh | <b>Portata della pompa di calore glicole-acqua o acqua-acqua</b>  | 0,68                 |      | m <sup>3</sup> /h |
| <b>Per riscaldatore combinato con pompa di calore</b>   |   |        |     |   |                      |      |                   |
| <b>Profilo sanitario dichiarato, produzione di acqua calda</b>  | XL  |        |     | <b>Efficienza energetica della produzione di acqua calda</b>  | $\eta_{wh}$          | 99   | %                 |
| <b>Consumo energetico giornaliero</b>   | Q <sub>elac</sub>   | 7,73   | kWh | <b>Consumo di carburante giornaliero</b>  | Q <sub>fuel</sub>    |      | kWh               |
| <b>Consumo energetico annuo</b>   | AEC   | 1.697  | kWh | <b>Consumo di carburante annuo</b>  | AFC                  |      | GJ                |
| <b>Informazioni di contatto</b>   | <b>NIBE Energy Systems – Box 14 – Hannabadsvägen 5 – 285 21 Markaryd – Sweden</b> |        |     |   |                      |      |                   |

Figura 44 - Estratto del manuale installatore della Pompa di Calore NIBE F1155-6

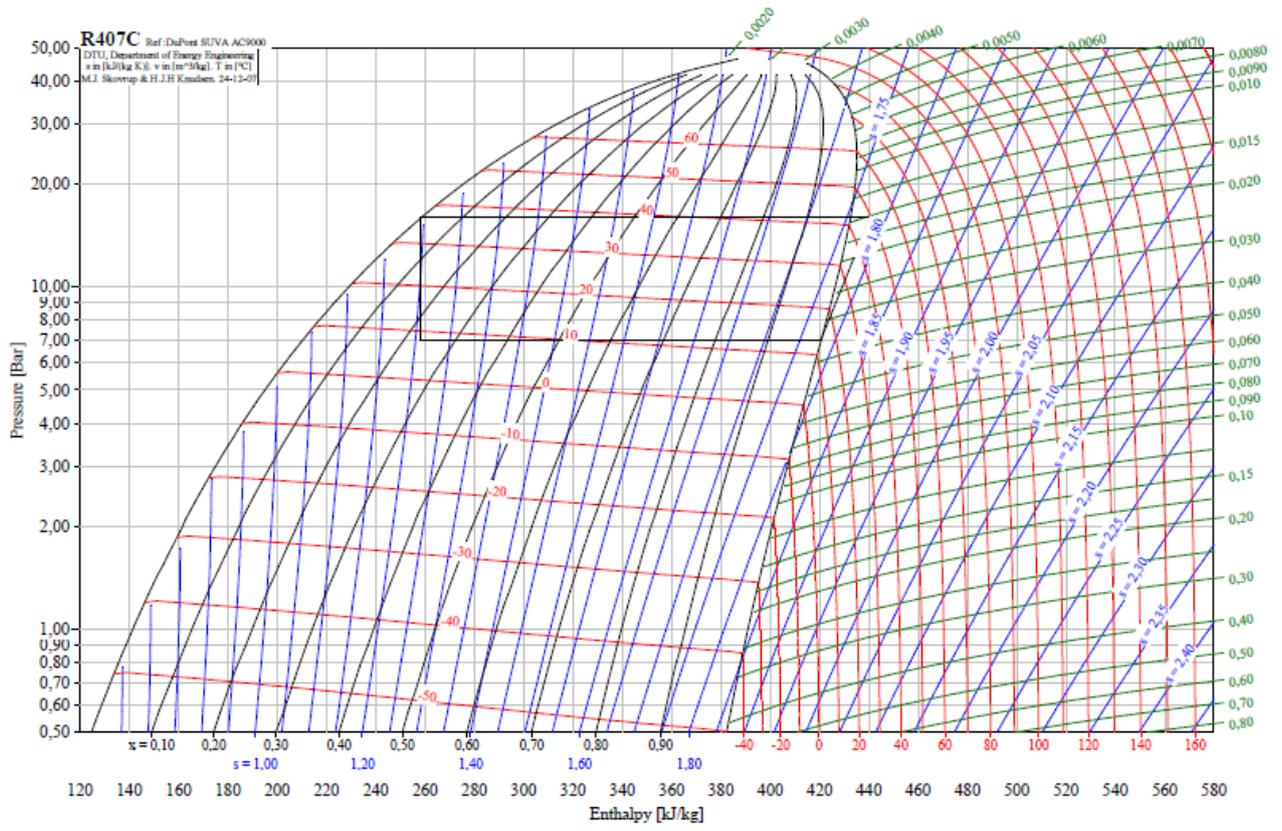


Figura 45 - Ciclo termodinamico nel range di pressioni fisse 7 - 16 bar estratto da Coolpack

|            |                 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |              |              |                 |                | TsatBPgas in [°C]     | 12,98 |
|------------|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------------|--------------|-----------------|----------------|-----------------------|-------|
|            | unità di misura | °C   | °C x min     | %            |                 |                | TsatAPgas in [°C]     | 41,82 |
|            |                 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |              |              |                 |                | Colonne dei controlli |       |
| Date       | Time            | BT1  | BT2  | BT3  | BT10 | BT11 | BT12 | BT14 | BT17 | BT25 | gradi minuto | freq. Compr. | freq Compr. <>0 | BT17>TsatBPgas | BT14>TsatAPgas        |       |
| 2019-10-27 | 00:00:19        | 16,8 | 41,7 | 41,6 | 17,4 | 17   | 41,5 | 30,2 | 28,6 | 41,9 | -48,8        | 0            | CANCELLA        | ok             | CANCELLA              |       |
| 2019-10-27 | 00:00:49        | 16,7 | 41,7 | 41,6 | 17,3 | 17   | 41,5 | 30,2 | 28,6 | 41,9 | -52          | 0            | CANCELLA        | ok             | CANCELLA              |       |
| 2019-10-27 | 00:01:19        | 16,8 | 41,7 | 41,6 | 17,4 | 17,1 | 41,5 | 30,2 | 28,6 | 41,8 | -52          | 0            | CANCELLA        | ok             | CANCELLA              |       |
| 2019-10-27 | 00:01:49        | 16,7 | 41,7 | 41,5 | 17,4 | 17,1 | 41,4 | 30,1 | 28,6 | 41,8 | -55,2        | 0            | CANCELLA        | ok             | CANCELLA              |       |
| 2019-10-27 | 00:02:19        | 16,8 | 41,7 | 41,5 | 17,4 | 17,1 | 41,4 | 30,1 | 28,6 | 41,8 | -55,2        | 0            | CANCELLA        | ok             | CANCELLA              |       |
| 2019-10-27 | 00:02:49        | 16,8 | 41,6 | 41,5 | 17,4 | 17,1 | 41,4 | 30,1 | 28,6 | 41,8 | -58,4        | 0            | CANCELLA        | ok             | CANCELLA              |       |
| 2019-10-27 | 00:03:19        | 16,7 | 41,6 | 41,5 | 17,3 | 17,1 | 41,4 | 30,1 | 28,6 | 41,7 | -58,4        | 0            | CANCELLA        | ok             | CANCELLA              |       |
| 2019-10-27 | 00:03:49        | 16,7 | 41,6 | 41,5 | 17,4 | 17   | 41,4 | 30,1 | 28,5 | 41,7 | -61,6        | 0            | CANCELLA        | ok             | CANCELLA              |       |
| 2019-10-27 | 00:04:19        | 16,7 | 41,6 | 41,5 | 17,3 | 16,5 | 41,3 | 39   | 17,3 | 41,7 | -61,6        | 39,9         | ok              | ok             | CANCELLA              |       |
| 2019-10-27 | 00:04:49        | 16,8 | 42,4 | 41,4 | 17,4 | 14,2 | 42,7 | 46,3 | 16,7 | 41,7 | -64,9        | 40           | ok              | ok             | ok                    |       |
| 2019-10-27 | 00:05:19        | 16,7 | 43,7 | 41,4 | 17,4 | 13,1 | 43,7 | 48,4 | 18,5 | 41,7 | -64,9        | 39,9         | ok              | ok             | ok                    |       |
| 2019-10-27 | 00:05:49        | 16,7 | 44,4 | 41,4 | 17,4 | 12,5 | 44,3 | 49,6 | 19,2 | 41,7 | -68,2        | 39,9         | ok              | ok             | ok                    |       |
| 2019-10-27 | 00:06:19        | 16,7 | 44,8 | 41,5 | 17,4 | 12,3 | 44,6 | 50,4 | 19,3 | 41,7 | -68,2        | 40,1         | ok              | ok             | ok                    |       |
| 2019-10-27 | 00:06:49        | 16,7 | 45,1 | 41,6 | 17,4 | 12   | 44,8 | 51,3 | 19,3 | 41,9 | -71,4        | 40           | ok              | ok             | ok                    |       |
| 2019-10-27 | 00:07:19        | 16,7 | 45   | 41,8 | 17,4 | 12,3 | 44,4 | 51,1 | 19,6 | 42   | -71,4        | 20,2         | ok              | ok             | ok                    |       |
| 2019-10-27 | 00:07:49        | 16,7 | 44,3 | 42   | 17,4 | 13,3 | 43,8 | 51,3 | 20,2 | 42,1 | -74,4        | 20,1         | ok              | ok             | ok                    |       |
| 2019-10-27 | 00:08:19        | 16,7 | 44   | 42   | 17,4 | 14   | 43,7 | 51,5 | 20,6 | 42,3 | -74,4        | 19,9         | ok              | ok             | ok                    |       |
| 2019-10-27 | 00:08:49        | 16,7 | 44   | 42,2 | 17,4 | 14,2 | 43,8 | 51,7 | 20,3 | 42,4 | -77,1        | 20,2         | ok              | ok             | ok                    |       |
| 2019-10-27 | 00:09:19        | 16,6 | 44,1 | 42,4 | 17,4 | 14,3 | 43,9 | 52,1 | 20,7 | 42,6 | -77,1        | 19,8         | ok              | ok             | ok                    |       |
| 2019-10-27 | 00:09:49        | 16,7 | 44,3 | 42,4 | 17,4 | 14,3 | 44,1 | 52,5 | 20,9 | 42,7 | -79,5        | 20,3         | ok              | ok             | ok                    |       |
| 2019-10-27 | 00:10:19        | 16,7 | 44,4 | 42,5 | 17,4 | 14,3 | 44,2 | 53   | 20,9 | 42,8 | -79,5        | 19,9         | ok              | ok             | ok                    |       |

Tabella 6 - Estratto della tabella dei dati del 27/10/2019 con le colonne delle tre ipotesi iniziali