



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di laurea magistrale in Ingegneria Energetica e Nucleare

Analisi delle dispersioni termiche e ottimizzazione dello scambio termico in un sistema geotermico a bassa entalpia

Relatore:

Davide Papurello

Candidato:

Giuseppe Scarlatino
317900

Anno accademico 2025/2026

Abstract

L'adozione del pacchetto di misure Fit for 55 da parte della direttiva europea sull'efficienza energetica (EED), impone agli Stati membri degli obiettivi ambiziosi allo scopo di giungere ad una riduzione minima del 55% delle emissioni di gas serra e mitigare gli effetti del cambiamento climatico entro il 2030. Fra i più rilevanti, si annoverano l'obbligo di soddisfare almeno il 42,5% del fabbisogno energetico tramite fonti rinnovabili e la riduzione del consumo di energia primaria e finale di almeno l'11,7%, perseguibile prevedendo un risparmio annuo medio dell'1,5%. Di conseguenza, la ricerca e lo sviluppo di nuove soluzioni impiantistiche per sfruttare le fonti rinnovabili disponibili, forniscono un importante contributo allo scopo, favorendo la riduzione dell'utilizzo di fonti fossili. A soddisfare tale esigenza, contribuisce l'innovativo sistema geotermico a bassa entalpia GeothermSkin, un muro energetico costituito da una rete di tubazioni in polietilene reticolato (con funzione di geoscambiatore) installata sulle strutture verticali interrato degli edifici. Il prototipo, operativo presso l'Energy Center di Torino, è accoppiato, tramite una rete di distribuzione lunga circa 65 m, ad una pompa di calore che alimenta, tramite fluido termovettore, un ventilconvettore per il riscaldamento o il raffrescamento dell'ambiente di prova.

Il presente lavoro di tesi, è incentrato sulla determinazione delle dispersioni termiche della rete di distribuzione e sulla valutazione dello scambio termico tra i moduli GeothermSkin e il terreno. Tale analisi è finalizzata all'individuazione di soluzioni volte, rispettivamente, alla riduzione delle perdite termiche e all'incremento dello scambio termico, con l'obiettivo di massimizzare lo sfruttamento della fonte rinnovabile e migliorare l'efficienza complessiva del sistema.

Dopo un'analisi preliminare dei principali sistemi geotermici esistenti e dei relativi vantaggi e svantaggi offerti da ciascuna soluzione impiantistica, viene introdotto e descritto l'impianto oggetto di studio. Successivamente, basandosi sulle specifiche geometriche di moduli, collettori e rete di distribuzione (inclusi i relativi spessori di isolamento termico), i diversi componenti sono stati modellati tramite il software CAD Fusion 360. La geometria così ottenuta è stata quindi importata in ambiente COMSOL Multiphysics®, software impiegato per la simulazione di fenomeni fisici accoppiati e multivariati.

Ai fini della simulazione, sono stati usati i dati del sistema geotermico raccolti durante la stagione di riscaldamento tra dicembre 2022 e gennaio 2023 e le informazioni climatiche relative al medesimo periodo. Ciò ha permesso di determinare, al variare delle condizioni al contorno, le dispersioni termiche attraverso la rete di distribuzione e la potenza termica scambiata con il terreno.

L'elaborato si conclude con l'esame di diverse strategie di ottimizzazione. In particolare, vengono stimati i vantaggi legati alla sostituzione dell'isolante e i miglioramenti, in termini di scambio termico con il terreno, ottenibili adottando, per il sistema GeothermSkin, un materiale metallico caratterizzato da una maggiore conducibilità termica, portando, nel mese di dicembre, a un netto incremento della potenza termica totale scambiata con il terreno, la quale passa da circa 15,95 kW del caso base a 46,95 kW (+194,36%), e permettendo al COP di raggiungere un valore di 2,44 rispetto

all'1,14 iniziale (+113,65%). Nel mese di gennaio si registra un trend analogo: la potenza scambiata sale da 14,65 kW a 25,12 kW (+71,47%), con un conseguente innalzamento del COP da 1,23 a 1,64, pari a un incremento del 33,36%.

Indice

Indice delle figure	6
Indice delle tabelle	8
Nomenclatura	9
Capitolo 1	12
Introduzione	12
1.1 Fondamenti di geotermia	12
1.2 Classificazione dei sistemi geotermici	14
1.2.1 Sistemi geotermici ad alta e media entalpia	15
1.2.2 Sistemi geotermici a bassa entalpia e geoscambiatori	16
1.2.2.1 Impianti open loop	17
1.2.2.2 Impianti closed-loop	18
1.3 Pompe di calore	23
1.3.1 Principio di funzionamento	23
1.3.2 Classificazione delle pompe di calore	27
1.3.2.1 Pompa di calore aria-aria	27
1.3.2.2 Pompa di calore aria-acqua	28
1.3.2.3 Pompa di calore acqua-aria	28
1.3.2.4 Pompa di calore acqua-acqua	29
1.3.2.5 Pompa di calore terra-acqua (o geotermica)	30
1.4. Potenzialità e tratti distintivi del sistema GeothermSkin® rispetto alle sonde tradizionali	30
1.5. Impatto delle dispersioni termiche nella rete di distribuzione	32
Capitolo 2	35
Descrizione del caso studio e contesto	35
2.1 Collocazione dell'impianto sperimentale: Energy Center	35
2.2 Caratteristiche climatiche e geologiche del sito	38
2.3 Descrizione e finalità dell'impianto	38
2.3.1 Geotherm Skin	39
2.3.1.1 Lavori di installazione sonde geotermiche	40
2.3.1.2 Sistema di monitoraggio terreno e superficie muraria esterna	41
2.3.2 Circuito primario	45

2.3.2.1 Sistema di monitoraggio sonde geotermiche	47
2.3.3 Pompa di calore.....	48
2.3.3.1 Sistema di monitoraggio pompa di calore	49
2.3.4 Circuito secondario	51
2.3.5 Impianto solare termico.....	52
2.3.6 Circuito irrigatori	53
2.4 Descrizione delle logiche di funzionamento	54
Capitolo 3	56
Modellazione e simulazione del circuito primario in COMSOL Multiphysics	56
3.1 Introduzione	56
3.2 Raccolta delle informazioni relative al sistema.....	56
3.3 Realizzazione della geometria e semplificazioni adottate	58
3.4 Dati di input delle simulazioni.....	60
3.5 Configurazione iniziale del modello COMSOL.....	61
3.5.1 Ipotesi del modello	62
3.6 Struttura del Model Builder e configurazione dei nodi.....	62
3.6.1 Definizioni globali.....	63
3.6.2 Componente.....	66
3.6.2.1 Definizioni	66
3.6.2.2 Materiali	68
3.6.2.3 Trasferimento di calore in solidi e fluidi (<i>ht</i>)	70
3.6.2.4 Mesh.....	78
3.6.2.5 Risultati.....	78
3.7 Risultati caso base	80
Capitolo 4	84
Ottimizzazione delle prestazioni di impianto	84
4.1 Workflow.....	84
4.2 Sostituzione isolante	84
4.2.1 Caratteristiche del materiale isolante	84
4.2.2 Risultati ottenuti (sostituzione isolante)	85
4.3 Sostituzione materiale sonde geotermiche	88
4.3.1 Caratteristiche del nuovo materiale utilizzato per le sonde	88

4.3.2 Risultati ottenuti (sostituzione materiale sonde).....	90
4.4 Azione combinata sostituzione isolante+ sostituzione materiale sonde geotermiche	92
4.4.1 Risultati processo di ottimizzazione	95
4.5 Analisi di sensibilità	96
4.5.1 Incremento della portata volumetrica	96
4.5.2 Incremento della conducibilità termica del terreno	97
4.6 Conclusioni	97
Bibliografia	99
Sitografia	100

Indice delle figure

Figura 1: Andamenti della temperatura del suolo al variare della profondità	13
Figura 2: Rappresentazione schematica di un sistema geotermico ²⁷	14
Figura 3: Tipologie di sistemi geotermici ad alta e media entalpia.....	16
Figura 4: Sistemi SWHP e GWHP ²¹	17
Figura 5: Schematizzazione del pozzo.	17
Figura 6: Sistemi GCHP ²¹	18
Figura 7: Esempio di installazione sonde geotermiche verticali ¹⁷	19
Figura 8: Sezioni trasversali delle sonde geotermiche; tubo a U singola (A), tubo a U doppia(B), sonda coassiale (C) ⁶	20
Figura 9: Esempio di installazione sonde geotermiche orizzontali ⁹	20
Figura 10: Differenti configurazioni sonde geotermiche orizzontali ⁵	21
Figura 11: Schema rappresentativo dei pali energetici (a); tipologie di posa pali energetici (b) ³⁰	22
Figura 12: Schema rappresentativo di un diaframma energetico (a); esempio di installazione (b). .	23
Figura 13: Schematizzazione del ciclo termodinamico inverso; (a) riscaldamento, (b) raffreddamento ¹⁷	23
Figura 14: Ciclo termodinamico compiuto dal fluido frigorigeno nel diagramma log p-h ¹⁸	24
Figura 15: Schema funzionale di una pompa di calore ¹⁸	24
Figura 16: Schema valvola di inversione a 4 vie.	25
Figura 17: Andamento del COP in funzione delle temperature dei termostati ³¹	26
Figura 18: Pompa di calore aria-aria di tipo Split ²³	27
Figura 19: Pompa di calore aria-acqua ²³	28
Figura 20: Pompa di calore acqua-aria ²³	28
Figura 21: Pompa di calore acqua-acqua ²³	29
Figura 22: Pompa di calore terra-acqua ²³	30
Figura 23: Esempio applicativo del sistema GeothermSkin sulla parete interrata di un edificio residenziale ²	31
Figura 24: Energy Center, Torino e posizione del prototipo.....	36
Figura 25: Pianta del seminterrato.....	37
Figura 26: Pianta terrazza.....	37
Figura 27: Dimensioni moduli GeothermSkin ²	39
Figura 28: Lavori di scavo e blindatura per il prototipo GeoThermSkin; (a) fase iniziale e (b) fondo scavo livellato per la posa dei tubi ²	40
Figura 29: Posizionamento della sensoristica sulla superficie del prototipo ²	42
Figura 30: Schema dei piani di misura in sezione (a); cella di pressione (b) ²	43
Figura 31: Posizionamento dei sensori di temperatura; (a) Piano A, (b) Piano B, (c) Piano C e (d) Piano D ²	44
Figura 32: Rappresentazione in pianta del percorso della linea di distribuzione ²	45
Figura 33: Collettori di mandata e ritorno e indicazione dei vari tratti di tubazione del sistema di distribuzione ²	46

Figura 34: Dettaglio misuratore di portata e contabilizzatori termici.	47
Figura 35: Viste NIBE F1155; (a) frontale senza pannello anteriore, (b) retro della macchina ¹³	49
Figura 36: PdC e accumulo da 200 l (a); componentistica interna (b) ¹³	49
Figura 37: Schema disposizione sensori a bordo macchina ¹³	50
Figura 38: Accumulo Pacetti 8 l ¹³	51
Figura 39: Ventilconvettore CRC 23 ³²	51
Figura 40: (a) Moduli solari termici con tubi sottovuoto; (b) Accumulo BP-02 in centrale termica e componentistica; (c) Accumulo 200 l e componentistica ¹³	53
Figura 41: Schema funzionale impianto sperimentale integrato con impianto solare termico.	55
Figura 42: Modello realizzato in Fusion 360.	58
Figura 43: Componenti e tratti di tubazione non rappresentati nel modello.	59
Figura 44: Dettaglio connessione ai collettori dei tratti Flow3 e Return1 e unione dei tratti Return3+Flow2 e Return2+Flow1.	60
Figura 45: Schermata principale COMSOL.	61
Figura 46: Modelli delle diverse porzioni del circuito primario.	63
Figura 47: Sotto-nodi creati nel nodo Definizioni globali.	63
Figura 48: Densità del fluido in funzione della temperatura.	64
Figura 49: Calore specifico del fluido in funzione della temperatura.	65
Figura 50: Viscosità dinamica del fluido in funzione della temperatura.	65
Figura 51: Conducibilità termica del fluido in funzione della temperatura.	66
Figura 52: Sotto-nodi creati nel nodo Definizioni.	66
Figura 53: Sotto-nodi creati nel nodo Materiali.	68
Figura 54: Sotto-nodi "Fluido" definiti per la gestione direzionale del campo di velocità.	72
Figura 55: Esempio definizione del campo di velocità: (a) flusso monodirezionale concorde all'asse y; (b) cambio di direzione del flusso dall'asse y all'asse x.	72
Figura 56: Struttura completa del nodo della fisica e relativi sotto-nodi implementati.	77
Figura 57: Rappresentazione mesh dei modelli.	78
Figura 58: Campo di temperature (dicembre).	79
Figura 59: Campo di temperature (gennaio).	79
Figura 60: Variazione della T media del fluido lungo circuito primario (dicembre).	80
Figura 61: Variazione della T media del fluido lungo circuito primario (gennaio).	80
Figura 62: Isolante Thermablok Aerogel A2.	85
Figura 63: Profili di temperatura; caso base vs sostituzione nuovo isolante (dicembre).	85
Figura 64: Profili di temperatura; caso base vs sostituzione nuovo isolante (gennaio).	86
Figura 65: Nuovo materiale per sonde Sanicro® 35.	89
Figura 66: Profili di temperatura; caso base vs nuovo materiale sonde (dicembre).	90
Figura 67: Profili di temperatura; caso base vs nuovo materiale sonde (gennaio).	90
Figura 68: Profili di temperatura; caso base vs nuovo isolante e materiale sonde (dicembre).	92
Figura 69: Profili di temperatura; caso base vs nuovo isolante e materiale sonde (gennaio).	93

Indice delle tabelle

Tabella 1: Classificazione delle risorse geotermiche in base alla temperatura.....	13
Tabella 2: Informazioni generali e dati climatici del sito.	38
Tabella 3: Dettagli geometrici moduli GeothermSkin.	39
Tabella 4: Posizione estensimetri e celle di pressione sulla superficie del muro ²	42
Tabella 5: Tabella riassuntiva informazioni relative al circuito primario.....	46
Tabella 6: Codice identificativo sensoristica PdC ¹³	50
Tabella 7: Tabella riassuntiva informazioni relative al circuito secondario.	52
Tabella 8: Specifiche geometriche e materiali del circuito primario.	57
Tabella 9: Specifiche geometriche e materiali del circuito secondario.....	57
Tabella 10: Proprietà del fluido in funzione della temperatura.	64
Tabella 11: Parametri del terreno nella zona di Torino (Barla et al.,2019)	67
Tabella 12: Valori di conducibilità termica utilizzati per la definizione della funzione k_iso.....	68
Tabella 13: Proprietà termofisiche tratti di tubazione in acciaio zincato ¹¹	69
Tabella 14: Proprietà termofisiche dei collettori in PE100.....	69
Tabella 15: Proprietà termofisiche GeothermSkin ²⁹	69
Tabella 16: Proprietà termofisiche isolante utilizzato per ogni tratto di tubazione ²⁴	69
Tabella 17: Flussi termici scambiati con il terreno (dicembre).	81
Tabella 18: Flussi termici scambiati con il terreno (gennaio).....	82
Tabella 19: Flussi termici mensilmente dispersi.....	82
Tabella 20: COP e valori di potenza netta mediamente prodotta nei mesi di dicembre e gennaio. .	83
Tabella 21: Proprietà termofisiche isolante Thermablok Aerogel A2 ²²	85
Tabella 22: Sostituzione isolante; flussi termici dispersi e scambiati.....	86
Tabella 23: Sostituzione isolante; COP e temperature di ritorno macchina.	87
Tabella 24: Proprietà termofisiche nuovo materiale sonde Sanicro®35.....	89
Tabella 25: Sostituzione materiale sonde; flussi termici dispersi e scambiati.	91
Tabella 26: Sostituzione materiale sonde; COP e temperature di ritorno macchina.....	91
Tabella 27: Sostituzione isolante e materiale sonde; flussi termici dispersi e scambiati.	93
Tabella 28: Sostituzione isolante e materiale sonde; COP e temperature di ritorno macchina.	94
Tabella 29: Risultati del processo di ottimizzazione.....	95
Tabella 30: Risultati analisi di sensibilità; incremento della portata volumetrica.	96
Tabella 31: Risultati analisi di sensibilità; incremento conducibilità termica fase solida terreno.	97

Nomenclatura

COP	Coefficient Of Performance
EER	Energy Efficiency Ratio
q_{cond}	Calore ceduto dal fluido refrigerante nel condensatore [kJ/kg]
q_{evap}	Calore assorbito dal fluido refrigerante nell'evaporatore [kJ/kg]
q_{ss}	Potenza termica dissipata per cortocircuito termico [W]
q_0	Flusso termico dissipato per convezione naturale [W/m ²]
$\mathbf{q}$	Flusso termico conduttivo [W/m ²]
Q	Flusso termico associato a sorgenti termiche aggiuntive [W/m ³]
Q_{ted}	Flusso termico associato agli effetti termoelastici nei solidi [W/m ³]
Q_p	Flusso termico dovuto a compressione adiabatica ed effetti termoacustici [W/m ³]
Q_{vd}	Flusso termico dovuto alle dissipazioni viscosse nel fluido [W/m ³]
Q_{geo}	Flusso termico associato all sorgente geotermica [W/m ³]
$\dot{Q}_{netta,m}$	Potenza termica scambiata all'evaporatore al netto delle dispersioni [W]
$\dot{Q}_{Cond}$	Potenza termica ceduta all'utenza nel condensatore [W]
$P_{el,tot}$	Potenza elettrica assorbita dalla pompa di calore [W]
Q	Portata volumetrica [m ³ /s]
k	Conducibilità termica del materiale (o fluido) [W/(m·K)]
k_g	Conducibilità termica del mezzo di posa tubazioni interessate da q_{ss} [W/(m·K)]
k_{eff}	Conducibilità termica efficace del mezzo poroso [W/m·K]
k_f	Conducibilità termica del fluido mobile [W/(m·K)]
k_s	Conducibilità termica della matrice solida [W/(m·K)]
k_{imf}	Conducibilità termica del fluido immobile [W/(m·K)]
k_{disp}	Conducibilità termica di dispersione [W/(m·K)]

S_f	Fattore di forma geometrico [m]
l	Lavoro di compressione fornito al fluido nel ciclo [kJ/kg].
T	Temperatura [°C]
T_{sup}	Temperatura superficiale del terreno [°C]
T_{inlet}	Temperatura fluido in input al modello [°C]
T_{ground}	Temperatura del terreno [°C]
T_{ustr}	Temperatura del fluido a monte (<i>upstream</i>) rispetto alla frontiera di ingresso [°C].
$T_{in,mand,m}$	Temperatura media di ingresso nella tubazione di mandata [°C]
$T_{out,rit,m}$	Temperatura media in uscita dalla tubazione di mandata [°C]
t_{app}	Approach Temperature [°C]
$\Delta t_{resv\ header}$	Salto termico del fluido nel tratto di collettore sommerso [°C].
$\Delta t_{grn\ header}$	Salto termico del fluido nel tratto di collettore transitante sul suolo superficiale [°C].
t_{supply}	Temperatura del fluido nella tubazione di mandata [°C]
t_{return}	Temperatura del fluido nella tubazione di ritorno [°C]
ELT	Entering Liquid Temperature [°C]
LLT_{swhe}	Leaving Liquid Temperature [°C]
ρ	Densità [kg/m ³]
p	Pressione [Pa]
p_A	Pressione assoluta di riferimento [Pa].
p_{ustr}	Pressione del fluido a monte rispetto alla frontiera di ingresso [Pa].
C_p	Capacità termica specifica a sforzo costante [J/(kg · K)]
$\mathbf{u}$	Vettore velocità [m/s]
α	Coefficiente di dilatazione termica [1/K]
S	Secondo tensore degli sforzi di Piola-Kirchoff [Pa].
$\boldsymbol{\tau}$	Tensore degli sforzi viscosi [Pa]
$\mathbf{n}$	Vettore normale alla superficie di ingresso [-].
H	Entalpia specifica del fluido rispetto a uno stato di riferimento [J/kg].
h	Coefficiente di scambio termico convettivo [W/(m ² ·K)].

Ra_D	Numero di Rayleigh basato sul diametro D [-]
Ra_H	Numero di Rayleigh basato sull'altezza H [-]
Pr	Numero di Prandtl [-]
ϵ_p	Porosità terreno [-]
θ_{imf}	Frazione volumetrica del fluido immobile [-]

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Fondamenti di geotermia

La *geotermia*, dal greco “geo” (terra) e “termia” (calore), è la disciplina che studia l’insieme dei fenomeni naturali che permettono di sfruttare il calore proveniente dall’interno della terra. Tale risorsa energetica trae origine principalmente dal calore primordiale del pianeta e al calore radiogenetico, derivante dal decadimento radioattivo di elementi come Uranio (U238 e U235), Torio (Th232) e Potassio (K40), distribuiti all’interno del nucleo, mantello e crosta terrestre. Nonostante l’elevata disponibilità, tale fonte energetica è fortemente distribuita e raramente concentrata in contesti geologici accessibili; inoltre, tali risorse si trovano spesso a profondità elevate, imponendo vincoli tecnici ed economici per un loro efficiente sfruttamento.

Al fine di analizzare i meccanismi di scambio termico del suolo, il terreno viene suddiviso in zone in base all’influenza climatica atmosferica [\[12\]](#):

- *Strato climaticamente perturbato*: si estende nei primi 15–20 m di profondità. In questa fascia superficiale la temperatura risente direttamente delle fluttuazioni stagionali, e l'effetto del flusso geotermico profondo è trascurabile rispetto agli apporti solari e meteorici.
- *Strato neutro*: costituisce la superficie che delimita la zona climaticamente perturbata da quella non perturbata e si localizza intorno ai 15 m di profondità. A partire da tale quota, il profilo termico si stabilizza su un valore costante tutto l'anno, azzerando le variazioni stagionali.
- *Strato climaticamente non perturbato*: si sviluppa al di sotto dello strato perturbato. In questa regione profonda le oscillazioni climatiche non esercitano alcuna influenza e lo stato termico delle rocce è governato dal flusso endogeno terrestre; da questa quota in poi, la temperatura terreno aumenta secondo il gradiente geotermico medio (pari a circa 2,5-3°C ogni 100 m).

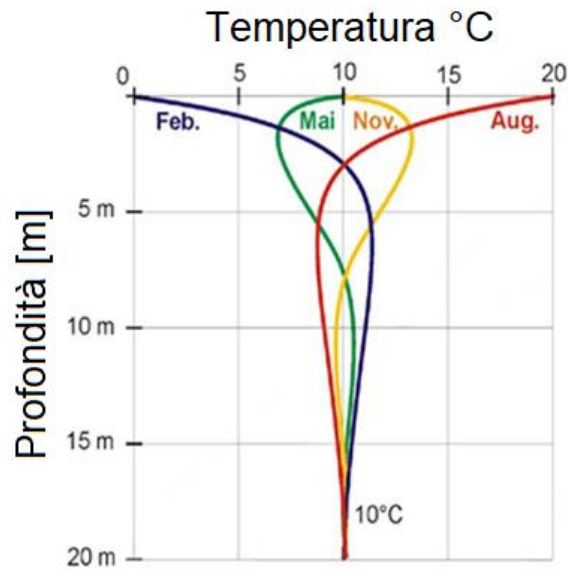


Figura 1: Andamenti della temperatura del suolo al variare della profondità

Come mostrato in *Fig.1*, l'evidente divergenza delle curve termiche estive e invernali registrata in prossimità della superficie tende a smorzarsi progressivamente con la profondità, fino a convergere asintoticamente in corrispondenza dello strato neutro. In entrambe le porzioni di terreno, il profilo termico teorico può essere alterato dalla presenza di acqua di falda la quale, in funzione della velocità di scorrimento, incrementa la capacità di scambio termico del campo geotermico a scapito della sua capacità di accumulo energetico interstagionale.

Le risorse geotermiche vengono comunemente classificate in base all'entalpia dei fluidi che trasferiscono il calore dalle rocce (calde) presenti nel sottosuolo, alla superficie. Tale grandezza esprime il contenuto energetico del fluido stesso, ed è indicativo della quantità di calore e lavoro che è possibile trarne. Una classificazione basata sulla temperatura (dalla quale l'entalpia dipende) è riportata in *Tab.1*.

	Muffler e Cataldi, 1978	Hochstein, 1990	Benderitter e Cormy, 1990	Nicholson, 1993	Axelsson G., 2000
Risorse a bassa entalpia	<90	<125	<100	≤150	≤190
Risorse a media entalpia	90-150	125-225	100-200	-	
Risorse ad alta entalpia	>150	>225	>200	>150	>190

Tabella 1: Classificazione delle risorse geotermiche in base alla temperatura.

In riferimento alla classificazione di (Nicholson, 1993), le risorse geotermiche si distinguono in:

- risorse geotermiche ad *alta entalpia* ($T > 150^{\circ}\text{C}$), impiegate negli usi indiretti del calore tramite impiego di fluidi geotermici (acqua surriscaldata/vapori) nei cicli di produzione di energia elettrica;
- risorse geotermiche a *media entalpia* ($90^{\circ}\text{C} < T < 150^{\circ}\text{C}$), per cui si hanno sia impieghi diretti che indiretti. In quest'ultimo caso, il fluido geotermico viene impiegato per vaporizzare un fluido di lavoro (solitamente organico, con basso punto di ebollizione ed elevata pressione di vapore a bassa temperatura) e utilizzato per produrre energia elettrica
- risorse geotermiche a *bassa entalpia* ($T < 90^{\circ}\text{C}$), impiegate sia negli usi diretti del calore sia per i comuni usi diretti del calore sia per i comuni usi terapeutici, termali e balneari. Trovano inoltre applicazione in agricoltura, itticoltura e nei processi industriali, oltre che nel riscaldamento e raffrescamento di ambienti tramite pompe di calore.

1.2 Classificazione dei sistemi geotermici

Per sistema geotermico (Fig.2) generalmente si intende un sistema fluido convettivo, che, in uno spazio confinato nella parte superiore della crosta terrestre, trasporta il calore dalla sorgente termica, al luogo, generalmente la superficie, dove il calore stesso è assorbito (disperso o utilizzato) [14]. Un sistema geotermico è sempre formato da tre elementi: la sorgente di calore, il serbatoio ed il fluido termovettore

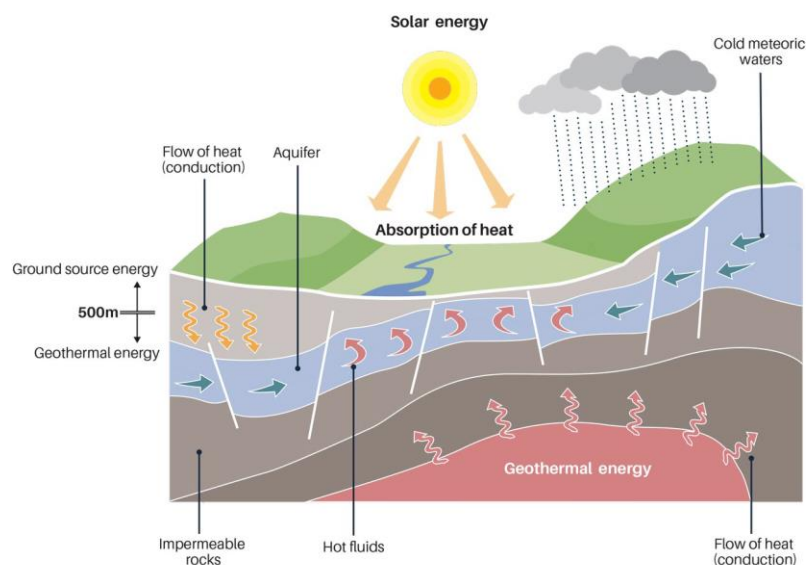


Figura 2: Rappresentazione schematica di un sistema geotermico²⁷.

1.2.1 Sistemi geotermici ad alta e media entalpia

I sistemi geotermici ad alta entalpia convertono il calore proveniente dal suolo terrestre direttamente in energia elettrica. Tali impianti sfruttano specifiche anomalie geologiche capaci di raggiungere temperature di diverse centinaia di gradi a profondità ridotte, spesso pari a poche centinaia di metri. L'installazione di questi sistemi, è particolarmente complessa e richiede infrastrutture tipiche di complessi industriali o aziende dotate di ampie superfici. In base alla stratigrafia del sottosuolo e al meccanismo di scambio termico, si distinguono cinque categorie principali di sistemi geotermici (Fig. 3):

- *Sistemi idrotermali*: si dividono in sistemi:
 - *ad acqua dominante* (i più diffusi a livello globale), dove l'acqua liquida costituisce la fase continua che regola la pressione, mentre il vapore è presente in forma di bolle;
 - *a vapore dominante*, dove il vapore costituisce la fase continua che coesiste con l'acqua liquida in un serbatoio mantenuto in temperatura da risalite magmatiche situate ad alcuni chilometri di profondità. Quest'ultima configurazione è ideale per la generazione elettrica, sebbene risulti piuttosto rara.
- *Sistemi ad acqua calda*: i quali contengono acqua con temperature inferiori a 100° C (tipicamente tra 50°C e 82°C). Trovano impiego quasi esclusivamente negli usi diretti del calore, come il riscaldamento residenziale, le colture in serra e i processi industriali.
- *Sistemi geopressurizzati*: racchiudono acqua a temperature e pressioni più elevate rispetto ai sistemi idrotermali, poiché confinata in rocce profonde. Tali caratteristiche consentono di recuperare sia l'energia termica sia quella piezometrica del fluido.
- *Sistemi "Hot Dry Rock" (a rocce calde secche)*: sono costituiti da formazioni rocciose impermeabili in cui non è presente la circolazione di fluidi, originate dalla solidificazione del magma in prossimità della superficie. Sono caratterizzate da temperature comprese tra i 200 °C e 350 °C e lo sfruttamento di questa risorsa richiede la fratturazione artificiale (*fracking*) oppure attraverso la circolazione forzata del fluido ad alta pressione che fessura la roccia, la raffredda e veicola il calore in superficie.
- *Sistemi magmatici*: mirano a intercettare artificialmente l'energia termica diretta di un corpo magmatico intrappolato a circa 5 km di profondità, caratterizzato da temperature comprese tra 600 °C e 1400 °C, al fine di riscaldare un fluido di lavoro. L'estrazione termica dal magma comporta tuttavia notevoli criticità tecniche ed economiche, legate principalmente alle complesse operazioni di perforazione.

I sistemi a media entalpia condividono, infine, le medesime configurazioni geologiche delle tipologie ad alta entalpia (fatta eccezione per i sistemi magmatici), differenziandosi per temperature d'esercizio più contenute, tipicamente comprese nel range $90\text{ °C} < T < 150\text{ °C}$.

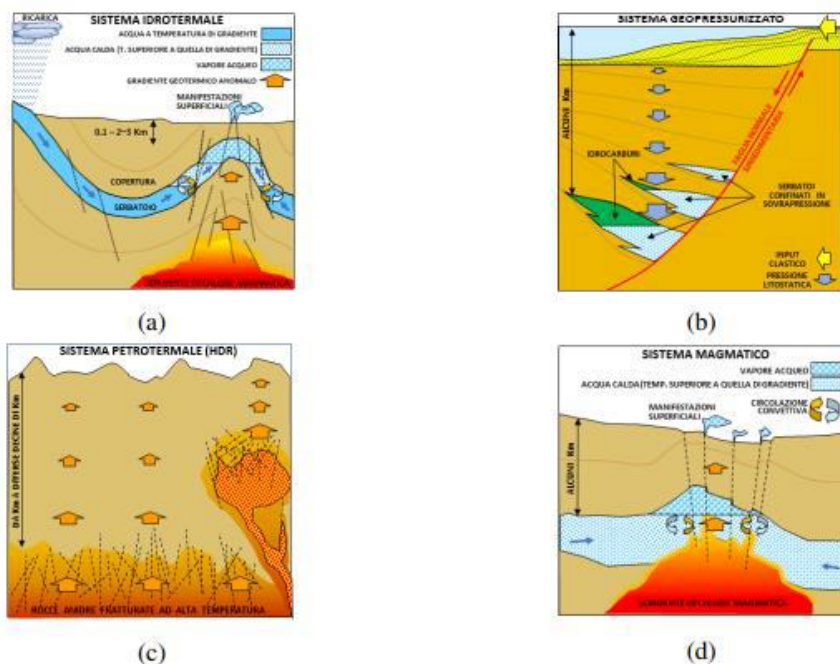


Figura 3: Tipologie di sistemi geotermici ad alta e media entalpia.

1.2.2 Sistemi geotermici a bassa entalpia e geoscambiatori

I sistemi a bassa entalpia sono destinati all'approvvigionamento del calore per uso diretto e presentano temperature del serbatoio inferiori a 90 °C. A differenza dei sistemi ad alta e media entalpia (vincolati ad anomalie termiche localizzate) la bassa entalpia è sfruttabile in gran parte del territorio italiano, poiché il gradiente geotermico si stabilizza già al di sotto dei 15 m dal piano campagna.

Gli usi diretti del calore comprendono la climatizzazione degli ambienti, la produzione di acqua calda sanitaria (ACS), le applicazioni termali, l'acquacoltura, i processi industriali e il settore agricolo (riscaldamento di serre, pastorizzazione, essiccazione e fermentazione alimentare).

Le configurazioni impiantistiche principali si dividono in:

- *Impianti diretti*: trasferiscono il calore del geofluido a un circuito secondario tramite uno scambiatore (o alimentano direttamente l'utenza). Sono impiegati per il pre-riscaldamento invernale o il pre-raffrescamento estivo dei fluidi termovettori (aria o acqua) in singole utenze o reti di teleriscaldamento.
- *Impianti indiretti*: innalzano il livello termico della risorsa mediante una pompa di calore elettrica (geotermica), operando sia su singole utenze sia su reti di teleriscaldamento.

In base alla modalità di accoppiamento con il terreno e al fluido termovettore, gli impianti indiretti per la climatizzazione degli edifici si strutturano in due macrofamiglie: a circuito idraulico aperto (*open loop*) e a circuito idraulico chiuso (*closed loop*).

1.2.2.1 Impianti open loop

In questa configurazione, la pompa di calore eleva la temperatura dell'acqua captata per il riscaldamento dell'utenza; successivamente, l'acqua raffreddata viene reimpressa nell'ambiente. Si distinguono due categorie:

- *Surface Water Heat Pump (SWHP)*: sfruttano l'energia termica di corsi d'acqua o bacini idrici superficiali.
- *Groundwater Heat Pump (GWHP)*: impiegano acque di falda profonde, caratterizzate da un'ottima capacità di accumulo solare e da temperature stabili durante l'anno (tipicamente tra 9 °C e 12 °C).

Una rappresentazione delle due soluzioni è mostrata in *Figura 4*.

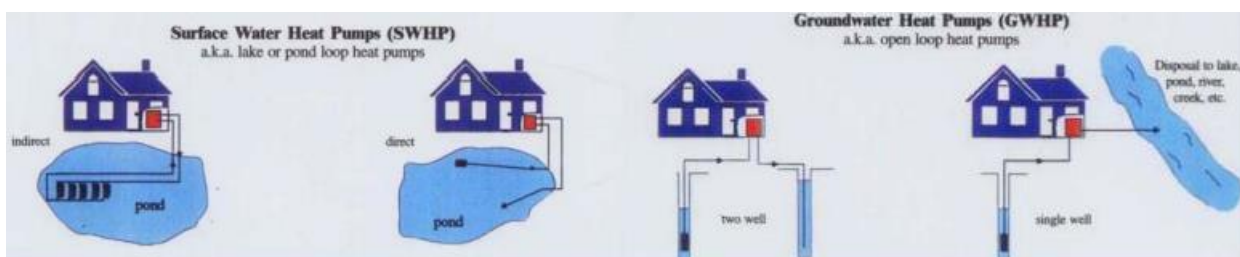


Figura 4: Sistemi SWHP e GWHP²¹.

La progettazione dei pozzi, realizzati tramite trivellazione e rivestiti con tubazioni in PVC o acciaio zincato, è legata alle proprietà idrogeologiche del sito e al fabbisogno idrico della pompa di calore (il cui dimensionamento richiede solitamente tra 150 l/h per ogni kW termico). L'intercapedine tra lo scavo e la tubazione viene sigillata con malte cementizie additivate per garantire stabilità strutturale e protezione da contaminazioni esterne. Il tubo di rivestimento si estende fino alla zona satura dell'acquifero, dove presenta una porzione terminale fessurata (filtro) che permette l'ingresso dell'acqua. La parte sommitale ospita la testa del pozzo, che integra le connessioni idrauliche di mandata e la pompa sommersa per il sollevamento del fluido. La struttura tipica del pozzo è schematizzata in *Figura 5*.

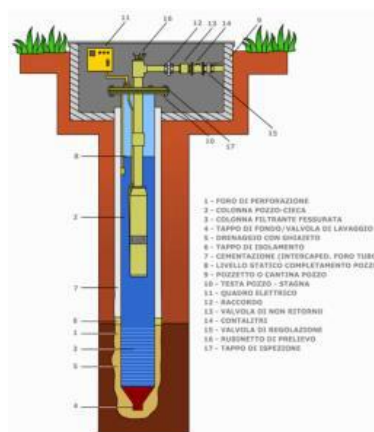


Figura 5: Schematizzazione del pozzo.

I vantaggi e gli svantaggi dei sistemi open-loop sono:

Vantaggi:

- *Efficienza elevata:* la temperatura costante dell'acqua di falda, legata alla sua alta capacità termica, garantisce rendimenti della pompa di calore superiori rispetto ai sistemi a circuito chiuso, influenzati dalle variazioni termiche del terreno.
- *Sostenibilità economica:* a parità di potenza termica, presentano ingombri ridotti e costi di installazione inferiori.

Svantaggi:

- *Rischio di usura e sporcamento:* il contatto diretto con il geofluido espone gli scambiatori a corrosione, incrostazioni saline e occlusioni per solidi sospesi. In caso di chimica dell'acqua sfavorevole, è necessario interporre uno scambiatore intermedio (circuito aperto indiretto).
- *Complessità idrogeologica:* la fattibilità è subordinata alla presenza di un acquifero idoneo, la cui dinamica e i cui tempi di ricarica richiedono accurati studi preliminari per evitare cali di efficienza.

1.2.2.2 Impianti closed-loop

Questa categoria di impianti si caratterizza per un sistema di tubazioni di mandata e ritorno a circuito chiuso, inserite nel terreno e collegate a una pompa di calore (*Ground Coupled Heat Pump* - GCHP, Fig. 6). Tali condotti costituiscono le sonde geotermiche (o geoscambiatori), strutture artificiali interrate mediante scavo o trivellazione a profondità comprese tra 2 e 200 m, la cui unica funzione è lo scambio termico con il sottosuolo.

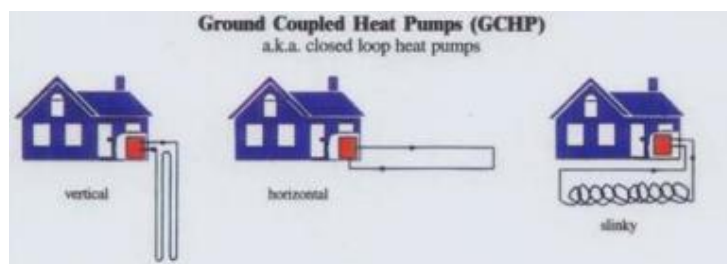


Figura 6: Sistemi GCHP²¹.

I vantaggi e gli svantaggi dei sistemi closed-loop sono:

Vantaggi:

- *Assenza di vincoli geologici:* l'installazione non richiede requisiti specifici del sottosuolo;
- *Nessuna interazione dell'impianto con le acque sotterranee;*
- *Iter autorizzativo più rapido* (rispetto ad altre soluzioni);
- il sistema è più adattabile alle diverse condizioni, anche per quanto riguarda la disposizione stessa che le tubazioni possono assumere nel terreno poiché invisibili una volta installate

Svantaggi:

- *Dipendenza climatica:* l'efficienza operativa della pompa di calore risente delle variazioni meteorologiche esterne che influenzano la temperatura del terreno.
- *Sensibilità alla profondità:* gli effetti negativi delle oscillazioni termiche atmosferiche sulla resa dell'impianto sono tanto più marcati quanto più le sonde sono posizionate vicine alla superficie.

Tali sistemi inoltre, si suddividono in tre configurazioni principali: sonde verticali, sonde orizzontali e geostrutture.

1.2.2.2.1 Sonde geotermiche verticali

Rappresentate in *Figura 7*, le sonde verticali (*Borehole Heat Exchanger, BHE*) costituiscono la tecnologia più diffusa per lo sfruttamento della bassa entalpia. Sono formate da tubazioni inserite in perforazioni verticali dal diametro di 10-20 cm e profondità fino a 200 m.

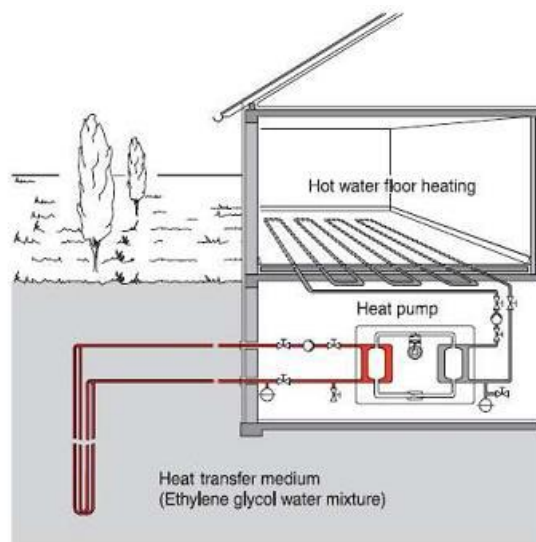


Figura 7: Esempio di installazione sonde geotermiche verticali¹⁷.

Il processo realizzativo prevede la trivellazione del foro e il successivo riempimento dal fondo, tramite tubi getto, con miscele premiscelate di cementi bentonitici, allo scopo di saturare gli spazi vuoti, massimizzando la conducibilità termica tra fluido e terreno, e sigillare le eventuali falde acquifere attraversate dalla perforazione. Il numero e la lunghezza complessiva delle sonde vengono dimensionati in base alla potenza termica richiesta dall'edificio. Al termine dei lavori, il piano campagna viene ripristinato senza lasciare tracce visibili.

Le tubazioni operano a pressioni di 2-3 bar e sono realizzate in polietilene o polipropilene (con diametro esterno di 20-40 mm) per garantire resistenza meccanica e anticorrosiva. Le geometrie degli scambiatori (*Fig. 8*) si dividono in:

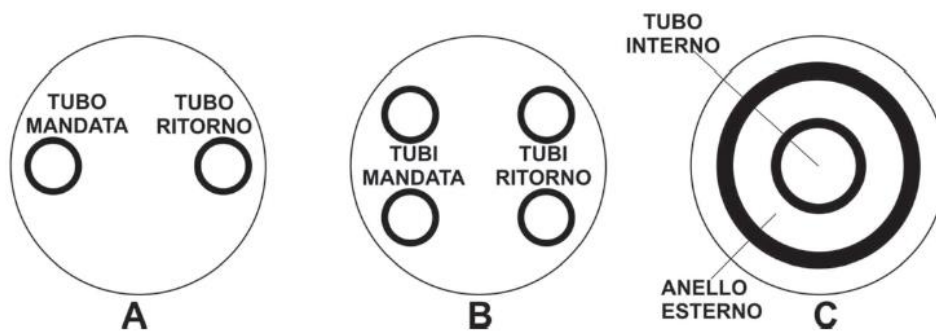


Figura 8: Sezioni trasversali delle sonde geotermiche; tubo a U singola (A), tubo a U doppia(B), sonda coassiale (C)⁶.

- **Tubi a U:** una o più coppie di tubazioni collegate sul fondo, in cui circola un fluido termovettore (generalmente miscela di acqua e glicole etilenico al 20%).
- **Tubi coassiali:** configurazione in cui il condotto di ritorno è interno a quello di mandata. Si distinguono in:
 - *semplici*, che occupano l'intera sezione del perforo e non necessitano di cementazione se il diametro esterno coincide con quello dello scavo (sebbene siano soggetti a cortocircuitazione termica, mitigabile aumentando lo spessore o inserendo un'intercapedine isolante)
 - *complessi*, dotati di alette distanziatrici per garantire la coassialità e ottimizzare lo scambio termico.

1.2.2.2.2 Sonde geotermiche orizzontali

Gli scambiatori orizzontali (Fig. 9) vengono posati a poco più di un metro di profondità tramite scavi a sbancamento o a trincea. Sfruttando l'energia termica superficiale direttamente legata all'irraggiamento solare, l'area sovrastante non deve ospitare edifici, pavimentazioni o alberi ad alto fusto sempreverdi; l'impianto richiede pertanto un'ampia superficie verde limitrofa all'edificio.

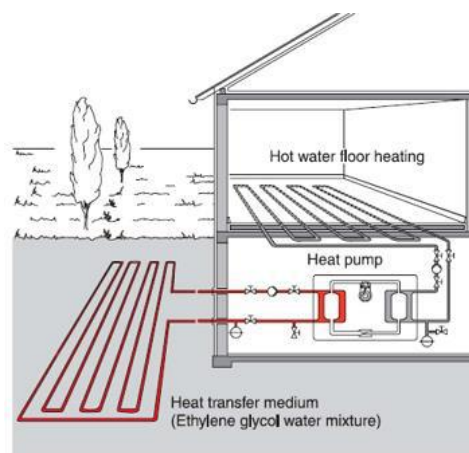


Figura 9: Esempio di installazione sonde geotermiche orizzontali².

Le sonde sono costituite da serpentine di tubi in polietilene o polipropilene disposte in parallelo, che convergono in collettori di mandata e ritorno collegati alla pompa di calore. La scelta della configurazione (**Figura 10**) dipende dalla natura del terreno, dall'ombreggiamento e dalla vegetazione presente:

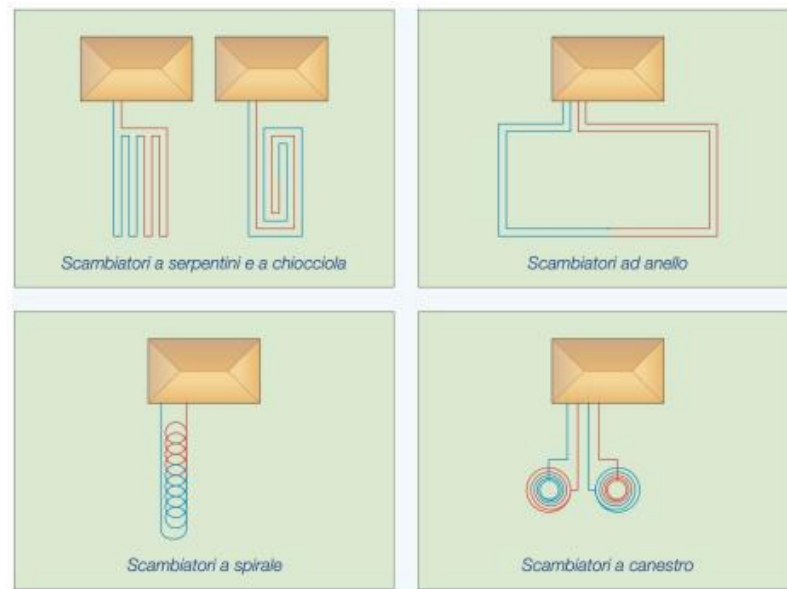


Figura 10: Differenti configurazioni sonde geotermiche orizzontali⁵.

- *Serpentina e chiocciola*: inducono un campo termico omogeneo nel suolo, riducendo i fenomeni di sotto-raffreddamento locale e salvaguardando la crescita della vegetazione.
- *Sonde ad anello*: posate anche in modo sovrapposto per limitare l'estensione dello scavo, ma soggette a interferenze termiche e cali di resa a causa della vicinanza tra i circuiti.
- *Sonde a spirale ed a canestro*: le prime sono formate da cerchi a diametro costante parzialmente sovrapposti, mentre le seconde presentano geometrie cilindriche o coniche molto compatte, ampiamente diffuse negli ultimi anni.

1.2.2.2.3 Geostrutture

Le geostrutture energetiche costituiscono una tecnologia che consente lo scambio termico con il sottosuolo per soddisfare il fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento degli edifici. Il principale vantaggio rispetto ai sistemi geotermici tradizionali risiede nella possibilità di integrare i circuiti di scambio in elementi strutturali già previsti per l'opera, posizionati a diretto contatto con il terreno o con l'acqua di falda.

Tuttavia, la fase di progettazione è particolarmente complessa: poiché la stabilità e il sostegno dell'edificio rimangono la funzione primaria dell'opera, nascono vincoli stringenti sul dimensionamento e sul posizionamento dei tubi, i quali possono essere installati sia all'interno sia all'esterno del manufatto. Questo tipo di sistemi operano a circuito chiuso: un fluido termovettore circola nell'elemento strutturale e trasferisce il calore a una pompa di calore, la quale alimenta poi il circuito secondario di climatizzazione interna. Le geostrutture rappresentano attualmente una tecnologia di nicchia; tra le configurazioni impiantistiche più diffuse si distinguono:

- **Pali energetici;** elementi in cemento armato aventi la funzione primaria di fondazione profonda e sostegno dell'edificio (*Fig. 11*). Possono essere prefabbricati o gettati in opera, con diametri compresi tra 0,4 e 1,5 m e lunghezze variabili tra i 30 e 40 m in base alla geologia del sito. Le tubazioni dello scambiatore vengono fissate longitudinalmente all'interno della gabbia di armatura prima del getto di calcestruzzo, operazione essenziale per garantire una conducibilità termica ottimale verso il terreno. La disposizione dei circuiti può seguire uno sviluppo a "U" oppure a spirale. Questa tipologia di sistema, applicabile esclusivamente nelle nuove costruzioni, non comporta incrementi significativi sui costi di realizzazione e costituisce una valida alternativa alle sonde geotermiche perforate.

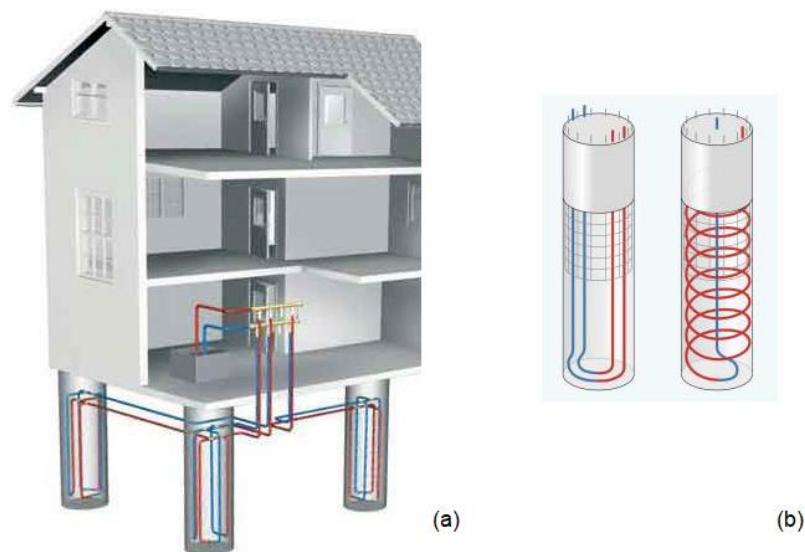


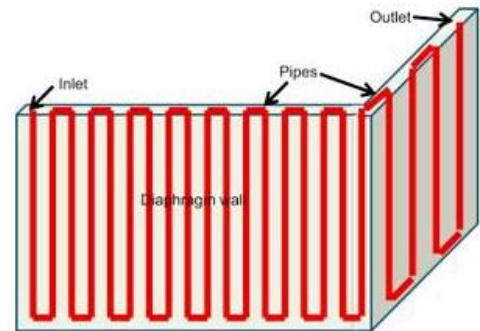
Figura 11: Schema rappresentativo dei pali energetici (a); tipologie di posa pali energetici (b)³⁰.

- **Diaframmi energetici** (muri energetici); strutture che integrano i tubi scambiatori all'interno delle gabbie di rinforzo del diaframma stesso (*Fig. 12*). Rispetto ai pali, lo sviluppo planare dei muri energetici permette di interfacciarsi con volumi di terreno decisamente più estesi, incrementando la superficie di scambio. Trovano largo impiego come opere di sostegno laterale del terreno, in particolare nelle applicazioni di tipo *cut-and-cover* dove gli scavi strutturali vengono spinti fino alla quota di progetto e successivamente rinterrati. Il principio di funzionamento termico è analogo a quello dei pali; tuttavia, per minimizzare la resistenza

termica del calcestruzzo, le tubazioni vengono collocate sul lato della gabbia direttamente a contatto con il suolo circostante.



(a)



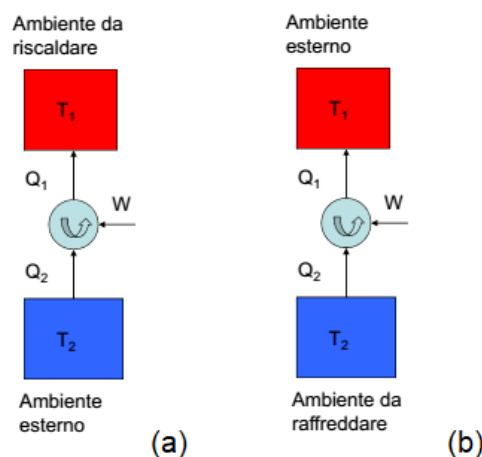
(b)

Figura 12: Schema rappresentativo di un diaframma energetico (a); esempio di installazione (b).

1.3 Pompe di calore

1.3.1 Principio di funzionamento

La pompa di calore è una tecnologia rinnovabile in quanto assolve alle funzioni di climatizzazione, riscaldamento e produzione di acqua calda sanitaria, sfruttando il calore gratuito e illimitato accumulato nell'aria, nell'acqua superficiale, nelle falde acquifere sotterranee e nel terreno [5]. Questo tipo di tecnologia basa il suo funzionamento su un ciclo termodinamico inverso di un fluido frigorigeno che, attraverso continue fasi di espansione e compressione, assorbe calore da un fluido freddo (come ad esempio, l'acqua presente nelle sonde) e lo cede ad un fluido caldo, come l'acqua dell'impianto (utenza). Inoltre, invertendo il ciclo di lavoro, il sistema diventa bidirezionale, offrendo la possibilità di raffrescare gli ambienti durante i mesi estivi (Fig.13).



(a)

(b)

Figura 13: Schematizzazione del ciclo termodinamico inverso; (a) riscaldamento, (b) raffrescamento ¹⁷.

Il ciclo inverso compiuto dal fluido nel diagramma $\log(p)$ - h è mostrato in Fig.14, mentre lo schema funzionale della macchina è riportato in Fig. 15

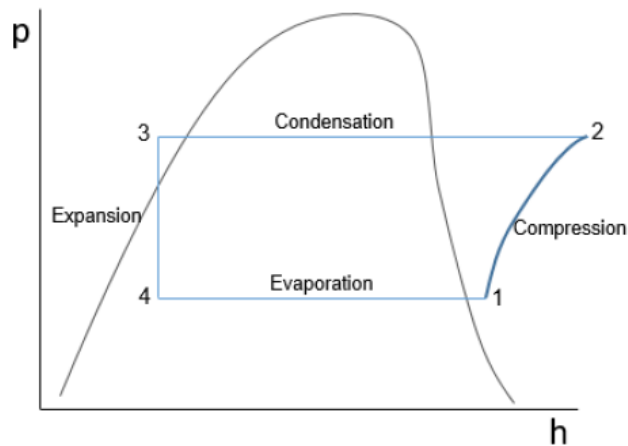


Figura 14: Ciclo termodinamico compiuto dal fluido frigorifero nel diagramma $\log p$ - h [18](#).

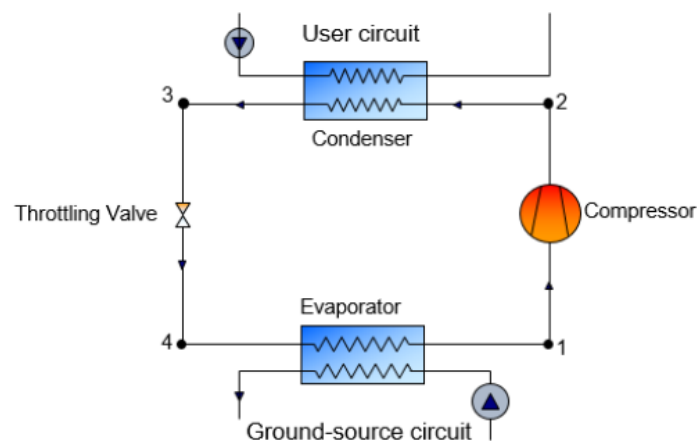


Figura 15: Schema funzionale di una pompa di calore [18](#).

La macchina è costituita dai seguenti componenti

- **Compressore;** realizza la trasformazione di compressione (1-2), portando il fluido frigorifero dal punto 1, dove si trova allo stato di vapore saturo (o leggermente surriscaldato come mostrato in Fig. 14), al punto 2 caratterizzato da pressioni e temperature maggiori. Mantenere il fluido in condizioni di surriscaldamento garantisce l'assenza di frazioni liquide all'interno del compressore, prevenendone la rottura meccanica. La trasformazione è assunta come adiabatica (reversibile/isoentropica nel caso ideale).
- **Condensatore;** scambiatore di calore in cui il fluido refrigerante, cede calore un circuito esterno (circuitto secondario), riscaldandolo. Durante tale processo, il fluido nello stato di vapore surriscaldato, si desurriscalda e condensa, uscendo dal componente (punto 3) allo stato di liquido saturo o leggermente sottoraffreddato (se si effettua il sottoraffreddamento,

come nel caso in Fig.14). La trasformazione avviene a pressione costante (e a temperatura costante all'interno della regione bifasica).

- **Valvola di laminazione:** componente che realizza l'espansione isoentalpica (3-4), riducendo la sua pressione e portandolo dallo stato di liquido sottoraffreddato a quello di miscela bifase (punto 4).
- **Evaporatore:** scambiatore di calore, in cui il fluido refrigerante, assorbe calore da un circuito esterno (circuito primario). Durante questa fase, il refrigerante evapora aumentando la sua entalpia a temperatura costante, fino a tornare allo stato di vapore saturo o surriscaldato (punto 1). La trasformazione avviene a pressione costante (e a temperatura costante all'interno della regione bifasica).

Come componente ausiliario, può essere presente anche una *valvola di inversione* a quattro vie; che permette di invertire la direzione del flusso di refrigerante. In questo modo il ciclo di lavoro si inverte, consentendo alla macchina di commutare la propria funzione e provvedere al raffreddamento degli ambienti durante il periodo estivo (Fig. 16).

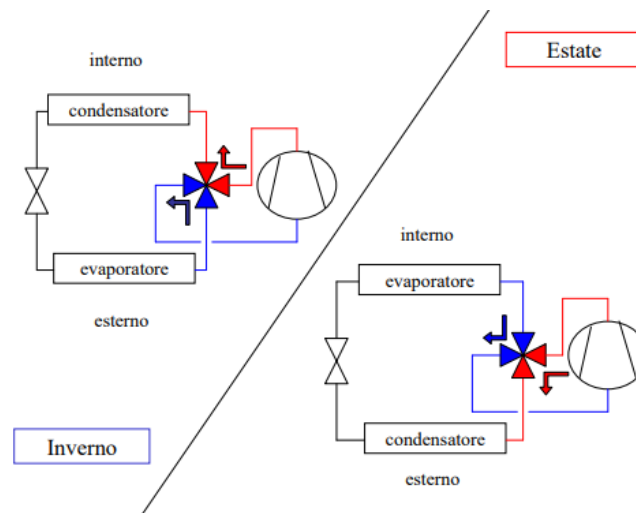


Figura 16: Schema valvola di inversione a 4 vie.

Va puntualizzato che le trasformazioni appena descritte fanno riferimento ad un ciclo termodinamico privo di irreversibilità. Nella realtà, infatti, si riscontrano perdite di carico negli scambiatori (condensatore ed evaporatore) e un funzionamento non ideale del compressore (il quale sarà caratterizzato da un suo rendimento isoentropico).

In riferimento a Fig.13, i parametri prestazionali della macchina sono:

- Il **COP (Coefficient of Performance)**, che descrive le prestazioni della macchina quando questa opera in modalità riscaldamento, definito come:

$$COP = \frac{q_{cond}}{l} = \frac{q_{cond}}{q_{cond} - q_{evap}} \quad (1.1)$$

dove:

- q_{cond} è il calore ceduto dal fluido refrigerante nel condensatore all'ambiente da riscaldare [kJ/kg] e rappresenta l'effetto utile della macchina quando questa opera come pompa di calore.
- q_{evap} è il calore assorbito dal fluido refrigerante nell'evaporatore [kJ/kg]
- l è il lavoro di compressione fornito al fluido nel ciclo [kJ/kg].

È possibile definire inoltre, il COP_{max} , relativo ad un ciclo di Carnot (ideale) operante tra 2 serbatoi termici, uno ad alta temperatura T_1 e uno a bassa temperatura T_2 :

$$COP_{max} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} \quad (1.2)$$

- L'EER, che descrive le prestazioni della macchina quando questa opera in modalità raffrescamento, definito come:

$$EER = \frac{q_{evap}}{l} = \frac{q_{evap}}{q_{cond} - q_{evap}} \quad (1.3)$$

- q_{cond} è il calore ceduto dal fluido refrigerante nel condensatore [kJ/kg].
- q_{evap} è il calore assorbito dal fluido refrigerante nell'evaporatore dall'ambiente da raffrescare [kJ/kg] e rappresenta l'effetto utile della macchina quando questa opera come macchina frigorifera.
- l è il lavoro di compressione fornito al fluido nel ciclo [kJ/kg].

Analogamente si definisce l'EER_{max} come:

$$EER_{max} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \quad (1.4)$$

Dalle equazioni (1.2) e (1.4) si deduce che il COP e l'EER aumentano all'aumentare della temperatura T_2 del serbatoio a bassa temperatura e al diminuire della temperatura T_1 del serbatoio ad alta temperatura. In altre parole, le efficienze aumentano al ridursi del ΔT tra i due serbatoi, come mostrato in *Figura 17*.

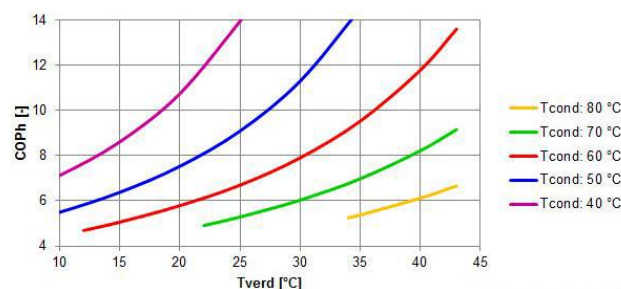


Figura 17: Andamento del COP in funzione delle temperature dei termostati [31](#).

1.3.2 Classificazione delle pompe di calore

La classificazione principale delle pompe di calore viene effettuata in base alla *tipologia di sorgente* termica (esterna ed interna) tra cui la macchina lavora. La scelta della sorgente dipende da fattori quali le caratteristiche dell'ambiente esterno, le limitazioni normative, le prestazioni richieste, i costi di realizzazione e i tempi di ritorno dell'investimento. Nello specifico, si distinguono le

- *sorgenti calde* (o interne), quali l'aria, quando la pompa di calore riscalda direttamente l'aria degli ambienti o l'acqua dei circuiti di riscaldamento e
- *sorgenti fredde* (o esterne) suddivise in aria esterna o di recupero, acqua superficiale o di falda, e terra tramite sonde geotermiche).

Da questa classificazione derivano le principali tipologie di unità, descritte di seguito mettendone in luce i relativi punti di forza e svantaggi.

1.3.2.1 Pompa di calore aria-aria

Questa unità adotta l'aria sia come sorgente esterna sia come sorgente interna, ed è dotata di scambiatori gas/fluido refrigerante (*Fig.18*).

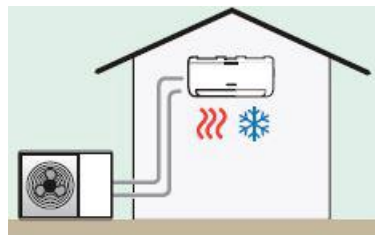


Figura 18: Pompa di calore aria-aria di tipo Split ²³.

Vantaggi:

- Sfrutta l'aria esterna che è sempre disponibile;
- presenta una grande semplicità di installazione delle macchine,
- non richiede sistemi di captazione costosi e non necessita di autorizzazioni specifiche.

Svantaggi:

- L'aria è una sorgente a temperatura variabile con la stagione e l'ora del giorno, il che rende l'efficienza dipendente dalle condizioni esterne. Al ridursi della temperatura esterna decrescono la temperatura di evaporazione e il COP.
- Quando la temperatura superficiale dell'evaporatore scende sotto lo zero, il vapore d'acqua diventa ghiaccio, richiedendo cicli di sbrinamento che comportano un maggior consumo di energia elettrica e una minore efficienza.

1.3.2.2 Pompa di calore aria-acqua

Questa unità permette di estrarre l'energia gratuita presente nell'aria esterna e di trasferirla all'acqua sotto forma di calore, producendo acqua tecnica al servizio di un impianto idronico (Fig.19).



Figura 19: Pompa di calore aria-acqua ²³.

Vantaggi:

- Garantisce un'ampia versatilità in termini di soluzioni impiantistiche (sia nel residenziale sia nell'industriale).
- L'elevata applicabilità permette di mantenere il sistema di distribuzione esistente negli impianti originariamente dotati di generatori a gas, senza dover riqualificare l'intero impianto.

Svantaggi:

- Presenta limitazioni legate alla variabilità della potenza, del rendimento e, soprattutto, alle temperature di mandata.
- Condivide inoltre gli svantaggi legati all'uso dell'aria esterna come sorgente fredda (variabilità del COP e necessità di cicli di sbrinamento).

1.3.2.3 Pompa di calore acqua-aria

Utilizza come sorgente fredda l'acqua presente nel sottosuolo (prelevata attraverso appositi pozzi) e come sorgente calda specifici circuiti idraulici (come ad esempio gli anelli di condensazione) (Fig.20)

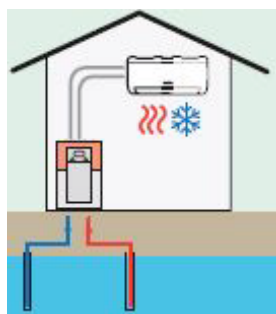


Figura 20: Pompa di calore acqua-aria ²³.

Vantaggi:

- Sfrutta i vantaggi generali dell'acqua, legati all'efficienza elevata grazie a una sorgente a temperatura costante e all'assenza di cicli di sbrinamento.

Svantaggi:

- È una tipologia poco utilizzata in quanto richiede la realizzazione di pozzi di prelievo della sorgente fredda, i quali sono soggetti ad analisi geologiche e permessi di captazione.

1.3.2.4 Pompa di calore acqua-acqua

In questa unità, entrambi gli scambi di calore (lato freddo e lato caldo) utilizzano come sorgente l'acqua. Il lato freddo sottrae energia alle acque superficiali (p.e. mare, laghi, corsi d'acqua e stagni) o a quelle di falda nel sottosuolo, mentre il lato caldo alimenta gli impianti ad acqua (Fig.21)

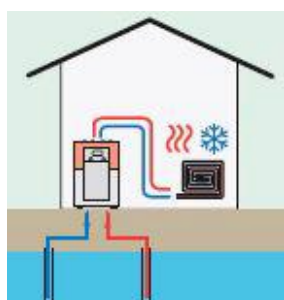


Figura 21: Pompa di calore acqua-acqua ²³.

Vantaggi:

- Sono caratterizzati da una maggiore stabilità di funzionamento
- Scambiatori più efficienti e ottimi rendimenti grazie alla temperatura costante della sorgente fredda.
- Non necessita di cicli di sbrinamento.

Svantaggi:

- Presenta una maggiore complessità dei sistemi e dell'impianto.
- Ha un'applicabilità limitata alla presenza o meno di acqua sfruttabile ai fini termici
- Vincoli normativi stringenti e complessi iter autorizzativi (specialmente per il prelievo e l'utilizzo di acqua di falda).

1.3.2.5 Pompa di calore terra-acqua (o geotermica)

Si tratta di pompe di calore acqua-acqua in cui l'acqua della sorgente fredda viene utilizzata come fluido intermedio per scambiare calore direttamente con il terreno tramite delle sonde geotermiche.

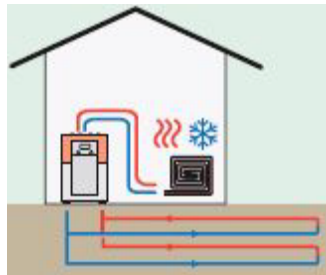


Figura 22: Pompa di calore terra-acqua [23](#).

Vantaggi:

- Offre vantaggi molto simili a quelli dell'utilizzo dell'acqua, garantendo una stabilità di funzionamento, un'elevata efficienza dovuta alla costanza della temperatura del terreno e l'assenza di cicli di sbrinamento.

Svantaggi:

- Comporta elevati costi di realizzazione del campo sonde (soprattutto se queste sono disposte a profondità elevate).

1.4. Potenzialità e tratti distintivi del sistema GeothermSkin® rispetto alle sonde tradizionali

Nel panorama delle tecnologie per lo sfruttamento della geotermia a bassa entalpia, i sistemi superficiali tradizionali e le geostrutture energetiche presentano ancora alcune criticità che ne limitano la diffusione, soprattutto nei contesti urbani densamente edificati. Infatti, le sonde geotermiche verticali richiedono perforazioni profonde e costi iniziali elevati (oltre a iter autorizzativi complessi) mentre i collettori orizzontali necessitano invece di ampie superfici libere, spesso non disponibili nei centri urbani. Anche le geostrutture energetiche, pur integrando la funzione di scambio termico negli elementi strutturali, risultano difficilmente applicabili agli edifici esistenti, poiché devono essere previste in fase di progettazione.

Per superare tali limitazioni è stato sviluppato il sistema innovativo GeothermSkin®, una soluzione assimilabile al muro energetico, costituita da un'infrastruttura aggiuntiva applicata alle superfici interrate degli edifici, alle quali conferisce una funzione di scambio termico (Figura). Il sistema trasforma le pareti a contatto con il terreno in geoscambiatori, sfruttando il sottosuolo come

sorgente o dissipatore di calore per la climatizzazione degli ambienti. Questo concetto estende di fatto i concetti delle geostrutture energetiche anche al patrimonio edilizio esistente (*Fig.23*).



Figura 23: Esempio applicativo del sistema GeothermSkin sulla parete interrata di un edificio residenziale ².

GeothermSkin® è composto da moduli di tubazioni polimeriche (PE-Xa o PE-HD) installate sulla superficie esterna delle strutture interrate e attraversate da un fluido termovettore acqua-glicole che scambia calore con il terreno. L'installazione dei moduli segue vincoli geometrici (30 cm dal fondo e 10 cm dai bordi) mutuati dalle geostrutture; tuttavia, mentre in pali e diaframmi queste distanze nascono all'interno del cemento come copriferro e protezione dal getto, in GeothermSkin vengono applicate all'esterno per proteggere i tubi nudi dall'azione meccanica del reinterro della terra.

La natura modulare del sistema (che comprende un modulo a sviluppo prevalentemente verticale e due moduli a sviluppo prevalentemente orizzontale) consente sia una facile adattabilità in fase progettuale sia un'elevata affidabilità in esercizio, poiché eventuali moduli danneggiati possono essere esclusi idraulicamente assicurandone la continuità di funzionamento (Baralis and Barla, 2021). Inoltre, i collettori di distribuzione sono posizionati all'interno dell'edificio, in modo da facilitare l'ispezione visiva e l'isolamento parziale della rete. Un ulteriore tratto distintivo risiede nel fatto che (per massimizzare lo scambio termico) ai tubi non viene applicata alcuna corazzatura o protezione esterna, richiedendo però una maggiore attenzione durante la posa; tuttavia, l'elasticità intrinseca delle tubazioni è tale da assecondare e assorbire completamente i movimenti e gli assestamenti del terreno che avvengono durante l'intera vita utile dell'impianto.

L'installazione avviene dopo la realizzazione delle strutture: nelle nuove costruzioni prima del rinterro, negli edifici esistenti tramite scavi localizzati per esporre le pareti interrate, con interventi meno invasivi rispetto alle perforazioni profonde dei sistemi verticali. Il passaggio del circuito verso l'interno dell'edificio richiede l'esecuzione di fori passanti nella parete interrata. Negli interventi di

ristrutturazione, qualora il carotaggio intercetti le barre d'armatura esistenti, le estremità recise dell'acciaio devono essere passivate con resine epossidiche per impedirne il degrado. La successiva sigillatura ermetica del foro viene realizzata combinando guaine bituminose, geo-tessuti (per bloccare il passaggio di particelle fini dal terreno) ed elementi in gomma al posto delle comuni schiume isolanti, conferendo all'apertura una pendenza ascendente verso l'interno per prevenire infiltrazioni d'acqua.

Da un punto di vista prestazionale, l'efficienza attesa di un sistema installato a queste profondità è relativamente bassa perché influenzata dalla temperatura superficiale e dagli scambi termici con l'ambiente interno. Questo limite si riscontra in particolare negli edifici con un numero di piani contenuto (circa 8-10 piani), le cui fondazioni si attestano a profondità superiori rispetto alla quota omeotermica [4], esponendo il sistema a volumi di terreno con temperature meno favorevoli rispetto a quelle delle sonde verticali. Tuttavia i costi di installazione di questi sistemi geotermici molto superficiali sono contenuti, soprattutto nel caso di nuove costruzioni, rendendo tale tecnologia interessante sotto l'aspetto costi-benefici. In particolare, il costo stimato varia tra 650 e 1050 €/kW, risultando leggermente inferiore ai sistemi geotermici verticali tradizionali (750 - 1500 €/kW) e leggermente superiore ai collettori orizzontali (600 - 900 €/kW), che però richiedono ampie superfici.

Di conseguenza, i principali vantaggi di GeothermSkin® risiedono nella ridotta occupazione di suolo, nella possibilità di applicazione sia a edifici nuovi sia esistenti e nella semplificazione delle operazioni di installazione e autorizzazione. Tale installazione, effettuata nell'Energy Center di Torino, è avvenuta nello specifico senza interferire con le normali attività dell'edificio. Queste caratteristiche ne favoriscono l'impiego nei contesti urbani e negli interventi di riqualificazione energetica, contribuendo alla diffusione dei sistemi geotermici a bassa entalpia e alla riduzione delle emissioni associate alla climatizzazione degli edifici.

1.5. Impatto delle dispersioni termiche nella rete di distribuzione

Le dispersioni termiche che avvengono lungo la rete di tubazioni di collegamento tra il geoscambiatore e la pompa di calore rappresentano una criticità progettuale fondamentale. Come evidenziato dall'ASHRAE, l'integrazione di elevati carichi ausiliari o la presenza di variazioni termiche non controllate nel fluido termovettore all'ingresso della macchina, rispetto alle condizioni nominali, possono arrivare ad azzerare i benefici di efficienza tipici dei sistemi geotermici rispetto agli impianti HVAC convenzionali. Diventa quindi essenziale valutare come il fluido, lungo il tragitto di distribuzione, subisca scambi termici parassiti con l'ambiente circostante che ne modificano la temperatura prima dell'ingresso in centrale termica, alterando le prestazioni della macchina.

Dal punto di vista progettuale, l'ASHRAE [16] definisce una procedura analitica per quantificare l'esatta variazione di temperatura subita dal fluido termovettore lungo i collettori di distribuzione e determinare così la temperatura reale di ingresso alla pompa di calore (*ELT, Entering Liquid Temperature*). Questa metodologia permette di superare l'approssimazione semplificata secondo

cui il fluido mantiene una temperatura costante nel tragitto, ipotesi che lo standard considera valida solo per grandi impianti adiacenti alla sorgente. Al contrario, in configurazioni caratterizzate da basse portate (< 3 l/s) e/o estensioni longitudinali significative dei collettori e la rete di distribuzione (>60 m), lo scambio termico parassita con l'ambiente circostante deve essere integrato nel calcolo attraverso il seguente bilancio termico:

$$ELT = LLT_{swhe} + t_{app} + \Delta t_{resv\ header} + \Delta t_{grn\ header} \quad (1.5)$$

dove

- ELT è la temperatura del fluido termovettore in ingresso alla pompa di calore dell'edificio [°C]
- LLT_{swhe} (*Leaving Liquid Temperature*) è la temperatura del fluido all'uscita dal geoscambiatore prima dell'immissione nella rete di distribuzione [°C]; rappresenta il potenziale termico di partenza estratto dalla sorgente
- t_{app} (*Approach Temperature*) è l'approccio termico dello scambiatore [°C], definito come lo scarto termico tra la temperatura teorica della sorgente e quella reale del fluido dovuto alle resistenze conduttive dei materiali (valore negativo, poiché riduce la temperatura utile del fluido all'uscita dal geoscambiatore).
- $\Delta t_{resv\ header}$ è la variazione termica parassita subita dal fluido nel tratto di collettore/tubazione che attraversa un bacino idrico o accumulo superficiale [°C] (tale valore è pari a 0, data l'assenza nel caso studio, di scambiatori sommersi o tratti di tubazione in acqua).
- $\Delta t_{grn\ header}$ è la variazione termica parassita subita dal fluido lungo la tubazione di distribuzione causata dal transito nel suolo superficiale [°C] (nel caso studio questo termine è equivalente alla variazione di temperatura subita dal fluido lungo il tratto di collettore/tubazione di collegamento esposto all'aria dell'ambiente interrato).

Oltre allo scambio diretto con l'ambiente esterno, le reti di distribuzione subiscono il fenomeno del cortocircuito termico stazionario (q_{ss}) tra le tubazioni di mandata (*supply*) e ritorno (*return*) posate a distanza ravvicinata (come nel caso del presente lavoro di tesi). Ipotizzando un regime stazionario, flussi turbolenti e superfici esterne dei condotti a temperatura prossima a quella del fluido, tale trasferimento di calore parassita viene modellato (nel caso invernale) tramite la seguente relazione

$$q_{ss} = k_g \cdot S_f \cdot (t_{return} - t_{supply}) \quad (1.6)$$

dove:

- k_g è la conducibilità termica del mezzo in cui sono posate le tubazioni affiancate, interessate dallo scambio termico parassita [W/(m·°C)]
- t_{supply} è la temperatura del fluido nella tubazione di mandata [°C]
- t_{return} è la temperatura del fluido nella tubazione di ritorno [°C]
- S_f è il fattore di forma geometrico [m], definito come:

$$S_f = \frac{2\pi L}{\cosh^{-1}\left(\frac{D^2 - r_1^2 - r_2^2}{2r_1 r_2}\right)} \quad (1.6.1)$$

con:

- L , lunghezza longitudinale del tratto di tubazioni parallele e affiancate interessato dallo scambio termico [m]
- D , distanza di interasse tra la tubazione di mandata e quella di ritorno [m]
- r_1, r_2 , raggi esterni delle due tubazioni [m]

Al fine di ottenere i valori di temperatura necessari a determinare ELT e q_{ss} , è fondamentale disporre di un'infrastruttura di monitoraggio dedicata, in grado di rilevare i valori a monte e a valle di ogni Δt . A tale infrastruttura, è necessario affiancare un modello physic based (sviluppato nel presente lavoro di tesi) volto a stimare il valore di temperatura di ritorno alla macchina al variare delle condizioni al contorno. In un'ottica di gestione e manutenzione intelligente dell'impianto, tale modello consente di effettuare un confronto tra le prestazioni misurate con quelle teoriche, offrendo uno strumento diagnostico utile per l'individuazione di anomalie o dispersioni anomale lungo la rete di distribuzione.

Capitolo 2

Descrizione del caso studio e contesto

2.1 Collocazione dell'impianto sperimentale: Energy Center

L'impianto sperimentale oggetto di studio è collocato nel seminterrato dell'Energy Center, situato a Torino in via P. Borsellino. Il centro, nato dall'iniziativa ECI (Energy Center Initiative) del Politecnico di Torino, ha l'obiettivo di supportare le autorità locali, nazionali e internazionali nelle scelte relative a politiche e tecnologie energetiche, promuovendo al contempo la creazione di network e lo sviluppo di iniziative imprenditoriali nel settore energetico.

L'ECI si articola in due pilastri:

- *l'Energy Center House (EC-H)*, edificio situato nel campus del Politecnico, che ospita aziende, start-up e pubbliche amministrazioni attive in ambito energetico, nato con il supporto di enti pubblici e fondazioni;
- *l'Energy Center Lab (EC-L)*, centro interdipartimentale che riunisce ricercatori e docenti impegnati nello sviluppo di tecnologie e sistemi per la transizione energetica. Il laboratorio utilizza strumenti avanzati e dati in tempo reale per simulare scenari energetici a diverse scale, analizzando l'impatto di tecnologie, politiche e comportamenti sociali.

La struttura, di 5000 m² (Fig.24), è progettata secondo elevati standard di efficienza energetica e comfort termico e integra soluzioni tecnologiche avanzate. Il fabbisogno per il riscaldamento è estremamente ridotto, pari a 0,89 kWh/(m²a) [\[28\]](#). È dotata di un sistema HVAC aria-acqua con controsoffitto radiante e aria primaria, integrato da teleriscaldamento, solare termico e gruppi polivalenti, oltre a sistemi frigoriferi ad assorbimento. Parte dell'energia viene autoprodotta tramite risorse in sito, tra cui l'utilizzo di acqua sotterranea a bassa entalpia per riscaldamento e raffrescamento e un impianto fotovoltaico da 46 kW su 320 m². Completano il sistema illuminazione LED e tecnologie avanzate di gestione energetica.



Figura 24: Energy Center, Torino e posizione del prototipo.

Nel seguito della trattazione si farà riferimento a specifiche porzioni del piano seminterrato e della terrazza dell'edificio, individuate in funzione della loro rilevanza ai fini dell'analisi impiantistica.

Per quanto riguarda il *piano seminterrato* (Fig. 25), si distinguono le seguenti aree di interesse:

- *Isola 1*: locale in cui sono installati la pompa di calore, il ventilconvettore (utenza termica) e i sistemi di accumulo. Tali componenti costituiscono gli elementi principali dell'impianto sperimentale, in quanto ne regolano il funzionamento e l'integrazione con il sistema solare termico. L'area coincide con il locale dell'unità di trattamento aria, situato a destra della centrale termica;
- *Isola 2*: porzione dell'intercapedine che separa il seminterrato dal terreno circostante. Sulla superficie esterna della parete è installato il sistema GeothermSkin, mentre su quella interna sono collocati i collettori generali ai quali si collegano i circuiti dei moduli;
- *Centrale termica*: ambiente destinato ad accogliere gli impianti termici che consentono l'integrazione tra il sistema solare termico e la pompa di calore.

Per quanto concerne la *terrazza*, l'analisi è limitata alle aree corrispondenti ai *vani scala A e B*, in quanto sedi di installazione dei moduli solari termici a tubi sottovuoto (Fig. 26)

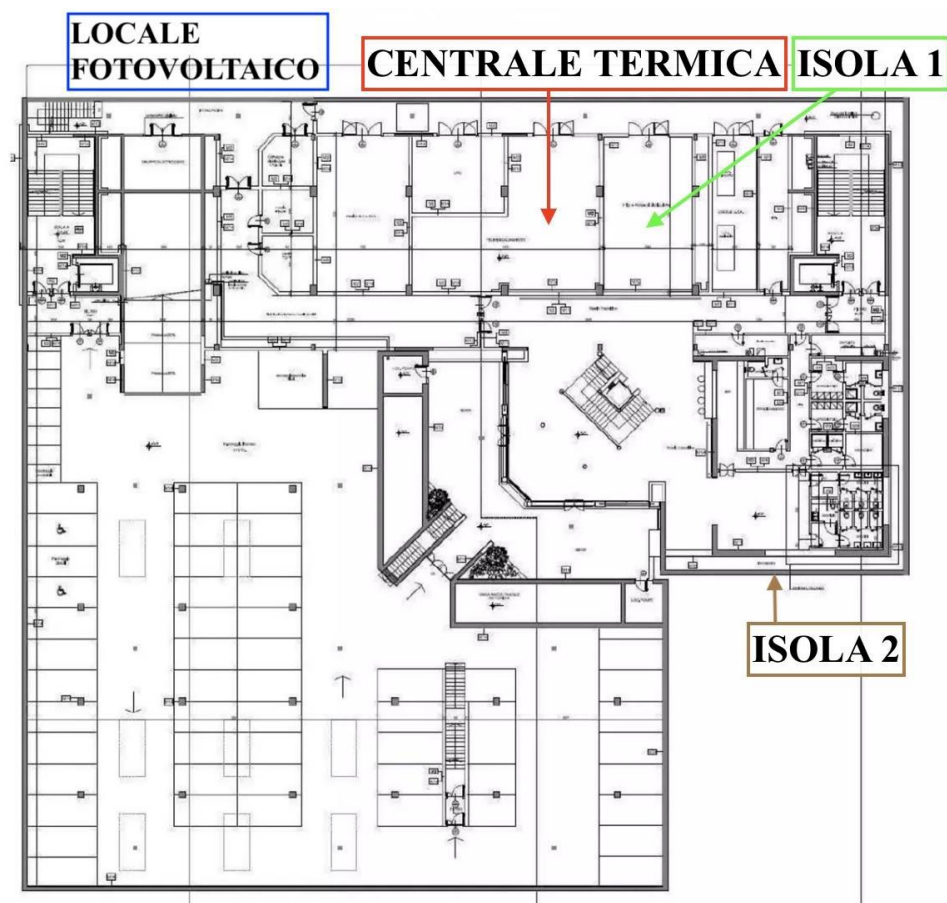


Figura 25: Pianta del seminterrato.

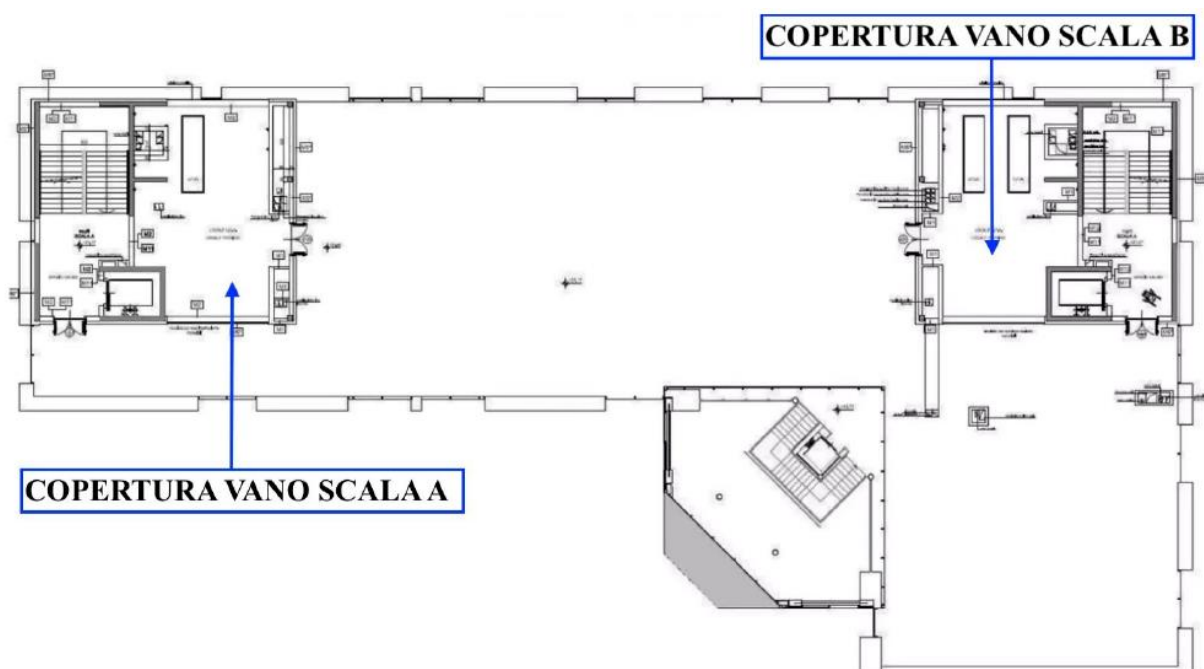


Figura 26: Pianta terrazza.

2.2 Caratteristiche climatiche e geologiche del sito

Le informazioni generali e i dati climatici relativi al sito, sono riportati in *Tabella 2*:

Località	Torino
Provincia	TO
Indirizzo	Via Paolo Borsellino, 38 int. 16, 10138
Altitudine s.l.m	239 m
Latitudine nord	45° 07'
Latitudine est	7° 65'
Gradi giorno	2617
Temperatura esterna minima di progetto	-8 °C
Zona climatica	E
Destinazione d'uso prevalente (DPR 412/93)	E.2 Edifici adibiti a uffici e assimilabili
Superficie riscaldata	5000 m ²

Tabella 2: Informazioni generali e dati climatici del sito.

Dal punto di vista geologico, il territorio di Torino si estende prevalentemente su un'area semi-pianeggiante originata dalle conoidi alluvionali della Dora Riparia e della Stura di Lanzo, digradando dolcemente da ovest verso est (da circa 260-270 a 220 m s.l.m.) fino a incontrare i rilievi collinari oltre il fiume Po.

Nei primi 50 m di profondità, il sottosuolo è composto da depositi di sabbia e ghiaia a cementazione e densità variabili, che ospitano un importante acquifero libero. Questa falda freatica presenta un forte deflusso sotterraneo in direzione est-sud-est, sostenuto da uno strato basale limoso-argilloso a bassa conducibilità.

In corrispondenza del sito sperimentale, la falda si attesta a circa 23 m di profondità, posizionandosi molto al di sotto della quota di installazione del prototipo. Per questo motivo, l'attivazione del sistema geotermico non eserciterà alcuna influenza significativa sul livello o sulla temperatura delle acque sotterranee.

2.3 Descrizione e finalità dell'impianto

L'impianto sperimentale è stato progettato per studiare il comportamento di GeothermSkin in condizioni operative reali, valutando sia la quantità di calore scambiato con il terreno sia le interazioni termiche con il suolo e con il muro di sostegno su cui è installato, soggetto anche a deformazioni e fenomeni termo-indotti. Il sistema consente inoltre di analizzare le prestazioni energetiche complessive, in particolare il coefficiente di prestazione della pompa di calore e le potenze scambiate durante le fasi di riscaldamento e raffrescamento.

L'impianto utilizza una pompa di calore acqua-terreno alimentata elettricamente, che trasferisce calore tra terreno e ambiente interno tramite un ciclo termodinamico inverso e un fluido termovettore a base di acqua e glicole. Lo scambio con il terreno avviene attraverso GeothermSkin

installato sul muro interrato, mentre quello con l'ambiente interno è affidato a un ventilconvettore. In questo modo il sistema può fornire riscaldamento in inverno e raffrescamento in estate, sia in modalità attiva che passiva, oltre a smaltire il calore proveniente dall'impianto solare termico e regolare l'umidità del terreno tramite un circuito di irrigazione.

L'impianto può essere suddiviso in diversi sottosistemi principali: la pompa di calore, i circuiti primario e secondario, il circuito di irrigazione e l'impianto solare termico. Ciascuno di questi elementi viene analizzato in modo più approfondito nei paragrafi successivi.

2.3.1 Geotherm Skin

Il sistema GeothermSkin è composto da moduli di tubazioni polimeriche (PE-Xa o PE-HD) installate sulla superficie esterna delle strutture interrate e attraversate da un fluido termovettore acqua-glicole che scambia calore con il terreno.

I moduli possono essere collegati ad un collettore principale sia in serie sia in parallelo e presentano due possibili configurazioni: con serpentine a sviluppo prevalentemente orizzontale (GeothermSkin-H) oppure verticale (GeothermSkin-V). Le estremità delle sonde convergono sui collettori generali che, mediante un circuito di distribuzione, alimentano la pompa di calore.

Le caratteristiche geometriche dei moduli e la superficie di scambio complessiva sono riportati in *Tabella 3* e *Figura 27*.

Modulo	Sviluppo serpentine	Lunghezza [m]	Estremità di ingresso	Estremità di uscita	Area di scambio [m ²]
1	Orizzontale	26.6	H2	H1	6,3
2	Orizzontale	27	H3	H2	
3	Verticale	29.3	H4	H3	

Tabella 3: Dettagli geometrici moduli GeothermSkin.

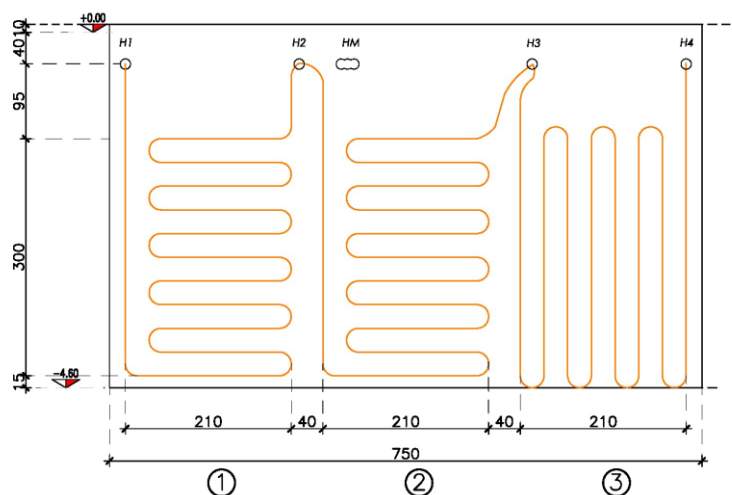


Figura 27: Dimensioni moduli GeothermSkin².

2.3.1.1 Lavori di installazione sonde geotermiche

L'installazione di GeothermSkin è stata progettata per ridurre al minimo l'area interessata dai lavori, evitando interferenze con le normali attività dell'edificio, già pienamente operativo e utilizzato per uffici ed eventi. Le operazioni di scavo sono state pianificate con grande attenzione, al fine di garantire sicurezza e tempi di realizzazione contenuti. Per tali motivi, la realizzazione può essere considerata un esempio di applicazione del sistema a un edificio esistente, senza compromettere la continuità e la funzionalità delle attività interne.

La realizzazione dell'impianto sperimentale è iniziata il 26 giugno 2019, con il coinvolgimento delle aziende Geonovis, Winet ed Eurix. L'installazione è stata eseguita sulla facciata nord-est dell'edificio (Figura), la cui parete esterna si affaccia su un'area verde con manto erboso. Sul lato interno, il muro delimita un corridoio tecnico a cielo aperto (cavedio), coperto da una griglia in acciaio calpestabile a livello stradale; ciò comporta che la superficie interna della parete sia esposta alle escursioni termiche dell'aria esterna. Inoltre, la significativa distanza dal parcheggio interrato dell'edificio garantisce un'influenza trascurabile sullo stato termico dell'area interessata.

Individuata la zona di intervento, è stato eseguito uno scavo in corrispondenza dell'isola 2, in adiacenza al muro perimetrale, inizialmente fino a una profondità compresa tra 0,8 e 1,2 m e successivamente fino a circa 4,7 m, poco al di sopra della fondazione del muro.

Considerata la geometria dello scavo e la profondità raggiunta, si è reso necessario mettere in sicurezza il pozzo mediante la realizzazione di un sistema di sostegno costituito da pannelli di contenimento, disposti lungo il perimetro interno, e da puntoni metallici di contrasto. Questi ultimi, in grado di resistere sia a sforzi di compressione che di trazione, risultano particolarmente adatti in ambienti umidi (Fig. 27).



Figura 28: Lavori di scavo e blindatura per il prototipo GeoThermSkin; (a) fase iniziale e (b) fondo scavo livellato per la posa dei tubi⁴.

Naturalmente tali operazioni non sarebbero necessarie in edifici di nuova costruzione, nei quali lo scavo fino al livello di fondazione è generalmente già previsto prima del getto del muro.

Una volta completate le operazioni di scavo e messa in sicurezza, le tubazioni sono state ancorate alla superficie esterna del muro mediante morsetti metallici, disposti a un'interasse di circa 75 cm. Sono stati così realizzati tre moduli: due con configurazione GeothermSkin-H e uno con configurazione GeothermSkin-V, al fine di disporre di entrambe le soluzioni e consentire prove comparative nelle medesime condizioni operative.

Le estremità di ciascun circuito costituiscono i punti più superficiali dei moduli; per limitare l'influenza delle variazioni termiche dell'aria a livello del suolo, la serpentina dello scambiatore è stata sviluppata lungo la parete a partire da circa 1,5 m sotto il piano campagna fino alla profondità massima del piano interrato.

Le estremità dei circuiti sono state quindi collegate al collettore, situato sul lato interno del muro, tramite appositi fori di circa 13 cm di diametro, realizzati mediante carotaggio della parete perimetrale in calcestruzzo armato, spessa 80 cm. Successivamente, tali fori sono stati opportunamente sigillati per prevenire possibili infiltrazioni d'acqua.

2.3.1.2 Sistema di monitoraggio terreno e superficie muraria esterna

Completata l'installazione dei circuiti idraulici, si è proceduto alla configurazione del sistema di misura e alle operazioni di rinterro dello scavo. Il riempimento è stato eseguito in modo progressivo, alternando fasi di stesura del materiale di risulta con fasi di livellamento del terreno e inserimento della strumentazione.

In condizioni naturali, la superficie esterna del muro presenta una temperatura simile a quella del terreno circostante, con leggere differenze rispetto al terreno in campo libero dovute al fatto che la superficie interna del muro è invece a contatto con l'aria.

L'inserimento del geoscambiatore provoca una variazione termica nel terreno immediatamente esterno al muro: durante l'inverno il fluido termovettore sottrae calore, mentre in estate lo cede. Queste variazioni di temperatura generano deformazioni e tensioni nel muro e nel terreno, proporzionali all'entità della variazione termica stessa.

Per monitorare questi effetti termo-meccanici è stato progettato un sistema di sensori in grado di rilevare tensioni e deformazioni. In particolare, le deformazioni sono state misurate mediante cinque estensimetri, mentre per caratterizzare il campo di tensioni sulla superficie del muro, sono state impiegate quattro celle di pressione. Entrambe le tipologie sono state fissate rigidamente al muro in posizioni differenti e con diversi orientamenti assiali: verticale (V), normale (N), orizzontale (H) e orizzontale inclinata di 15° (H*) (*Figura 29*).

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

Tabella 4: Posizione estensimetri e celle di pressione sulla superficie del muro².

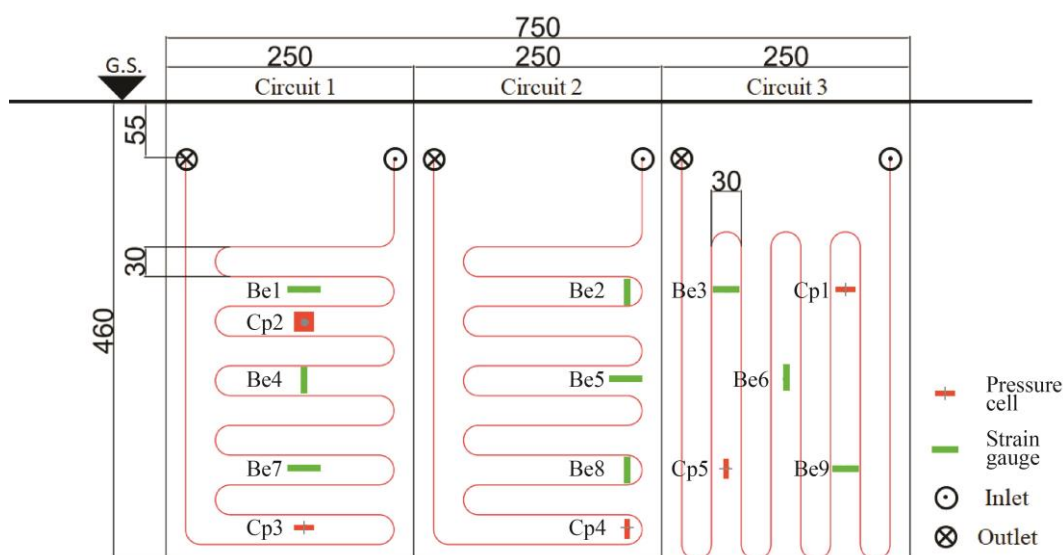


Figura 29: Posizionamento della sensoristica sulla superficie del prototipo².

Il monitoraggio del campo termico nel terreno è affidato a termoresistenze PT-100 (identificate con la sigla C), distribuite su quattro livelli corrispondenti alle profondità di 0,75 m, 2,15 m, 3,35 m e 4,60 m (Fig. 30). Ad ogni livello i sensori sono stati posizionati in piccole sedi ricavate nel terreno, ponendovi uno strato sottile di sabbia sopra le capsule allo scopo di attenuare gli effetti dovuti agli urti con eventuali detriti. Il numero di termoresistenze impiegate diminuisce con l'aumentare della profondità, in quanto gli strati più profondi sono caratterizzati da condizioni termiche più uniformi e da gradienti termici ridotti; viceversa, nelle zone superficiali, maggiormente influenzate dalle variazioni climatiche, è necessario un numero più elevato di punti di misura.

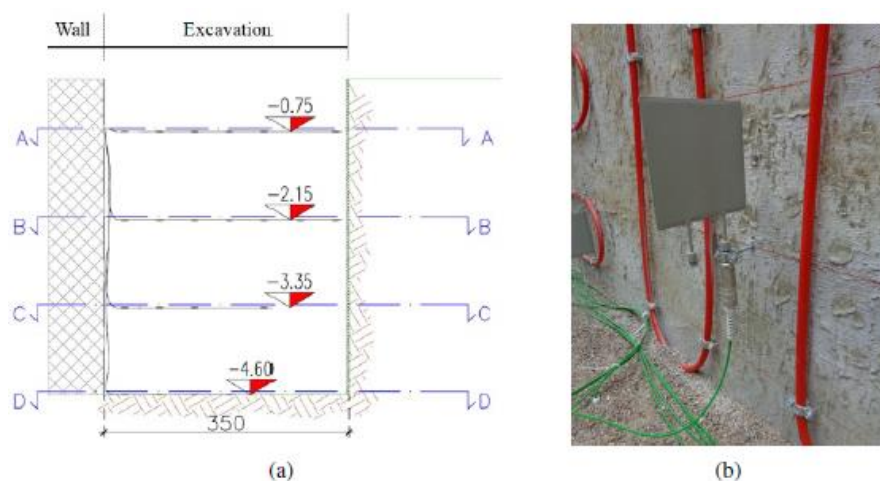
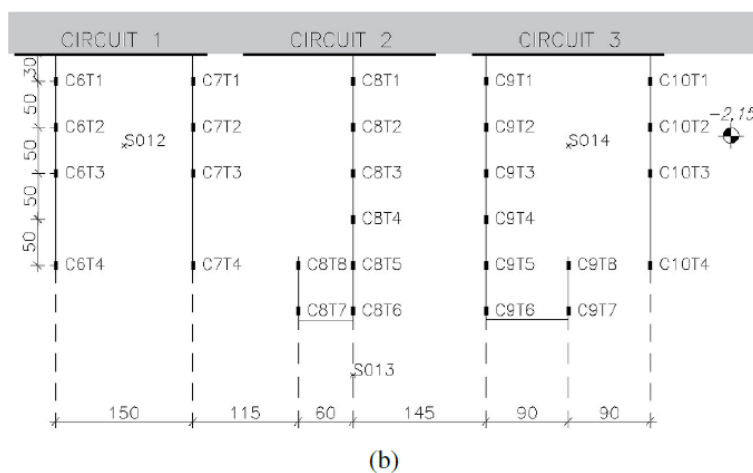
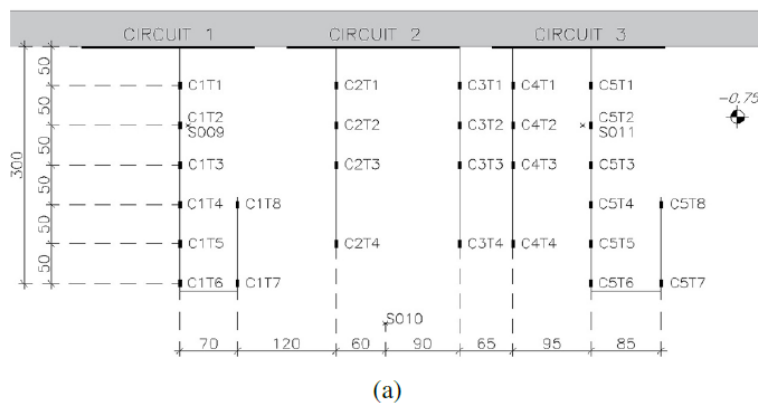
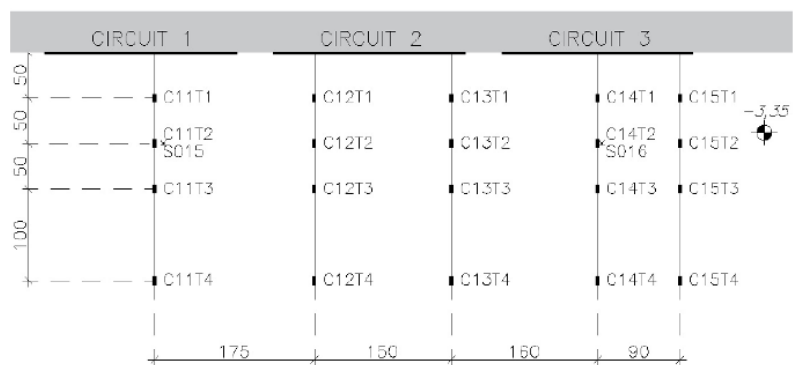


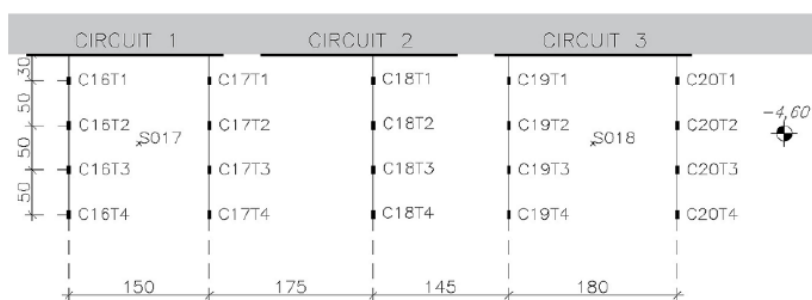
Figura 30: Schema dei piani di misura in sezione (a); cella di pressione (b)².

Infine sono stati predisposti degli igrometri per la valutazione dell'umidità (identificati con la sigla S) fino alla profondità massima di 4,60 m e dei tensiometri (a profondità molto ridotta) per caratterizzare il comportamento del terreno parzialmente saturo attraverso la misura del potenziale di suzione. La combinazione di queste misure consente inoltre di ricostruire sperimentalmente la curva caratteristica di umidità del geomateriale. La posizione degli igrometri e delle termoresistenze sui diversi piani e riportata in Fig. 31. e realizza una rete di misura tridimensionale che monitora adeguatamente l'umidità relativa ed il campo di temperatura del terreno.





(c)



(d)

Figura 31: Posizionamento dei sensori di temperatura; (a) Piano A, (b) Piano B, (c) Piano C e (d) Piano D².

2.3.2 Circuito primario

Il circuito primario comprende la porzione di impianto che collega la pompa di calore al sistema GeothermSkin, includendo sia quest'ultimo sia il circuito idraulico con i collettori di mandata e di ritorno.

Il *circuito idraulico* è quella sezione compresa tra i collegamenti con le valvole 3 vie deviatrici e la valvola generale dei collettori. È realizzato con tubi di diametro nominale pari a 28 mm in acciaio zincato, giuntati a pressare e staffati alla parte interna del muro che delimita l'intercapedine. I tubi si estendono per 65,4 m lungo il perimetro dell'edificio (Fig. 32) poiché le sonde, situate nell'Isola 2, sono distanti rispetto all'Isola 1, dove è collocata la pompa di calore.

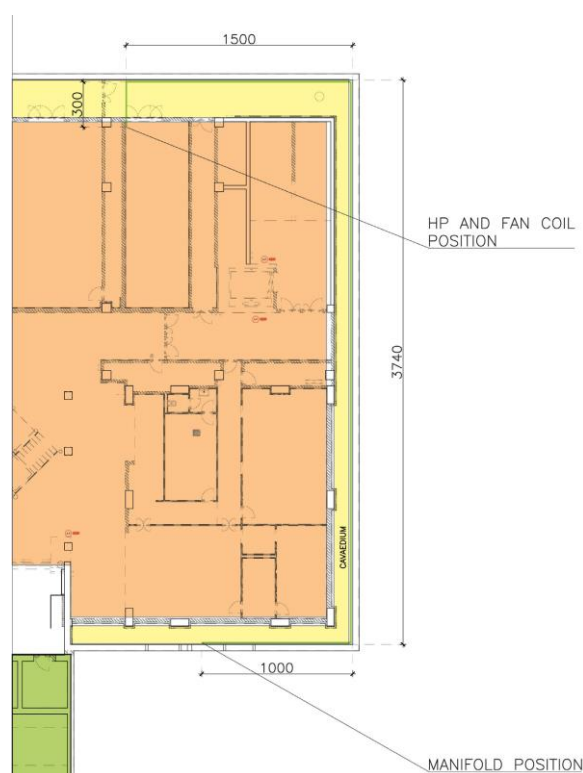


Figura 32: Rappresentazione in pianta del percorso della linea di distribuzione ².

Lungo il condotto di mandata sono installate (Fig. 41):

- una valvola di sicurezza a molla, con scarico convogliato e tarata a 3 bar;
- una valvola a sfera, compresa tra le due valvole a sfera poste sulle derivazioni filettate, che consentono il reintegro manuale dell'acqua e glicole nell'impianto
- una valvola generale per chiudere la mandata.

Sul condotto di ritorno sono invece presenti:

- un vaso d'espansione chiuso,
- un filtro ad Y con cestello metallico, intercettato da due valvole a sfera per consentire l'estrazione e pulizia/sostituzione del cestello metallico,
- e ulteriori valvole per chiudere il ritorno e le derivazioni di collegamento con il circuito solare.

È inoltre presente una valvola a 3 vie miscelatrice, impiegata per garantire che la temperatura dell'acqua calda, in arrivo dall'impianto solare termico ed immessa sul ritorno (dal terreno) del circuito primario per alimentare la pompa di calore, non superi i 30°C.

Al circuito idraulico sono collegati i due *collettori*, uno per la mandata e uno per il ritorno, situati nell'Isola 2 (Fig. 33). Questi permettono di testare diverse configurazioni degli scambiatori di calore grazie a una serie di valvole che consentono di escludere singolarmente dalla circolazione uno o più moduli, nonché di collegarli in serie o in parallelo. Ai collettori sono quindi collegati tre circuiti di mandata e tre di ritorno dei moduli GeothermSkin. I collettori sono realizzati in polietilene ad alta densità, con diametro esterno pari a 32 mm, giuntati mediante collari elettrosaldabili e poggiati su sostegni tassellati al muro.

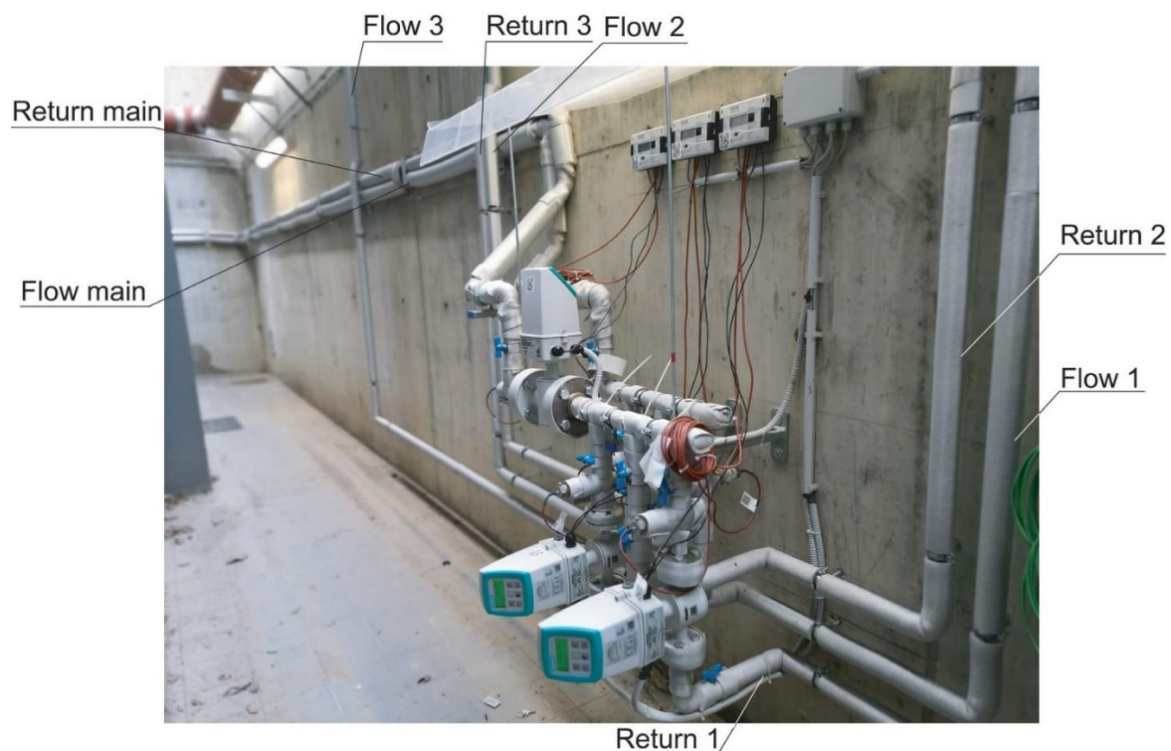


Figura 33: Collettori di mandata e ritorno e indicazione dei vari tratti di tubazione del sistema di distribuzione ².

L'intero circuito è rivestito con uno strato di isolante elastomerico a celle chiuse dello spessore di 20 mm. In *Tabella 5*, vengono riassunte le caratteristiche principali del circuito primario.

Circuito	Idraulico	Collettori
Materiale	Acciaio zincato	Polietilene
Modello	Viega Prestabo DN28	PE100 PN16
Diametro nominale	28 mm	32 mm
Pressione nominale	-	16 bar a 20 °C
Isolante	Elastomerico a celle chiuse	
Giunti	A pressare	Collari elettrosaldabili

Tabella 5: Tabella riassuntiva informazioni relative al circuito primario.

Infine, lo scambio termico necessario a garantire l'alimentazione termica del circuito frigorifero interno alla pompa di calore, avviene grazie ad una portata nominale di fluido termovettore (miscela di acqua e glicole propilenico al 25% in volume) mediamente pari a $0.65 \text{ m}^3/\text{h}$, sostenuta dal circolatore GP2 installato sul ritorno a bordo macchina (*Fig. 35*).

2.3.2.1 Sistema di monitoraggio sonde geotermiche

Sui collettori si attestano tre circuiti di mandata e tre di ritorno in polietilene del circuito sonde, ognuno dei quali munito di contabilizzatore termico, misuratore di portata e valvola a sfera. Quindi su questa sezione d'impianto sono installati i quattro contabilizzatori termici ed i tre misuratori di portata. In particolare, i due contabilizzatori termici ad ultrasuoni (SITRANS FUE950 Energy Calculator) sono installati su due partenze differenti e misurano l'energia termica trasferita verso le due sonde a terreno, mentre il terzo contabilizzatore è installato sul collettore generale di mandata al fine di misurare l'energia termica totale trasferita verso le sonde a terreno, mentre l'energia termica verso il secondo modulo sonda è misurata con un differente contabilizzatore termico compatto installato successivamente. I misuratori installati sono mostrati in *Fig. 34*.

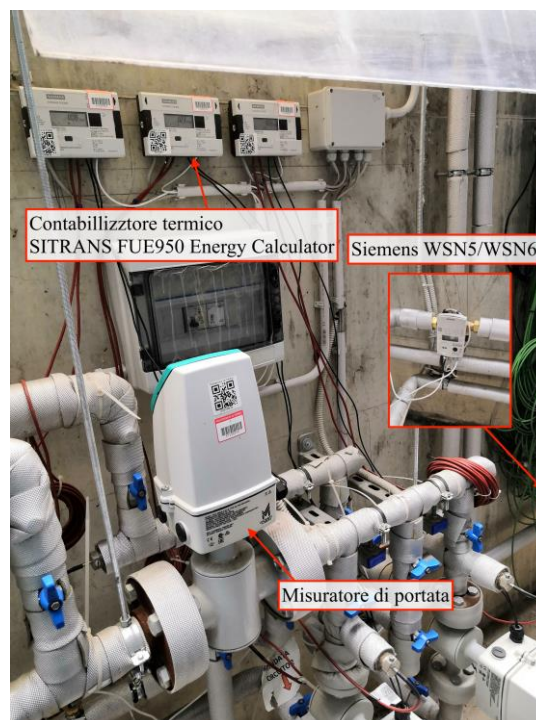


Figura 34: Dettaglio misuratore di portata e contabilizzatori termici.

2.3.3 Pompa di calore

La pompa di calore elettrica modello Nibe F1155-6, con potenza termica nominale di 3,15 kW, è installata nel seminterrato (isola 1). L'unità è alimentata in monofase a 230 V e 50 Hz tramite un quadro di bassa tensione posizionato sulla parete retrostante; tale quadro è a sua volta derivato dal quadro elettrico generale della centrale di distribuzione (QCD). L'assorbimento elettrico della macchina è pari a 0,67 kW. Il quadro locale è dotato di interruttore automatico con protezione magnetotermica e differenziale bipolare (L+N).

La pompa di calore utilizza come fluido frigorigeno di ciclo 1.16 Kg di R407C (miscela zeotropica composta da 23% R32 difluorometano, 25% R125 pentafluoroetano, 52% R134A tetrafluoroetano) sottoposto internamente ad un ciclo termodinamico inverso. A bordo macchina una portata di 0.08 l/s di R407C scorre nel circuito chiuso dove viene compressa nel compressore ermetico di tipo *rotativo* [19], a velocità variabile mediante tecnologia inverter e scambia calore con l'esterno fluendo al primario degli scambiatori a piastre che rappresentano il condensatore e l'evaporatore.

Nel lato secondario degli scambiatori scorre una miscela di acqua e glicole al 25% in volume, che consente il trasferimento termico attraverso i circuiti idraulici primario e secondario verso il campo sonde e il ventilconvettore, i quali cedono o assorbono calore rispettivamente dal terreno e dall'aria. La laminazione del refrigerante è affidata ad una valvola elettronica.

L'unità integra due circolatori, denominati GP1 e GP2, destinati alla movimentazione della miscela acqua-glicole rispettivamente nei circuiti secondario e primario. È inoltre presente un pressostato di sicurezza che interrompe il funzionamento della macchina qualora la pressione del refrigerante superi i 32 bar o scenda al di sotto di 1,5 bar.

Il collegamento al circuito primario è realizzato mediante tubazioni di mandata e ritorno con diametro nominale di 28 mm, mentre il circuito secondario utilizza tubazioni da 22 mm; entrambe sono in acciaio zincato e dotate di isolamento termico.

La commutazione stagionale, nonché l'attivazione delle modalità di riscaldamento o raffrescamento passivo, avviene sul circuito idraulico tramite quattro valvole deviatrici a tre vie, controllate dalla scheda accessoria NIBE AXC50. Le configurazioni delle valvole variano in funzione della modalità operativa selezionata.

Dal punto di vista operativo, la pompa di calore può funzionare con una temperatura massima di ritorno sul circuito secondario pari a 58 °C e raggiungere una temperatura di mandata fino a 65 °C utilizzando il solo compressore, estendibile a 70 °C con l'attivazione della resistenza elettrica supplementare (mai attivata durante la campagna sperimentale).

2.3.3.1 Sistema di monitoraggio pompa di calore

La macchina è dotata di un'infrastruttura di monitoraggio costituita da sensori impiegati per la misura dei principali parametri di funzionamento. La modifica di questi parametri e delle funzioni dalla macchina viene condotta dal pannello di controllo frontale a cui si accede aprendo lo sportello esterno della pompa di calore (Fig. 35 e Fig. 36).

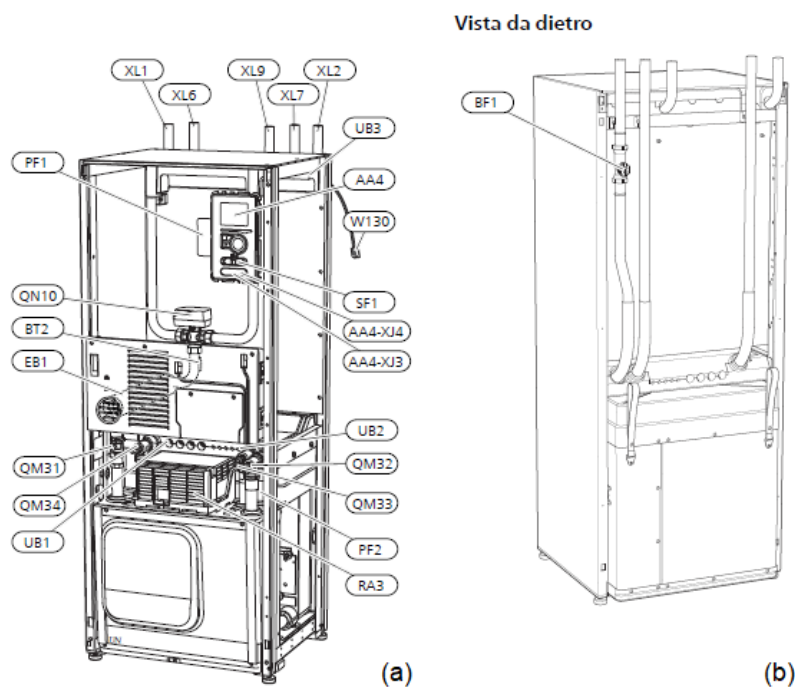


Figura 35: Viste NIBE F1155; (a) frontale senza pannello anteriore, (b) retro della macchina ¹³.



Figura 36: PdC e accumulo da 200 l (a); componentistica interna (b) ¹³.

I sensori sono posti sul circuito chiuso dell'R407C in modo da misurarne le temperature del frigorifero in corrispondenza dei capisaldi del ciclo termodinamico, le temperature dei termovettori dei circuiti idraulici primario e secondario ed ulteriori parametri riportati in (Tab. 6).

Codice identificativo	Grandezze misurate
BT1	Temperatura ambientale esterna
BT2	Temperatura mandata secondario (utenza termica) dopo eventuale resistenza
BT3	Temperatura ritorno secondario (utenza termica)
BT10	Temperatura ritorno primario (sonde)
BT11	Temperatura mandata primario (sonde)
BT12	Temperatura mandata secondario (utenza termica)
BT14	Temperatura frigorifero uscita compressore
BT17	Temperatura frigorifero ingresso compressore
BT25	Temperatura mandata secondario esterno per controllo retroazione
Degree Minutes	Gradi minuto
compr.freq. act	Frequenza alimentazione del compressore
GP1-speed	Regime di rotazione circolatore acqua-glicole secondario
GP2-speed	Regime di rotazione circolatore acqua-glicole primario

Tabella 6: Codice identificativo sensoristica PdC [13](#).

Le grandezze vengono rilevate con frequenza di campionamento pari ad una misura al minuto e memorizzate su supporto memoria fisico o in cloud. Dal momento che il passaggio dalla funzione di riscaldamento a quella di raffreddamento richiede un'inversione dei fluidi che attraversano gli scambiatori, ma la posizione dei sensori rimane invariata, durante la stagione di raffreddamento quelli posti sul circuito primario e secondario misureranno temperature invertire rispetto a quelle misurate nella stagione invernale, come mostrato nella figura che segue (Fig. 37).

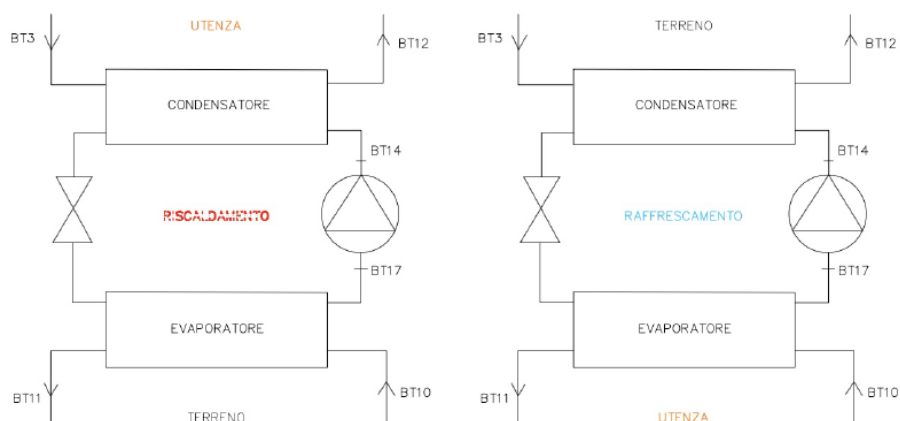


Figura 37: Schema disposizione sensori a bordo macchina [13](#).

2.3.4 Circuito secondario

Il circuito secondario è percorso da una portata di acqua e glicole al 25% in volume variabile tra 0,29 e 0.34 m³/h sostenuta dal circolatore GP1 installato nella pompa di calore. La mandata ed il ritorno, realizzati con tubi in acciaio zincato da diametro nominale di 22 mm coibentati e giuntati mediante filettatura, collegano in serie la pompa di calore, il ventilconvettore e l'accumulo Pacetti da 100 l. Quest'ultimo funge da volano termico (consentendo di ridurre la frequenza di accensione del compressore ed aumentando la vita utile della pompa di calore), è dotato di una predisposizione con portagomma sul corpo cilindrico che consente il reintegro del termovettore e di un vaso di espansione da 8 l (Fig. 38).



Figura 38: Accumulo Pacetti 8 l [13](#).

Il terminale d'utenza è costituito da un ventilconvettore Sabiana modello CRC 23 in cui il fluido termovettore, con temperatura limitata tra 5 ed 85°C, attraversa lato tubi una batteria di scambio termico alettata, lambita esternamente da una portata d'aria ambiente massima di 340 m³/h movimentata da un ventilatore elettrico (Fig. 39)

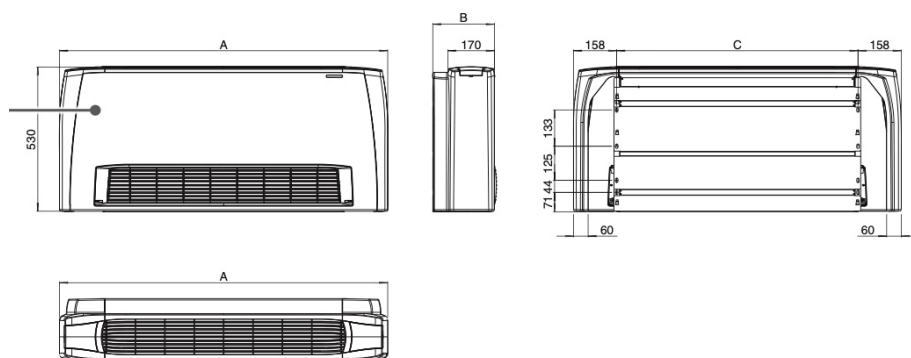


Figura 39: Ventilconvettore CRC 23 [32](#).

Sul tubo di ritorno che collega il ventilconvettore e l'accumulo sono installati: un contabilizzatore termico compatto, il filtro ad Y con cestello metallico intercettato da valvole a sfera e la valvola di sicurezza a molla con scarico convogliato, tarata alla pressione di 3 bar.

I dettagli relativi a tale circuito sono riassunti in *Tabella 7*.

Tubi		Ventilconvettore	
Modello	Viega Prestabo DN22	Modello	Sabiana CRC24
Materiale	acciaio zincato	N° ranghi batteria	4
Dn	ø22mm	T alimentazione	5-85°C
Isolante	elastomerico	Portata ventilatore	340 m3/h
		Resa max riscaldamento	2.2 kW
		Portata max	750 l/h
		Portata min	100 l/h

Tabella 7: Tabella riassuntiva informazioni relative al circuito secondario.

2.3.5 Impianto solare termico

Sulla copertura dell'edificio sono installati collettori solari termici a tubi sottovuoto (*Fig. 40a*) che trasferiscono energia a un accumulo da 1000 litri BP-02 (*Fig. 40b*) mediante un fluido termovettore dedicato, il quale, scorrendo nella serpentina del serbatoio, cede calore all'acqua in esso contenuta. Tale serbatoio svolge il ruolo di interfaccia tra il sistema solare termico e l'impianto termotecnico dell'Energy Center, permettendo l'integrazione tra i due impianti.

Il circolatore EP15 gestisce la circolazione del fluido termovettore nei collettori solari, attivandosi quando la temperatura dei pannelli supera di 5 °C quella dell'accumulo e arrestando il funzionamento al raggiungimento del valore di set-point. Qualora la temperatura prodotta dai collettori ecceda tale valore, una valvola di regolazione a tre vie interviene chiudendo il ramo B e aprendo il ramo C, consentendo il trasferimento e accumulo di calore nel serbatoio di accumulo ACC-01 dell'impianto termotecnico a servizio dell'edificio.

Dall'accumulo BP-02 si diramano le tubazioni di mandata e ritorno in acciaio zincato (diametro nominale 28 mm), che collegano un secondo accumulo Pacetti da 200 litri (*Fig. 40c*) situato nel locale UTA (isola 1), in prossimità della pompa di calore.

Sul tubo di ritorno, tra il BP-02 e il Pacetti da 200 litri, è installato un circolatore Grundfos, che regola la circolazione in base alle logiche definite dalla centralina Nibe Solar42. Quest'ultima, tramite due sensori, rileva le temperature BT53 (dell'accumulo BP-02) e BT54 (dell'accumulo da 200 litri) e quando la temperatura del primo supera quella del secondo di un determinato ΔT , il circolatore si attiva, favorendo il passaggio del fluido nel serpentino al fine di trasferire calore all'acqua e glicole contenuta nell'accumulo da 200 litri. Quest'ultimo si attesta sui condotti di mandata e ritorno del

ciruito sonde con un tubo di mandata munito di contabilizzatore termico compatto ed uno di ritorno su cui è installato il vaso d'espansione da 24 litri precaricato a 0,7 bar.

La valvola miscelatrice posta sul ritorno del circuito sonde consente di ridurre la temperatura all'ingresso della pompa di calore qualora l'acqua derivante dal solare termico sia superiore a 30°C, evitando che la macchina si arresti automaticamente.

Il termostato differenziale STC1000 interviene durante la procedura di scarico termico volta a cedere l'energia termica accumulata nel serbatoio da 200 l dell'impianto solare termico nel terreno quando la pompa di calore non è in funzione per l'assenza di carico termico richiesto. A tal proposito, quando la temperatura dell'accumulo supera $T_{set} + \Delta T$ °C, il termostato comanda l'accensione del circolatore GP2 integrato nella pompa di calore tenendo inattivo il compressore dando inizio il processo di scarico termico che si conclude quando la temperatura dell'accumulo diventa inferiore a $T_{set} - \Delta T$ °C.



(a)



(b)



(c)

Figura 40: (a) Moduli solari termici con tubi sottovuoto; (b) Accumulo BP-02 in centrale termica e componentistica; (c) Accumulo 200 l e componentistica [13](#).

2.3.6 Circuito irrigatori

Gli irrigatori superficiali sono alimentati da tre circuiti in polietilene disposti in parallelo, che dal seminterrato raggiungono la superficie passando attraverso un pozzetto in cemento. Ciascun circuito è dotato di una propria pompa e confluisce in piccolo collettore in polietilene, alimentato a sua volta da una derivazione del collettore generale dell'impianto di irrigazione, realizzato in acciaio zincato. Su questa derivazione sono installati un'ulteriore pompa, che preleva l'acqua dal collettore generale per alimentare quello locale in polietilene, e un contalitri. Le pompe sono alimentate da un quadro elettrico locale, derivato dal quadro elettrico generale.

2.4 Descrizione delle logiche di funzionamento

L'impianto (il cui schema è rappresentato *Fig. 41*) è in grado di realizzare il servizio di riscaldamento e raffrescamento in maniera attiva e passiva e valorizzare, solo per il funzionamento invernale, il calore del terreno o quello derivante dall'impianto solare termico.

In modalità di *riscaldamento*, la miscela di acqua e glicole attraversa le sonde geotermiche, sottraendo calore al terreno ed aumentando la sua temperatura, per poi fluire all'evaporatore dove si raffredda cedendo calore al fluido frigorigeno, per essere, infine, reimpressa nelle sonde a terreno. Il fluido frigorigeno, in condizioni bifase dopo la laminazione, attraversa l'evaporatore dove, assorbendo calore dal fluido primario, evapora fino a raggiungere lo stato di vapore surriscaldato. Viene quindi compresso nel compressore, raggiungendo la pressione massima del ciclo. Successivamente attraversa il condensatore, dove si desurriscalda, condensa e si sottoraffredda, cedendo calore alla miscela acqua-glicole del circuito secondario d'utenza. Quest'ultima, riscaldandosi nel passaggio attraverso il condensatore, alimenta la batteria alettata del ventilconvettore, che trasferisce il calore all'aria ambiente. L'acqua, raffreddata dopo lo scambio termico con l'ambiente, viene convogliata nell'accumulo e da qui nuovamente prelevata per essere rimessa in circolo e ripetere il ciclo.

Nel funzionamento in regime di *raffrescamento* invece, è necessario innanzitutto commutare le valvole di inversione stagionale, così da invertire i flussi che scorrono al secondario negli scambiatori a piastre. In questa modalità, il ciclo del fluido frigorigeno rimane invariato ma la miscela acqua-glicole dell'utenza termica viene fatta circolare nell'evaporatore, dal quale esce a temperatura più bassa per alimentare il ventilconvettore e sottrarre calore all'ambiente interno. Contemporaneamente, il fluido del circuito primario assorbe calore nel condensatore e lo cede al terreno, fluendo attraverso il geoscambiatore.

L'impianto può operare anche in configurazione *passiva* qualora risultino soddisfatte le seguenti condizioni:

1. in regime invernale, la temperatura del terreno sia sufficientemente elevata da consentire il riscaldamento della miscela acqua-glicole fino a valori idonei alla copertura del carico termico;
2. in regime estivo, la temperatura del terreno sia sufficientemente bassa da permettere il raffreddamento del fluido di lavoro fino a valori adeguati al soddisfacimento del carico frigorifero;
3. i carichi termici, sia invernali sia estivi, risultino contenuti, anche in virtù di condizioni climatiche esterne favorevoli.

In tali condizioni, il funzionamento in modalità passiva consente la climatizzazione degli ambienti interni mantenendo il compressore della pompa di calore disattivato e alimentando esclusivamente i circolatori dei circuiti acqua-glicole, con conseguente riduzione dell'assorbimento di energia elettrica. La scheda accessoria NIBE AXC50 al verificarsi di condizioni favorevoli al funzionamento

passivo attiva entrambi i circolatori senza accendere il compressore ed agisce sul gruppo valvole deviatrici a tre vie collegando il circuito primario e secondario in serie, così che l'acqua e glicole circoli in maniera termicamente passiva sia nell'evaporatore che nel condensatore.

Se la radiazione solare incidente sui *moduli solari termici* è adeguata il termovettore dell'impianto solare termico può scaldare indirettamente l'acqua contenuta nell'accumulo da 1000 litri, la quale, movimentata dal circolatore Grundfos Alpha 25-80, fluisce nel serpentino dell'accumulo da 200 litri, cedendo calore all'acqua e glicole in esso contenuta. Quest'ultimo serbatoio di accumulo alimenta il ritorno del circuito sonde su cui è posta la valvola a tre vie miscelatrice che, qualora la temperatura dell'acqua e glicole ingresso alla macchina sia maggiore di 30°C, la limita ad un valore inferiore miscelandola con la mandata, consentendo in tal modo di che la macchina si arresti, come previsto dal programma di protezione installato.

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

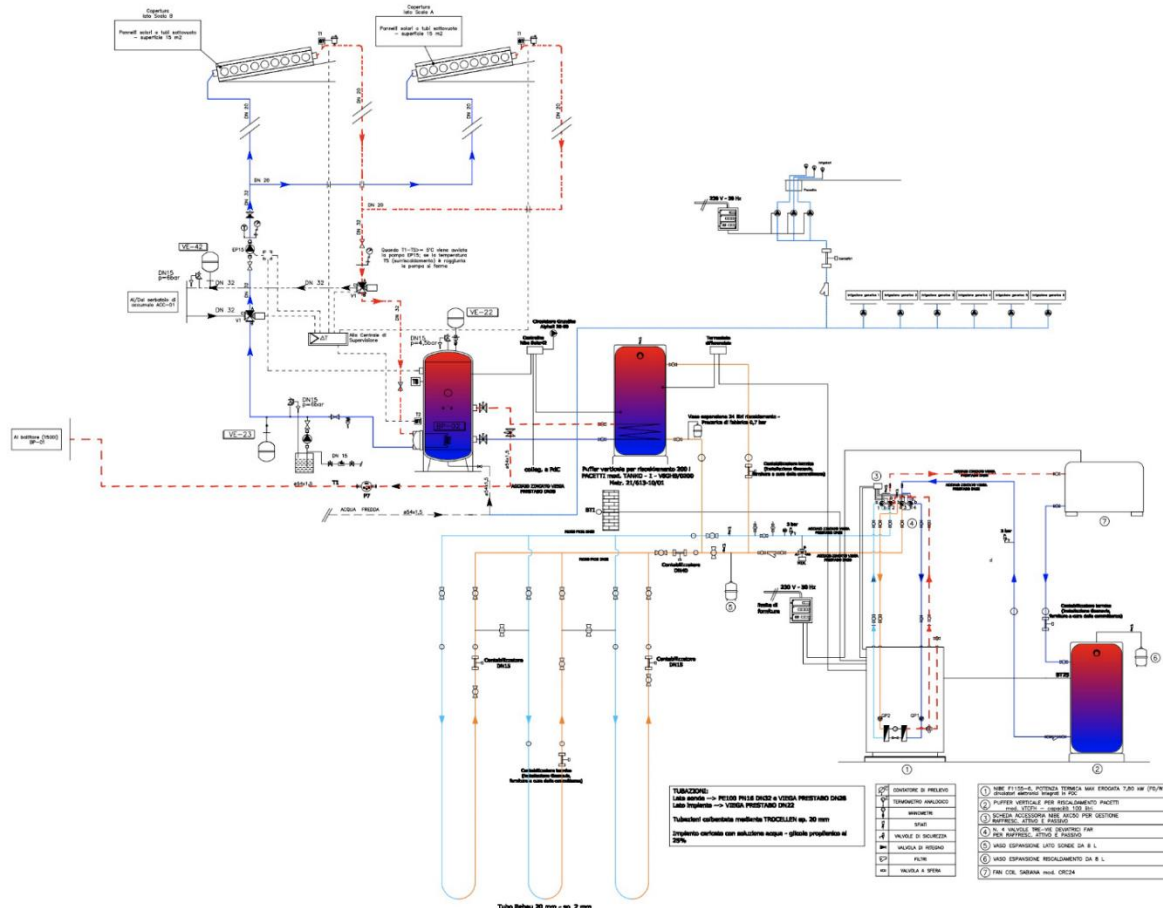


Figura 41: Schema funzionale impianto sperimentale integrato con impianto solare termico.

Capitolo 3

Modellazione e simulazione del circuito primario in COMSOL Multiphysics

3.1 Introduzione

Nel presente capitolo sono descritti i passaggi seguiti per la realizzazione del modello tridimensionale del circuito primario dell'impianto oggetto di studio, successivamente impiegato per le simulazioni in COMSOL Multiphysics. Tali simulazioni sono finalizzate principalmente a valutare le dispersioni termiche lungo la rete di distribuzione, la potenza scambiata tra il fluido e il terreno attraverso i tre moduli GeothermSkin, nonché la potenza netta trasferita al condensatore e il COP della pompa di calore.

La modellazione dei tratti di tubazione che collegano i collettori alla pompa di calore riveste una particolare importanza, in quanto consente di quantificare le perdite termiche lungo le linee che, pur in presenza di isolamento, non risultano trascurabili.

In particolare, a fronte delle potenze relativamente contenute tipiche del sistema in esame, anche variazioni di temperatura dell'ordine di pochi gradi o frazioni di grado possono incidere significativamente sulla sua capacità di sfruttare adeguatamente o meno la fonte geotermica, compromettendone il rendimento complessivo.

Alla luce di tali considerazioni, l'attività di tesi si inserisce anche nell'ottica di individuare, a partire dallo stato di fatto dell'impianto, possibili margini di miglioramento del collegamento tra il campo geotermico e la pompa di calore, al fine di ridurre le perdite e ottimizzare l'efficienza dell'impianto.

3.2 Raccolta delle informazioni relative al sistema

Come esposto nel capitolo precedente, il circuito primario è costituito dal circuito idraulico, i collettori di mandata e ritorno, e i tre moduli del sistema Geotherm-Skin ad essi connessi.

Si è quindi proceduto alla realizzazione del modello tridimensionale, una volta raccolte le principali informazioni dimensionali, relative a:

- la lunghezza complessiva di ciascun modulo Geotherm-Skin (lato terreno), nonché il diametro esterno e lo spessore delle serpentine;
- la lunghezza dei tratti di tubazione di Geotherm-Skin uscenti dal lato interno della parete perimetrale e connessi ai collettori di mandata e ritorno (tale lunghezza è stata stimata);

- il diametro e lo spessore dei collettori;
- la lunghezza delle tubazioni di mandata e ritorno della linea di distribuzione, che collegano rispettivamente i collettori alla pompa di calore situata nell'Isola 1, nonché il loro diametro e spessore;
- lo spessore dell'isolamento previsto per ciascun tratto di tubazione.

Tali informazioni sono sintetizzate in *Tabella 8*, insieme (per completezza) alle informazioni relative al circuito secondario (*Tabella 9*).

	Tratto	Lunghezza [m]			D _{EXT} tubazione [mm]	s tubazione [mm]	Materiale tubazione	s isolante [mm]	D _{EXT} con isolamento [mm]	Materiale isolante
S o n d e	GeothermSkin (lato terreno)	Modulo 1	H2->H1	26.6	20	2	Polietilene reticolato (Rautherm S; Rehau)			
		Modulo 2	H3->H2	27						
		Modulo 3	H4->H3	29.3						
	H-> Uscita lato int parete esterna	Modulo 1	H1 -> lato int H1	0.8						
		Modulo 2	H2 -> lato int H2	0.8						
		Modulo 3	H3 -> lato int H3	0.8						
C i r c u i t o P r i m a r i o	Lato int parete esterna -> Collettore	Modulo 1	Lato int H1 -> Collettore (Return 1)	9	20	2	Polietilene reticolato (Rautherm S; Rehau)	20	60	Rivestimento elastomerico a celle chiuse
			Lato int H2 -> Collettore (Flow 1) *							
		Modulo 2	Lato int H3 -> Collettore (Return 2) *							
			Lato int H2 -> Collettore (Flow 2) *							
		Modulo 3	Lato int H3-> Collettore (Return 3) *							
			Lato int H4-> Collettore (Flow 3)	8.86						
	Collettori	Mandata**		0.86	32	3	PE 100	20	72	Rivestimento elastomerico a celle chiuse
		Ritorno**		1.31	32	3			72	
	Collettore -> PDC	Mandata		65.4	28	1.5	Acciaio zincato	20	68	Rivestimento elastomerico a celle chiuse
		Ritorno		65.7	28	1.5	Acciaio zincato		68	

Tabella 8: Specifiche geometriche e materiali del circuito primario.

	Tratto	Lunghezza [m]	D _{EXT} tubazione [mm]	s tubazione [mm]	Materiale tubazione	s isolante [mm]	D _{EXT} con isolamento [mm]	Materiale isolante
Circuito Secondario	PDC -> Ventilconvettore	0.5	22	1.5	Acciaio zincato (Viega Prestabo)	20	62	Rivestimento elastomerico a celle chiuse
	Ventilconvettore -> Volano termico	0.5	22	1.5	Acciaio zincato (Viega Prestabo)	20	62	Rivestimento elastomerico a celle chiuse
	Volano termico -> PDC	0.5	22	1.5	Acciaio zincato (Viega Prestabo)	20	62	Rivestimento elastomerico a celle chiuse

Tabella 9: Specifiche geometriche e materiali del circuito secondario.

*Tali lunghezze non sono state indicate in virtù delle semplificazioni espresse nel paragrafo successivo.

** Le lunghezze riportate per i collettori fanno riferimento alla distanza percorsa dal fluido al loro interno.

3.3 Realizzazione della geometria e semplificazioni adottate

Lo step successivo è stato quello di realizzare la geometria del sistema da analizzare. A tal fine è stato impiegato il software Autodesk Fusion 360.

È opportuno osservare che COMSOL Multiphysics consente comunque la creazione di geometrie, mediante l'impiego di solidi elementari o combinazioni degli stessi; tuttavia, a causa della complessità del modello in esame, la modellazione diretta in COMSOL sarebbe risultata più onerosa e meno flessibile.

Si è pertanto scelto di utilizzare Fusion 360, il quale mette a disposizione strumenti di modellazione 3D parametrica più avanzati e versatili, come sketching evoluto, gestione delle feature (estrusioni, rivoluzioni, sweep e loft) e maggiore controllo sulle relazioni geometriche. Tali caratteristiche hanno permesso di realizzare in modo più agevole le porzioni più complesse della geometria, come i collettori e i restringimenti di sezione presenti in particolari tratti di tubazione.

Il modello rappresentato in Fig. 42, fa riferimento alla configurazione più comunemente adottata, in cui i tre moduli sono collegati in serie, al fine di massimizzare la superficie di scambio termico con il terreno.

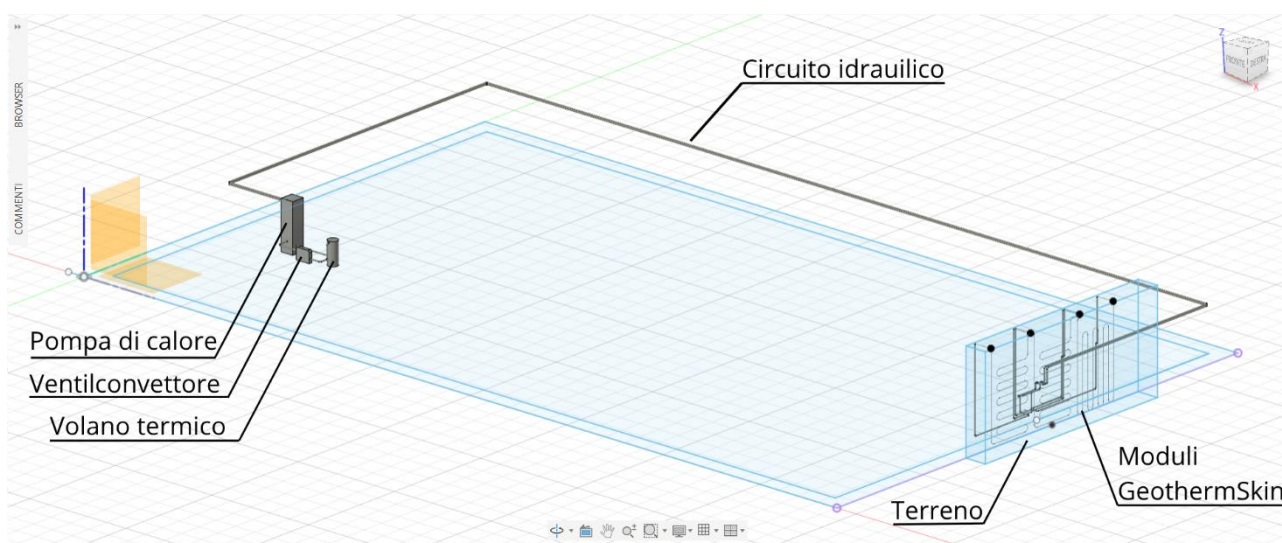


Figura 42: Modello realizzato in Fusion 360.

Ai fini della simulazione, sono state introdotte alcune semplificazioni modellistiche, in particolare non sono stati rappresentati (Fig. 43)

- i tratti di tubazione che collegano l'impianto geotermico a quello solare termico, in quanto l'analisi è stata focalizzata esclusivamente sull'impianto geotermico.
- le valvole presenti nel circuito idraulico (la cui funzione svolta da ognuna è stata descritta nel paragrafo 2.3.2), sostituite con dei tratti continui di tubazione nelle linee di mandata e ritorno che collega la pompa di calore ai collettori

- [illegible]

Di conseguenza, il circuito relativo ai moduli Geotherm-Skin, è stato schematizzato come un unico percorso continuo di tubazione, che parte dal *Flow 3* (mandata al modulo a sviluppo verticale) del collettore di mandata, e si ricollega al *Return 1* (ritorno dell'ultimo modulo a sviluppo prevalentemente orizzontale) del collettore di ritorno. Lungo questo percorso sono stati inclusi anche i tratti identificati come Return 3, Flow 2, Return 2 e Flow 1; a seguito delle semplificazioni adottate e della configurazione in serie oggetto di studio, essi non sono più rappresentati con le diramazioni verso i collettori, ma contribuiscono alla formazione della linea continua equivalente (*Fig. 44*)

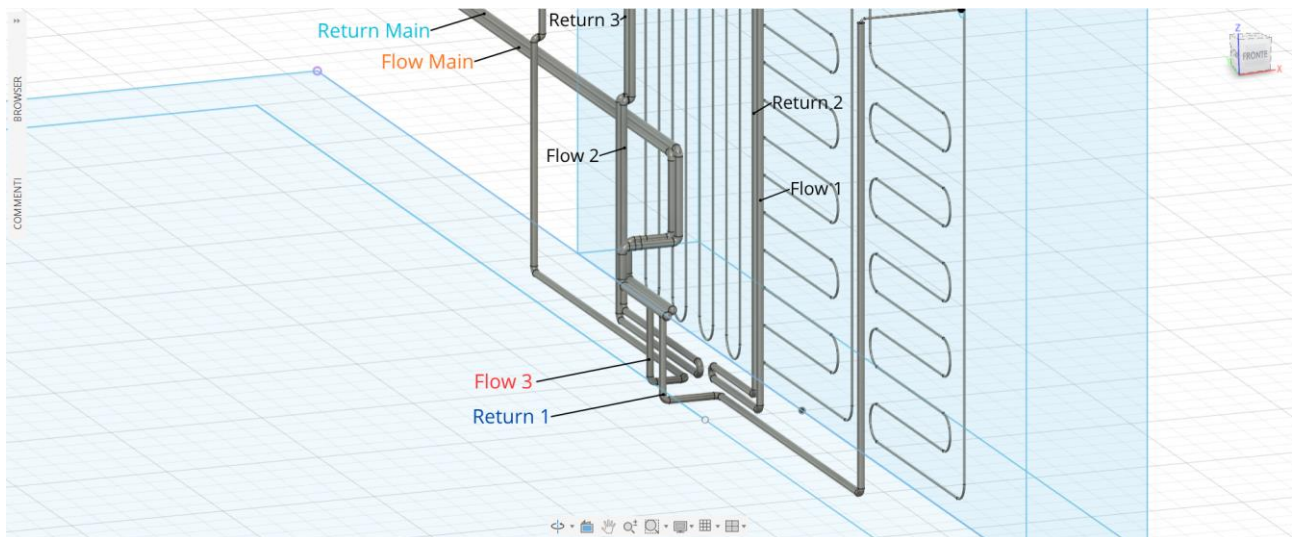


Figura 44: Dettaglio connessione ai collettori dei tratti Flow3 e Return1 e unione dei tratti Return3+Flow2 e Return2+Flow1.

Infine, anche i vasi di espansione non sono stati inclusi nel modello, in quanto, durante il normale funzionamento dell'impianto, le variazioni di volume specifico del fluido risultano contenute e tali da non influenzare significativamente il comportamento del sistema; al contrario, la loro modellazione risulterebbe rilevante esclusivamente nell'ambito di simulazioni dinamiche caratterizzate da rapide o marcate fluttuazioni di temperatura, in cui si manifestano espansioni apprezzabili del fluido.

3.4 Dati di input delle simulazioni

Le simulazioni svolte in ambiente COMSOL Multiphysics sono state realizzate utilizzando come input i dati di monitoraggio della pompa di calore raccolti durante la stagione di riscaldamento, nello specifico nei mesi di dicembre 2022 e gennaio 2023. Tra le variabili monitorate sono stati utilizzati i valori di temperatura del fluido termovettore in mandata alla sonda geotermica. Inoltre, sempre in riferimento a tale periodo, sono stati utilizzati i dati relativi alla temperatura dell'aria esterna, acquisiti tramite il portale di Arpa Piemonte e rilevati dalla stazione meteorologica più vicina all'Energy Center con frequenza giornaliera. Per uniformare il time step della simulazione, i dati di monitoraggio della pompa di calore sono stati a loro volta aggregati su base giornaliera, conformemente alla frequenza del dataset ARPA.

3.5 Configurazione iniziale del modello COMSOL

Una volta realizzata la geometria del sistema in Fusion 360, questa è stata esportata in formato *.step* allo scopo di essere importata in COMSOL per le simulazioni. Tale software, consente infatti di eseguire simulazioni accoppiate risolvendo simultaneamente diverse fisiche all'interno del medesimo dominio computazionale.

All'avvio, la configurazione iniziale ha previsto la selezione della:

- *dimensione spaziale della simulazione*; impostata in *3D* per il caso in esame
- *la fisica del modello*; scegliendo l'interfaccia *Trasferimento di calore in solidi e fluidi (ht)*, per modellare i meccanismi di conduzione e convezione termica
- *tipologia di studio*; optando per *Transitorio* (dipendente dal tempo), al fine di valutare l'evoluzione delle proprietà termofisiche nell'orizzonte temporale considerato (mesi di dicembre e gennaio) con risoluzione giornaliera.

Si viene quindi indirizzati alla schermata di *Fig. 45* che include cinque sezioni principali:

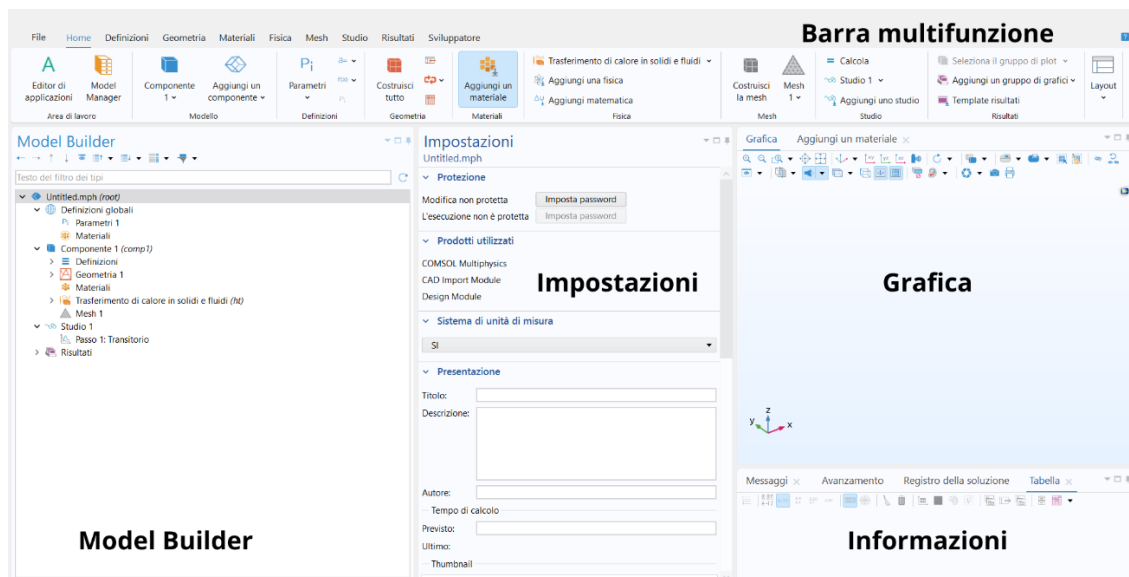


Figura 45: Schermata principale COMSOL.

- *Barra di multifunzione*: tramite la quale è possibile gestire ogni fase del processo di modellazione
- *Model Builder*: in cui vengono rappresentati, tramite una struttura ad albero, i diversi nodi, settando i quali è possibile definire ogni caratteristica del modello.
- *Impostazioni*: dove è possibile definire le specifiche di ogni nodo
- *Grafica*: che mostra la geometria del modello, permettendo la selezione diretta di domini e superfici a cui applicare le specifiche definite nella finestra delle *Impostazioni*. All'interno della stessa area vengono inoltre visualizzati i grafici e i risultati di interesse.
- *Informazioni*: in cui vengono visualizzate informazioni importanti relative allo stato della simulazione, le statistiche della mesh, i messaggi del solutore e le tabelle dei risultati.

3.5.1 Ipotesi del modello

Le ipotesi e le assunzioni considerate per la definizione dei modelli descritti nei successivi paragrafi sono elencate di seguito:

- Le simulazioni dello studio transitorio sono state condotte con un timestep giornaliero.
- La convezione naturale, è stata modellata sulla superficie del dominio del terreno e tutti i tratti di tubazione, ad eccezione delle porzioni direttamente a contatto con il suolo (sonde geotermiche).
- I tratti di tubazione non interrati sono stati considerati esposti alla temperatura dell'aria ambiente esterna. Sebbene l'intera linea di distribuzione sia situata nel piano seminterrato (e sia quindi esposto a temperature superiori rispetto a quelle esterne) si è adottata questa ipotesi in un'ottica conservativa.
- Il contributo gratuito offerto dalla radiazione solare (che contribuirebbe al riscaldamento e all'accumulo termico nel terreno) è stato trascurato per garantire un ulteriore margine conservativo nei risultati.
- Per ogni passo temporale è stata impostata la condizione per cui la temperatura superficiale del terreno sia sempre maggiore di 3 K rispetto alla temperatura del fluido in ingresso alle sonde (*equazione 3.1*).
- Il campo delle temperature del suolo è descritto da una relazione lineare, funzione della profondità z (*equazione 3.2*)

3.6 Struttura del Model Builder e configurazione dei nodi

La simulazione simultanea della tubazione di mandata, dei collettori e dello scambio termico delle sonde con il terreno all'interno di un unico modello numerico ha comportato un notevole onere computazionale. Per ottimizzare le risorse di calcolo e garantire la convergenza, si è reso necessario suddividere l'analisi dell'intero sistema in cinque sotto-simulazioni distinte, sviluppate in altrettanti file COMSOL dedicati. Nello specifico, i modelli strutturati riguardano:

- **Modello 1:** simulazione della sola tubazione di mandata (*Fig. 46a*);
- **Modello 2:** simulazione del collettore di mandata e del tratto di tubazione *Flow3*, che connette il collettore stesso al *Modulo 3* (*Fig. 46b*);
- **Modello 3:** simulazione dello scambio termico dei tre moduli energetici con il terreno circostante (*Fig. 46c*);
- **Modello 4:** simulazione del tratto di tubazione *Return1*, che collega l'uscita del *Modulo 1* al collettore di ritorno (*Fig. 46d*);
- **Modello 5:** simulazione della sola tubazione di ritorno (*Fig. 46e*);

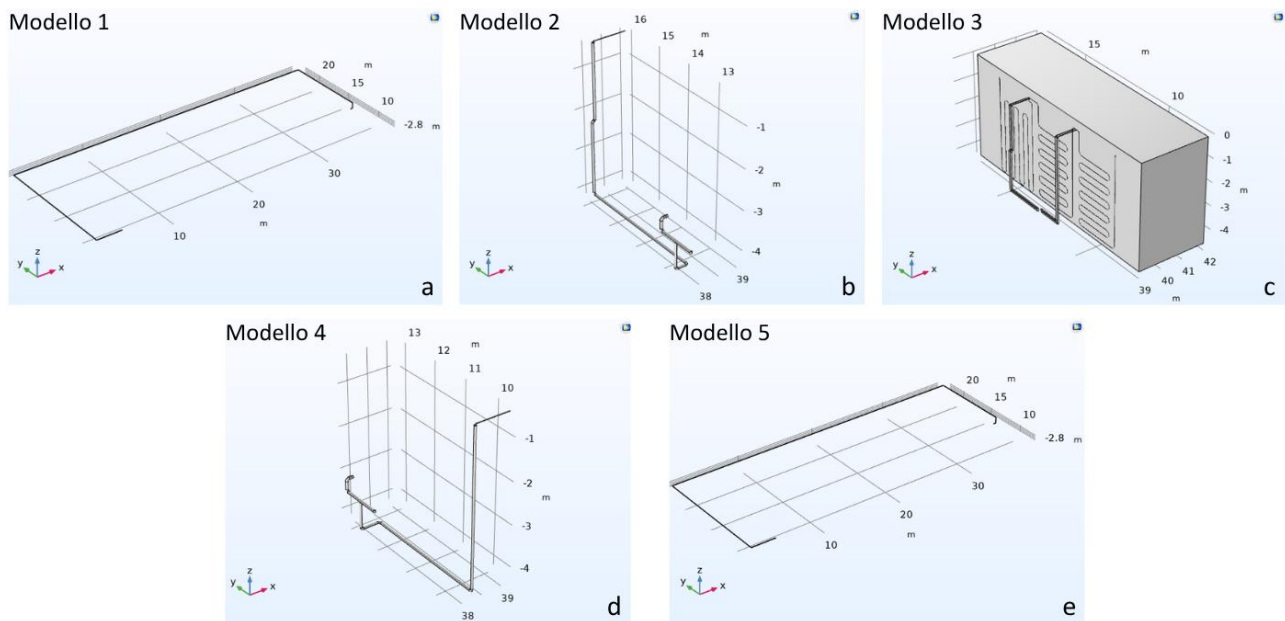


Figura 46: Modelli delle diverse porzioni del circuito primario.

Le simulazioni sono state eseguite in cascata e i valori di temperatura calcolati nelle sezioni di uscita di ciascun tratto di tubazione sono stati esportati e utilizzati come input per il modello successivo. Di seguito viene descritta l'intera procedura di configurazione dei nodi del *Model Builder* successiva all'importazione della geometria. Tale metodologia risulta valida per la definizione e l'allestimento di tutti i progetti COMSOL sopra elencati.

3.6.1 Definizioni globali

In questa sezione sono state specificate le grandezze e le funzioni globali, richiamabili in qualsiasi punto del modello. Nello specifico, sono stati definiti i seguenti sotto-nodi (Fig. 47):

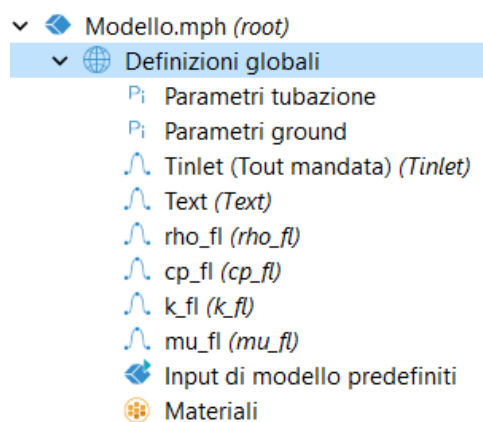


Figura 47: Sotto-nodi creati nel nodo *Definizioni globali*.

- **Parametri;** in cui sono stati inseriti i valori numerici suddivisi in
 - *Parametri tubazione:* comprendenti diametri interni, esterni e isolati relativi ai condotti in acciaio zincato, PE100 e PE-Xa, oltre al valore della portata volumetrica nominale del circuito primario, pari a 650 l/h (circa $1.81 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$)
 - *Parametri Ground:* sotto-nodo introdotto limitatamente al Modello 3 per definire il gradiente termico del terreno G, impostato sul valore di $0.03 \text{ }^\circ\text{C}/\text{m}$.
- **Funzioni interpolanti;** in cui
 - sono stati caricati i dataset relativi alle temperature in input al modello (*Tinlet*) e alle temperature dell'aria esterna (*Text*);
 - sono state definite per interpolazione le funzioni di densità (*rho_fl*), calore specifico a pressione costante (*cp_fl*), conducibilità termica (*k_fl*) e viscosità dinamica (*mu_fl*) del fluido termovettore, noti i valori che tali proprietà assumono per diversi valori di temperatura (*Tab.10*).

Fluido termovettore (circuito primario e secondario)					
	Temperatura [$^\circ\text{C}$]				
	-5	0	20	40	60
Concentrazione in volume di glicole [%]	25				
Punto di congelamento [$^\circ\text{C}$]	-10				
Densità [kg/m^3]	1032.7	1031.2	1023.4	1013.8	1002.3
Calore specifico [$\text{J}/\text{kg}^\circ\text{C}$]	3860	3870	3920	3970	4010
Conducibilità termica [$\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$]	0.437	0.443	0.467	0.488	0.502
Viscosità dinamica [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]	0.007245	0.0055	0.002192	0.00104	0.000573

Tabella 10: Proprietà del fluido in funzione della temperatura.

Tali funzioni (non lineari) sono state interpolate utilizzando una *Spline cubica* e sono rappresentate nelle Figure 48, 49, 50, 51.

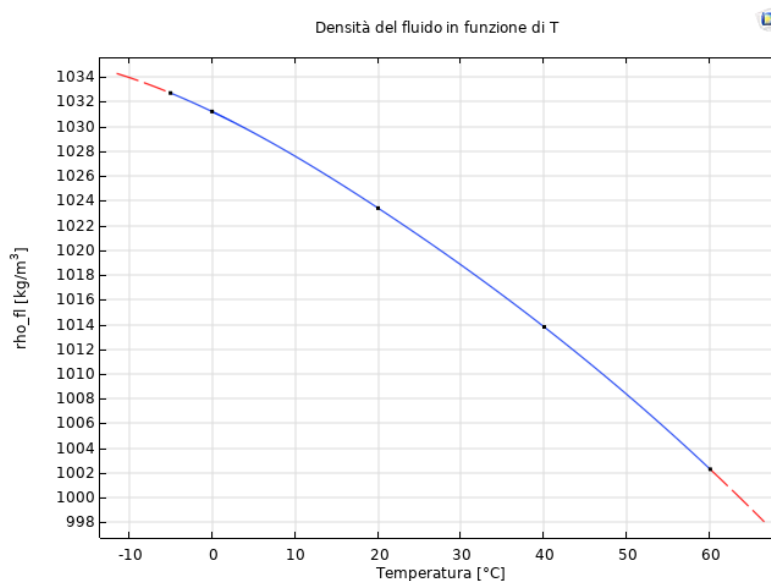


Figura 48: Densità del fluido in funzione della temperatura.

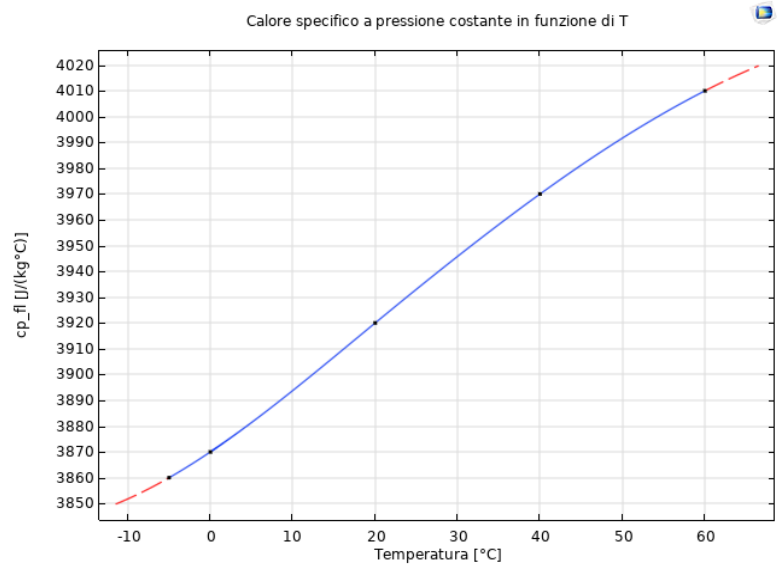


Figura 49: Calore specifico del fluido in funzione della temperatura.

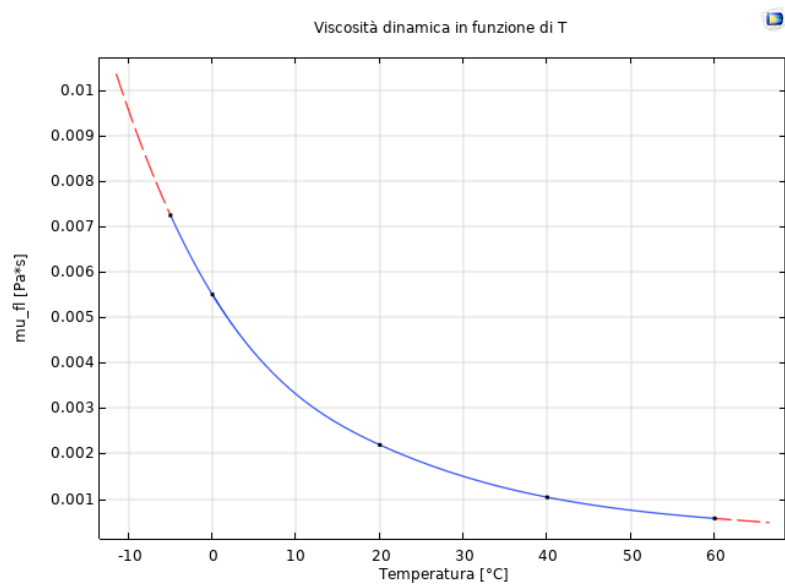


Figura 50: Viscosità dinamica del fluido in funzione della temperatura.

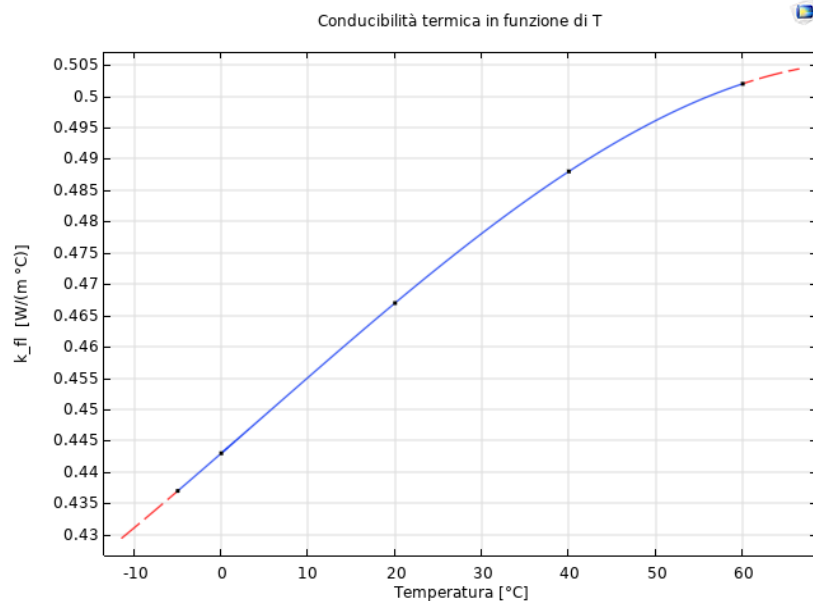


Figura 51: Conducibilità termica del fluido in funzione della temperatura.

3.6.2 Componente

3.6.2.1 Definizioni

In questa sezione sono state configurate le variabili locali, applicabili (tramite selezione diretta sul componente) a specifiche porzioni del componente in esame.

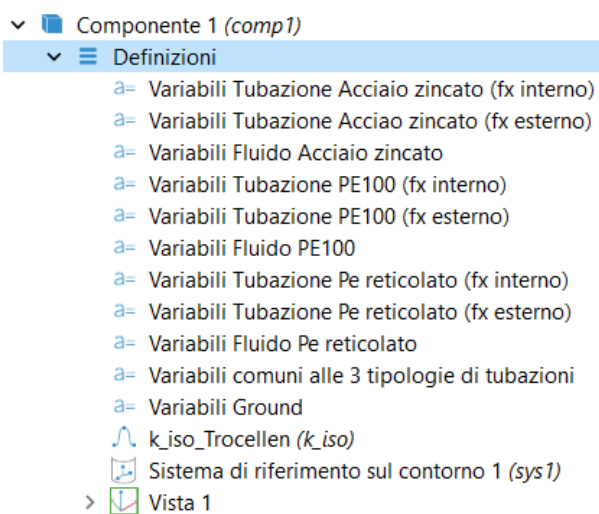


Figura 52: Sotto-nodi creati nel nodo Definizioni.

Nello specifico (*Fig. 52*), i diversi parametri sono stati organizzati secondo i sotto-nodi:

- *Variabili Tubazione*: definite distintamente per ogni materiale. Raccolgono i valori di diametro interno ed esterno e di diametro della tubazione isolata, necessari per la successiva caratterizzazione (nel nodo della fisica) del flusso interno e il flusso esterno alla tubazione.
- *Variabili Fluido*: configurate anch'esse distintamente per ogni materiale. Sono utilizzate per determinare la sezione trasversale di passaggio del fluido e la sua velocità, oltre che per assegnare ad ogni dominio fluido, le proprietà termofisiche (precedentemente definite a livello globale).
- *Variabili comuni*: introdotte per definire le proprietà comuni a tutti i tratti di tubazione presenti, ovvero la temperatura ambiente $T_{amb}=T(t)$ e la pressione atmosferica $p_{amb}=101325$ Pa

Per quanto riguarda il *Modello 3*, all'interno del sotto-nodo *Variabili Ground* sono state definite le proprietà medie del terreno, utilizzando valori coerenti con i lavori di monitoraggio svolti precedentemente nell'area metropolitana di Torino (Barla et al., 2019) e riportati nella tabella seguente (*Tab.11*)

	Fase solida	Acqua
Porosità [%]	17.5	
Conducibilità termica [W/m·K]	2.7	0.6
Capacità termica [MJ/(m ³ ·K)]	1.8	4.2
Densità [kg/m ³]	1922	1000
Calore specifico a pressione costante [J/kg·K]	936.52	4200

Tabella 11: Parametri del terreno nella zona di Torino (Barla et al.,2019)

Inoltre, nello stesso sotto-nodo è stata inserita la relazione che regola l'andamento della temperatura del terreno in funzione della profondità z . Lo scopo è garantire che (in ogni istante della simulazione in transitorio) la temperatura del terreno si mantenga superiore a quella del fluido in ingresso nelle sonde, nell'ottica di poter effettuare (a parità di T_{inlet} del fluido) una valutazione circa i benefici derivati dall'adozione di un materiale alternativo per le sonde (Capitolo 4). A tale scopo, sono state definite le seguenti relazioni:

$$T_{sup} = T_{inlet}(t) + 3 [K] \quad (3.1)$$

$$T_{ground} = T_{sup} + G \cdot z [K] \quad (3.2)$$

dove:

- T_{sup} è la temperatura superficiale del terreno (per ipotesi sempre maggiore di 3 K, rispetto alla T_{inlet})
- T_{inlet} , nel *Modello 3*, rappresenta la temperatura del fluido in ingresso alle sonde.
- T_{ground} è la temperatura del terreno

Infine, utilizzando i valori di conducibilità termica al variare della temperatura, riportati nella scheda tecnica dell'isolante effettivamente installato nell'impianto (*Tab. 12*), è stata definita una funzione interpolante (k_{iso})

Temperatura [°C]	Conducibilità termica [W/(m·K)]
0 °C	0.0345
10 °C	0.0359
40 °C	0.04

Tabella 12: Valori di conducibilità termica utilizzati per la definizione della funzione k_{iso} .

3.6.2.2 Materiali

Nella sezione *Materiali* sono state memorizzate le proprietà termofisiche dei materiali costituenti il componente. Ai fini delle analisi termiche condotte, le proprietà di interesse sono la conducibilità termica, la densità e il calore specifico a pressione costante.

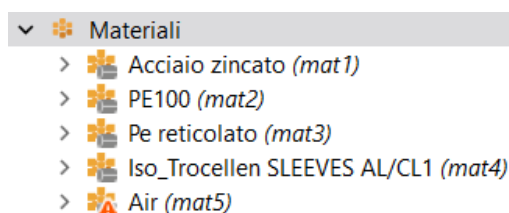


Figura 53: Sotto-nodi creati nel nodo *Materiali*.

All'interno di ciascun sotto-nodo (*Fig. 53*) sono stati inseriti prioritariamente i dati ricavati direttamente dalle schede tecniche dei produttori. Per i parametri non disponibili in tali documenti, si è ovviato utilizzando dei valori o delle funzioni dipendenti dalla temperatura prelevate dalla libreria integrata di COMSOL, selezionando materiali analoghi per caratteristiche chimico-fisiche e strutturali. I valori di tutte le proprietà così configurate sono riportati nelle *Tabelle 13, 14, 15 e 16* seguenti.

Materiale TUBAZIONE MANDATA e RITORNO	
Materiale	Acciaio al carbonio zincato esternamente
Produttore; modello	Viega; Prestabo
Densità [kg/m ³]	7874.56
Conducibilità termica [W/m·K]	50
Cp [J/kg·K]*	475
*Valore ricavato dal materiale <i>Steel AISI 4340</i> della libreria COMSOL	

Tabella 13: Proprietà termofisiche tratti di tubazione in acciaio zincato ¹¹.

Materiale COLLETTORI di MANDATA e RITORNO	
Materiale	PE100 (Polietilene ad alta densità)
Densità [kg/m ³]*	rho(T)
Conducibilità termica [W/m·K]*	k(T)
Cp [J/kg·K]*	cp(T)
*Funzioni ricavate dal materiale <i>HDPE</i> della libreria COMSOL	

Tabella 14: Proprietà termofisiche dei collettori in PE100.

Materiale GEOTHERM-SKIN	
Materiale	PE-Xa (Polietilene reticolato)
Produttore; modello	Rehau; Rautherm S
Densità [kg/m ³]*	951
Conducibilità termica [W/m·K]	0.35
Cp [J/kg·K]*	2300
*Valori ricavati da scheda tecnica del produttore THERM (tubo in PE-Xa con conducibilità termica pari a quella del produttore Rehau)	

Tabella 15: Proprietà termofisiche GeothermSkin ²⁹.

Materiale ISOLAMENTO	
Materiale	Elastomerico a celle chiuse
Produttore; modello	Trocellen; SLEEVES AL/CL1
Densità [kg/m ³]	30
Conducibilità termica [W/m·K]*	k_iso(T)
Cp [J/kg·K]**	C_solid_101_kPa_1(T)
* Funzione definita nel nodo <i>Definizioni</i> a utilizzando i valori di Tab 5	
** Funzione ricavata dal materiale <i>Closed-cell foam [solid,101 kPa]</i> in COMSOL	

Tabella 16: Proprietà termofisiche isolante utilizzato per ogni tratto di tubazione ²⁴.

Si noti infine, che il sotto-nodo (*Air*) non è stato assegnato ad alcuna entità geometrica del componente; la sua definizione è comunque necessaria allo scopo di richiamarne le relative proprietà nel nodo della fisica per la caratterizzazione della convezione naturale.

3.6.2.3 Trasferimento di calore in solidi e fluidi (*ht*)

Il nodo della fisica permette di associare ai rispettivi domini e contorni geometrici le relative equazioni caratteristiche e condizioni al contorno. All'interno di questo ambiente vengono impostate le proprietà termofisiche di solidi e fluidi, richiamando le variabili di conducibilità termica, densità e calore specifico a pressione costante precedentemente definite. In questo modo, il solutore dispone di tutti i parametri necessari per la risoluzione del sistema di equazioni e la definizione del campo termico.

3.6.2.3.1 Equazioni di bilancio termico per i domini solidi

L'equazione di bilancio di riferimento utilizzata per i domini solidi è:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q + Q_{\text{ted}} \quad (3.3)$$

Dove

- ρ è la densità [kg/m³]
- C_p è la capacità termica specifica a sforzo costante [J/(kg · K)]
- T è la temperatura assoluta [K]
- ∇T è il gradiente di temperatura [K/m]
- $\mathbf{u}$ è il vettore velocità del moto traslatorio [m/s] (nullo nel nostro caso)
- $\mathbf{q}$ è il flusso termico per conduzione [W/m²], descritto dalla legge di Fourier

$$\mathbf{q} = -k \nabla T \quad (3.3.1)$$

con

- k conducibilità termica del materiale [W/(m·K)]
 - ∇T è il gradiente di temperatura [K/m]
-
- Q è il termine che tiene conto delle sorgenti termiche aggiuntive [W/m³]
 - Q_{ted} è il termine che tiene conto degli effetti termoelastici nei solidi [W/m³], descritto dall'equazione

$$Q_{\text{ted}} = -\alpha T \frac{dS}{dt} \quad (3.3.2)$$

con

- α coefficiente di dilatazione termica [1/K]
- S è il secondo tensore degli sforzi di Piola-Kirchoff [Pa].

Poiché nel nostro caso il dominio solido non è accoppiato fisicamente a fenomeni di meccanica strutturale (trattandosi di una simulazione puramente termica) il termine di smorzamento termoelastico è nullo.

3.6.2.3.2 Equazioni di bilancio termico per i domini fluidi

Nei fluidi, l'equazione di bilancio energetico utilizzata dal software è la seguente:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q + Q_p + Q_{vd} \quad (3.4)$$

dove

- ρ è la densità [kg/m³]
- C_p è la capacità termica specifica a sforzo costante [J/(kg · K)]
- T è la temperatura assoluta [K]
- ∇T è il gradiente di temperatura [K/m]
- $\mathbf{u}$ è il vettore velocità del moto traslatorio [m/s]
- $\mathbf{q}$ è il flusso termico per conduzione [W/m²]
- Q contiene sorgenti termiche diverse dalla dissipazione viscosa [W/m³]
- Q_p rappresenta il lavoro compiuto dalle variazioni di pressione ed è il risultato del riscaldamento dovuto a compressione adiabatica e ad alcuni effetti termoacustici [W/m³].
Esso è generalmente piccolo per flussi a basso numero di Mach

$$Q_p = \alpha_p T \left(\frac{\partial p}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla p \right) \quad (3.4.1)$$

con

- p è la pressione [Pa]
- α_p è il coefficiente di dilatazione termica [1/K], definito come

$$\alpha_p = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \quad (3.4.1.1)$$

per i gas ideali, il coefficiente di dilatazione termica assume la forma più semplice
 $\alpha_p = 1/T$.

- Q_{vd} rappresenta la dissipazione viscosa nel fluido [W/m³]

$$Q_{vd} = \boldsymbol{\tau} \cdot \nabla \mathbf{u} \quad (3.4.2)$$

con

- $\boldsymbol{\tau}$, tensore degli sforzi viscosi [Pa]

Dalle equazioni appena definite si può osservare come, oltre alle proprietà termofisiche, la caratterizzazione del dominio fluido richieda la definizione del campo di velocità lungo i tre assi cartesiani.

Poiché lo sviluppo tridimensionale del circuito comporta continue variazioni nella direzione del vettore velocità $\mathbf{u}$, al fine di ridurre l'onere computazionale della simulazione, si è scelto di operare con valori scalari di velocità, in corrispondenza dei diversi tratti di tubazione.

A tale scopo, sono stati definiti 18 sotto-nodi di tipo "Fluido" (Fig. 54), così da contemplare tutte le potenziali direzioni spaziali assunte dal vettore velocità e associare a ciascun sotto-nodo un campo di velocità

- *Unidimensionale* (e orientato lungo lo specifico asse geometrico) nei tratti rettilinei di tubazione (Fig. 55a)
- *Bidimensionale* nei raccordi d'angolo. In corrispondenza di questi ultimi (dove il fluido subisce un cambio di direzione da un asse all'altro) il modulo del vettore velocità è stato ripartito in due componenti identiche e pari a $u/\sqrt{2}$ per ciascun asse interessato, ipotizzando quindi che nel raccordo il flusso risulti inclinato a 45° rispetto agli assi (Fig.55b).

- Fluido x
- Fluido -x
- Fluido y
- Fluido -y
- Fluido z
- Fluido -z
- Fluido R da x a y
- Fluido R da x a -y
- Fluido R da -x a y
- Fluido R da -x a -y
- Fluido R da y a z
- Fluido R da y a -z
- Fluido R da -y a z
- Fluido R da -y a -z
- Fluido R da x a z
- Fluido R da x a -z
- Fluido R da -x a z
- Fluido R da -x a -z

Figura 54: Sotto-nodi "Fluido" definiti per la gestione direzionale del campo di velocità.

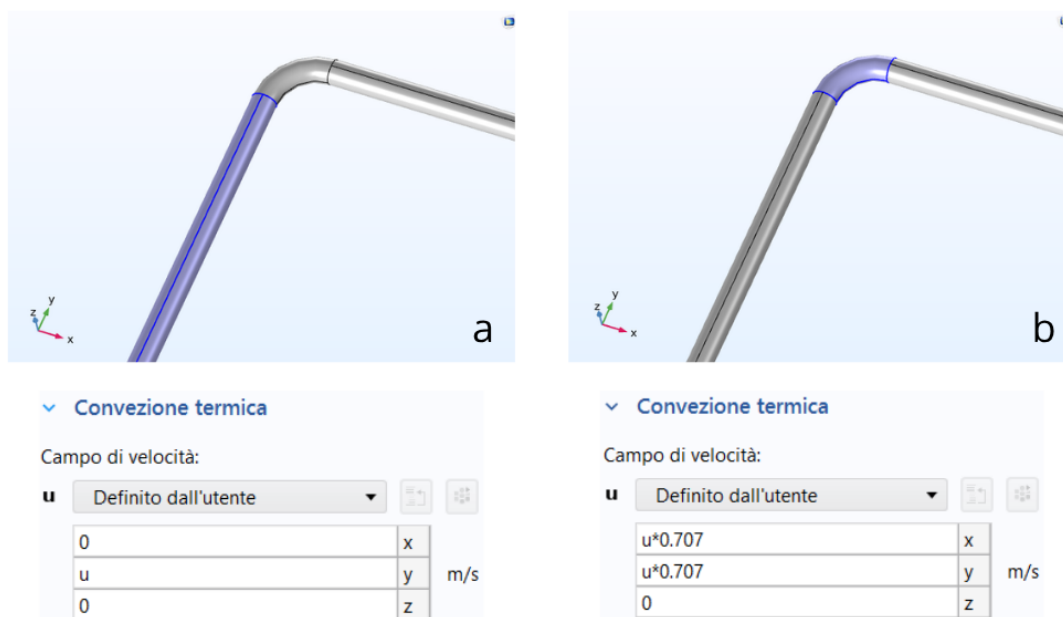


Figura 55: Esempio definizione del campo di velocità: (a) flusso monodirezionale concorde all'asse y; (b) cambio di direzione del flusso dall'asse y all'asse x.

3.6.2.3.3 Condizione di flusso entrante e uscente del fluido

Per completare la definizione del dominio fluido, è stato necessario imporre le corrette condizioni di scambio termico in corrispondenza delle sezioni di ingresso e di uscita delle tubazioni.

Per la sezione di flusso entrante, lo scambio termico è governato dal trasporto convettivo del fluido che fa il suo ingresso nel sistema, modellato da COMSOL secondo la seguente relazione di bilancio:

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = \rho \Delta H \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} \quad (3.5)$$

$$\Delta H = \int_{T_{ustr}}^T C_p dT + \int_{p_{ustr}}^{p_A} \frac{1}{\rho} (1 - \alpha_p T) dp \quad (3.6)$$

Dove i singoli termini che compaiono in queste equazioni sono definiti come segue:

- $\mathbf{n}$ è il vettore normale alla superficie di ingresso [-].
- $\mathbf{q}$ è il flusso termico conduttivo [W/m²].
- $\mathbf{u}$ è il vettore velocità del fluido all'ingresso [m/s].
- ρ è la densità del fluido [kg/m³].
- ΔH è la variazione di entalpia specifica del fluido rispetto a uno stato di riferimento [J/kg].
- C_p è la capacità termica specifica a pressione costante del fluido interno [J/(kg·K)].
- T è la temperatura locale attuale del fluido [K].
- T_{ustr} è la temperatura del fluido a monte (*upstream*) rispetto alla frontiera di ingresso [K].
- p è la pressione locale del fluido [Pa].
- p_{ustr} è la pressione del fluido a monte rispetto alla frontiera di ingresso [Pa].
- p_A è la pressione assoluta di riferimento [Pa].
- α_p è il coefficiente di dilatazione termica del fluido interno [1/K].

Al contrario, per la sezione di flusso uscente, si assume che il trasporto di calore verso l'esterno avvenga prevalentemente per convezione forzata guidata dal moto del fluido stesso. COMSOL traduce questa ipotesi imponendo che il flusso conduttivo normale alla frontiera sia nullo tramite la condizione:

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = 0 \quad (3.7)$$

3.6.2.3.4 Condizioni al contorno per lo scambio termico in convezione naturale

Per quantificare lo scambio termico dissipativo verso l'ambiente, sono state applicate specifiche condizioni di flusso alle superfici esterne delle tubazioni (isolate e non). Nello specifico, per modellare correttamente la convezione naturale tenendo conto dell'orientamento geometrico dei condotti, sono state definite due condizioni distinte per i

- **Tratti di tubazione orizzontali:** per i quali il COMSOL calcola lo scambio termico basandosi sulle seguenti equazioni:

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = q_0 \quad (3.8)$$

$$q_0 = h(T_{\text{ext}} - T) \quad (3.9)$$

$$h = \frac{k}{D} \left(0.6 + \frac{0.387 \text{Ra}_D^{1/6}}{\left(1 + \left(\frac{0.559}{\text{Pr}} \right)^{9/16} \right)^{8/27}} \right)^2 \quad (3.10)$$

- **Tratti di tubazione verticali:** per i quali il software adotta la formulazione:

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = q_0$$

$$q_0 = h(T_{\text{ext}} - T)$$

$$h = \frac{k}{H} \left(\frac{4}{3} \left(\frac{7 \text{Ra}_H \text{Pr}}{5(20 + 21 \text{Pr})} \right)^{1/4} + \frac{4(272 + 315 \text{Pr})H}{35(64 + 63 \text{Pr})D} \right) \quad (3.11)$$

dove

- L'equazione di frontiera $-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = q_0$ rappresenta formalmente il principio di conservazione dell'energia sulla superficie e impone che il flusso termico conduttivo (che dall'interno del solido attraversa la parete lungo la normale uscente dalla superficie) sia pari al flusso termico dissipato per convezione naturale q_0 .
- h è il coefficiente di scambio termico convettivo $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$.
- k è la conducibilità termica dell'aria esterna $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$.
- D è il diametro esterno della tubazione o del rivestimento isolante $[\text{m}]$
- Ra_D è il numero di Rayleigh basato sul diametro D $[-]$
- Pr è il numero di Prandtl $[-]$
- H : Altezza verticale del tratto di tubazione $[\text{m}]$
- Ra_H è il numero di Rayleigh basato sull'altezza H $[-]$

Relativamente al *Modello 3*, si è tenuto conto dello scambio termico convettivo tra il suolo e l'ambiente esterno, assimilandone la superficie esposta a una piastra piana il cui flusso termico è descritto dalle equazioni seguenti:

$$\begin{aligned}
 -\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} &= q_0 \\
 q_0 &= h(T_{\text{ext}} - T) \\
 h &= \begin{cases} \frac{k}{L} 0.54 \text{Ra}_L^{1/4} & \text{if } T > T_{\text{ext}} \text{ and } 10^4 \leq \text{Ra}_L \leq 10^7 \\ \frac{k}{L} 0.15 \text{Ra}_L^{1/3} & \text{if } T > T_{\text{ext}} \text{ and } 10^7 \leq \text{Ra}_L \leq 10^{11} \\ \frac{k}{L} 0.27 \text{Ra}_L^{1/4} & \text{if } T \leq T_{\text{ext}} \text{ and } 10^5 \leq \text{Ra}_L \leq 10^{10} \end{cases} \quad (3.12)
 \end{aligned}$$

dove L è la lunghezza caratteristica definita come il rapporto tra l'area e il perimetro della superficie di terreno esposta.

3.6.2.3.5 Valori iniziali

All'interno del nodo Valori Iniziali è stata definita la temperatura che stabilisce lo stato termico del sistema all'istante iniziale ($t = 0$), a partire dal quale il software calcolerà l'evoluzione temporale del campo termico per gli step successivi dello studio transitorio. Nel presente lavoro, per la tubazione è stato impostato un valore $T_{\text{inlet}}(0)$ (corrispondente alla temperatura del fluido all'ingresso del tratto in esame all'istante zero) mentre per il terreno è stato inserito un valore pari a $T_{\text{gr}}(0)$ relativo al medesimo istante temporale.

3.6.2.3.6 Equazioni di bilancio termico in mezzi porosi

Infine, esclusivamente all'interno del Modello 3, è stato implementato il sotto-nodo relativo ai mezzi porosi con lo scopo di descrivere il trasferimento termico coniugato nel terreno. In particolare, COMSOL risolve la fisica di questi domini accoppiando i bilanci energetici di una fase fluida e di una matrice porosa, basandosi sulle equazioni seguenti:

$$(\rho C_p)_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_f C_{p,f} \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q + Q_p + Q_{\text{vd}} + Q_{\text{geo}} \quad (3.13)$$

$$\mathbf{q} = -k_{\text{eff}} \nabla T \quad (3.14)$$

dove

- $(\rho C_p)_{\text{eff}}$ è la capacità termica volumetrica efficace a pressione costante, definita da:

$$(\rho C_p)_{\text{eff}} = \epsilon_p \rho_f C_{p,f} + \theta_s \rho_s C_{p,s} + \theta_{\text{imf}} \rho_{\text{imf}} C_{p,\text{imf}} \quad (3.13.1)$$

con

- ϵ_p porosità; frazione volumetrica occupata dai pori in cui il fluido può scorrere liberamente.
 - ρ_f densità della fase fluida in movimento [kg/m^3]
 - $C_{p,f}$ capacità termica specifica a pressione costante del fluido [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]
 - θ_s frazione volumetrica della matrice solida
 - ρ_s densità della matrice solida [kg/m^3]
 - $C_{p,s}$ capacità termica a pressione costante della matrice solida [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]
 - θ_{imf} frazione volumetrica del fluido immobile; ovvero la quota di volume occupata dal fluido intrappolato stabilmente nei pori chiusi o legata capillarmente.
 - ρ_{imf} densità del fluido immobile [kg/m^3]
 - $C_{p,\text{imf}}$ capacità termica a pressione costante del fluido immobile [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]
- $\frac{\partial T}{\partial t}$ è la derivata parziale della temperatura rispetto al tempo [K/s] (termine transitorio).
 - $\rho_f C_{p,f} \mathbf{u} \cdot \nabla T$ è il termine di trasporto convettivo del fluido [W/m^3] e quantifica il calore trasportato nello spazio dal moto macroscopico del fluido.

con

- $\mathbf{u}$ campo di velocità del fluido che scorre nei pori (velocità di Darcy) [m/s]
 - ∇T gradiente di temperatura [K/m]
- $\nabla \cdot \mathbf{q}$ è la divergenza del vettore flusso termico conduttivo [W/m^3]
 - Q è la sorgente termica volumetrica generica [W/m^3]; ovvero il calore introdotto o rimosso manualmente nel dominio (p.e. reazioni esterne).
 - Q_p è il riscaldamento per lavoro di pressione [W/m^3]; ovvero il calore generato o assorbito dalle compressioni/espansioni volumetriche locali del fluido.
 - Q_{vd} è la dissipazione viscosa [W/m^3]; ovvero l'energia termica generata irreversibilmente dall'attrito viscoso del fluido contro i micro-pori del terreno.
 - Q_{geo} è la sorgente termica geotermica [W/m^3]; ovvero il termine che tiene conto dei flussi termici o gradienti radioattivi naturali della crosta terrestre.

- $\mathbf{q} = -k_{\text{eff}} \nabla T$ è la legge di Fourier per i mezzi porosi

con

- $\mathbf{q}$ flusso termico conduttivo [W/m^2]
- k_{eff} conducibilità termica efficace del mezzo poroso [$\text{W/m}\cdot\text{K}$], definita da

$$k_{\text{eff}} = \epsilon_p k_f + \theta_s k_s + \theta_{\text{imf}} k_{\text{imf}} + k_{\text{disp}} \quad (3.14.1)$$

dove

- k_f è la conducibilità termica del fluido mobile [W/(m·K)]
- k_s è la conducibilità termica della matrice solida [W/(m·K)]
- k_{imf} è la conducibilità termica del fluido immobile [W/(m·K)]
- k_{disp} è la conducibilità termica di dispersione [W/(m·K)]

Una volta completata l'assegnazione delle equazioni ai domini e definite le relative condizioni al contorno, l'albero della fisica si presenta nella configurazione mostrata in *Figura 56*.

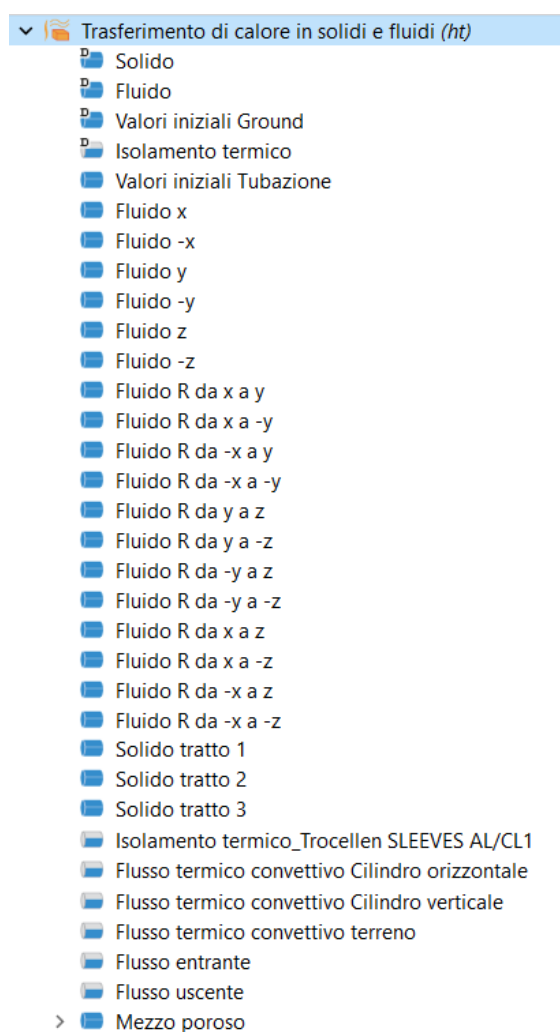


Figura 56: Struttura completa del nodo della fisica e relativi sotto-nodi implementati

3.6.2.4 Mesh

Nel nodo *Mesh*, l'intero dominio viene suddiviso in un insieme discreto di elementi geometrici elementari (tetraedrici, in tal caso). Questa operazione, di discretizzazione o "generazione della griglia di calcolo", è fondamentale in quanto definisce i nodi in cui il solutore calcolerà numericamente le equazioni differenziali alle derivate parziali del modello termico.

Le rappresentazioni della mesh dei 5 modelli definiti sono state riportate in *Figura 57*.

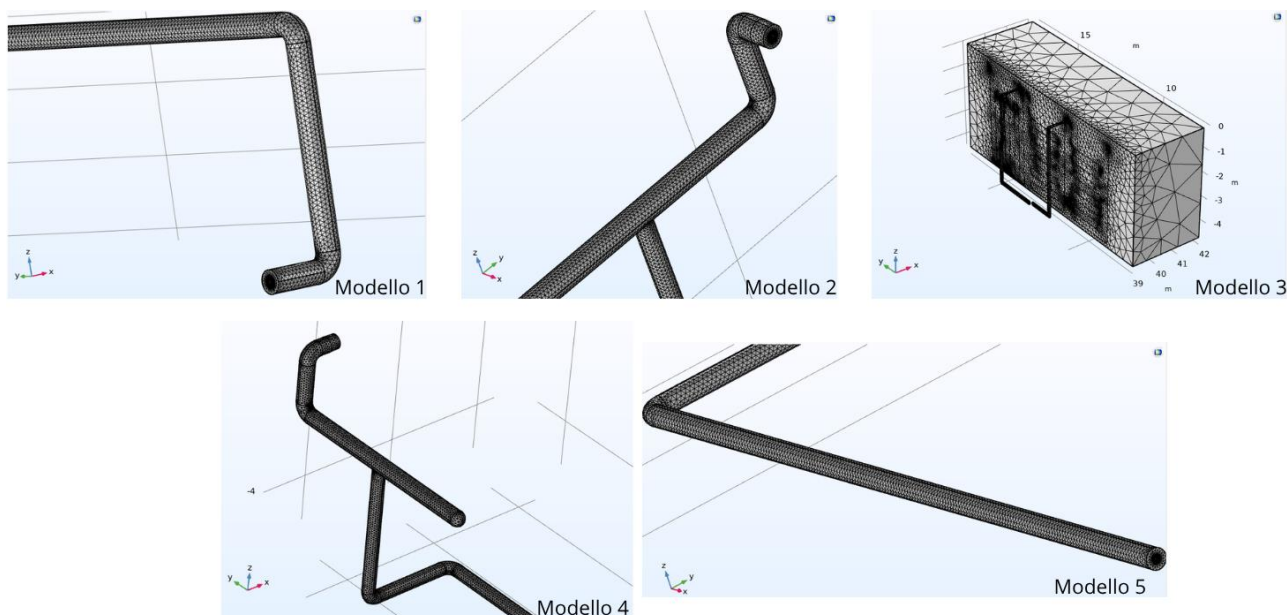


Figura 57: Rappresentazione mesh dei modelli.

A causa dell'elevato onere computazionale richiesto dalle simulazioni in transitorio, non è stato eseguito uno studio sistematico di *mesh independence study* o *grid convergence study*. Tuttavia, per garantire l'accuratezza dei risultati, si è optato per la generazione di una mesh "Molto fitta". Tale impostazione genera una griglia non strutturata con densità variabile: gli elementi risultano fortemente addensati in prossimità delle tubazioni (dove i gradienti termici sono più elevati) e progressivamente più radi verso i confini del terreno, ottimizzando così il compromesso tra precisione locale e tempi di calcolo.

3.6.2.5 Risultati

A conclusione della simulazione, la distribuzione del campo di temperatura ottenuta nel nodo *Risultati* è riportata in *Figura 58* per il mese di dicembre e in *Figura 59* per gennaio.

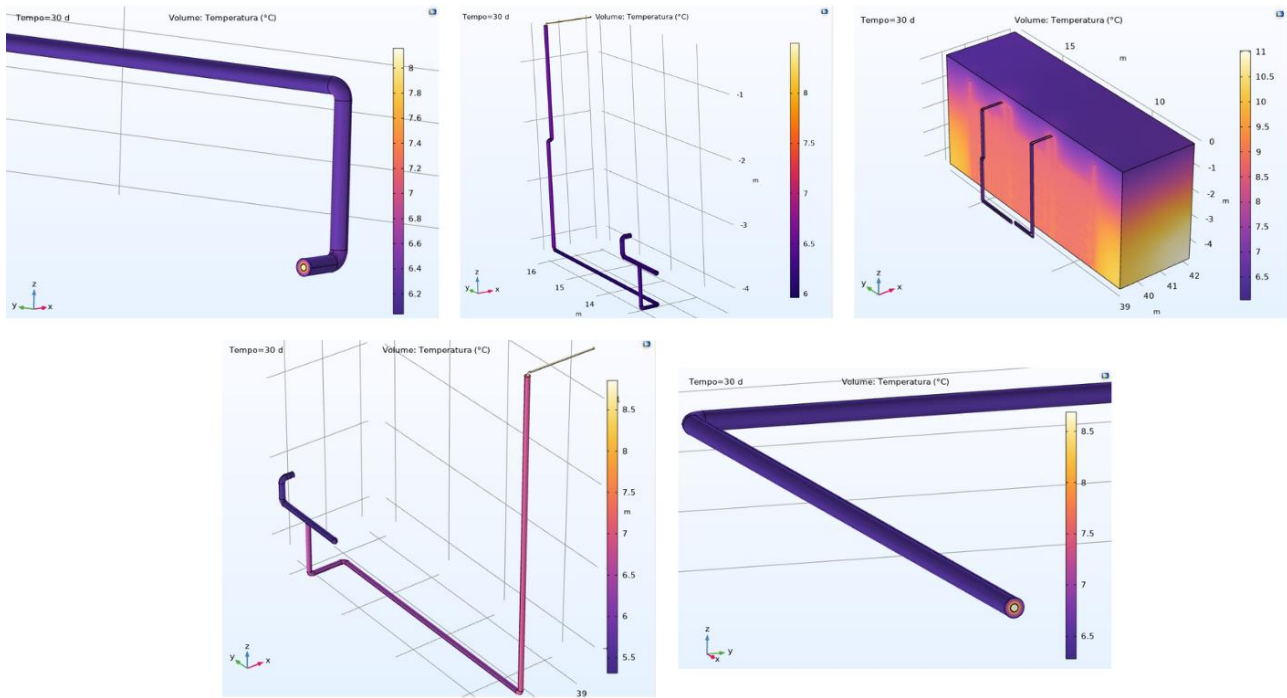


Figura 58: Campo di temperature (dicembre).

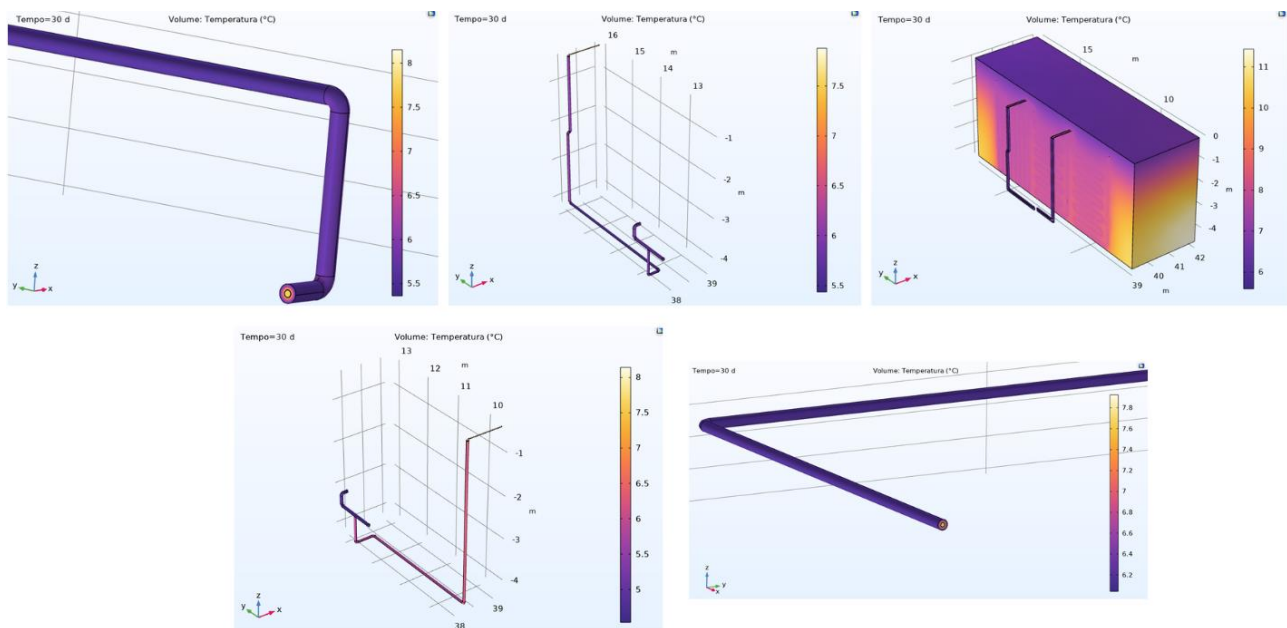


Figura 59: Campo di temperature (gennaio).

Inoltre, nella sezione *Valori Derivati* del medesimo nodo, è stato possibile estrarre, per ciascun modello, le grandezze fisiche di interesse, in particolare:

- i valori di Temperatura del fluido mediata sulla sezione di passaggio (*T media su superficie*)
- i valori di flusso termico normale alla superficie, ottenuti definendo un nodo di *Integrazione su superficie* e utilizzando la funzione *ht.ntflux*; tali valori (se positivi) rappresentano il flusso termico disperso dalla tubazione.

- i valori di densità e calore specifico del fluido nelle sezioni di ingresso e uscita di ogni modulo Geotherm-Skin, che sono stati mediati e utilizzati per calcolare il flusso termico scambiato con il terreno in ogni modulo.

3.7 Risultati caso base

I valori di temperatura estratti sono stati utilizzati per generare i grafici di *Figura 60* e *61*, al fine di analizzare l'evoluzione termica del fluido lungo l'intero circuito.

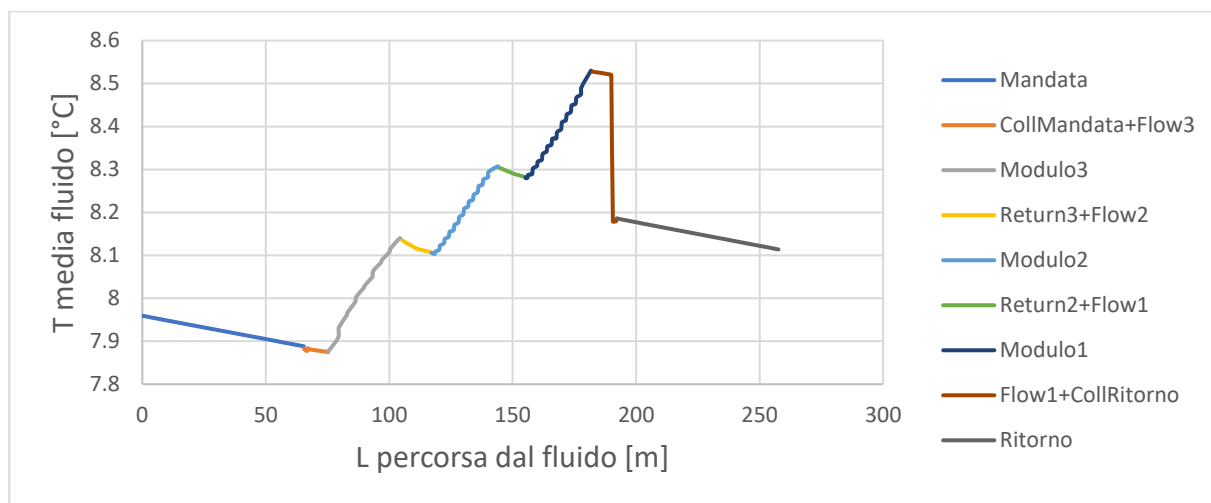


Figura 60: Variazione della T media del fluido lungo circuito primario (dicembre).

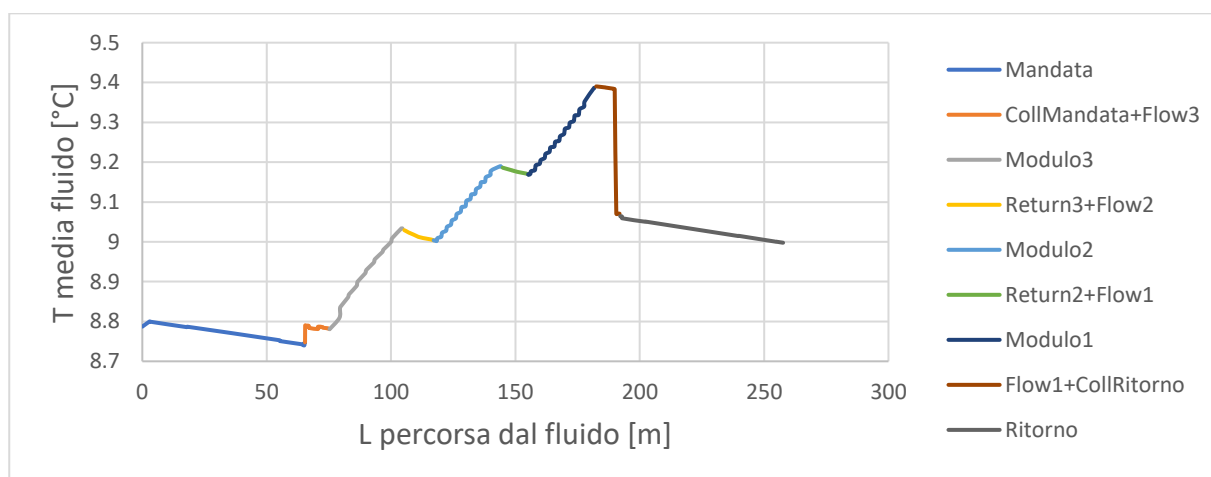


Figura 61: Variazione della T media del fluido lungo circuito primario (gennaio).

Il comportamento complessivo evidenzia un progressivo calo della temperatura lungo l'intera linea di distribuzione e un incremento termico in corrispondenza delle sonde geotermiche che, al netto delle perdite che si realizzano nei condotti di collegamento tra i vari moduli (tratti Return3+Flow2 e Return2+Flow1), consentono di elevare la temperatura del fluido di 0.65 °C a dicembre e di circa 0.61 °C a gennaio.

Tuttavia, all'uscita dai moduli, in corrispondenza dell'ingresso nel collettore di ritorno, si registra una sensibile riduzione della temperatura, pari a 0.34 °C a dicembre e a 0.31 °C a gennaio. Questo

fenomeno è dovuto al fatto che, nel collettore di ritorno, il fluido sperimenta un brusco e forte allargamento della sezione di passaggio a parità di portata volumetrica e ciò genera vortici, ricircoli locali e turbolenze che aumentano nettamente il coefficiente di scambio termico convettivo. Di conseguenza, si verifica un picco localizzato nella cessione di calore verso l'esterno, che causa il rapido calo di temperatura osservato.

Per quanto riguarda i flussi termici complessivamente scambiati con il terreno, i valori relativi ai mesi di dicembre e gennaio sono riportati in *Tab.17* e *18* e sono stati tramite calcolati tramite la relazione

$$\dot{Q}_{M_i} = Q\rho c_p(T_{out,M_i} - T_{in,M_i}) \quad (3.15)$$

dove ρ e c_p sono state valutate (per ogni step della simulazione) alla temperatura media tra ingresso e uscita dell' i -esimo modulo.

Dicembre				
	Q_M3 [W]	Q_M2 [W]	Q_M1 [W]	TOTALE [W]
0	135.59	145.70	122.44	403.73
1	391.26	315.74	289.04	996.05
2	313.75	244.21	246.40	804.36
3	166.15	220.06	231.93	618.14
4	230.15	216.28	230.90	677.33
5	259.96	219.17	235.65	714.77
6	216.23	242.25	259.11	717.60
7	306.83	265.34	282.41	854.58
8	377.57	289.79	307.73	975.09
9	398.81	318.77	339.17	1056.74
10	448.55	347.82	370.67	1167.04
11	558.52	365.60	392.30	1316.43
12	715.89	348.61	383.41	1447.91
13	543.84	331.64	374.47	1249.95
14	408.93	311.85	361.77	1082.55
15	381.30	283.34	336.86	1001.50
16	332.96	254.83	312.09	899.88
17	338.32	221.21	282.00	841.53
18	407.27	171.78	235.61	814.66
19	233.15	122.28	189.13	544.56
20	90.96	69.52	139.26	299.73
21	27.58	0.94	72.99	101.51
22	-120.53	-76.19	-2.02	-198.73
23	-251.72	-149.66	-75.26	-476.64
24	-421.24	-173.86	-106.83	-701.93
25	-248.74	-175.40	-120.05	-544.19
26	-234.87	-148.60	-107.06	-490.53
27	-352.83	-95.50	-63.06	-511.39
28	-133.41	-42.47	-19.14	-195.02
29	107.76	1.66	17.98	127.40
30	302.38	18.20	33.94	354.53
	5930.35	4464.94	5553.86	15949.15

Tabella 17: Flussi termici scambiati con il terreno (dicembre).

Gennaio				
	Q_M3 [W]	Q_M2 [W]	Q_M1 [W]	TOTALE [W]
0	130.24	86.39	115.94	332.57
1	213.88	190.05	186.45	590.38
2	-41.92	77.33	92.51	127.92
3	-216.83	63.60	76.61	-76.62
4	83.83	93.23	99.01	276.06
5	343.70	172.69	167.64	684.03
6	539.92	167.62	169.09	876.63
7	173.40	124.99	140.90	439.29
8	-66.48	75.87	98.27	107.67
9	-6.50	39.74	65.76	99.00
10	-68.64	72.26	91.77	95.38
11	33.23	103.32	118.49	255.05
12	214.77	135.89	145.72	496.38
13	265.95	170.04	179.80	615.79
14	299.70	204.26	213.88	717.85
15	345.09	234.70	245.05	824.84
16	378.57	245.44	261.36	885.37
17	369.43	256.25	277.50	903.18
18	399.56	261.14	288.09	948.79
19	424.60	235.29	268.45	928.34
20	324.85	209.29	248.74	782.88
21	265.73	179.48	224.54	669.75
22	249.95	128.74	176.61	555.31
23	133.72	78.06	128.68	340.46
24	-7.51	32.93	85.29	110.71
25	-110.64	30.62	78.28	-1.74
26	-18.70	50.77	90.12	122.19
27	192.43	87.30	116.40	396.13
28	348.89	101.09	126.66	576.64
29	289.16	113.50	137.48	540.14
30	162.88	121.51	146.00	430.39
	5646.26	4143.40	4861.10	14650.76

Tabella 18: Flussi termici scambiati con il terreno (gennaio).

I flussi termico dispersi mensilmente da ciascun tratto del circuito e il relativo contributo alle perdite complessive sono riportati in *Tabella 19*.

		Dicembre		Gennaio	
Sezione		Fx termico disperso in un mese [W]	Perdite %	Fx termico disperso in un mese [W]	Perdite %
Mandata		1627.02	38.61	1353.19	37.35
Collettore di Mandata + Flow 3		212.44	5.04	189.21	5.22
Geotherm-Skin	Moduli	0.00	0.00	0.00	0
	Return3+ Flow 2	272.65	6.47	236.64	6.53
	Return2+ Flow1	251.78	5.97	217.75	6.01
Return 1+ Collettore di ritorno		201.68	4.79	182.58	5.04
Ritorno		1648.53	39.12	1443.49	39.84
TOTALE		4214.10	100	3622.86	100

Tabella 19: Flussi termici mensilmente dispersi.

Si osserva come le perdite maggiori si concentrino, in percentuale, lungo i condotti di mandata e di ritorno. In particolare, la tubazione di ritorno registra le perdite più elevate: questo comportamento è riconducibile al maggiore gradiente termico tra il fluido (uscente dalle sonde) e l'aria esterna.

Infine, è stata calcolata la potenza termica netta media scambiata dal sistema al condensatore, al netto delle dispersioni introdotte dalla rete di distribuzione, a partire dalle temperature medie di ingresso nella tubazione di mandata $T_{in,mand,m}$ e di uscita da quella di ritorno $T_{out,rit,m}$:

$$\dot{Q}_{netta,m} = Q\rho c_p(T_{out,rit,m} - T_{in,mand,m}) \quad (3.16)$$

con ρ e c_p valutati alla temperatura media tra i due valori.

A partire da questo dato è stato quindi calcolato il COP ipotizzando un'efficienza di scambio unitaria all'evaporatore, sapendo che la potenza elettrica assorbita dalla pompa di calore è pari a 660 W nel modello F1155-6.

$$COP = \frac{\dot{Q}_{Cond}}{P_{el,tot}} = \frac{\dot{Q}_{netta,m} + P_{el,tot}}{P_{el,tot}} \quad (3.17)$$

I risultati complessivi (riportati in *Tab. 20*) mostrano per il mese di gennaio un incremento delle prestazioni del sistema rispetto al mese di dicembre, con potenza netta scambiata maggiore del 62,20% e un incremento del COP pari al 7,74%.

	Dicembre	Gennaio
$\dot{Q}_{netta,m}$ [W]	93.76	152.09
Q [m ³ /s]	0.00018056	
ρ [kg/m ³]	1028.06	1027.73
c_p [J/kg°C]	3890.12	3892.23
T _{out, ritorno} [°C]	8.11	9
T _{in, mandata} [°C]	7.98	8.79
ΔT	0.13	0.21
$P_{el,tot}$ [W]	660	
COP	1.14	1.23

Tabella 20: COP e valori di potenza netta mediamente prodotta nei mesi di dicembre e gennaio.

Capitolo 4

Ottimizzazione delle prestazioni di impianto

4.1 Workflow

In questo capitolo vengono proposte alcune soluzioni di retrofit volte a migliorare le prestazioni dell'impianto in oggetto. L'analisi è stata condotta a parità di condizioni al contorno, mantenendo invariate le temperature dell'aria esterna T_{ext} e di mandata del fluido termovettore T_{inlet} , relative ai mesi di dicembre e gennaio. Partendo da questo, al modello COMSOL (descritto in precedenza) sono stati aggiunti due nuovi nodi nella sezione *Materiali* associati al nuovo isolante e al nuovo materiale scelto per le sonde geotermiche; una volta le proprietà ai relativi domini, si è passati all'esecuzione delle simulazioni per ricavare le grandezze fisiche di interesse.

Sono stati quindi valutati gli effetti sulla potenza netta scambiata, sulle dispersioni termiche nella rete di distribuzione e sulla potenza scambiata con il terreno, analizzando l'impatto finale sul COP. Lo studio ha presa in esame prima i singoli interventi e, successivamente, la combinazione.

4.2 Sostituzione isolante

L'obiettivo della sostituzione dell'isolante è ridurre le dispersioni termiche lungo l'intera rete di distribuzione. Tale operazione è fondamentale per limitare il calo di temperatura del fluido termovettore sia nel tragitto precedente all'ingresso nelle sonde, sia (e soprattutto) nel percorso di ritorno dalle sonde alla macchina, quando il fluido presenta la temperatura più alta.

4.2.1 Caratteristiche del materiale isolante

Il materiale selezionato per tale scopo è il *Thermablok Aerogel A2*, commercializzato dall'azienda *Thermablok Aerogel Ltd*; un isolante termico avanzato ad altissime prestazioni, costituito da un materassino flessibile in aerogel di silice amorfa rinforzato con fibre di vetro (*Fig.62*).

Grazie alle sue notevoli proprietà termofisiche (tra cui una conduttività termica estremamente bassa pari a $0,016 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) e all'elevata flessibilità, questo materiale viene impiegato per il rivestimento protettivo delle tubazioni (*pipe lagging*), l'isolamento di solai e pavimentazioni e la correzione di ponti termici in corrispondenza delle spalle di porte e finestre (*window and door reveals*).



Figura 62: Isolante Thermablok Aerogel A2.

Le proprietà termofisiche del nuovo isolante implementate nel software, sono riportate in Tab. 21.

Nuovo materiale isolante	
Materiale	Aerogel di silice amorfa rinforzata con fibre di vetro
Produttore; modello	Thermablok Aerogel Ltd; Aerogel A2
Densità [kg/m^3]	200
Conducibilità termica [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]	0,016
Calore specifico a pressione costante [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]	1000

Tabella 21: Proprietà termofisiche isolante Thermablok Aerogel A2 ²².

4.2.2 Risultati ottenuti (sostituzione isolante)

Le grandezze d'interesse e i profili di temperatura risultanti dalle simulazioni con il nuovo isolante, sono riportate rispettivamente in Tabella 22-23 e in Figura 63-64.

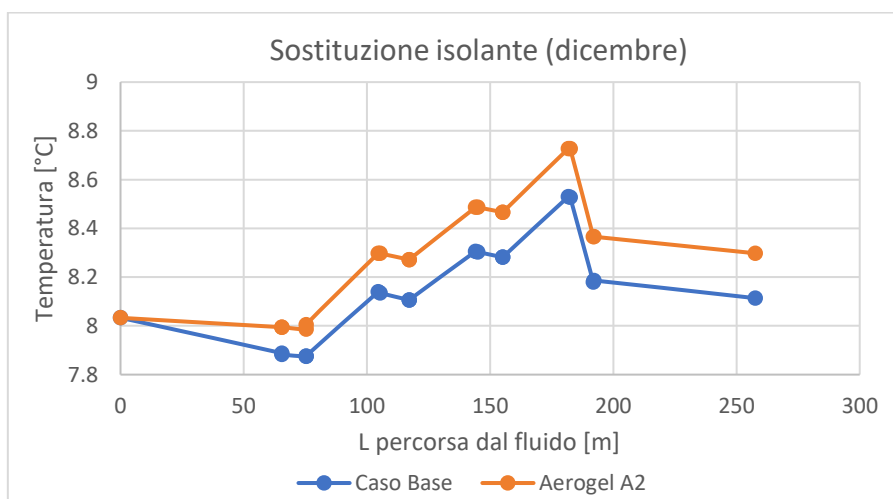


Figura 63: Profili di temperatura; caso base vs sostituzione nuovo isolante (dicembre).

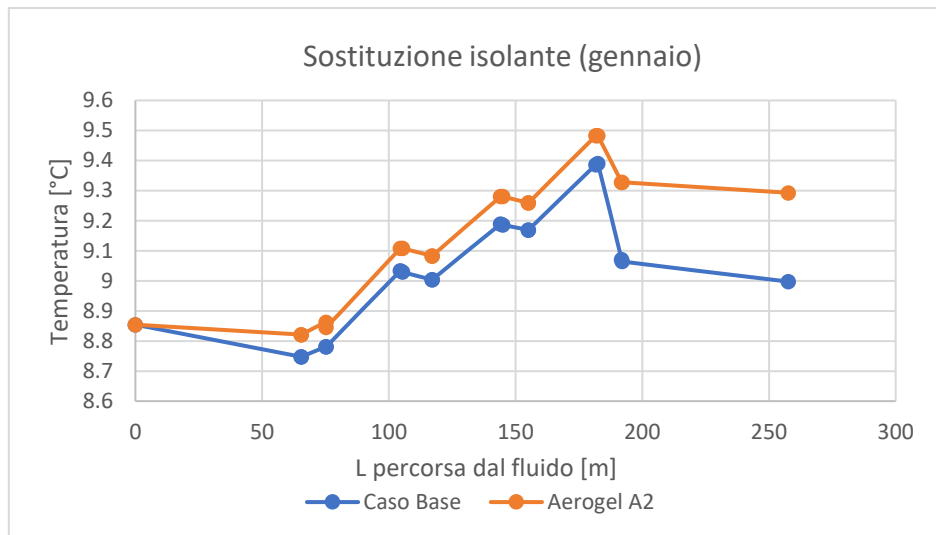


Figura 64: Profili di temperatura; caso base vs sostituzione nuovo isolante (gennaio).

Sezione		Sostituzione isolante					
		Dicembre			Gennaio		
		Flusso disperso in un mese [W]	Flusso scambiato in un mese [W]	Perdite per sezione %	Flusso disperso in un mese [W]	Flusso scambiato in un mese [W]	Perdite per sezione %
Mandata		1035.27	0	29.63	809.58	0	27.26
Collettore di mandata+Flow 3		148.52	0	4.25	130.82	0	4.40
Geotherm Skin	Modulo 3	0.00	6963.66	0.00	0	5502.64	0
	Return3+Flow2	208.15	0	5.96	188.29	0	6.34
	Modulo 2	0.00	4808.14	0.00	0	4417.23	0
	Return2+Flow1	194.87	0.00	5.58	176.64	0	5.96
	Modulo1	0.00	5843.46	0.00	0	4999.42	0
Return 1+ Collettore di ritorno		150.51	0.00	4.31	118.55	0	3.99
Ritorno		1756.58	0.00	50.28	1546.03	0	52.06
TOTALE		3493.90	17615.26	100.00	2969.92	14919.29	100
Totale (caso base)		4214.10	15949.15		3622.86	14650.76	
Variazione %		-17.09	10.45		-18.02	1.83	

Tabella 22: Sostituzione isolante; flussi termici dispersi e scambiati.

	Sostituzione isolante	
	Dicembre	Gennaio
Potenza termica netta media [W]	226.69	365.40
Potenza termica netta media (caso base) [W]	93.76	152.09
$\Delta \dot{Q}_{netta,m}$ [W]	132.93	213.31
Variazione $\dot{Q}_{netta,m}$ [%]	141.77	140.26
Potenza termica scambiata con il terreno, media [W]	568.23	481.27
Potenza termica scambiata con il terreno, media (caso base) [W]	514.49	472.61
Tout, ritorno [°C]	8.30	9.30
Tout, ritorno (caso base) [°C]	8.11	9.00
Potenza elettrica totale [W]	660	
COP	1.34	1.55
COP (caso base)	1.14	1.23
Δ COP	0.20	0.32
Variazione COP [%]	17.64	26.27

Tabella 23: Sostituzione isolante; COP e temperature di ritorno macchina.

Dalle tabelle e dai grafici, si osserva (rispetto al caso base):

- Una riduzione complessiva del flusso termico disperso; del 17,09% nel mese di dicembre e del 18 % nel mese di gennaio.
- Una temperatura in ingresso macchina incrementata del 2,27% (+0,18 °C) nel mese di dicembre e del 3,28% (+0,30 °C) nel mese di gennaio.
- Un incremento della potenza termica mensilmente scambiata con il terreno del 10,45% (+1,6 kW) a dicembre e dell'1,83 % (+0,268 kW) a gennaio.
- Un incremento della potenza termica netta mensile del 141,77 % (+133 W) a dicembre e del 140,26 % (+213,3 W) a gennaio.
- Un incremento del COP del 17,64 % (+0.20) a dicembre e del 26,27% (+0.32) a gennaio.

Si rileva, infine, un incremento delle dispersioni nel condotto di ritorno, rispetto al caso base, in entrambi i mesi analizzati (+6.55% a dicembre e +7.10% a gennaio). Tale fenomeno è riconducibile alla maggiore temperatura di uscita del fluido dalle sonde geotermiche; tale incremento determina un aumento del ΔT tra il fluido e l'ambiente esterno, traducendosi in perdite mensili complessivamente maggiori.

4.3 Sostituzione materiale sonde geotermiche

La ricerca di un materiale alternativo al PE-Xa, nasce dall'esigenza di massimizzare lo scambio termico con il terreno. Infatti, il PE-Xa, pur avendo una conducibilità termica tipica di un materiale isolante ($\leq 0,065 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ secondo la UNI EN ISO 10456), viene tradizionalmente e diffusamente utilizzato per via della sua:

- elevata flessibilità, che semplifica l'installazione sul campo;
- elasticità intrinseca, che consente alle tubazioni di assecondare gli assestamenti del terreno durante la vita utile dell'impianto;
- elevata resistenza chimica e meccanica; il materiale infatti non corrode e resiste molto bene allo stress cracking in fase di posa.

Tuttavia, nell'ottica di voler massimizzare il flusso termico a fronte di una superficie di scambio ridotta rispetto ai sistemi tradizionali a bassa entalpia, si è optato per utilizzare un materiale metallico, caratterizzato da una conducibilità termica nettamente migliore. In particolare, la scelta è stata guidata dalla necessità di individuare un materiale non solo in grado di garantire un'elevata conducibilità termica, ma anche di assicurare una resistenza alla corrosione e chimica pari o superiore a quella del PE-Xa.

4.3.1 Caratteristiche del nuovo materiale utilizzato per le sonde

La scelta del materiale metallico è ricaduta sulla lega Alleima Sanicro[®] 35 (Fig. 65) [20], un materiale avanzato che unisce le proprietà tipiche di un acciaio inossidabile super-austenitico a quelle di una lega di nichel. Sul piano della resistenza chimica e alla corrosione, Sanicro[®] 35 garantisce l'idoneità all'installazione nel sottosuolo grazie a specifiche caratteristiche della sua composizione chimica:

- *Resistenza alla corrosione localizzata (Pitting e Crevice):* l'elevato contenuto di Cromo (27%), Molibdeno (6,5%) e Azoto (0,21%) conferisce alla lega un valore nominale di PREN (*Pitting Resistance Equivalent Number*) pari a circa 52, assicurand una protezione ottimale dalla vaiolatura in presenza di cloruri o ambienti salini come le acque di falda.
- *Resistenza alla tensocorrosione;*
- *Inerzia in ambienti acidi e basici:* la lega mostra tassi di corrosione estremamente bassi sia in acidi forti (come il cloridrico e il solforico), sia in soluzioni caustiche e alcaline, preservando l'integrità della sonda anche dall'azione delle miscele cementizie impiegate nel foro.

Dal punto di vista della *resistenza meccanica*, il materiale si rivela idoneo a sopportare le sollecitazioni del terreno senza subire deformazioni plastiche. Grazie a elevati valori di snervamento e trazione e a un modulo di elasticità pari a $190 \cdot 10^3 \text{ Mpa}$ a 20°C , questo materiale assicura che la sezione di passaggio del fluido rimanga invariata nel tempo, a fronte dei continui assestamenti del terreno.



Figura 65: Nuovo materiale per sonde Sanicro®35.

Le proprietà termofisiche di tale lega, implementate nel software, sono riportate in *Tabella 24*.

Nuovo materiale per sonde		
Materiale	Acciaio inossidabile super-austenitico	
Produttore; modello	Alleima; Sanicro ®35	
Densità [kg/m ³]	8100	
Conducibilità termica [W/(m·K)]	0 °C	9.5*
	20 °C	10
	100 °C	12
Calore specifico a pressione costante [J/(kg·K)]	0 °C	445**
	20 °C	450
	100 °C	470
*ottenuto interpolando linearmente tra 0-20°C, ipotizzando una pendenza del tratto pari al tratto interpolante i valori di k nell'intervallo 20-100 °C		
***ottenuto interpolando linearmente tra 0-20°C, ipotizzando una pendenza del tratto pari al tratto interpolante i valori di c_p nell'intervallo 20-100 °C		

Tabella 24: Proprietà termofisiche nuovo materiale sonde Sanicro®35.

4.3.2 Risultati ottenuti (sostituzione materiale sonde)

Le grandezze d'interesse e i profili di temperatura risultanti dalle simulazioni con il nuovo materiale, sono riportate rispettivamente in *Tabella 25-26* e in *Figura 66-67*.

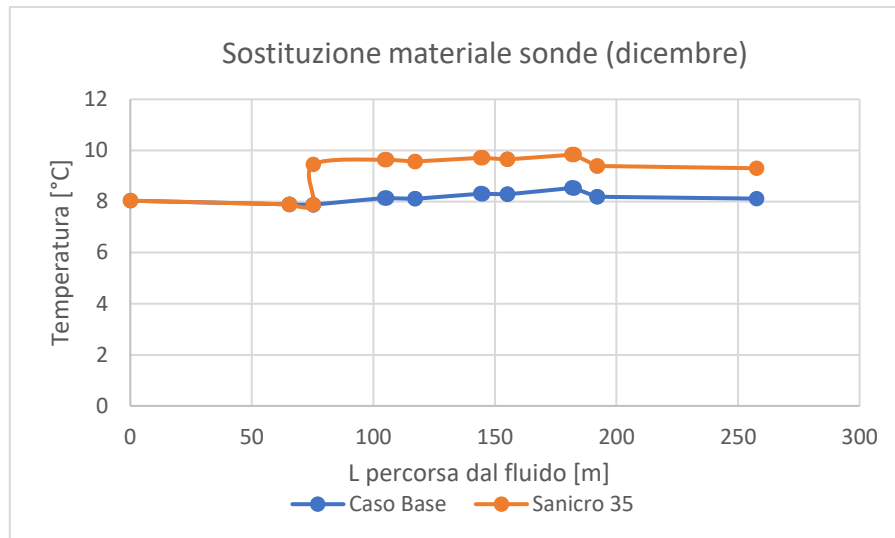


Figura 66: Profili di temperatura; caso base vs nuovo materiale sonde (dicembre).

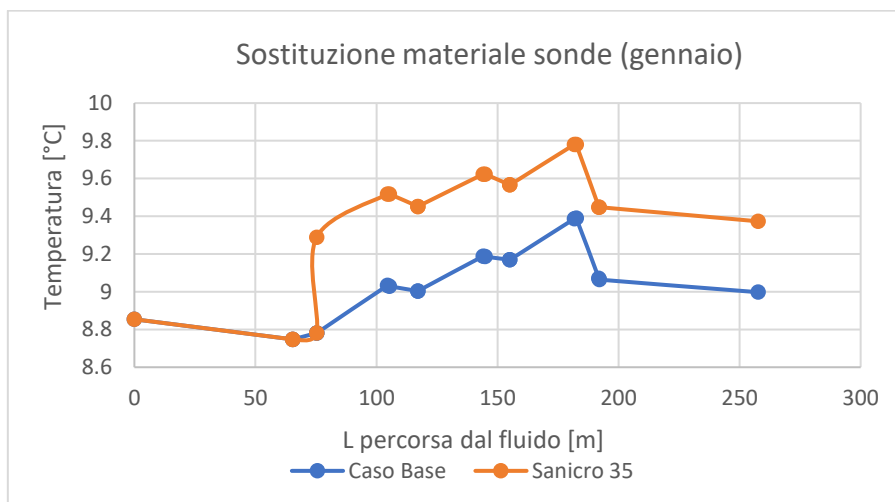


Figura 67: Profili di temperatura; caso base vs nuovo materiale sonde (gennaio).

Sezione		Sostituzione materiale sonde					
		Dicembre			Gennaio		
		Flusso disperso in un mese [W]	Flusso scambiato in un mese [W]	Perdite per sezione %	Flusso disperso in un mese [W]	Flusso scambiato in un mese [W]	Perdite per sezione %
Mandata		1627.02	0.00	32.94	1353.19	0	34.70
Collettore di mandata+Flow 3		212.44	0.00	4.30	189.21	0	4.85
Geotherm Skin	Modulo 3	0.00	39562.19	0.00	0	16485.83	0.00
	Return3+Flow2	38.54	0.00	7.70	286.80	0	7.35
	Modulo 2	0.00	3220.36	0.00	0	3837.16	0.00
	Return2+Flow1	340.69	0.00	6.90	258.46	0	6.63
	Modulo1	0.00	4165.53	0.00	0	4799.20	0.00
Return 1+ Collettore di ritorno		261.89	0.00	5.30	191.22	0	4.90
Ritorno		2116.91	0.00	42.86	1620.77	0	41.56
TOTALE		4939.48	46948.09	100.00	3899.66	25122.19	100.00
Totale (caso base)		4214.10	15949.15		3622.86	14650.76	
Variazione %		17.21	194.36		7.64	71.47	

Tabella 25: Sostituzione materiale sonde; flussi termici dispersi e scambiati.

	Sostituzione materiale sonde	
	Dicembre	Gennaio
Potenza termica netta media [W]	950.45	423.02
Potenza termica netta media (caso base) [W]	93.76	152.09
$\Delta \dot{Q}_{netta,m}$ [W]	856.69	270.93
Variazione $\dot{Q}_{netta,m}$ [%]	913.65	178.14
Potenza termica scambiata con il terreno, media [W]	1514.45	810.39
Potenza termica scambiata con il terreno, media (caso base) [W]	514.49	472.61
Tout, ritorno [°C]	9.30	9.38
Tout, ritorno (caso base) [°C]	8.11	9.00
Potenza elettrica totale [W]	660	
COP	2.44	1.64
COP (caso base)	1.14	1.23
Δ COP	1.30	0.41
Variazione COP [%]	17.64	26.27

Tabella 26: Sostituzione materiale sonde; COP e temperature di ritorno macchina.

Dalle tabelle e dai grafici, si osserva (rispetto al caso base):

- Un incremento complessivo del flusso termico disperso del 17,21 % a dicembre e del 7,64% per il mese di gennaio. Tale incremento si localizza a valle dei condotti di collegamento tra i moduli (tratti *Return3+Flow2* e *Return2+Flow1*) interessando il collettore di ritorno e il tratto compreso tra quest'ultimo e l'uscita del Modulo 1 (*Return1*) e la tubazione di ritorno. La maggiore dispersione è determinata dalle temperature di uscita dai moduli più elevate rispetto al caso base, dovute ad uno flusso termico maggiore scambiato tra il fluido e il terreno; di conseguenza, si crea un ΔT maggiore tra temperatura del fluido stesso e l'ambiente esterno.
- Una temperatura in ingresso macchina incrementata del 14,64% (+1,19 °C) nel mese di dicembre e del 4,18% (+0,38 °C) nel mese di gennaio.
- Un incremento della potenza termica mensilmente scambiata con il terreno del 194,36% (+31 kW circa) a dicembre e del 71,47 % (10,47 kW) a gennaio.
- Un incremento della potenza termica netta mensile del 913,65 % (+856,69 W) a dicembre e del 178,14 % (+270,93 W) a gennaio.
- Un incremento del COP del 113,65 % (+1.30) a dicembre e del 33,36% (+0.41) a gennaio.

4.4 Azione combinata sostituzione isolante+ sostituzione materiale sonde geotermiche

Infine, sono state condotte altre simulazioni per quantificare i benefici derivanti dall'implementazione simultanea delle due soluzioni descritte.

Le grandezze d'interesse e i profili di temperatura risultanti dalle simulazioni, condotte integrando la nuova sonda metallica e il nuovo isolante, sono riportate rispettivamente in *Tabella 27-28* e in *Figura 68-69*.

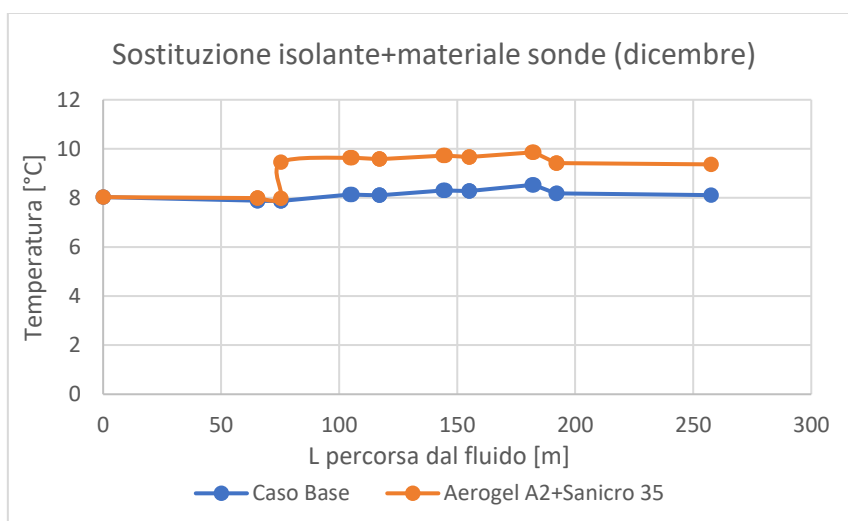


Figura 68: Profili di temperatura; caso base vs nuovo isolante e materiale sonde (dicembre).

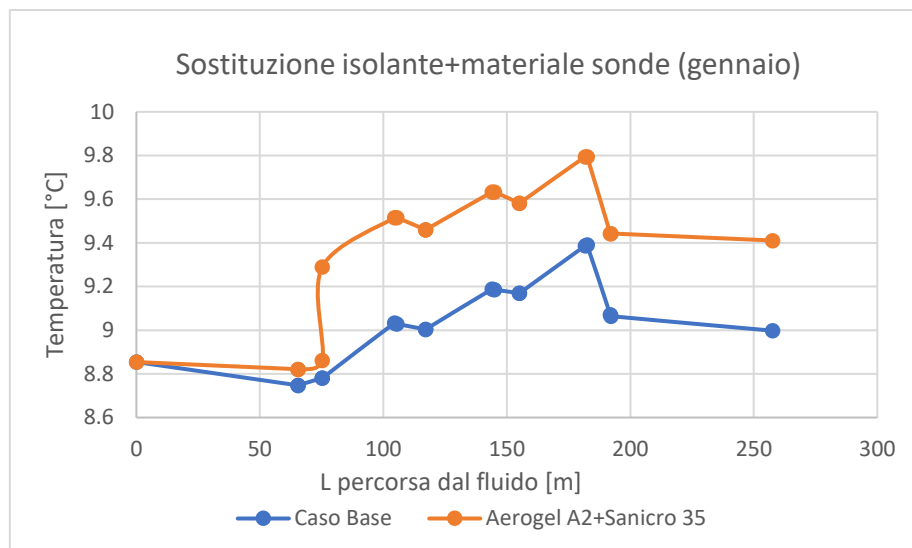


Figura 69: Profili di temperatura; caso base vs nuovo isolante e materiale sonde (gennaio).

Sezione		Sostituzione isolante + materiale sonde					
		Dicembre			Gennaio		
		Flusso disperso in un mese [W]	Flusso scambiato in un mese [W]	Perdite per sezione %	Flusso disperso in un mese [W]	Flusso scambiato in un mese [W]	Perdite per sezione %
Mandata		1035.27	0.00	31.59	809.58	0.00	33.52
Collettore di mandata+Flow 3		148.52	0.00	4.53	130.82	0.00	5.42
Geotherm Skin	Modulo 3	0.00	37067.40	0.00	0.00	14634.68	0.00
	Return3+Flow2	267.64	0.00	8.17	195.82	0.00	8.11
	Modulo 2	0.00	3239.13	0.00	0.00	3887.97	0.00
	Return2+Flow1	244.88	0.00	7.47	180.96	0.00	7.49
	Modulo1	0.00	4175.06	0.00	0.00	4768.07	0.00
Return 1+ Collettore di ritorno		190.08	0.00	5.80	143.49	0.00	5.94
Ritorno		1391.05	0.00	42.44	954.37	0.00	39.52
TOTALE		3277.44	44481.59	100.00	2415.04	23290.71	100.00
Totale (caso base)		4214.10	15949.15		3622.86	14650.76	
Variazione %		-22.23	178.90		-33.34	58.97	

Tabella 27: Sostituzione isolante e materiale sonde; flussi termici dispersi e scambiati.

	Sostituzione isolante + materiale sonde	
	Dicembre	Gennaio
Potenza termica netta media [W]	998.37	449.92
Potenza termica netta media (caso base) [W]	93.76	152.09
$\Delta \dot{Q}_{netta,m}$ [W]	904.6	297.83
Variazione $\dot{Q}_{netta,m}$ [%]	964.76	195.83
Potenza termica scambiata con il terreno, media [W]	1434.89	751.31
Potenza termica scambiata con il terreno, media (caso base) [W]	514.49	472.61
Tout, ritorno [°C]	9.36	9.41
Tout, ritorno (caso base) [°C]	8.11	9.00
Potenza elettrica totale [W]	660	
COP	2.51	1.68
COP (caso base)	1.14	1.23
Δ COP	1.37	0.45
Variazione COP [%]	120.01	36.67

Tabella 28: Sostituzione isolante e materiale sonde; COP e temperature di ritorno macchina.

Si osserva, in definitiva (rispetto al caso base):

- Una riduzione complessiva del flusso termico disperso; del 22,23 % nel mese di dicembre e del 33.34 % nel mese di gennaio.
- Una temperatura in ingresso macchina incrementata del 15,45 % (+1,25 °C) nel mese di dicembre e del 4,59 % (+0,41 °C) nel mese di gennaio.
- Un incremento della potenza termica mensilmente scambiata con il terreno del 178,90 % (+28,53 kW) a dicembre e dell'58,97 % (+8,64 kW) a gennaio.
- Un incremento della potenza termica netta mensile del 964,76 % (+904,6 W) a dicembre e del 195,83 % (+297,8 W) a gennaio.
- Un incremento del COP del 120,01 % (+1,37) a dicembre e del 36,67% (+0.45) a gennaio.

4.4.1 Risultati processo di ottimizzazione

Analizzando i risultati relativi al COP, alla potenza dispersa e alla potenza scambiata con il terreno sintetizzati in *Tabella 29*, è possibile fare le seguenti considerazioni:

	Dicembre			Gennaio		
	Sostituzione isolante	Sostituzione materiale sonde	Sostituzione isolante+ materiale sonde	Sostituzione isolante	Sostituzione materiale sonde	Sostituzione isolante+ materiale sonde
Flusso termico scambiato in un mese [W]	17615.26	46948.09	44481.59	14919.29	25122.19	23290.71
Flusso termico scambiato in un mese [W] (caso base)	15949.15			14650.76		
Flusso termico disperso in un mese [W]	3493.90	4939.48	3277.44	2969.92	3899.66	2415.04
Flusso termico disperso in un mese [W] (caso base)	4214.10			3622.86		
Potenza termica netta media [W]	226.69	950.45	998.37	365.40	423.02	449.92
Potenza termica netta media [W] (caso base)	93.76			152.09		
COP	1.34	2.44	2.51	1.55	1.64	1.68
COP (caso base)	1.14			1.23		

Tabella 29: Risultati del processo di ottimizzazione.

- Ogni intervento di retrofit consente complessivamente di migliorare tutte le grandezze di interesse e, in generale, le prestazioni del sistema.
- L'intervento di retrofit che consente di massimizzare le prestazioni della pompa di calore a parità di condizioni al contorno, è quello relativo alla sostituzione del materiale delle sonde, che porta ad un incremento maggiore del COP e della potenza scambiata con il terreno, rispetto allo stato di fatto del sistema e alla sola sostituzione dell'isolante.
- Sebbene la combinazione di entrambe le azioni di retrofit fornisca i risultati migliori, sul COP tale incremento risulta marginale se confrontato con la sola sostituzione del materiale delle sonde (+2.98 % per il mese di dicembre e +2.48% per il mese di gennaio) il che richiederebbe un'analisi costi benefici, che giustifichi o meno la realizzazione di entrambi gli interventi.

4.5 Analisi di sensibilità

In questo paragrafo è stata affrontata un'analisi di sensibilità mirata a quantificare l'impatto che la portata volumetrica del fluido termovettore (ossia un parametro operativo dell'impianto) e la conducibilità termica della fase solida del terreno (indicativo delle proprietà fisiche del sito) esercitano sulle prestazioni termiche ed energetiche dell'impianto. L'indagine è stata impostata prendendo come riferimento lo stato di fatto dell'impianto, escludendo interventi di retrofit strutturale, con l'obiettivo di isolare valutare la risposta del sistema applicando un incremento percentuale predefinito a ciascun parametro del 10%. Nei paragrafi che seguono vengono presentati i risultati ottenuti da tali simulazioni.

4.5.1 Incremento della portata volumetrica

I risultati ottenuti incrementando del 10 % la portata volumetrica del fluido termovettore, portandola da un valore $Q = 1,8056 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, a un valore finale $Q' = 1,9862 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, sono sintetizzati e riportati in *Tabella 30*.

	Dicembre				Gennaio			
	$\dot{Q}_{netta,tot}$ [W]	COP	$\dot{Q}_{gr,tot}$ [W]	$\dot{Q}_{disp}$ [W]	$\dot{Q}_{netta,tot}$ [W]	COP	$\dot{Q}_{gr,tot}$ [W]	$\dot{Q}_{disp}$ [W]
$Q \text{ [m}^3/\text{s]}$	93.76	1.14	15949.15	4214.10	152.09	1.23	14650.76	3622.86
$Q' \text{ [m}^3/\text{s]}$	170.74	1.26	18227.73	4212.21	230.48	1.35	15845.65	3668.93
Δ	76.98	0.12	2278.58	-1.89	78.39	0.12	1194.89	46.06
Variazione %	82.10	10.21	14.29	-0.04	51.54	9.65	8.16	1.27

Tabella 30: Risultati analisi di sensibilità; incremento della portata volumetrica.

Dalla tabella si osserva, in entrambi i mesi, un incremento della potenza netta scambiata all'evaporatore, della potenza scambiata nei moduli e del COP, riconducibile alla maggiore portata elaborata dall'impianto. Per quanto riguarda la potenza termica dispersa, questa non ha subito variazioni significative; il che suggerirebbe un impatto non significativo della portata volumetrica sulle dispersioni (a differenza di quanto è stato riscontrato, invece, in seguito alla sostituzione dell'isolante).

4.5.2 Incremento della conducibilità termica del terreno

I risultati ottenuti incrementando del 10 % la conducibilità termica della fase solida, portandola da un valore $k_{gr} = 2,7 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ a un valore pari a $k'_{gr} = 2,97 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, sono sintetizzati in *Tabella 31*.

	Dicembre				Gennaio			
	$\dot{Q}_{netta,tot}$ [W]	COP	$\dot{Q}_{gr,tot}$ [W]	$\dot{Q}_{disp}$ [W]	$\dot{Q}_{netta,tot}$ [W]	COP	$\dot{Q}_{gr,tot}$ [W]	$\dot{Q}_{disp}$ [W]
k_{gr} [W/(mK)]	93.76	1.14	15949.15	4214.10	152.09	1.23	14650.76	3622.86
k'_{gr} [W/(mK)]	161.88	1.25	18327.13	4277.10	167.42	1.25	14994.65	3614.41
Δ	68.11	0.10	2377.97	63.00	15.33	0.02	343.88	-8.45
Variazione %	72.64	9.04	14.91	1.50	10.08	1.89	2.35	-0.23

Tabella 31: Risultati analisi di sensibilità; incremento conducibilità termica fase solida terreno.

Dalla tabella si osserva, in entrambi i mesi, un incremento della potenza netta scambiata all'evaporatore, della potenza scambiata nei moduli e del COP, riconducibile alla minore resistenza opposta dal terreno allo scambio termico. Anche in questo scenario, un incremento della conducibilità termica del terreno, non sembra esercitare alcun impatto sulle dispersioni termiche, che si attestano pressoché su valori analoghi a quelli del caso base.

4.6 Conclusioni

Il presente lavoro di tesi ha avuto come obiettivo la caratterizzazione del funzionamento dell'impianto geotermico basato sul prototipo GeothermSkin®, effettuata attraverso lo sviluppo di un modello fisico in ambiente COMSOL Multiphysics. La diffusione di questa tecnologia rappresenterebbe un'importante opportunità per lo sfruttamento della risorsa geotermica anche in contesti caratterizzati da spazi notevolmente ridotti, dove l'installazione dei sistemi tradizionali risulterebbe impossibile. Ciononostante, la configurazione attuale presenta alcune criticità che ne precludono un utilizzo continuativo e profittevole: in determinate condizioni infatti, l'esercizio del sistema risulta energeticamente non conveniente, sia a causa dell'insufficiente scambio termico nelle sonde (qualora la temperatura del fluido sia inferiore a quella del suolo), sia per via delle rilevanti dispersioni della quota parte di calore accumulato lungo la rete di distribuzione.

Lo studio si è quindi focalizzato sull'individuazione di soluzioni volte a migliorarne le prestazioni in condizioni operative sfavorevoli, ossia in presenza di rigide temperature dell'aria esterna, di un esiguo gradiente termico del suolo (fortemente influenzato dal clima alle profondità considerate) e di una minima differenza di temperatura tra quest'ultimo e il fluido in ingresso alle sonde, allo scopo di aumentare i tempi operativi dell'impianto.

Quindi, per renderne vantaggioso l'utilizzo, anche in tali scenari, nelle simulazioni è stata introdotta l'ipotesi che la temperatura superficiale del terreno fosse superiore di 3 °C rispetto a quella in ingresso alle sonde. Si è inoltre adottato un gradiente geotermico pari a $G = 0,03 \text{ °C/m}$, valore che determina un incremento termico contenuto alla massima profondità raggiunta dalle sonde, pari a 0,135 °C rispetto alla sua temperatura in superficie.

Inoltre (sebbene nel modello sia stata considerata la convezione naturale), si è scelto di trascurare l'irraggiamento solare, al fine di adottare un approccio conservativo. Quest'ultima ipotesi, pur escludendo un apporto fondamentale per il riscaldamento e l'accumulo termico nel sottosuolo, ha permesso di non "viziare" i risultati della simulazione da contributi gratuiti. In questo modo è stato possibile valutare, a parità di temperature del terreno e del fluido in ingresso alle sonde, le prestazioni del materiale alternativo per le sonde analizzato nel paragrafo 4.3.

I risultati ottenuti rispecchiano le condizioni operative e le caratteristiche intrinseche del sistema in esame, evidenziando come l'impianto benefici in modo evidente della sostituzione del materiale delle sonde. È quindi lecito ritenere che (per questi sistemi a bassissima entalpia) l'installazione di sonde realizzate in materiale conduttivo possa condurre a un significativo miglioramento dell'efficienza complessiva.

Infatti, sebbene l'adozione di un materiale metallico non sia usuale in ambito geotermico, questa opzione ha garantito i miglioramenti più significativi. Il riscontro è evidente soprattutto nel mese di dicembre (caratterizzato da temperature esterne mediamente più rigide rispetto a gennaio), in cui il COP ha raggiunto un valore di 2,44 rispetto all'1,14 del caso base, registrando un incremento del 113,65% mentre, nel mese di gennaio, si è passati da un COP di 1,23 a 1,64, con un aumento del 33,36%. Anche lo scambio termico con il terreno ha registrato un netto incremento, passando da una potenza termica totale scambiata nel mese di dicembre di circa 15,95 kW (caso base) a 46,95 kW (+194,36%), mentre nel mese di gennaio si è passati da 14,65 kW (caso base) a 25,12 kW (+71,47%).

Questa soluzione consente pertanto di massimizzare lo scambio termico a parità di superficie di scambio disponibile. Infine, l'implementazione del nuovo isolante ha prodotto l'effetto desiderato di contenere le rilevanti perdite termiche lungo la rete di distribuzione, riducendo il calo di temperatura ΔT che il fluido sperimenta nei diversi condotti, in particolar modo nella tubazione di ritorno verso la macchina. Questo secondo intervento di efficientamento si rivela comunque vantaggioso qualora non fosse praticabile il retrofit sulle sonde, il quale richiederebbe il rifacimento dello scavo. Di conseguenza, l'impiego del materiale metallico potrebbe essere una soluzione più indicata per l'installazione di future nuove unità.

Bibliografia

- [1] Banks D., *An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling*, Chichester, Wiley-Blackwell, 2012.
- [2] Baralis M., *Optimisation of geothermal resources in urban areas*, Tesi di Dottorato, Politecnico di Torino, Relatori: Barla M., 2021.
- [3] Bergman T. L., Lavine A. S., Incropera F. P., DeWitt D. P., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Seventh Edition*, Hoboken, John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- [4] Bucci A., Barbero D., Lasagna M., Forno M. G., De Luca D. A., *Shallow groundwater temperature in the Turin area (NW Italy): vertical distribution and anthropogenic effects*, Environmental Earth Sciences, 76(5), 1–14, 2017.
- [5] Caleffi M., Guidetti F., *Idraulica 33: Le pompe di calore*, Fontaneto d'Agogna, Caleffi S.p.A., 2007.
- [6] Casasso A., Sethi R., *Tecnologia e potenzialità dei sistemi geotermici a bassa entalpia*, Geingegneria Ambientale e Mineraria, Anno L, n. 1, 13-22, 2013.
- [7] COMSOL, *Heat Transfer Module User Guide, version 5.4*, pdf.
- [8] Di Prima P., Santovito M., Papurello D., *CFD Analysis of a Latent Thermal Storage System (PCM) for Integration with an Air-Water Heat Pump*, International Journal of Energy Research, 2024, 1-12, 2024. [2024:(2024), pp. 1-12. 10.1155/2024/6632582]
- [9] DiPippo R., *Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact*, Oxford, Elsevier, 2012.
- [10] Doninelli M., *Le reti di distribuzione, Quaderni Caleffi*, Fontaneto d'Agogna, Caleffi S.p.A., 1993.
- [11] Foglio_tecnico_prestabo.pdf.
- [12] GeologiInfo_Sistemi-Geotermici-a-Bassa-Temperatura.pdf.
- [13] GeothermSkin, *Prototipo di parete energetica*, 2023.
- [14] Hochstein M. P., *Classification of Geothermal Resources*, Auckland, Geothermal Institute (University of Auckland), 1990.
- [15] Impianti a pompe di calore geotermiche, Caleffi, Fontaneto d'Agogna, Caleffi S.p.A., 2020. [giugno 2020]
- [16] Kavanaugh S., Rafferty K., *Geothermal Heating and Cooling: Design of Ground-Source Heat Pump Systems*, Atlanta, ASHRAE, 2014.
- [17] Masoero M. C., *Progettazione Di Impianti Termotecnici*, Corso Di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica e Nucleare.

- [18] Menegazzo D., Lombardo G., Bobbo S., De Carli M., Fedele L., *State of the Art, Perspective and Obstacles of Ground-Source Heat Pump Technology in the European Building Sector: A Review*, Energies, 15, 2685, 2022.
- [19] Nibe F1155 Service Manual.pdf.
- [20] Sanicro 35, Alleima.pdf.
- [21] Takashima I., Yasukawa K., Yasukawa Y., Uchida Y., Yoshioka M., Won-In K., *A geothermal heat pump system in Bangkok, Thailand*, 2011.
- [22] Thermablok-Aerogel-A2-10mm-TC16-Insulation-Blanket-TDS-MSDS.
- [23] Tomasoni M., Guidetti F., *Idraulica 61: Gli impianti a pompa di calore aria-acqua*, Fontaneto d'Agogna, Caleffi S.p.A., 2021.
- [24] Trocellen Sleeves_2024_eng.pdf.

Sitografia

- [25] <https://insulation.trocellen.com/applications/hvac-insulation/trocellen-class/>
- [26] https://www.ar-therm.com/images/prodotti/sistemi-radianti/tubazioni/tubo-pe-xa/scheda-tecnica-tubo-pe-xa_26799048.pdf
- [27] <https://www.bgs.ac.uk/>
- [28] https://www.energycenter.polito.it/chi_siamo
- [29] <https://www.rehau.com/downloads/357396/ti-sistemi-radianti-parte-1-tubazioni-e-sistemi-di-posa.pdf>
- [30] www.unionegeotermica.it
- [31] www.viessmannitalia.it
- [32] <https://www.sabiana.it/it/products/carisma-crc>