



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in ingegneria meccanica

MODELLAZIONE E SIMULAZIONE DI POMPE DI CALORE A CAPACITÀ VARIABILE

MODELING AND SIMULATION OF VARIABLE CAPACITY HEAT PUMPS

Relatore: Chiar.ma

Prof. **Alessia Arteconi**

Tesi di Laurea di:

Michele Casci Ceccacci

Correlatore:

Ing. **Alice Mugnini**

A.A. 2020/2021

Sommario

Capitolo 1	4
1.1 Introduzione	4
Capitolo 2	6
2.1 Fonti di approvvigionamento	6
2.2 Tipologie di pompe di calore	7
2.2.1 Pompa di calore salina-acqua (geotermiche)	7
2.2.2 Pompa di calore acqua-acqua	8
2.2.3 Pompa di calore aria-acqua	10
2.3 Ciclo termodinamico di una pompa di calore	11
2.3.1 Fase di evaporazione	12
2.3.2 Fase di compressione	13
2.3.3 Fase di condensazione	14
2.3.4 Fase di espansione	14
Capitolo 3	16
3.1 Operatività pompa di calore	16
3.2 Confronto tra caldaie e pompe di calore	18
3.2.1 Vantaggi pompe di calore	19
3.2.2 Svantaggi pompe di calore	20
Capitolo 4	24
4.1 Passaggi per la creazione del componente	24
4.2 Grandezze utilizzate	30
4.3 Funzionamento pompa di calore a capacità variabile	31
4.3.1 Esempio numerico del funzionamento	34
Capitolo 5	36
5.1 Descrizione caso di studio	36
5.1.1 Funzionamento impianto	38
5.1.2 Descrizione delle componenti	40
5.1.3 Grandezze caso di studio	43

5.2 Risultati ottenuti nella settimana di Gennaio	45
5.3 Risultati ottenuti nel mese di Marzo	50
Capitolo 6	56
6.1 Conclusioni	56
Bibliografia	58

Capitolo 1

1.1 Introduzione

La seguente tesi sperimentale ha come obiettivo quello di spiegare il funzionamento della pompa di calore, per poi andar ad eseguire due simulazioni su un impianto termotecnico, nel quale è inserito il componente creato e sviluppato, ovvero: la pompa di calore a capacità variabile.

Negli ultimi anni, con la transizione alle energie pulite, si sono ricercate nuovi fonti energetiche e macchine in grado di poterne fare utilizzo. Si sta attuando una conversione, che consiste nel passaggio dalla caldaia, in grado di generare calore attraverso la combustione di combustibili fossili, all'utilizzo delle pompe di calore. Le pompe di calore possono prelevare calore da fonti naturali, per esempio acqua, aria e terra per poi riutilizzarlo per il riscaldamento di abitazioni o edifici. Consentono di ridurre notevolmente l'inquinamento ambientale, in quanto non producono fumi, e se abbinate a impianti fotovoltaici possono azzerare le emissioni. In Europa, negli ultimi anni, il mercato delle pompe di calore si è notevolmente incrementato raggiungendo quota 11,8 milioni di unità vendute (dato prelevato nell'indagine di mercato del 2019). Le tipologie di pompe di calore presenti in circolazione sono elevate, ma le più utilizzate sono quelle ad inverter ovvero a capacità variabile, perché sono in grado di garantire il massimo confort con minori consumi di elettricità.

Non sempre è possibile, però, testare direttamente queste macchine e oltretutto si hanno difficoltà nello studio del loro comportamento dinamico; perciò, nell'ingegneria, prima della realizzazione di un componente o circuito, si ha la fase della simulazione; attraverso questa operazione è possibile simulare situazioni reali, tramite l'utilizzo di software in modo tale da poter ottenere e analizzare i risultati e ricorrere alla scelta più opportuna.

Si farà utilizzo del Trnsys Simulation Studio per poter simulare un classico impianto termotecnico, presente nelle abitazioni. Nel software appena citato, sono presenti pompe di calore di varie tipologie, ma solamente con modalità di funzionamento on/off. Per questo motivo si è palesata la necessità di poter creare una pompa di calore in grado di regolare la propria capacità, il cui nome attribuitogli è Type3000. Partendo dalla conoscenza del funzionamento della pompa calore on/off e del linguaggio del fortran si è virato verso la creazione di una nuova tipologia. Nell'attività antecedente alla tesi, ovvero quella di tirocinio, si è svolta la programmazione e l'integrazione della pompa di calore a capacità variabile nel Trnsys.

Il primo modello presentava solamente le funzionalità basilari, che poi sono state ampliate e perfezionate durante la scrittura dell'elaborato, in modo da ottenere un componente in grado di modellarsi alle differenti situazioni e ai vari campi di operabilità.

Nel primo capitolo della tesi è presente un'introduzione in cui viene data la definizione di pompa di calore, analizzando le varie tipologie in base alle fonti da cui trae approvvigionamento energetico e in seguito viene descritto nel dettaglio il ciclo termodinamico con cui opera.

Per poi proseguire, nel secondo capitolo, con un confronto con la caldaia tradizionale e la spiegazione dei vantaggi e degli svantaggi che può comportare l'installazione della pompa di calore all'interno degli edifici.

Nei capitoli successivi si va più nello specifico. Nella prima parte del terzo capitolo si analizza la fase di compilazione del codice con il quale opera la pompa di calore a capacità variabile, attraverso il software Visual Intel Fortran, presentando una accurata guida dei passaggi fondamentali; mentre nella seconda parte si espongono le modalità di funzionamento della pompa con le relative equazioni e grafici, inoltre è presente un esempio numerico, per avere un approccio più pratico. I dati riguardanti le specifiche della pompa sono prelevati da uno dei costruttori per eccellenza nel settore: la ditta Viessmann.

Nel quarto capitolo si presenta inizialmente il circuito termotecnico, con una breve descrizione dei vari componenti. A seguire sono presenti i valori numerici delle grandezze del caso di studio nel quale vengono svolte due simulazioni, in archi temporali diversi, con due pompe di calore aria-acqua differenti:

- 1- la pompa di calore on/off;
- 2- la pompa di calore a capacità variabile implementata dal sottoscritto;

Nell'ultima fase del lavoro è stata eseguita la rielaborazione, rappresentazione e discussione dei dati ottenuti nelle varie simulazioni dei due casi di studio. Si evidenzieranno, inoltre, nell'ultima parte, i risultati di entrambi i componenti in modo tale da poter riscontrare quale dei due è il più adeguato nel caso di studio considerato.

Capitolo 2

Definizione di pompa di calore

2.1 Fonti di approvvigionamento

Un componente spesso utilizzato negli impianti termotecnici è la pompa di calore, quest'ultima ha come scopo ricavare l'energia termica dall'ambiente per poi utilizzarla per il riscaldamento di edifici, fluidi nei serbatoi o fluidi negli impianti meccanici.

Le fonti principali di approvvigionamento di energia sono di tre tipi:

1. Geotermica: si basa sullo sfruttamento del calore naturale prodotto nel sottosuolo dalla Terra, tendendo ad andare in profondità, infatti, si ha un aumento del gradiente termico. Non è facilmente reperibile, perché per poter ricavare consistenti quantità di energia termica è necessario raggiungere profondità elevate, salvo alcuni punti nella crosta terrestre che fungono da serbatoi termici naturali, in cui è possibile attingere energia grazie all'utilizzo di sonde geotermiche.
2. Acqua: in questo caso la fonte di energia termica è il calore contenuto nell'acqua prelevata da giacimenti, che attraverso l'ausilio di pompe meccaniche viene convogliata alla pompa di calore. Si compie una piccola digressione sulle tipologie di fonti d'acqua. Generalmente l'acqua viene prelevata dalle falde freatiche o da bacini naturali come laghi o fiumi, raramente dall'acquedotto.

Le falde freatiche sono delle falde caratterizzate da degli strati di terreno con elevata porosità in cui l'acqua si trova alla pressione atmosferica ed è libera di scorrere. Queste falde, a differenza di quelle artesiane, si trovano a profondità ridotte e quindi facilmente raggiungibile attraverso la creazione di pozzi.

Un vantaggio di queste falde risiede nel fatto che sono in grado di mantenere la temperatura dell'acqua al loro interno pressoché costante durante tutto l'arco dell'anno, consentendo alla pompa di operare con elevata efficienza.

Riguardo ai fiumi o laghi, quest'ultimi risentono oltre che in maniera più elevata, rispetto alle falde, della variazione di temperatura durante l'anno, anche della variazione della disponibilità dell'acqua presente in essi in base alle stagioni. In compenso non è necessaria la creazione di pozzi per poter attingere dai fiumi o dai laghi, l'unica accortezza consiste nel disporre la tubazione di prelevamento dell'acqua rialzata rispetto al letto del fiume/lago in modo da evitare problematiche relative all'aspirazioni di impurità: come sabbie, ghiaia, fango...

Talvolta se il livello del pelo libero dell'acqua si trova molto vicino con il letto del fiume/lago si attua la costruzione di dighe, con la quale è possibile innalzare la quota del livello dell'acqua.

L'ultimo luogo in cui è possibile prelevare l'acqua risulta la rete di distribuzione dell'acqua, conosciuta come acquedotto, con cui tramite un allaccio di tubazioni è possibile attingere all'acqua stessa. A differenza dell'energia geotermica, l'energia termica proveniente dall'acqua è facilmente reperibile, questo perché la disponibilità di acqua è molto più elevata con sforzi costruttivi minori.

3. Aria: in questo caso viene utilizzato il calore presente nell'aria per poter ottenere energia termica, l'aria viene continuamente riscaldata dai raggi solari e la sua reperibilità è massima.

Per ciascuna tipologia di fonte di energia esiste una pompa di calore:

Geotermica	→	Pompa di calore salina-acqua (geotermiche)
Acqua	→	Pompa di calore acqua-acqua
Aria	→	Pompa di calore aria-acqua

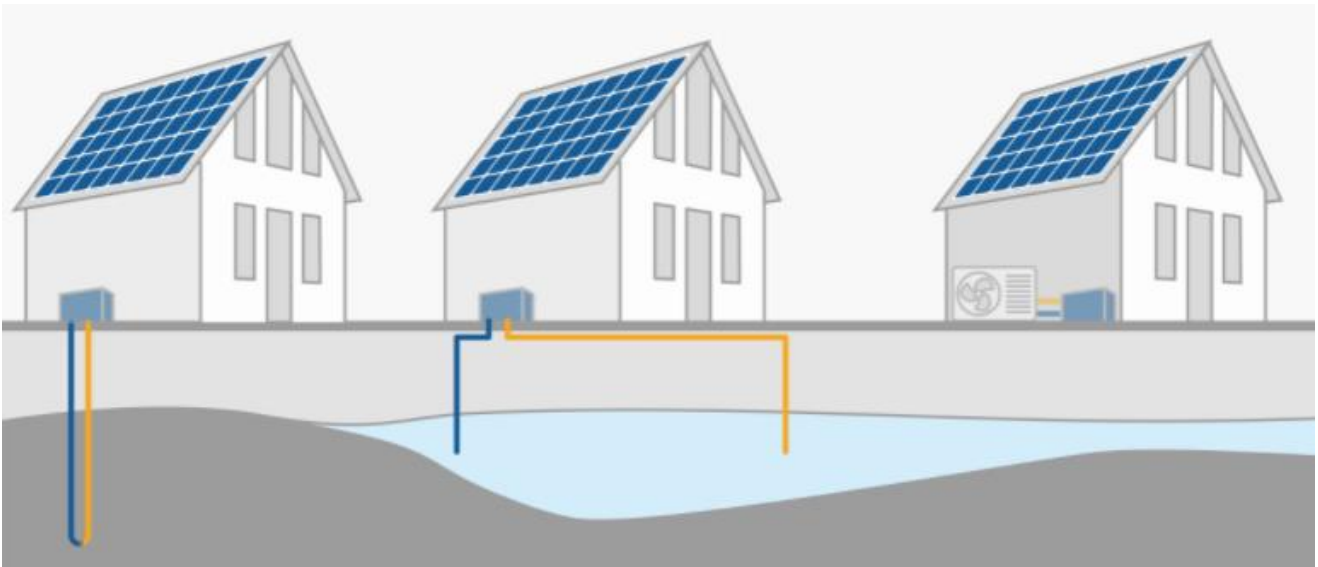


Figura 2.1 Tre tipologie di pompe di calore con rispettive fonti di approvvigionamento. [1]

2.2 Tipologie di pompe di calore

Utilizzando la Figura 2.1 possiamo notare uno schema sintetico di aspirazione e scarico di ciascuna tipologia di pompa. Da sinistra verso destra pompa salina-acqua (geotermica), acqua-acqua e aria-acqua. Si analizzeranno nei prossimi paragrafi le tipologie di pompe appena elencate.

2.2.1 Pompa di calore salina-acqua (geotermiche)

La temperatura dell'aria esterna varia durante l'anno ma anche durante l'arco della giornata stessa. Il sottosuolo è interessato da questa variabilità solo nei primi metri di profondità, poi man mano che si scende questa variabilità si annulla. Il gradiente di temperatura si riduce all'aumentare della profondità, per cui maggiore è la profondità e minore è l'influenza termica dell'aria esterna. Perciò

con l'aumentare della profondità questo gradiente termico diminuisce fino ad annullarsi ad un certo punto e la temperatura diventa costante, con valori mediamente più alti in inverno e valori più bassi in estate. La pompa di calore geotermica, durante la stagione invernale, è in grado di prelevare il calore che gli viene fornito dal suolo per poi utilizzarlo per il riscaldamento degli ambienti interni e per la produzione di acqua calda sanitaria. In estate avviene esattamente l'opposto, ovvero il calore viene ceduto al terreno e si sfrutta invece la bassa temperatura del sottosuolo per raffrescare gli ambienti.[2]

La pompa di calore salina-acqua si basa sull'utilizzo di sonde geotermiche, ovvero degli scambiatori di calore con il suolo che vengono inseriti in fori di pochi centimetri di diametro ma che possono arrivare a profondità compresa tra i 30 e i 150 metri, in base al fabbisogno di energia richiesto dalla struttura. Le sonde geotermiche sono costituite da tubi in polietilene, dotati di un percorso di andata e ritorno, dentro i quali circola acqua glicolata. Il sistema è chiamato chiuso non essendoci uno scambio di materia (fluido) con l'esterno, ma è presente solamente uno scambio termico di calore che viene prelevato dal suolo.

In commercio sono presenti due tipologie di sonde geotermiche:

- le sonde geotermiche orizzontali interrate ad una profondità di 1-1,5 metri;
- le sonde geotermiche verticali interrate ad una profondità di 70-120 m;

Le sonde geotermiche orizzontali sono indicate per l'installazione in zone temperate e con terreni ben esposti all'irraggiamento solare, in questo modo il fluido contenuto nelle sonde geotermiche a contatto con il suolo si riscalda ed evapora facilmente, prelevando l'energia termica dal terreno e convogliandola all'interno della pompa di calore stessa. Questa tipologia di sonda termica non è adatta per garantire il raffrescamento degli edifici in quanto nei mesi estivi, essendo la temperatura notevolmente più elevata, il suolo in superficie tenderà a raggiungere temperature più alte e di conseguenza ciò ostacolerà la produzione di acqua fresca, necessario per il raffrescamento degli ambienti interni.[18]

L'altra tipologia sono le sonde geotermiche verticali che risentono meno dei cambiamenti ambientali in quanto sono inserite in pozzi del diametro di pochi centimetri, che consentono un miglior isolamento termico dato che sfruttano la costante capacità del suolo di mantenere la temperatura. Il dimensionamento di questi ultimi varia a seconda della potenza termica necessaria al fabbisogno dell'edificio.

Un'altra tipologia talvolta utilizzata è quella a geostrutture, che è un sistema composto da tratti di pali di fondazione equipaggiati con uno scambiatore di calore. [3]

2.2.2 Pompa di calore acqua-acqua

Nell'immagine centrale notiamo un edificio che fa utilizzo di una pompa di calore acqua-acqua, un'unità di aspirazione, che generalmente è una pompa centrifuga, preleva l'acqua da un pozzo di estrazione per farla risalire fino alla pompa di calore. L'obiettivo di questo tipo di impianti è sempre ottenere uno scambio di calore, che consenta di innalzare la temperatura dell'acqua per uso sanitario e tecnico.

Questi sono i passaggi previsti per il funzionamento:

1. Il calore dell'acqua presente nel pozzo viene a contatto con un fluido refrigerante, presente all'interno della pompa di calore;
2. Il fluido, data la sua bassa temperatura, assorbe immediatamente il calore proveniente dall'acqua, e si trasforma in vapore;
3. Il vapore così prodotto viene compresso all'interno del compressore presente nella pompa di calore, aumentandone la sua temperatura;
4. Il vapore ad alta temperatura viene convogliato verso il condensatore, dove cede il calore al circuito di riscaldamento, che consente di ottenere acqua calda per usi sanitari;
5. Dopo il passaggio di calore, la temperatura del vapore diminuisce e il vapore viene laminato, tornando nuovamente allo stato di fluido iniziale.

Per poi far defluire in un secondo circuito l'acqua che ha ceduto l'energia termica e rimandarla alla fonte. Esistono due tipologie di pozzi per la reimmissione dell'acqua nella falda:

- Pozzo ad anello chiuso: nella struttura ad anello chiuso, l'acqua viene prelevata e successivamente reimpressa nello stesso pozzo o falda.
- Pozzo ad anello aperto: nel caso di struttura ad anello aperto, in realtà sono presenti due pozzi. Il primo è chiamato pozzo di captazione, usato per la risalita dell'acqua di falda. Un secondo pozzo usato per riversare direttamente in falda, chiamata pozzo di ricezione, che si interfaccia direttamente con la pompa di calore.

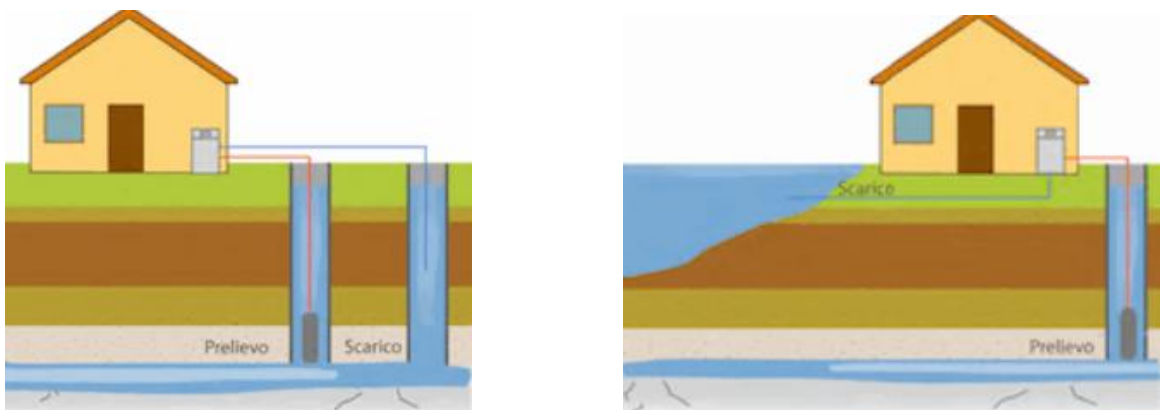


Figura 2.2 Schema di due circuiti ad anello aperto. [4]

Per entrambi i circuiti, di aspirazione e scarico, non è necessaria la perforazione per l'installazione di un pozzo in quanto i pozzi già esistenti possono essere utilizzati. Tuttavia, la quantità e la qualità dell'acqua del sottosuolo deve essere controllata, per evitare alcune problematiche. Una tra queste riguarda l'acidità dell'acqua stessa, è molto importante che l'acqua abbia un Ph compreso fra 6.5 e 9.5, quindi tendente verso il basico. Se l'acqua dovesse essere troppo acida si andrebbe incontro a problemi di corrosività con conseguente danneggiamento delle tubazioni e riduzione della vita utile. Un altro aspetto di cui tener conto riguarda la composizione chimica, infatti alcuni elementi, tra cui i carbonati di calcio, a lungo andare possono generare incrostazioni. Bisognerebbe andare ad eseguire un'analisi chimico-fisica per scongiurare questi problemi e allungare il più possibile la vita dell'impianto e della pompa di calore.

Un vantaggio di questa tipologia di pompe è il seguente:

la temperatura media annua delle acque sotterranee è di circa 10°C (oscilla fra gli 8°C e i 12 °C) quindi l'operatività si aggira sempre intorno ad un determinato intervallo, garantendo la massima efficienza della pompa di calore. Una pompa di calore ben equipaggiata può essere utilizzata anche in estate per raffreddare l'edificio.[19]

2.2.3 Pompa di calore aria-acqua

Come ultima tipologia di pompe di calore si analizza la pompa di calore aria-acqua, che utilizzeremo nelle prossime unità per svolgere delle simulazioni. Innanzitutto, il fluido utilizzato per prelevare/cedere calore è l'aria. Durante l'arco dell'anno, ma anche della giornata stessa, l'aria possiede temperatura molto diversificate. Dobbiamo tener conto anche della zona geografica in cui operiamo, che per ora consideriamo fissa in una determinata città. Date queste elevate variazioni di temperatura la pompa di calore dovrà operare in intervalli molto ampi, in compenso il costo dell'impianto è minore non dovendo usare tubazioni per la fase di aspirazione o scarico.

In queste tipologie di pompe viene utilizzato un fluido refrigerante intermedio resistente al gelo. Il fluido intermedio è un fluido termovettore usato per assorbire o cedere calore dagli/negli ambienti. "Ad oggi, per soddisfare i regolamenti europei ed evitare la possibile fuoriuscita in atmosfera di refrigerante ad elevato impatto ambientale, le soluzioni presenti sul mercato adottano prevalentemente i seguenti refrigeranti:

- R32, che ha ODP = 0 e GWP100 = 705
- R290, un idrocarburo (HC) che ha ODP = 0 e GWP100 < 1

Gli acronimi precedenti indicano:

- ODP, ozone depletion potential, ovvero il potenziale di danno allo strato di ozono (non sono più ammessi refrigeranti con ODP > 0)
- GWP100, global warming potential, ovvero il contributo all'effetto serra valutato su un periodo di 100 anni.

La scelta del refrigerante, oltre ad essere basata sui valori di ODP e GWP, dipende dalle sue prestazioni nel ciclo inverso considerato, nonché dalle sue caratteristiche in merito a problematiche di infiammabilità e tossicità. In futuro, l'uso di refrigeranti ad elevato GWP sarà sempre più limitato; possibili soluzioni prevedono l'utilizzo di:

- refrigeranti naturali, come gli idrocarburi, che hanno ODP = 0 e GWP ≤ 1
- idrofluorolefine (HFO), refrigeranti di nuova generazione con ODP = 0 e GWP < 10
- miscele dei precedenti, per bilanciare proprietà positive e negative."[5]

In seguito, si tratterà nel dettaglio il ciclo dell'aria, dell'acqua e del fluido intermedio, che viene utilizzato per prelevare calore dall'aria e trasportarlo fino all'acqua, descrivendo step by step ciò che avviene all'interno di ciascuna componente.

2.3 Ciclo termodinamico di una pompa di calore

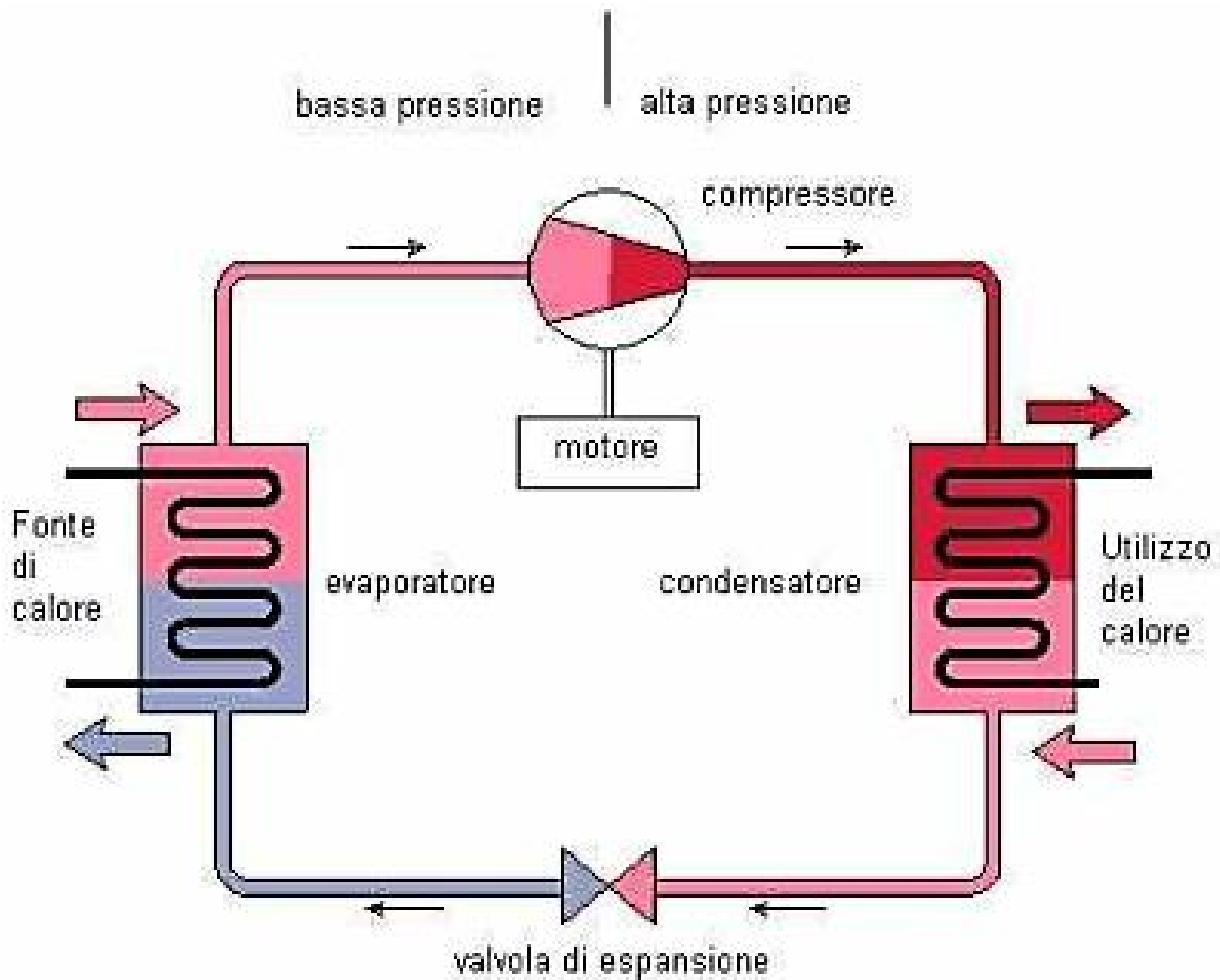


Figura 2.3 Rappresentazione grafica del ciclo termodinamico di una pompa di calore. [6]

Considerando l'immagine precedente iniziamo a trattare il ciclo che vede come scopo finale trasferire il calore dall'aria all'acqua.

Suddividiamo il ciclo in tre parti:

1. Il circuito di sinistra, nella quale circola l'aria prelevata dall'ambiente esterno che si trova ad una temperatura maggiore del liquido refrigerante;

2. Il circuito centrale, nel quale scorre il liquido intermedio (anche detto refrigerante);
3. Il circuito di destra, nella quale scorre l'acqua;

L'immagine ci mostra che il circuito centrale è diviso in due parti, una a bassa pressione ed una ad alta pressione, rispettivamente sinistra, destra. Inoltre, il colore blu indica un fluido a temperatura ridotta, mentre man mano che abbiamo una transazione verso il rosso abbiamo un aumento di temperatura.

L'ipotesi di partenza è che il fluido intermedio si trova ad una temperatura iniziale minore di quella dell'aria prelevata dall'esterno.

Suddividiamo il ciclo in quattro fasi, per ciascuna fase avremo un componente.

2.3.1 Fase di evaporazione

L'aria proveniente dall'ambiente esterno scorre all'interno di un condotto, grazie all'energia che le viene fornita da una macchina operatrice, genericamente un ventilatore a pale; fino ad arrivare all'interno dell'evaporatore.

L'evaporatore viene definito come uno scambiatore di calore, il cui scopo è quello di far scambiare calore tra l'aria e il fluido intermedio, molto importante è utilizzare un fluido intermedio la cui temperatura sia inferiore rispetto a quella dell'aria, per far sì che si possa avere un trasferimento di calore. Si innalza così la temperatura del fluido intermedio, che avendo basse temperature di vaporizzazione, tende a eseguire il passaggio di stato in vapore.

All'interno dell'evaporatore non vi è miscelazione fra i due fluidi ma unicamente uno scambio superficiale, questo perché il fluido intermedio scorre all'interno di una tubazione, mentre l'aria si trova nel condotto esternamente alla tubazione stessa. Affinché ci sia un notevole scambio di calore è necessario che la superficie interessata della tubazione sia elevata, facendo riferimento alla legge:

$$Q = A * m * (Tf - Ti)$$

Equazione 2.1

Essendo la massa (m) costante all'interno della tubazione e la temperatura finale (Tf) e iniziale (Ti) definita, l'unico parametro per aumentare il calore ceduto consiste nell'aumentare la superficie (A). Di fondamentale importanza è il fatto che i due fluidi non si miscelino, altrimenti si andrebbe incontro a elevate perdite di fluido intermedio e si dovrebbe ricaricare continuamente il circuito centrale.

Dopo aver ceduto il calore, l'aria fuoriesce nell'ambiente esterno ad una temperatura minore rispetto alla temperatura a cui è stata aspirata.

Il fluido refrigerante, invece, che è diventato vapore continua il suo percorso. Di seguito è possibile notare un evaporatore, nei tubi di rame scorre il fluido intermedio, mentre nei condotti in acciaio circola aria.

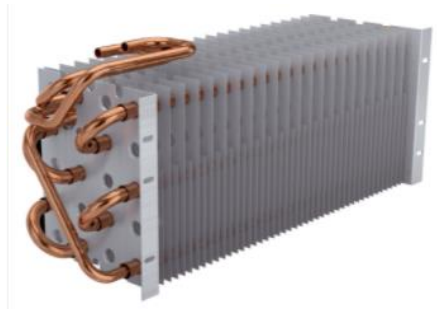


Figura 2.4 Evaporatore.[7]

2.3.2 Fase di compressione

A seguito del cambiamento di fase da liquido a vapore del fluido intermedio, quest'ultimo viene indirizzato all'interno del compressore, lo scopo del compressore è quello di comprimere il vapore, fornendo lavoro dall'esterno. Il vapore passerà da una situazione di bassa pressione, che si aggira intorno ai 6 bar, fino ad una situazione di alta pressione che si aggira intorno agli 11 bar.

Nel momento in cui si esegue la compressione non si aumenta soltanto la pressione del vapore, ma si va ad aumentare la temperatura. Il vapore diventa vapore surriscaldato.

Il compressore, inoltre, crea la differenza di pressione che permette al ciclo termodinamico di funzionare: esso aspira il fluido refrigerante attraverso l'evaporatore e lo convoglia verso il condensatore.

In commercio sono presenti varie tipologie di compressori, i più usati sono quelli a :

- Velocità fissa: con capacità di raffreddamento e riscaldamento comprese tra 4 e 16 kW e fino a 32 kW.
- Velocità variabile: offrono una capacità compresa tra 1 e 10 kW.

Affinché il compressore possa funzionare è necessario collegarlo ad un motore, il più delle volte elettrico. Il motore elettrico è, nella quasi totalità dei casi, basato su tecnologia inverter DC, ovvero il motore è a corrente continua con rotore a magneti permanenti. L'inverter DC converte la corrente alternata di rete (a 50 Hz) con cui viene alimentato il motore in corrente continua, che viene quindi erogata al motore sotto forma di impulsi molto rapidi e precisi. L'inverter DC è in grado di variare la frequenza di tali impulsi; questo consente di regolare la velocità di rotazione del rotore del motore e, in definitiva, la portata di refrigerante elaborata.



Figura 2.5 Compressore a velocità variabile.[8]

2.3.3 Fase di condensazione

Il fluido uscente dal compressore è il vapore surriscaldato ad alte pressioni, questo viene indirizzato verso il condensatore. Anche il condensatore, insieme all'evaporatore, è uno scambiatore di calore superficiale, quindi non avviene la miscelazione dei fluidi. Lo scopo del condensatore è completamente opposto a quello dell'evaporatore. Mentre nell'evaporatore il fluido intermedio acquista calore, nel condensatore il fluido intermedio cede calore ad un altro fluido. In questo caso si tratta dell'acqua per i sanitari proveniente dal circuito interno dell'edificio (circuito di destra).

Il vapore surriscaldato entrando nel condensatore andrà a cedere calore all'acqua; perciò, l'acqua tenderà ad aumentare la sua temperatura. Il vapore più trasferisce il calore all'acqua, più diminuisce la sua temperatura e così passa dallo stato gassoso allo stato liquido. Nella condizione ideale tutto il calore del fluido intermedio viene trasferito all'acqua facendo così tornare il fluido intermedio allo stato liquido, nella realtà ciò non avviene a causa delle perdite termiche.

Il liquido presenta ancora elevate pressioni, sebbene la sua temperatura si sia ridotta notevolmente.

La struttura del condensatore è molto simile a quella dell'evaporatore, le batterie usate nell'evaporatore e nel condensatore sono alettate, così da incrementare la superficie di scambio termico mantenendo, al tempo stesso, un ingombro non troppo elevato.

2.3.4 Fase di espansione

Il fluido intermedio si trova in una situazione particolare, in quanto avendo ceduto il calore nel condensatore, ha diminuito la propria temperatura, allo stesso modo avendo una pressione elevata non è in grado di assorbire calore dall'aria.

Per i motivi precedentemente citati è necessario andare ad eseguire una laminazione del fluido intermedio, ovvero effettuare una espansione: in questo modo è possibile ridurre la pressione e, ulteriormente, la temperatura.

Il fluido intermedio entra all'interno della valvola di espansione, questa tipologia di valvola viene anche detta di riduzione, perché al suo interno viene ridotta la pressione del fluido stesso.

Una volta attraversata la valvola di laminazione il fluido si trova nelle condizioni iniziali (fase di evaporazione) è in grado, perciò, di ripercorrere l'intero ciclo.



Figura 2.6 Valvola di laminazione.[9]

A causa della non perfetta tenuta fra i vari dispositivi e delle perdite di fuga, parte del fluido frigorifero, seppur poco, fuoriesce dal circuito centrale: è necessario andare ad eseguire una manutenzione periodica (annuale), il cui scopo è quello di andar a reintegrare il fluido intermedio o addirittura sostituirlo, nell'eventualità in cui abbia perso le caratteristiche chimico-fisiche per cui è stato designato.

Capitolo 3

Campi di operatività

3.1 Operatività pompa di calore

Le pompe di calore vengono utilizzate principalmente per il riscaldamento / raffrescamento degli edifici, vengono perciò inseriti all'interno degli impianti termotecnici. In base alla capacità della pompa nel soddisfare il fabbisogno è possibile suddividere l'impianto in due configurazioni: nel caso in cui la pompa di calore sia in grado di soddisfare l'intero fabbisogno termico avremo una configurazione monovalente, in cui l'unico generatore di calore è la pompa stessa. Nel caso opposto in cui non sia in grado di soddisfare l'intero fabbisogno allora si ricorre ad una configurazione bivalente con l'accoppiamento della pompa di calore con una caldaia.

Inizialmente per produrre il calore si utilizzavano caldaie, quest'ultime hanno visto un'ampia evoluzione nell'arco degli ultimi decenni passando dalle caldaie alimentate a gasolio, fino ad arrivare alle più recenti caldaie a condensazione. Questa evoluzione è avvenuta per poter far fronte ai nuovi requisiti sull'emissione e per ottenere rendimenti di queste macchine più elevati. Le caldaie sono in grado solamente di fornire calore all'acqua sanitaria non possono coprire la parte legata al raffrescamento. Oltretutto il calore si ottiene attraverso una combustione che avviene all'interno della camera di combustione presente nella caldaia, con la conseguente produzione di fumi dannosi per l'ambiente. Le sostanze attualmente utilizzate per la combustione sono il metano o le biomasse.

Le pompe di calore si classificano anche in base alle taglie, ovvero secondo la potenza che può essere: piccola se inferiore a 10 kW, media da 10 a 20 kW, grande quando va oltre i 20 kW. Le piccole sono impiegate per stanze singole, le medie per locali più grandi o per servire più ambienti, le grandi per climatizzare interi appartamenti, uffici o negozi.

L'aspetto curato dalle pompe di calore all'interno degli impianti termotecnici riguarda solamente il mantenimento o il raggiungimento di determinate temperature all'interno dell'edificio, non è in grado, perciò, di far fronte direttamente alle altre caratteristiche, tra cui qualità dell'aria e umidità presente.

Il calore una volta ottenuto dalla pompa di calore è trasferito all'acqua che circola nel circuito interno all'edificio, per poter riscaldare gli ambienti interni viene ceduto ad altri dispositivi, di seguito elencati i principali con le metodologie di funzionamento.

Ventilconvettori: dispositivi contenenti al proprio interno delle tubazioni in cui scorre l'acqua riscaldata, che prendono il nome di batteria di riscaldamento, che a sua volta cede calore all'aria esterna. Questa aria viene poi inviata grazie all'ausilio di ventilatori, mediante circolazione forzata, agli ambienti che si desidera riscaldare. Sono la tipologia più utilizzata a livello domestico.

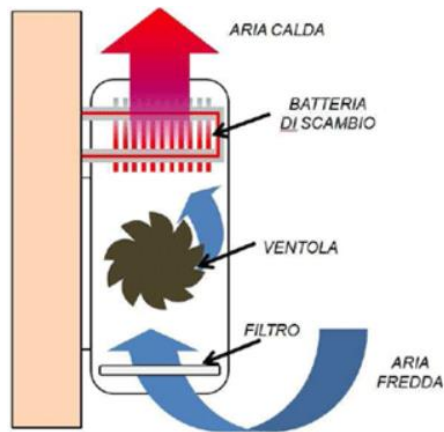


Figura 3.1 Schema del funzionamento di un ventilconvettore.

Pannelli radianti: sono delle serpentine installate o al di sotto del pavimento o sopra al soffitto, al cui interno scorre l'acqua riscaldata dalla pompa di calore, la metodologia con cui viene riscaldato il locale è attraverso l'irraggiamento. Sono in grado di uniformare il calore trasmesso all'interno dell'edificio, ma non consentono scambi di calore elevati quanto i ventilconvettori. Vengono utilizzati generalmente per il riscaldamento di ambienti non troppo estesi.



Figura 3.2 Pannelli radianti con installazione a pavimento, prima di eseguire la gettata di cemento.[10]

Canalizzazioni ad aria: sono in grado di trasferire il calore prodotto dalla pompa di calore direttamente all'aria stessa, per poi convogliarla tramite dei condotti all'interno del locale desiderato. I terminali con il quale viene immessa questa aria prende il nome di diffusore. Con questi dispositivi è possibile alleggerire gli ambienti da macchinari in quanto i diffusori sono molto più piccoli e facilmente installabili.



Figura 3.3 Rete di canalizzazione aria con terminali di immissione nei vari locali.[17]

3.2 Confronto tra caldaie e pompe di calore

In questo paragrafo andremo prima ad analizzare gli aspetti legati alla combustione, e, successivamente, i vantaggi e gli svantaggi delle pompe di calore poste a confronto con le caldaie.

La combustione ha come unico vantaggio la rapidità con la quale si possono ottenere potenze termiche molto elevate, anche se i valori di temperatura massima raggiungibili sono legati a tutti gli elementi presenti nel sistema termotecnico. Per esempio, le tubazioni e i radiatori domestici non sono progettati per raggiungere temperature massime superiori a 90°C.

Gli svantaggi sono invece molteplici:

1. Dalla combustione si producono sostanze di scarto, ovvero i fumi, il cui unico modo di essere smaltiti consiste nell'essere liberati nell'atmosfera. Questi fumi sono molto dannosi e tossici per la nostra salute, perché anche se filtrati, rilasciano nell'ambiente ossidi di azoto, monossido di carbonio e polveri sottili.
2. I luoghi in cui è possibile installare le caldaie sono anch'essi limitati, in quanto dalle ultime normative vigenti in base alla potenzialità ed al tipo di combustibile usato, le caldaie devono soddisfare una serie di requisiti relativi alla sicurezza del locale stesso e dell'edificio, tra cui norme di sicurezza antincendio. Senza entrare troppo nei dettagli, si riportano alcune prescrizioni riguardo le centrali termiche (CT) in cui vengono installate le caldaie.
 - La CT deve avere almeno una parete confinante con spazi a cielo aperto;
 - Se la CT confina con locali abitati, la parete rivolta verso spazi a cielo aperto deve avere una superficie di facile cedimento (pareti, porte, finestre);
 - La superficie in pianta dovrebbe essere di almeno 6 m²;
 - L'altezza della CT deve essere di almeno 2,5 m, e deve esserci una distanza di almeno 0,6 m tra pareti e caldaia, e di 1 tra soffitto e caldaia;
 - Pareti e solai devono essere resistenti al fuoco per almeno 2 ore ed impermeabili al combustibile liquido;

- L'accesso deve avvenire o dall'esterno o da un disimpegno con almeno un lato attestato su uno spazio a cielo aperto; in caso contrario, deve essere installato nel disimpegno un condotto di aerazione;" [5]
3. Nel momento in cui si riscalda un fluido quest'ultimo tende a dilatarsi, questa dilatazione è accolta dal vaso di accumulo. In caso di danneggiamento del componente o di mancata attivazione delle valvole di sicurezza allora la dilatazione non è adeguatamente scaricata e si va incontro a pressioni elevate. Fino a determinati valore di pressioni la caldaia è progettata per resistere, al di sopra della pressione critica si va incontro a cedimento del sistema ed esplosione.

Per evitare tutte le problematiche appena elencate, relative alla combustione interna, si è cercato di creare un'altra tipologia di macchine, in grado di generare calore in assenza di combustione, ma solamente attraverso fonti del tutto naturali. Ovvero le pompe di calore.

3.2.1 Vantaggi pompe di calore

Di seguito la lista di tutti i vantaggi legati all'utilizzo delle pompe di calore, che andremo poi a spiegare in maniera più dettagliata.

- 1) Assenza di combustione;
- 2) Non produce emissioni;
- 3) Utilizzo di fonti naturali;
- 4) Ridotti consumi energetici;
- 5) Si utilizza sia per il riscaldamento che per il raffrescamento;
- 6) Consente di accedere agli incentivi fiscali;
- 7) Ridotta rumorosità;

A differenza delle caldaie, per il funzionamento della pompa di calore non è necessaria la combustione, si necessita solo di alimentazione elettrica per far funzionare il compressore interno alla pompa e gli ausiliari (tra cui schede elettroniche). Per questo motivo non si genereranno i fumi e di conseguenza non si avrà la produzione di emissioni nocive nell'ambiente, salvo le emissioni che si genereranno nella produzione della corrente elettrica necessaria per alimentare la pompa di calore. Nell'eventualità in cui si andasse ad abbinare la pompa con un impianto di produzione di energia rinnovabile allora si annullerebbero completamente le emissioni.

Non avendo la combustione le pressioni in gioco massime sono notevolmente minori, aggirandosi ad un massimo di 11 bar senza mai raggiungere valori critici; in quanto anche se ci fosse un malfunzionamento del compressore la pressione massima raggiungibile sarebbe inferiore a quella critica, discostandosi di pochi bar rispetto al valore di 11 bar.

In secondo luogo, non si dovranno utilizzare i combustibili fossili come metano o gasolio, considerate con energie non rinnovabili e ad alto impatto ambientale, perché come visto nel capitolo primo, le pompe di calore sono alimentate con energie del tutto rinnovabili. Oltretutto non dovendo utilizzare un combustibile si otterrà anche un risparmio in termini economici, in quanto non si dovrà pagare un fornitore di servizi.

Un altro aspetto da considerare consiste nel fatto che si è in grado di produrre lo stesso calore di una caldaia tradizionale ma con la metà dell'energia iniziale, questo perché il punto di forza delle pompe di calore è proprio nel ridotto consumo energetico. Il risparmio, inoltre, aumenta se l'impianto viene utilizzato anche per il raffreddamento degli ambienti.

Un ulteriore vantaggio di cui tener conto risiede nell'aspetto economico. Installando una pompa di calore è possibile sfruttare gli incentivi statali per ottimizzare l'investimento compiuto. Esistono infatti due tipi di incentivi di cui può beneficiare chi installa un impianto a pompa di calore: il conto termico e le detrazioni fiscali. Il conto termico è un incentivo sfruttabile da privati e amministrazioni pubbliche per la produzione di energia termica. In alternativa, le detrazioni fiscali in generale possono essere di due tipi e consentono di recuperare importi differenti:

- Ristrutturazione edilizia: prevista per abitazioni o parti comuni di condomini consente al consumatore di ottimizzare il 50% del suo investimento iniziale;
- Ecobonus: previsto per gli interventi di riqualificazione energetica su qualsiasi edificio già provvisto di un impianto di riscaldamento, consente di recuperare il 65% della spesa sostenuta;[12]

A differenza di altre macchine le pompe di calore sono facilmente utilizzabili e hanno una vita utile più longeva, anche le operazioni di manutenzione sono ridotte. Mentre nella caldaia è necessaria la manutenzione annuale con eventuale pulizia interna e controllo dei fumi, nelle pompe di calore le operazioni manutenzione non hanno una cadenza periodica e richiedono tempi ridotti. Un intervento di manutenzione da eseguire sulla pompa di calore è la semplice pulizia dei filtri dei terminali in ambiente (unità interne, ventilconvettori) che assicura ad esempio un'efficienza costante e una corretta azione purificante dell'aria. È importante, inoltre, che la ventilazione sull'unità esterna non sia impedita da barriere fisiche di qualsiasi genere, altrimenti si potrebbero riscontrare problemi di aspirazione dalla sorgente.

Sebbene i primi modelli di pompe di calore fossero caratterizzati da elevata rumorosità, a seguito delle ultime normative di legge ci si è adeguati, ed ora è possibile ridurre sensibilmente la rumorosità di una pompa di calore grazie alla scelta oculata dell'ubicazione e del modello, fino all'adozione di misure antirumore. Una pompa di calore mediamente produce delle emissioni rumorose di circa 40-50 decibel, pari a quelle di un frigorifero.

3.2.2 Svantaggi pompe di calore

Dopo aver analizzato in maniera dettagliata quali vantaggi si possono ottenere utilizzando una pompa di calore, si andranno a trattare i suoi difetti. Di seguito elencati gli svantaggi della pompa di calore.

- 1) Elevati costi di installazione;
- 2) Bassa temperatura dell'acqua prodotta;
- 3) Necessario aumento di potenza del contatore;

Il costo di una pompa di calore può essere diviso in due parti: prezzo della pompa di calore in sé e prezzo per l'installazione di quest'ultima. Ovviamente entrambi sono variabili in funzione di alcuni fattori, solo per citarne alcuni: tipologia di pompa, luogo di produzione, luogo di installazione, potenza richiesta, personalizzazione nei controlli...

Il solo prezzo di una pompa di calore spesso non è indicativo del costo totale, perché lo schema di impianto adottato influenza significativamente la spesa complessiva. I costi più gravosi nella fase di installazione sono quelli che riguardano i collegamenti idraulici e i collegamenti elettrici; in quanto richiedono esperti in grado di convertire la rete già presente o nei casi peggiori sostituirla.

Mentre nelle caldaie la temperatura alla quale si opera generalmente con l'acqua in mandata si aggira intorno ai 70-75°C, nelle pompe di calore la temperatura si aggira intorno ai 50-55°C, una notevole differenza di circa 20°C. Questa differenza è dovuta al fatto che la caldaia è in grado di operare indipendentemente dalle condizioni termoisometriche dell'ambiente esterno; mentre, invece, la pompa di calore è in stretta connessione con le temperature in gioco esterne. Consideriamo come esempio una pompa di calore aria-acqua, più nello specifico la Rotex HPSU Compact 4-8 kW. Di seguito possiamo apprezzare i grafici. Nelle figure 3.4 e 3.5 è possibile notare rispettivamente come al variare della temperatura dell'aria esterna varia la temperatura della modalità riscaldamento e raffreddamento. Nella figura 3.6 invece si evidenzia come al variare della temperatura esterna varia la temperatura alla quale è possibile riscaldare l'acqua calda dei sanitari.

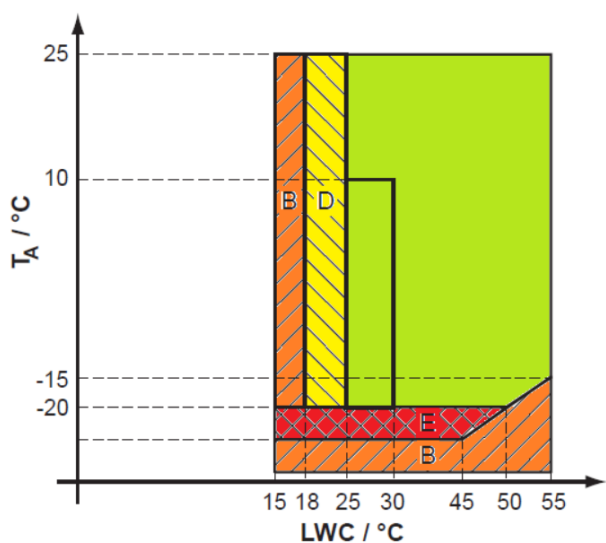


Figura 3.4 Modalità riscaldamento. [13]

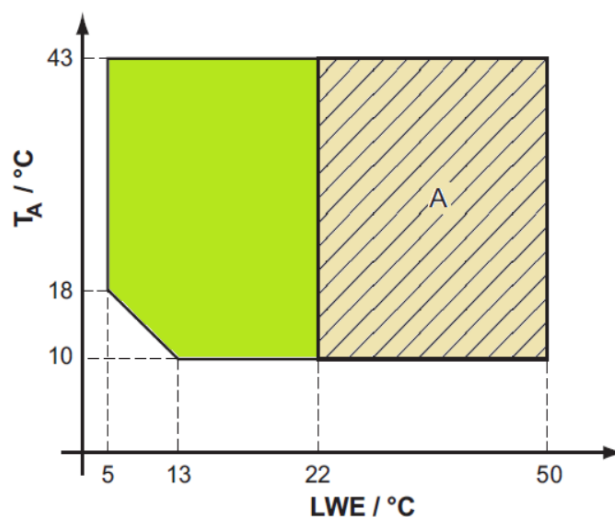


Figura 3.5 Modalità raffreddamento. [13]

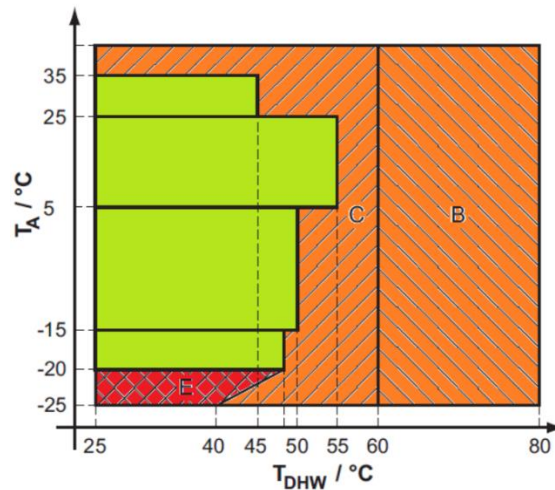


Figura 3.6 Acqua calda dei sanitari (DHW).[13]

I grafici presenti nelle Figura 3.4, Figura 3.5 e Figura 3.6 presentano nell'asse delle ordinate la temperatura dell'aria esterna (T_a) espressa in gradi centigradi $^{\circ}\text{C}$, mentre nell'asse delle ascisse rispettivamente la temperatura in uscita dell'acqua dal condensatore (LWC), la temperatura in uscita dell'acqua dall'evaporatore (LWE) e la temperatura dell'acqua calda dei sanitari (T_{dhw}) anch'esse espresse in gradi centigradi. La zona in arancione indicata con la lettera B indica che il funzionamento della pompa è permesso con il solo funzionamento del backup-heater, un dispositivo che funge da fonte di calore integrativa; mentre invece la zona indicata con la lettera C, sempre evidenziata in arancione, è possibile solo con l'ausilio di un kit in grado di fornire una potenza aggiuntiva di circa 6 kW, che prende il nome di booster heater. Il funzionamento all'interno della zona evidenziata in giallo con la lettera D è possibile solo se il valore di impostazione della temperatura di mandata è maggiore o uguale a 25°C . Mentre invece nella zona indicata con la lettera E, in rosso, non si ha garanzia riguardo al funzionamento della pompa stessa.

I diagrammi possono essere riassunti con i seguenti punti:

- il riscaldamento e la produzione di acqua calda sanitaria sono consentiti fin quando la temperatura dell'aria esterna è di $-20^{\circ}\text{C}/-25^{\circ}\text{C}$, al di sotto di questa temperatura il funzionamento è consentito ma solo con resistenza integrativa;
- il raffrescamento è invece consentito con una temperatura massima di 43°C ;
- la temperatura massima che si può raggiungere si aggira intorno ai $55-60^{\circ}\text{C}$, con l'eventuale aggiunta del backup-heater si può arrivare fino agli 80°C ;

Spesso in caso di installazione di una pompa di calore è necessario andar ad apportare delle modifiche al contatore. Nelle residenze domestiche il contatore genera una potenza massima di 3kW, ma laddove fossero presenti elettrodomestici che richiedono un elevato consumo di energia, è possibile utilizzare contatore in grado di erogare potenze che arrivano fino a 4,5kW o addirittura 6kW. Questo aumento di potenza erogata comporta costi maggiori, per cui nel momento in cui si installa una pompa di calore, funzionando solamente grazie all'apporto di energia elettrica, è necessario andar ad incrementare la potenza del contatore, andando ad avere costi mensili della fornitura elettrica più elevati. [13]

Concludendo, possiamo affermare che l'installazione di una pompa di calore è decisamente conveniente nelle zone geografiche in cui la temperatura si mantiene relativamente costante, ovvero non scendendo al di sotto del limite minimo e non salendo al di sopra del limite massimo di funzionamento della pompa di calore. A renderla tale sono i vantaggi in bolletta e ambientali, oltre agli incentivi proposti a livello statale e il funzionamento in entrambe le modalità sia di riscaldamento che di raffrescamento.

Talvolta, però, trovandosi in zone geografiche in cui la temperatura, specialmente in inverno, scende al di sotto del limite minimo di funzionamento è necessario adottare delle soluzioni ibride. Queste soluzioni consistono nell'inserire nell'impianto una pompa di calore e una caldaia, in modo tale che dove la pompa di calore non è in grado di coprire il fabbisogno termico entra in gioco la caldaia. La scelta deve, inoltre, essere fatta dopo una valutazione del dispositivo migliore per le proprie esigenze.

Capitolo 4

Creazione e funzionamento pompa di calore a capacità variabile

4.1 Passaggi per la creazione del componente

Nel Trnsys Simulation Studio è presente il componente della pompa di calore on/off, la cui sigla di indicazione è Type941. Non è però presente la pompa di calore a capacità variabile. Lo scopo di questa tesi è di creare proprio questo componente: la pompa di calore a capacità variabile, partendo dall'analisi della pompa di calore on/off, con la quale si andranno ad eseguire successivamente le simulazioni. In questo paragrafo si metteranno in evidenza i passaggi principali con il quale è stato possibile realizzare la pompa di calore a capacità variabile.

Inizialmente è necessario scaricare dal motore di ricerca Microsoft Visual Studio (MVS), insieme al kit base e al kit HPC, che consentono di poter compilare e operare con il linguaggio desiderato: ovvero il fortran. Ed in più, nell'eventualità in cui non fosse già presente, il programma con il quale si svolgeranno le operazioni di simulazione ovvero Trnsys Simulation Studio.

Ora lo scopo principale consiste nel programmare la pompa di calore a capacità variabile, tramite il linguaggio fortran, per poi eseguire la compilazione e inserire il file prodotto all'interno del Trnsys, con il quale poi è possibile eseguire simulazioni di impianti.

Per poter programmare in maniera corretta e funzionale il componente è consigliato consultare la guida presente all'interno del manuale del Trnsys, sotto la voce: "07-ProgrammersGuide". Nel quale sono presenti, con adeguata spiegazione, tutte le operazioni necessarie a creare un componente e in aggiunta una descrizione dettagliata di tutte le funzioni. Nel caso in questione la pompa di calore a capacità variabile sarà chiamata Type3000.

- 1) Come primo passaggio, aprire MVS e creare un nuovo progetto.
- 2) Inserire i dati relativi al proprio sistema operativo e al linguaggio di programmazione da utilizzare, in questo caso il fortran; per poi scegliere il formato Dinamic-link Library, come in Figura 4.1, con il quale è possibile condividere risorse in librerie compilate e con altri runtime applications.
- 3) Inserire i dati relativi al nome del progetto, in questo caso Type3000, e il percorso nel quale inserire il file, genericamente C:\TRNSYS17\Compilers\lvf11x. A questo punto dopo aver confermato i dati si aprirà la vera e propria schermata del MVS, come in Figura 4.2.

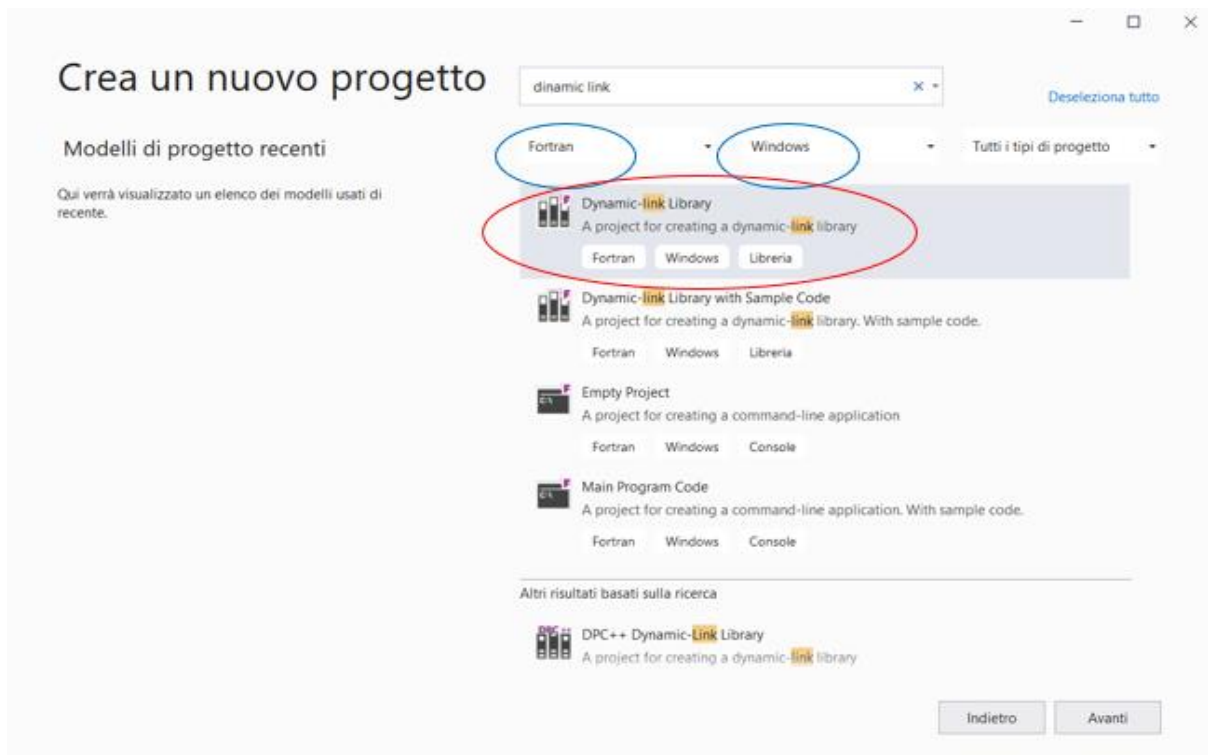


Figura 4.1 Creazione di un nuovo progetto utilizzando il formato Dinamic-link Library.

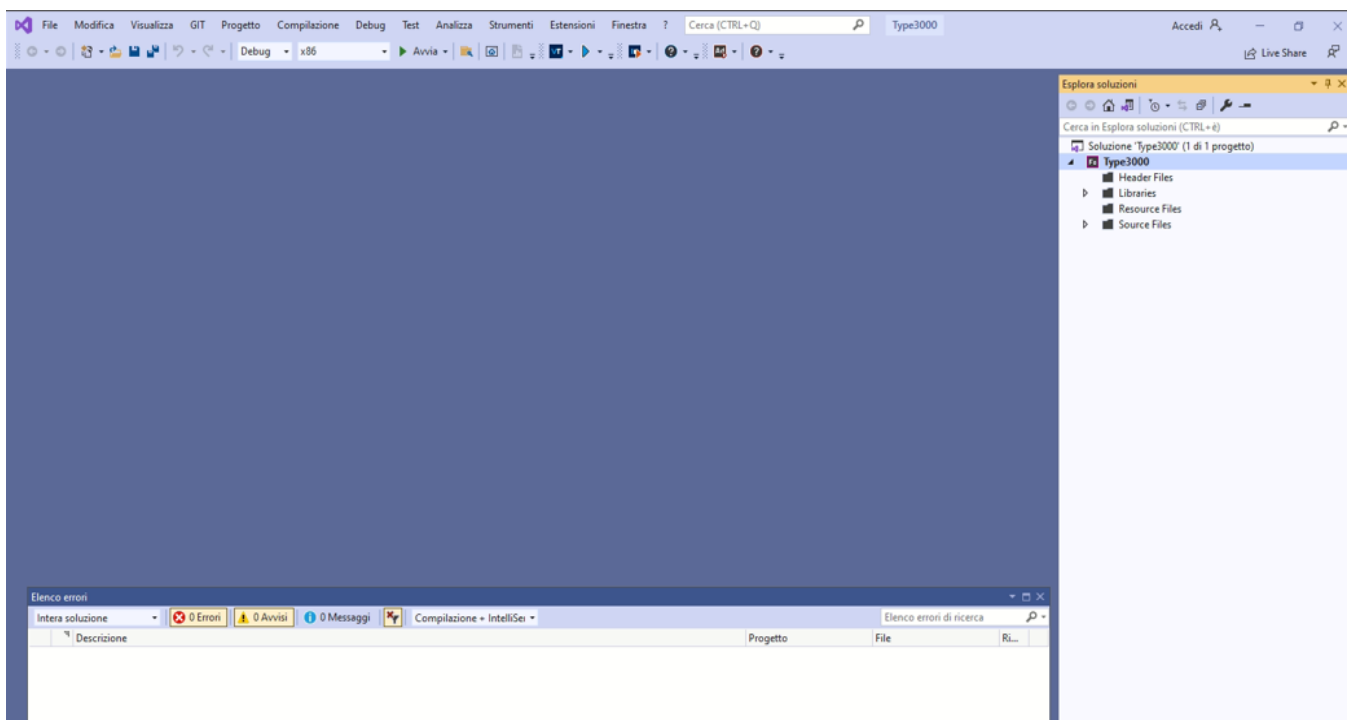


Figura 4.2 Schermata iniziale MVS con nuovo progetto, chiamato Type3000.

- 4) Sempre in riferimento alla Figura 4.2, premere con il tasto destro del mouse su Type3000, successivamente sulla casella «Proprietà» e si aprirà la seguente icona, di Figura 4.3.

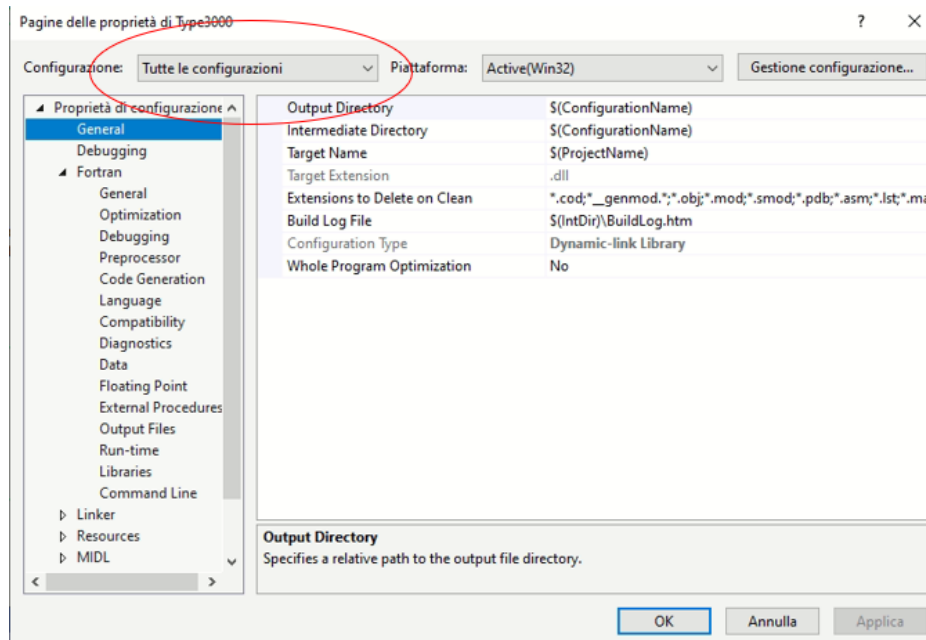


Figura 4.3 Pagina delle proprietà del Type3000.

- 5) In questo passaggio si inseriranno i settaggi per il collegamento fra le varie librerie di risorse, si fa riferimento alla Figura 4.3. Premendo sulla sezione “Configurazione” avremo un menù a discesa nel quale sono presenti tre voci: “Tutte le configurazioni”, “Debug” e “Release”. Per ciascuna di queste configurazioni avvalendosi delle voci presenti sul pannello di sinistra, “Proprietà di configurazione” e seguendo la guida, si andranno a inserire i vari settaggi presenti nelle Figura 4.4, Figura 4.5, Figura 4.6; riportate anche sul manuale nel paragrafo “07-ProgrammersGuide”.

Branch	Category	Parameter	Value
Fortran	Data	Local Variable Storage	All variables SAVE
		Initialize Local Saved Scalars to Zero	Yes
	Floating Point	Extend precision of Single precision constants	Yes
	External procedures	Calling convention	C, REFERENCE
		Name case interpretation	Upper Case
Compatibility	Use Other PowerStation Run-time library	Yes (/fpscomp:general)	

Figura 4.4 Settaggi voce “Tutte le configurazioni”.

Branch	Category	Parameter	Value
Debugging		Command	..\..\Exe\TRNExe.exe
		Command arguments	You can optionally enter the name of the deck file that you wish to debug here, to bypass the file/open dialog in TRNExe.exe
Fortran	Preprocessor	Additional Include Directories	..\TRNDI\Debug
	Libraries	Runtime library	Debug Single-threaded DLL
	Run-time	Runtime Error Checking	All
Build events	Post-build Event	Command Line	copy "Debug\MyDll.dll" ..\..\UserLib\DebugDLLs\MyDll.dll"
		Description	Post-build: Copvinq .dll to the UserLib folder

Figura 4.5 Settaggi voce “Debug”.

Branch	Category	Parameter	Value
Fortran	Preprocessor	Additional Include Directories	..\TRNDII\Release
	Libraries	Runtime library	Single-threaded DLL
Build events	Post-build Event	Command Line	copy "Release\MyDll.dll" "..\..\UserLib\ReleaseDLLs\MyDll.dll"
		Description	Copying .dll to the UserLib folder

Figura 4.6 Settaggi voce "Release".

6) Dopo avere applicato i settaggi descritti nel punto precedente, uscire dal pannello e facendo riferimento alla Figura 4.2, nuovamente tasto destro del mouse su Type3000, casella «Aggiungi» → «Nuovo elemento...».

Si aprirà un nuovo pannello, come in Figura 4.7, nella quale si dovrà scegliere il formato: «Fortran Free-form File (.f90)», in quanto il formato sarà supportato dalla piattaforma nel quale si svolgeranno le simulazioni.

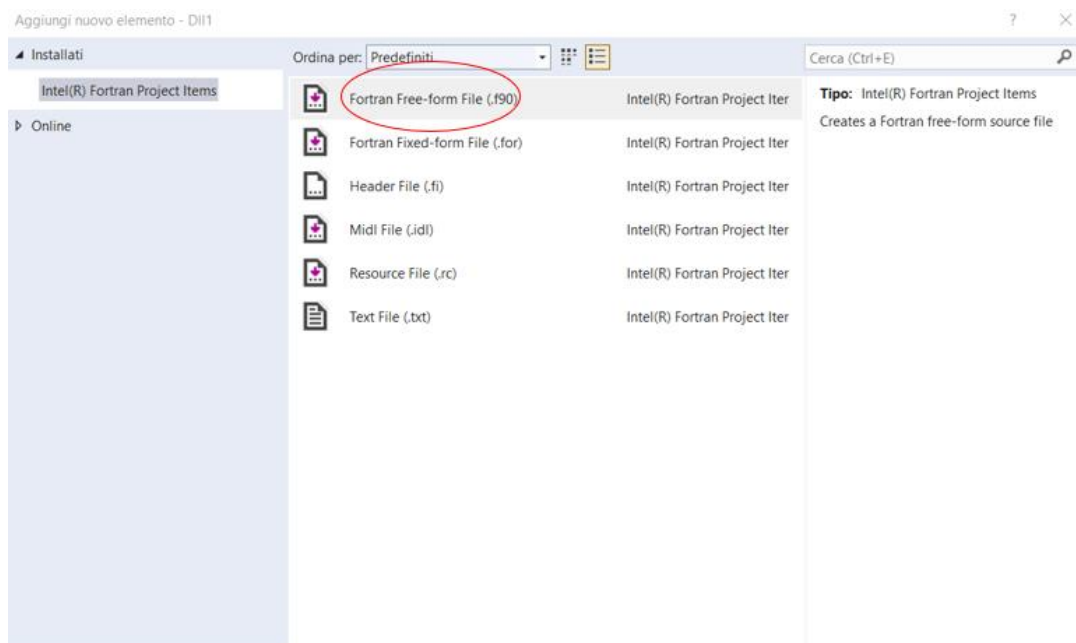


Figura 4.7 Pannello nel quale scegliere il formato Fortran Free-form File (.f90).

- 7) Nel formato che si aprirà a seguito del passaggio 6), si inseriranno le stringhe di codice.
- 8) Tasto destro su Type3000 -> «Aggiungi»-> «Nuova cartella». Tasto destro su «Nuova cartella», «Aggiungi»-> «Elemento esistente» e si cerca la cartella TRNDII.lib sotto il seguente collegamento:
C:\TRNSYS17\Compilers\lvf11x\TRDII\Debug.
- 9) A questo punto premere sul tasto «compilazione» nella barra degli strumenti in alto e premere «Ricompila Type3000».

Per controllare che la compilazione abbia avuto esito positivo è necessario verificare due aspetti. Il primo consiste nel fatto che la ricompilazione non deve presentare alcun tipo di errore né di logica, né di sintassi e per questo motivo deve aver raggiunto la fine della compilazione con esito "Compilazione riuscita".

Il secondo consiste nell'andare a verificare che sia stata creata la cartella con estensione .dll necessaria per poter inserire il componente all'interno del Trnsys Simulation Studio. Per eseguire questa verifica è necessario entrare nei seguenti percorsi:

Trnsys17 -> Userlib ->ReleaseDLLs

Trnsys17 -> Userlib ->DebugDLLs

E verificare che sia presente la cartella Type3000.dll, talvolta quest'ultima è presente solamente nel secondo percorso; perciò, è necessario copiarla e incollarla all'interno del primo percorso.[14] [15]

Da questo momento della trattazione la parte legata alla programmazione e compilazione è terminata, si prosegue con creazione della proforma sul Trnsys Simulation Studio.

Come primo passaggio, dopo aver aperto Trnsys Simulation Studio, andare nella voce "File" → "New" → "New Components" , si aprirà la schermata presente in Figura 4.8. In questa sezione aperta possiamo notare quattro diciture: "General", "Descriptions", "Variables" e "Files". Nella sezione "General" è possibile inserire le informazioni riguardanti il giorno di creazione, l'autore, il nome del componente, l'immagine e altre informazioni di risalto.

Nella sezione "Descriptions", invece, è possibile inserire una breve descrizione del funzionamento del componente.

La sezione "Variables" viene utilizzata per inserire i parametri, le variabili di input e di output con le relative unità di misura, il numero di queste deve coincidere con quelle dichiarate nella fase di programmazione.

Per finire la sezione "Files" si utilizza per andare ad eseguire i collegamenti del componente con i relativi file necessari per il funzionamento, in questo caso, Figura 4.9, il componente è collegato con i file Type3000.dll, creato precedentemente, contenuto all'interno della cartella Release e Debug (riquadrate in blu). In più attinge i dati relativi alla performance da un file la cui estensione è .dat.

Questi dati sono stati prelevati dal catalogo di uno dei costruttori per eccellenza di pompe di calore: la ditta Viessmann. Il Gruppo Viessmann è leader nel mondo nella produzione di innovativi sistemi di riscaldamento e climatizzazione per la casa, sistemi industriali, nonché sistemi di refrigerazione.

L'ultimo collegamento da inserire riguarda il percorso al file Type3000.f90 creato nel punto 7) con le stringhe di codice, che dovremo inserire nella sezione "Source Code File".

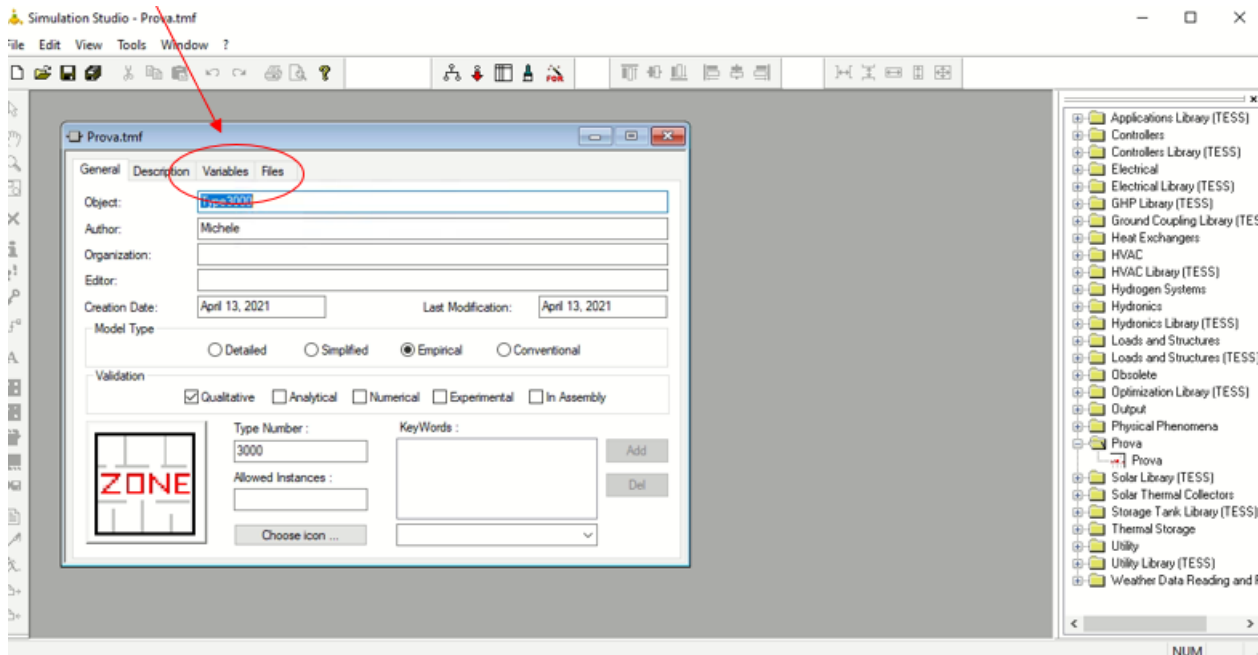


Figura 4.8. Proforma nel Trnsys Simulation Studio del nuovo componente.

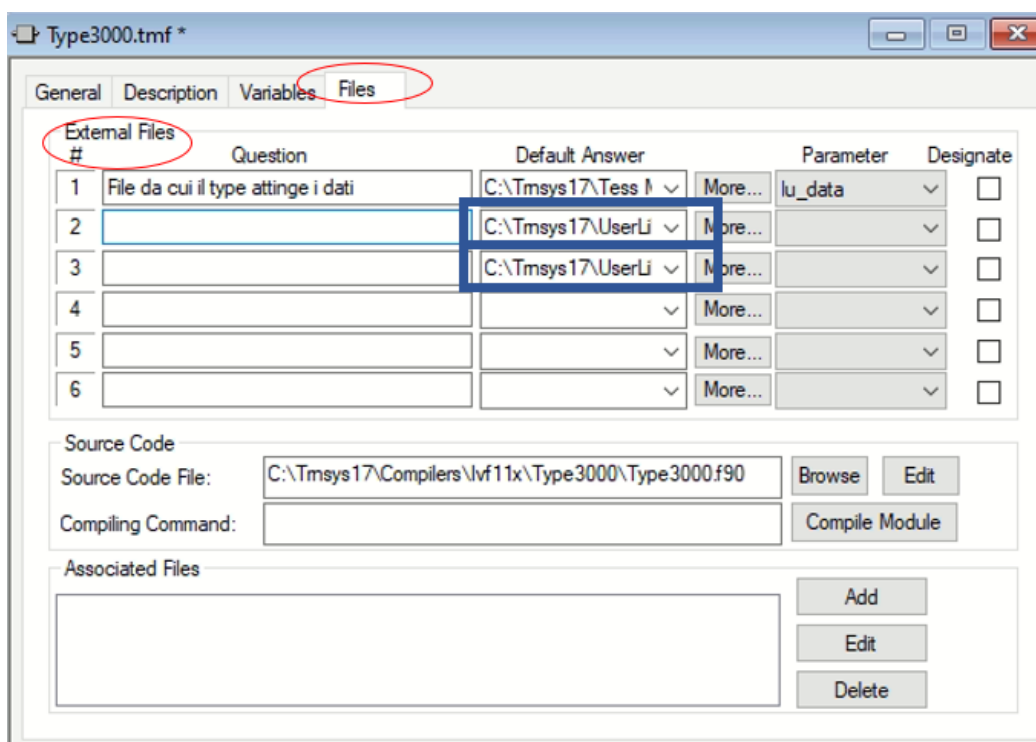


Figura 4.9 Sezione "Files" con i relativi collegamenti.

A questo punto salvare il nuovo componente, premendo il comando «Salva componente con nome..» che verrà salvato nella cartella Proforma nel seguente percorso:

C:\Trnsys17\Studio\Proformas

Riavviare il Trnsys e il componente, se tutto è stato eseguito correttamente, dovrebbe trovarsi nella colonna di destra sotto il nome Type3000.

4.2 Grandezze utilizzate

Sintesi delle grandezze utilizzate con rispettive unità di misura.

Calore specifico fluido	J/kg*K
Portata massica.....	kg/s
Temperatura aria.....	°C
Temperatura mandata.....	°C
Temperatura acqua.....	°C
CR	adimensionale
COP.....	adimensionale
fcorr.....	adimensionale
Potenza termica.....	W
Potenza elettrica.....	W
Potenza richiesta.....	W
Potenza nominale.....	W

Tabella delle grandezze in input della pompa di calore a capacità variabile.

Grandezze Input	Unità di misura
Temperatura fluido in ingresso	°C
Portata massica in ingresso	Kg/s
Temperatura fluido di mandata	°C
Temperatura aria in ingresso	°C
Pressione aria in ingresso	Atm
Umidità relativa	--
Valore di Cc	--
CR minimo	--
Modalità riscaldamento (onHeat)	--
Modalità raffrescamento (onCool)	--
Potenza nominale	kW
CR attivazione	--

Tabella delle grandezze in output della pompa di calore a capacità variabile.

Grandezze Output	Unità di misura
COP	--
Potenza elettrica (Power)	kW
Potenza termica (Capacity)	kWt
Temperatura fluido in uscita	°C
Portata massica in uscita	Kg/s
CR	--
Potenza richiesta	kW

4.3 Funzionamento pompa di calore a capacità variabile

Introduciamo, in questa unità, il funzionamento della pompa di calore a capacità variabile. Questa tipologia di pompa viene utilizzata per poter regolare in maniera più efficiente il quantitativo di calore da fornire al fluido, riducendo in questo modo la potenza elettrica necessaria. Trova applicazioni negli impianti termotecnici, perché consente una riduzione dei consumi rispetto ad una tradizionale pompa di calore on/off. Inizialmente è necessario introdurre alcune grandezze per andare a comprendere il funzionamento della pompa di calore a capacità variabile:

- COP (Coefficient of performance): il cui significato sarebbe “coefficiente di prestazione”, è il coefficiente utilizzato per eccellenza per poter confrontare le prestazioni tra pompe di calore, refrigeratori e sistemi di condizionamento ad aria. In termini matematici è il rapporto tra il calore fornito (o sottratto)(Q) in valore assoluto e il lavoro necessario(W), affinché questo calore possa essere fornito (o sottratto) dal sistema stesso. Qui di seguito riportata la formula empirica:

$$COP = \frac{Q}{W}$$

Equazione 4.1

- CR (capacity ratio): è il rapporto tra la potenza richiesta (Preq) e la potenza nominale espressa dal costruttore (Pnom) ad una determinata temperatura di mandata ed esterna alla quale si opera. Essendo il rapporto tra due potenze è adimensionale. In questo caso la Preq è pari al prodotto tra il calore specifico del fluido (Cp), la portata massica (G) e la differenza di temperatura (ΔT).

Il ΔT si ottiene facendo la differenza tra la temperatura di mandata (Tmandata) e la temperatura alla quale si trova il fluido di ritorno (Tingresso). Di seguito le formule:

$$CR = \frac{P_{req}}{P_{nom}}$$

Equazione 4.2

$$P_{req} = G * C_p * (T_{mandata} - T_{ingresso})$$

Equazione 4.3

In base al valore di questo rapporto è possibile suddividere l'operatività della pompa di calore a capacità variabile in tre zone:

- $CR \geq 1$ zona di funzionamento nominale, ovvero alla massima potenza e al massimo COP;
 - $1 > CR > CR_{min}$ zona di funzionamento a carico parziale, si opera con il COP dichiarato dai dati del costruttore;
 - $CR < CR_{min}$ zona di funzionamento a carico minimo, si opera con il valore del COP più basso possibile ed interviene il fattore di correzione;
- f_{corr} : è il fattore di correzione, ovvero un fattore che viene utilizzato per poter esprimere in maniera più esatta il COP. Questo fattore viene introdotto nella normativa italiana UNI TS 11300-4-2016. Di seguito una breve sintesi:
nel caso in cui il $CR < CR_{attivazione}$ allora la pompa si disattiverà,
nel caso in cui il $CR < CR_{min}$ allora il fattore correttivo dipenderà dalla seguente relazione:

$$f_{corr} = \frac{CR}{C_c * CR + (1 - C_c)}$$

Equazione 4.4

Dove CR è il capacity ratio precedentemente definito, mentre C_c è una costante il cui valore si aggira intorno a $C_c=0.9$, anche se il più delle volte è espressa nel catalogo. Nel caso in cui $CR > CR_{min}$ allora per trovare il fattore di correzione si effettuerà il rapporto fra il COP a carico parziale (COP_{cp}) e il COP a carico totale (COP_{ct}).

$$f_{corr} = \frac{COP_{cp}}{COP_{ct}}$$

Equazione 4.5

Di seguito il grafico della pompa di calore a capacità variabile in cui abbiamo la dipendenza del fattore di correzione al variare del CR.

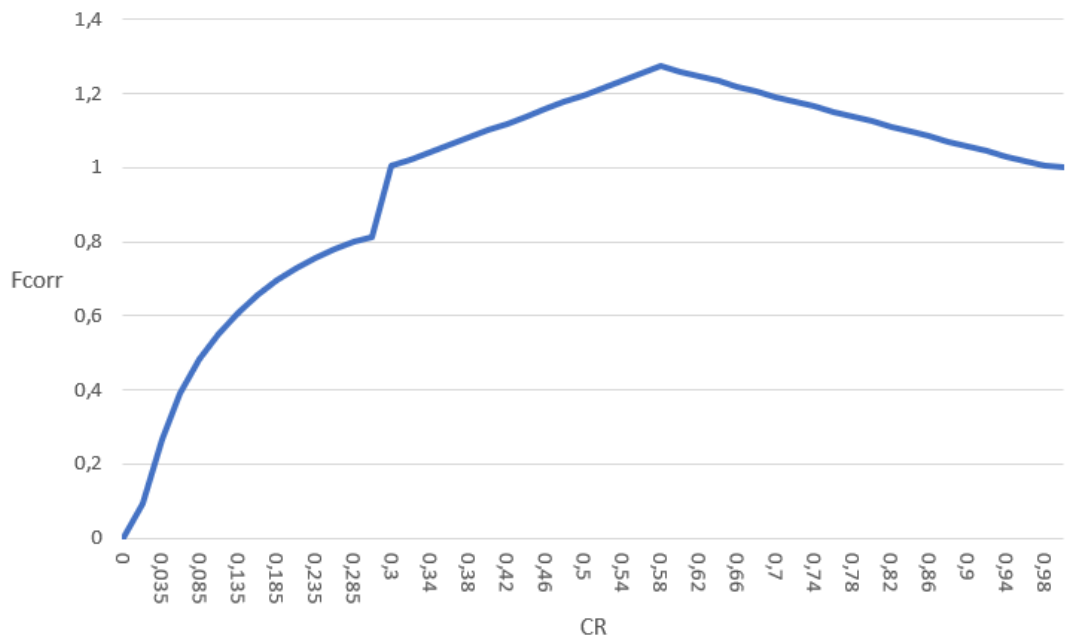


Figura 4.10 Andamento del fattore di correzione al variare del CR.

In questo grafico la curva continua in blu indica l'andamento del fcorr della pompa di calore a portata variabile creata ed utilizzata nelle simulazioni nel Trnsys Simulation Studio.

In questo caso si è imposto un $CR_{min} = 0,3$. Al di sotto del CR_{min} l'andamento del fattore correttivo tende ad aumentare, con andamento riportato nella equazione 4.4, fino ad arrivare ad un valore di circa 0,8. Al di sopra del CR_{min} si avrà un improvviso aumento del fattore correttivo che si aggira intorno ad 1, dovuto al fatto che si passa dalla equazione 4.4 alla 4.5, per poi aumentare con andamento quasi lineare ed avere un massimo, il cui valore è pari a 1,27 con un CR compreso fra 0,55 e 0,65. Successivamente, con l'aumentare del CR, il fattore correttivo tenderà a diminuire quasi linearmente, per poi portarsi nuovamente ad un valore pari ad 1 con $CR=1$.

- Potenza elettrica (Power): è la potenza elettrica che la pompa necessita per poter operare, si ottiene facendo il prodotto fra Capacity e COP.
- Potenza (Capacity): è la potenza termica che la pompa è in grado di trasferire al fluido.

$$Power = \frac{Capacity}{COP}$$

Equazione 4.6

4.3.1 Esempio numerico del funzionamento

Dopo aver introdotto le grandezze principali analizziamo il funzionamento della pompa di calore a capacità variabile.

1. Il primo step da eseguire consiste nel fissare la temperatura di mandata del fluido, nel caso trattato si utilizza: l'acqua. Perciò il calore specifico dell'acqua è pari a $4186 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$.
2. Successivamente, nota la temperatura del fluido in entrata alla pompa e nota la portata massica del fluido espressa in kg/s , è possibile calcolare la potenza richiesta.
3. Individuare la potenza nominale della pompa, dichiarata dal costruttore nel catalogo.
4. Trovare il CR, noto come il rapporto tra la potenza richiesta e la potenza nominale.
5. In un file climatico si troverà la temperatura dell'aria esterna, quest'ultima è una grandezza transitoria, ovvero varia al variare delle ore della giornata.
6. Ora, note la temperatura di mandata, la temperatura dell'aria esterna e il capacity rate attraverso l'interpolazione dei dati dal catalogo è possibile conoscere il valore del COP e della potenza, sia termica che elettrica.

Di seguito un esempio numerico.

Si consideri di dover operare con l'acqua e di dover riscaldare questo fluido termovettore fino ad una $T_{\text{mandata}} = 45^\circ\text{C}$. (1°step)

Il calore specifico dell'acqua è pari a $C_p = 4186 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$.

Misurando la temperatura del fluido si nota che è pari a $T_{\text{fluidoingresso}} = 8^\circ\text{C}$ e la portata massica $G = 0.05 \text{ kg/s}$

Inoltre, consultando il file climatico e scegliendo una data e un orario a piacimento, per esempio, ore 12:00 del 15 dicembre la temperatura dell'aria esterna è pari a

$$T_{\text{aria}} = 4.5^\circ\text{C}$$

Ricaviamo la potenza richiesta $P_{\text{req}} = 0.05 \cdot 4186 \cdot (45 - 8) = 7.750 \text{ J/s} = 7.75 \text{ kW}$ (2°step)

La potenza nominale dichiarata dal costruttore è $P_{\text{nom}} = 9.5 \text{ kW}$ (3°step)

Ricaviamo il CR = $7.79/9.5 = 0.82$ (4°step)

Note la temperatura dell'aria esterna, il capacity rate e la temperatura di mandata (riquadri in blu), entriamo nella tabella di seguito e interpoliamo il valore del COP e della potenza (rispettivamente 2° e 1° colonna)(riquadri in rosso). (5°step)

(6°step)

$$\text{COP} = 3.08$$

$$\text{Capacity} = 3.60 \text{ kWt}$$

$$\text{Power} = 1.17 \text{ kW}$$

Di seguito il file attraverso il quale la pompa di calore a portata variabile interpola i dati e permette di conoscere il COP e la Capacity, per poi poter conoscere la potenza elettrica, partendo dalla conoscenza della temperatura dell'aria esterna, Capacity rate e temperatura di mandata.

35	45	55				!Tmandata
0.51	0.66	0.82	1			!CR
-7	-2	2	7	12		!Taria ingresso
1.47	2.82					!taria=-7,CR=0.51,Tmand=35
1.56	3.23					!taria=-2,CR=0.51,Tmand=35
1.95	3.47					!taria=2,CR=0.51,Tmand=35
2.44	4.41					!taria=7,CR=0.51,Tmand=35
2.85	5.13					!taria=12,CR=0.51,Tmand=35
2.25	2.84					!taria=-7,CR=0.66,Tmand=35
2.39	3.26					!taria=-2,CR=0.66,Tmand=35
2.50	3.50					!taria=2,CR=0.66,Tmand=35
3.14	4.45					!taria=7,CR=0.66,Tmand=35
3.73	5.17					!taria=12,CR=0.66,Tmand=35
3.03	2.93					!taria=-7,CR=0.82,Tmand=35
3.22	3.35					!taria=-2,CR=0.82,Tmand=35
3.37	3.60					!taria=2,CR=0.82,Tmand=35
3.85	4.58					!taria=7,CR=0.82,Tmand=35
4.61	5.32					!taria=12,CR=0.82,Tmand=35
3.81	2.91					!taria=-7,CR=1,Tmand=35
4.05	3.33					!taria=-2,CR=1,Tmand=35
4.08	3.58					!taria=2,CR=1,Tmand=35
4.18	4.55					!taria=7,CR=1,Tmand=35
5.50	5.29					!taria=12,CR=1,Tmand=35
1.95	2.29					!taria=-7,CR=0.51,Tmand=45
1.97	2.41					!taria=-2,CR=0.51,Tmand=45
1.83	2.58					!taria=2,CR=0.51,Tmand=45
2.27	3.36					!taria=7,CR=0.51,Tmand=45
2.48	3.86					!taria=12,CR=0.51,Tmand=45
2.56	2.31					!taria=-7,CR=0.66,Tmand=45
2.58	2.43					!taria=-2,CR=0.66,Tmand=45
2.55	2.60					!taria=2,CR=0.66,Tmand=45
3.11	3.39					!taria=7,CR=0.66,Tmand=45
3.39	3.89					!taria=12,CR=0.66,Tmand=45
3.17	2.37					!taria=-7,CR=0.82,Tmand=45
3.20	2.50					!taria=-2,CR=0.82,Tmand=45
3.27	2.67					!taria=2,CR=0.82,Tmand=45
3.94	3.49					!taria=7,CR=0.82,Tmand=45
4.30	4.00					!taria=12,CR=0.82,Tmand=45
3.78	2.36					!taria=-7,CR=1,Tmand=45
3.82	2.49					!taria=-2,CR=1,Tmand=45
3.99	2.66					!taria=2,CR=1,Tmand=45
4.78	3.47					!taria=7,CR=1,Tmand=45

Figura 4.11 File di interpolazione dati.

Fissato il $CR_{min} = 0.3$ e il $CR_{attivazione} = 0.1$, in questo caso il $Cr = 0.82$ perchè essendo $CR > CR_{min} > CR_{attivazione}$ allora il fattore di correzione è pari a $COP = COP_{cp} / COP_{ct} = 3.08 / 2.67 = 1.15$.

Capitolo 5

Simulazione di un impianto termotecnico

5.1 Descrizione caso di studio

Per poter confrontare l'operatività della pompa di calore a capacità variabile con la pompa di calore on/off è necessario inserirli alternativamente nel medesimo caso di studio: l'impianto termotecnico in Figura 5.1, e prelevarne i dati della simulazione. In questa figura è stata inserita la pompa di calore a capacità variabile. Nel caso in cui fosse presente la pompa di calore on/off si fa riferimento alla Figura 5.2. [16]

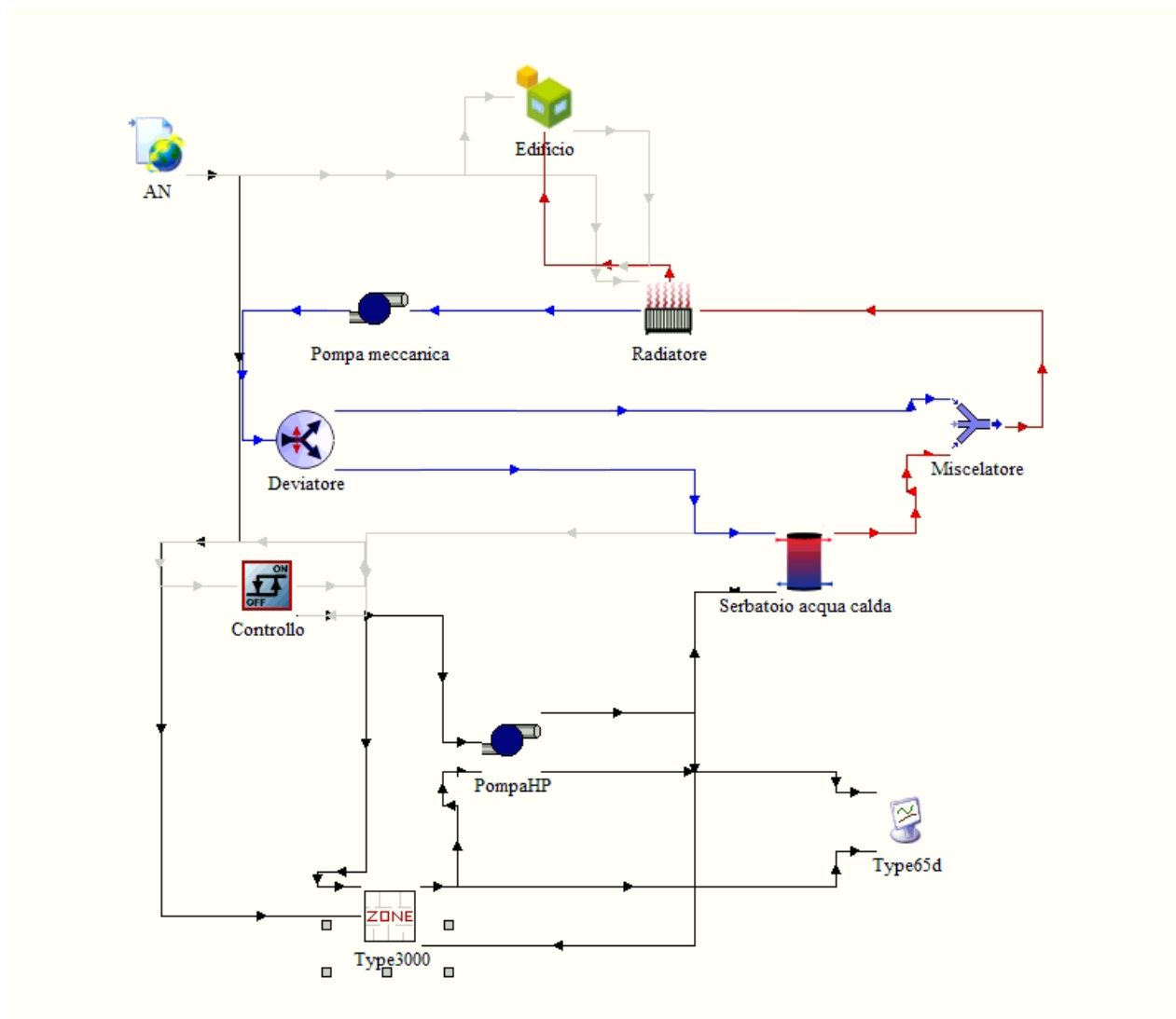


Figura 5.1 Impianto termotecnico con pompa di calore a capacità variabile.

Il Type941, pompa di calore on/off, è un componente già presente, in quanto creato dagli sviluppatori del Trnsys; perciò, non tutte le variabili in output sono le stesse del Type3000. A causa di questo piccolo inconveniente la grandezza potenza elettrica (Power) è presente, ma l'unica differenza riguarda i risultati che non sono espressi direttamente in kW, bensì in kJ/h. Per ovviare a questo aspetto si è inserita una nuova equazione in uscita dal componente. Questa equazione ha come input il valore della Power in kJ/h e come output il valore della Power in kW. Tutto ciò è permesso tramite un semplice rapporto, Equazione 5.1:

$$Power_{kW} = Power_{kJ/h} / 3600$$

Equazione 5.1

In questo modo si ottiene direttamente la Power in kW.

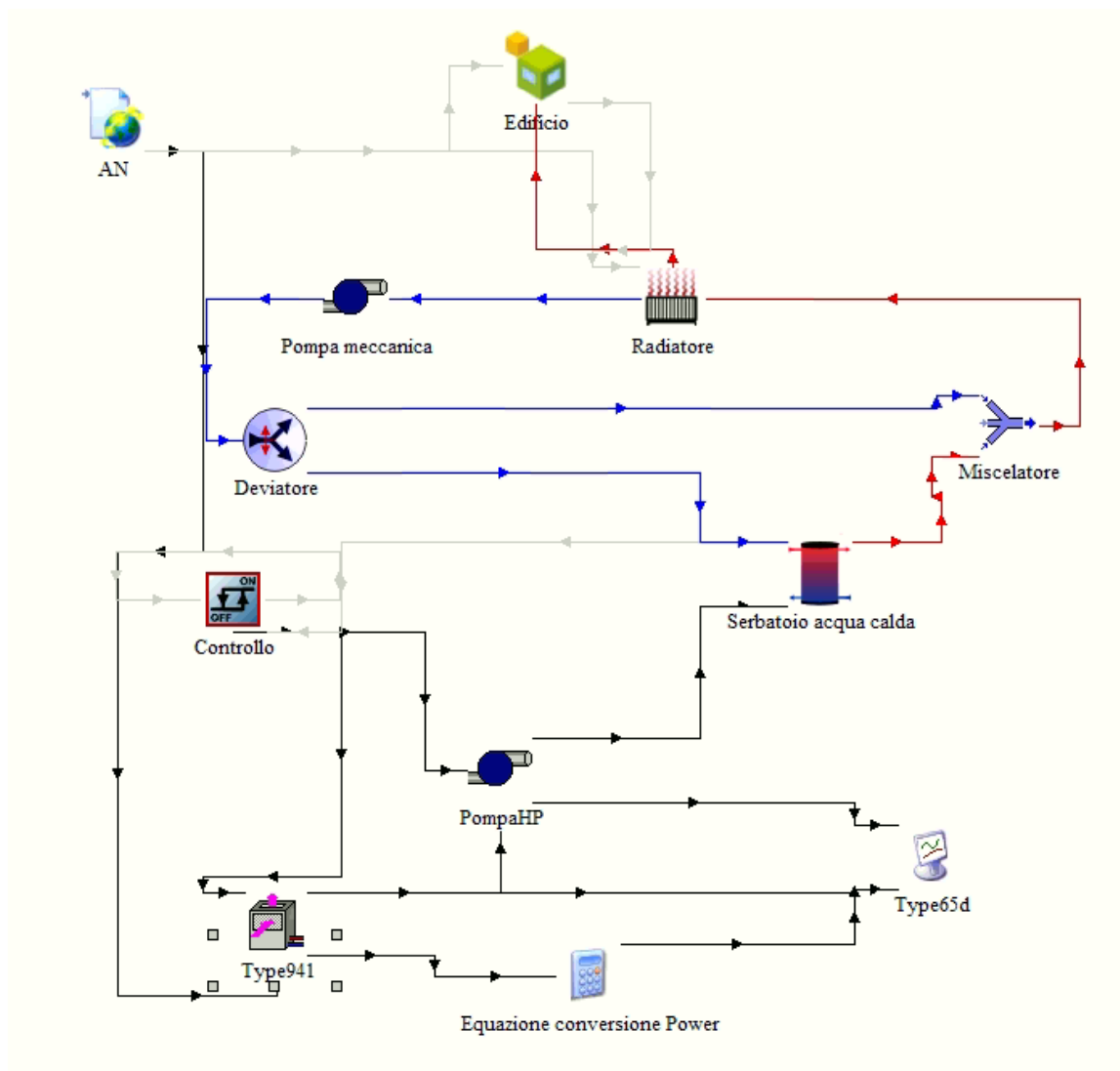


Figura 5.2 Impianto termotecnico con pompa di calore on/off.

5.1.1 Funzionamento impianto

La prima simulazione avviene in una settimana invernale, più precisamente nel mese di gennaio, la seconda durante l'intero mese di Marzo, nella città di Ancona(IT), le cui coordinate geografiche sono 43°37'N 13°31'E.

A cause della potenza termica dissipata dall'edificio, parte del calore presente all'interno viene ceduto all'ambiente esterno e di conseguenza la temperatura all'interno del locale diminuisce. Per mantenere il benessere termico all'interno del locale è necessario che del calore venga fornito, in modo tale da ripristinare la temperatura interna. Si fissa perciò una temperatura interna di benessere che si aggira intorno ai 20°C.

Per poter comprendere in maniera più semplice il funzionamento, si effettua la divisione dell'impianto in due circuiti, rispettivamente composti dai seguenti elementi:

1. Primo circuito, Figura 5.3: Radiatore → Pompa meccanica → Deviatore → Serbatoio acqua calda → Miscelatore → Radiatore.

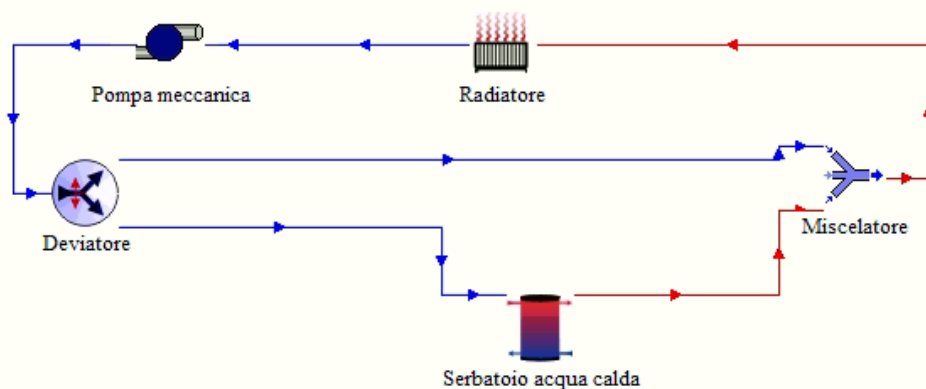


Figura 5.3 Rappresentazione schematica primo circuito.

2. Circuito secondo, Figura 5.4: Serbatoio acqua calda → Pompa di calore → PompaHP (con controllo) → Serbatoio acqua calda.

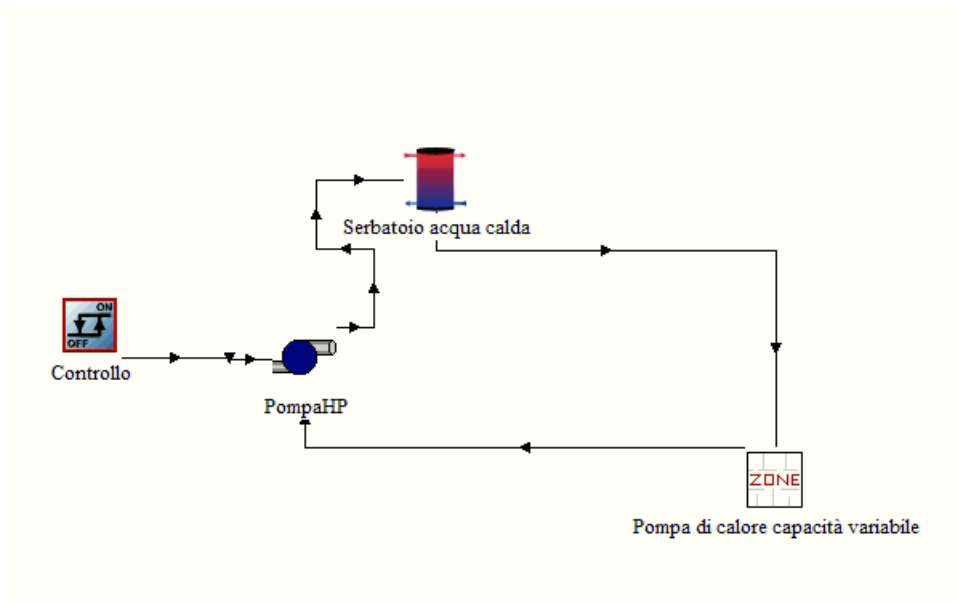


Figura 5.4 Rappresentazione schematica secondo circuito.

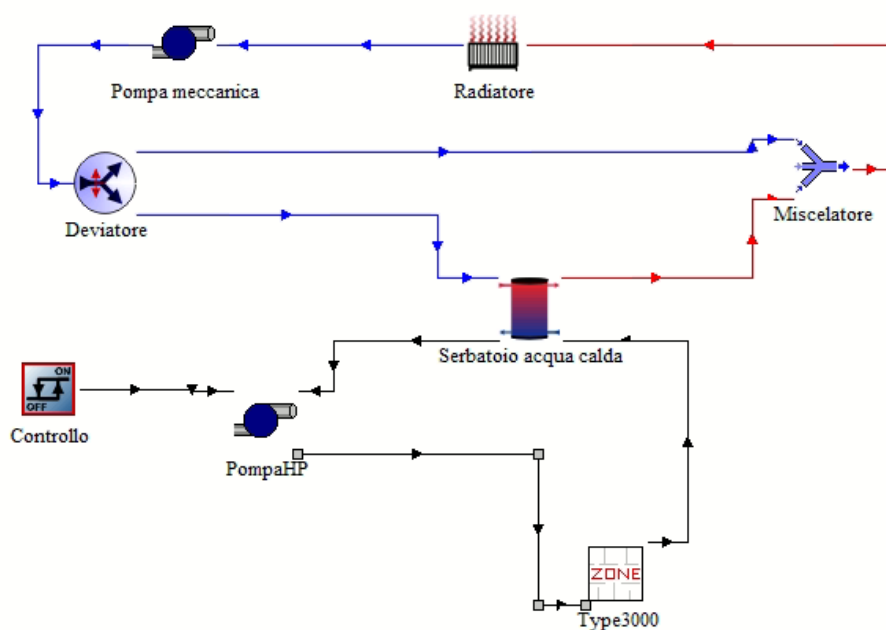


Figura 5.5 Rappresentazione del collegamento fra i due circuiti.

Nel primo circuito la pompa meccanica, che in questo caso opera a portata costante, ha lo scopo di fornire la prevalenza necessaria all'acqua di modo tale da consentire a quest'ultima di circolare all'interno del circuito fino al radiatore stesso. Il radiatore successivamente cede il calore dall'acqua all'aria, che viene poi immessa all'interno dell'edificio, e in questo modo mantiene la temperatura costante sul valore prefissato precedentemente. Dopo aver ceduto il calore: l'acqua, uscente dal radiatore, viene convogliata all'interno del deviatore. Il deviatore presenta un'unica entrata e due uscite: una diretta all'interno del serbatoio dell'acqua calda e una diretta verso il miscelatore. La

temperatura alla quale si trova l'acqua in entrata al deviatore è fondamentale per poter ottimizzare la portata di acqua fra le due uscite. Maggiore è la temperatura in entrata dell'acqua al deviatore e di conseguenza maggiore sarà la portata di acqua che verrà direzionata direttamente al miscelatore, in quanto trovandosi ad una temperatura elevata necessiterà di una portata ridotta di acqua proveniente dal serbatoio per poter raggiungere le condizioni di temperatura fissate. Nel caso opposto in cui la temperatura dell'acqua sia minore, allora aumenterà la portata di acqua in entrata al serbatoio, che verrà poi riscaldata, andando a diminuire la portata che andrà direttamente al miscelatore. Questo perché l'acqua che verrà convogliata direttamente al miscelatore non sarà riscaldata e avrà una temperatura pari a quella in uscita dal radiatore. Al contrario l'acqua che entrerà nel serbatoio verrà riscaldata fino alla temperatura prefissata.

Lo scopo del secondo circuito è quello di mantenere la temperatura all'interno serbatoio costante, in modo tale che il primo circuito sia sempre ben fornito di acqua calda. Per consentire questo processo un controllo misurerà costantemente la temperatura all'interno del serbatoio, in modo tale che nel momento in cui la temperatura scenda al di sotto del valore minimo allora si attivi la pompa meccanica. Questa pompa consente ad una determinata portata di acqua di poter uscire dal serbatoio e raggiungere la pompa di calore. All'interno della pompa di calore l'acqua verrà riscaldata fino alla temperatura di mandata. E poi verrà convogliata nuovamente al serbatoio. Nel momento in cui il controllo disattiva la pompa meccanica il fluido cessa di scorrere all'interno della pompa di calore.

5.1.2 Descrizione delle componenti

L'icona presente in Figura 5.6, è il Type56 , che in questo caso rappresenta l'edificio con cui si svolgeranno le simulazioni. In questo particolare caso, lo scopo è quello di mantenere la temperatura interna costante, perciò nel caso invernale essendo la temperatura esterna minore di quella interna, l'edificio avrà delle dispersioni di calore verso l'esterno. Affinché la temperatura possa rimanere costante all'interno dell'edificio è necessario che venga fornito calore da parte di un altro dispositivo.



Figura 5.6 Icona dell'edificio nel Simulation Studio.

In Figura 5.7 è rappresentata l'icona del Type1231. Questo dispositivo può essere considerato come un radiatore o un convettore, in grado di fornire calore attraverso una combinazione di irraggiamento e convezione. Preleva acqua, già riscaldata, dal serbatoio, per poi far avvenire all'interno del radiatore stesso lo scambio di calore fra acqua e aria, in modo da riscaldare l'aria che verrà poi immessa all'interno dell'edificio.



Figura 5.7 Icona Type1231 nel Simulation Studio.

Il Type654, Figura 5.8 è la pompa meccanica a velocità costante, in grado di mantenere costante la portata massica in uscita del fluido. Nel circuito termotecnico in questione ve ne sono due, sotto il nome di PumpHP e Pompameccanica, la prima ha lo scopo di far circolare l'acqua nel circuito che va dal serbatoio fino alla pompa di calore (Type3000), mentre la seconda permette all'acqua di circolare fra il radiatore e il serbatoio stesso. Queste pompe meccaniche permettono di far scorrere una determinata portata massica di fluido da un dispositivo all'altro. Sono in grado di attivarsi/disattivarsi tramite un segnale di controllo Booleano del tipo 0/1. Se il segnale di controllo è impostato su un valore di 0 allora la portata massica, l'energia assorbita e quella fornita sono pari a zero. Nel caso in cui invece sia pari a 1 allora la portata massica in uscita e la potenza assorbita dalla pompa sono impostate sui valori nominali specificati nell'elenco dei parametri.

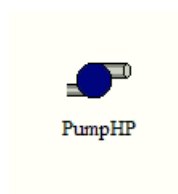


Figura 5.8 Icona Type654 nel Simulation Studio.

Il Type 11, in Figura 5.9, è un deviatore di fluido, consente di dividere la portata del fluido in due sotto-portate, una indirizzata in questo caso verso il serbatoio ed un'altra verso il miscelatore. Questo dispositivo presenta dieci modalità di funzionamento. Le modalità da 1 a 5 sono normalmente utilizzate per i fluidi con una sola proprietà importante, come la temperatura. Le modalità invece da 6 a 10 sono per i fluidi, come l'aria umida, con due proprietà importanti: la temperatura e l'umidità. Nel caso dell'impianto in questione, l'unica proprietà con la quale è necessario operare è la temperatura, perciò viene regolata con modalità 5.



Figura 5.9 Icona Type11 nel Simulation Studio.

Il Type649, in Figura 5.10, è una valvola miscelatrice in grado di combinare fino a 100 flussi singoli di fluido in entrata, per poi ottenerne uno unico in uscita, ha la funzione opposta rispetto a quella del deviatore. Nel caso in questione il suo scopo è quello di unire due portate differenti di fluido. Questo dispositivo, perciò, conoscendo le portate massiche e le temperature, è in grado di convogliare il fluido in un'unica direzione, la cui temperatura finale è una media ponderata delle

temperature dei due fluidi, mentre invece la portata in uscita è pari alla somma delle portate entranti.



Figura 5.10 Icona Type649 nel Simulation Studio.

Uno dei dispositivi fondamentali di questo impianto è Type 4: il serbatoio contenente acqua calda, Figura 5.11. Questa tipologia di serbatoio stratificato consente di dividere il volume di acqua in esso contenuto in vari strati completamente miscelati. Nel caso in questione sono presenti 20 strati. Inoltre, il serbatoio presenta due lati, il lato in cui entra il fluido freddo, che viene inserito nello strato inferiore, e il lato da cui entra il fluido caldo, che viene inserito nello strato superiore al di sotto del riscaldatore ausiliario.



Figura 5.11 Icona Type4 nel Simulation Studio.

Il Type3000, Figura 5.12, è la pompa di calore a capacità variabile già trattata ampiamente nel Capitolo 3 di questa tesi.

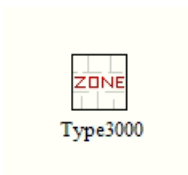


Figura 5.12 Icona Type3000 nel Simulation Studio.

In Figura 5.13 è presente l'icona relativa al file climatico dal quale la simulazione attinge i dati inerenti alla temperatura dell'aria esterna, umidità assoluta, umidità relativa, pressione e altri dati relativi alle condizioni climatiche. La città considerata in questo caso è Ancona(IT), le cui coordinate geografiche sono 43°37'N 13°31'E.



Figura 5.13 Icona del file climatico nel Simulation Studio.

Il dispositivo in Figura 5.14, è il Type2, un componente che svolge il ruolo di controllo, genera perciò una funzione di controllo che può avere valore di 1 o 0. Questo dispositivo viene normalmente utilizzato con il segnale di controllo in ingresso collegato con il segnale di controllo di uscita, fornendo un effetto di isteresi. Inoltre, per motivi di sicurezza questo controller include un'interruzione nel momento in cui si superi un valore soglia. Nel seguente caso si imposta una temperatura da mantenere, di 45°C, all'interno del serbatoio, più o meno una determinata tolleranza, questo controllo farà sì che la pompa meccanica (HPpump) si attivi, nel momento in cui la temperatura diminuisce al di sotto del valore limite, e consenta al fluido di poter circolare all'interno della pompa di calore ed essere riscaldata. Mentre nel caso in cui la temperatura raggiunga il valore massimo questo controllo spegnerà la pompa meccanica.



Figura 5.14 Icona Type2 nel Simulation Studio.

IL Type65d è un componente grafico utilizzato per visualizzare le variabili di sistema selezionate mentre la simulazione è in corso. Questo componente viene ampiamente utilizzato poiché fornisce preziose informazioni riguardo all'andamento delle variabili e consente di vedere immediatamente se il sistema non sta funzionando come desiderato. Oltretutto attraverso questo Type non viene generato alcun file, consentendo di risparmiare spazio sul disco. In Figura 5.15 l'icona del Type65d.

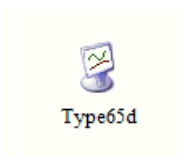


Figura 5.15 Icona Type65d nel Simulation Studio.

5.1.3 Grandezze caso di studio

L'edificio in questione è un edificio campione, prelevato dal sito Tabula Webtool, utilizzato per svolgere le simulazioni. In particolare, il modello di edificio risale all'anno 2006, costruito in Italia, in una zona climatica media (zona D). Questa zona è perfettamente compatibile con la città di Ancona, nella quale si hanno a disposizione i dati climatici nell'arco dell'intero anno. Di seguito sono riportate le specifiche riguardanti la composizione dell'edificio che si sviluppa in unico piano.

- Soffitto: solaio composto da laterizio e cemento, alto livello di isolamento, superficie pari a $A=96.4 \text{ m}^2$ con un valore di trasmittanza di $U=0.28 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$.



Figura 5.16 Stratigrafia soffitto.

- Pareti laterali: muratura in mattoni alveolati con elevata resistenza termica, alto livello di isolamento, superficie pari a $A=223.3 \text{ m}^2$ con un valore di trasmittanza pari a $U=0.34 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$.

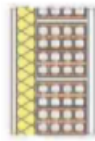


Figura 5.17 Stratigrafia pareti laterali.

- Pavimento: basamento di calcestruzzo su terreno, alto livello di isolamento, superficie di $A=96.4 \text{ m}^2$ con un valore di trasmittanza pari a $U=0.33 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$.



Figura 5.18 Stratigrafia pavimento.

- Finestre: vetro-camera basso emissivo con intercapedine d'aria o di altri gas, con telaio in legno, superficie di $A=21.7 \text{ m}^2$ con un valore di trasmittanza pari a $U=2.20 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$.

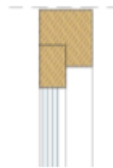


Figura 5.19 Stratigrafia finestre.

Le caratteristiche della pompa di calore a capacità variabile sono le seguenti:

- Modalità di operatività onHeat, ovvero modalità riscaldamento;
- Temperatura di mandata acqua fissata a 45°C ;
- Potenza nominale pari a 3.5 kW ;
- Valore del CR minimo pari a 0.3 ;
- Valore del CR di attivazione della pompa pari a 0.22 ;

Le caratteristiche delle pompe meccaniche sono le seguenti:

- Portata = 0.12 kg/s ;

- Potenza = 50 W;
- Efficienza del motore = 0.9;
- Efficienza complessiva = 0.8;

Caratteristiche del radiatore:

- Capacità di progetto = 4.5 kW;
- Temperatura superficiale di progetto = 45°C;

Nel caso di pompa di calore on/off le caratteristiche sono le seguenti :

- Modalità di operatività onHeat, ovvero modalità riscaldamento;
- Capacità elettrica di riscaldamento nominale = 3.5 kW;
- Potenza termica di riscaldamento nominale = 2.31 kW;

La temperatura da mantenere nel serbatoio è pari a quella di mandata, ovvero 45°C, più o meno un piccolo discostamento.

5.2 Risultati ottenuti nella settimana di Gennaio

In questo paragrafo si utilizzerà l'impianto termotecnico precedentemente descritto. Indichiamo con il termine Timestep il passo temporale, ovvero l'orario nel quale ci troviamo durante lo svolgimento della simulazione. Per ciascun intervallo di Timestep è associato un arco temporale dell'anno solare. In questa prima simulazione verrà considerata una settimana del mese di Gennaio, più nello specifico l'ultima settimana, il cui Timestep è compreso fra l'ora 558 e l'ora 744. Il sistema è impostato affinché ogni ora vengano salvati i dati. Si andranno a confrontare di pari passo la COP e la Power delle due pompe di calore, in modo da poter confrontare prima dai grafici e poi numericamente gli andamenti delle due grandezze precedentemente citate.

La pompa di calore a capacità variabile necessita anche di tre ulteriori grandezze per poter determinare la COP e la Power, come già analizzato nel Capitolo 4, queste tre grandezze sono: la temperatura esterna, il CR e la temperatura di mandata. Mentre le prime due variano nel corso della simulazione, la terza è costante. Riportiamo in Figura 5.20 l'andamento della temperatura dell'aria esterna al variare del Timestep, durante la settimana scelta come caso di studio. Si può notare come nei primi due giorni (ore 558-610) la temperatura media sia minore rispetto al resto della settimana. Inoltre, essendo una settimana invernale, si ha un'elevata escursione termica tra il giorno e la notte, con temperature che possono passare repentinamente dai 15°C agli 0°C. La temperatura media dell'aria esterna in questa settimana è pari a 6.5°C.

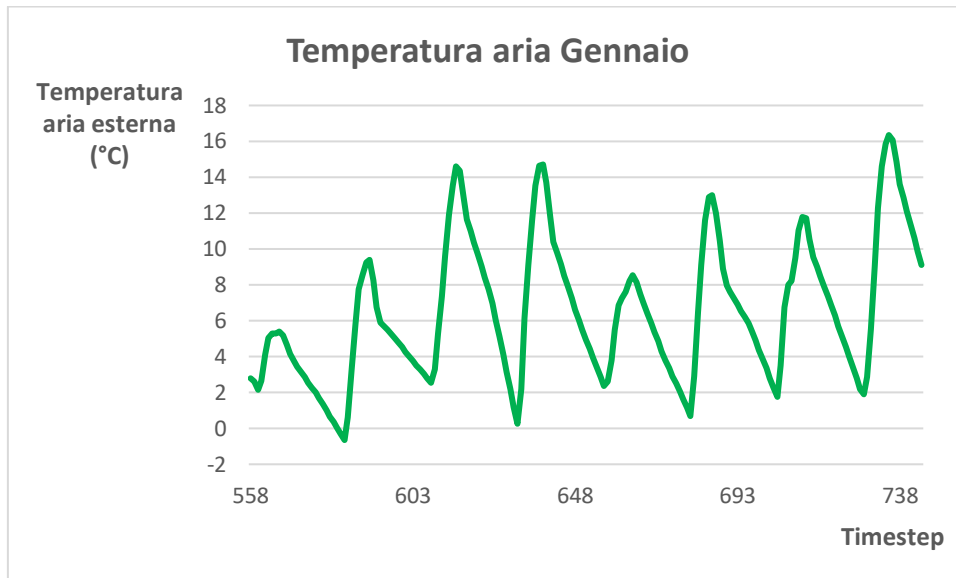


Figura 5.20 Rappresentazione della temperatura esterna nell'ultima settimana di Gennaio.

L'andamento del CR invece è solamente relativo alla pompa di calore a capacità variabile, in quanto è in grado di parzializzare il carico, processo che la pompa on/off non è in grado di compiere; il CR è legato principalmente alla potenza termica richiesta per mantenere l'edificio a temperatura. In base alla temperatura esterna si avranno potenze termiche dissipate differenti.

Nel caso in cui la temperatura esterna raggiunga i valori minimi allora la potenza termica dissipata dall'edificio sarà notevole, e di conseguenza aumenterà la potenza richiesta. Aumentando la potenza richiesta la pompa di calore a capacità variabile tenderà ad aumentare il proprio CR.

Riportiamo, ora, l'andamento del COP delle due pompe. Si può notare come in entrambi i grafici siano presenti: sull'asse delle ascisse il Timestep della simulazione e sull'asse delle ordinate il valore del COP. Affinché i dati possano essere facilmente interpretabili si è scelto di utilizzare la medesima scala numerica sull'asse delle Y, il cui minimo è 0 e il cui massimo è 4.5. Anche il colore rosso con la quale è stata evidenziata la grandezza non è casuale, infatti coincide con il colore presente sulla legenda nella fase di esplicitazione dei risultati nel Trnsys.

Nel momento in cui i valori di COP e di Power sono nulli allora ciò significa che la pompa di calore è disattivata. In Figura 5.21 è riportato l'andamento del COP nella pompa di calore on/off, nella Figura 5.22 quello della pompa di calore a capacità variabile.

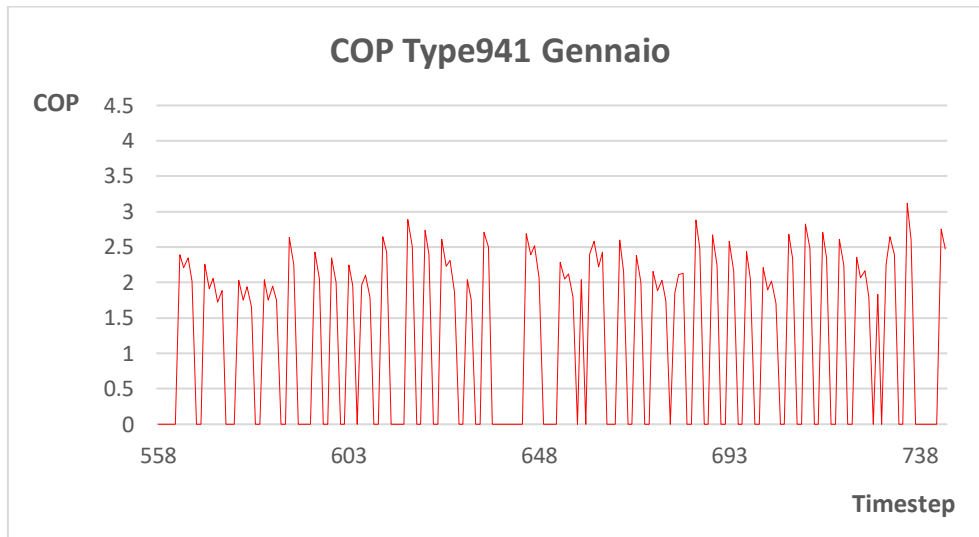


Figura 5.21 Andamento del COP pompa di calore on/off nell'ultima settimana di Gennaio.

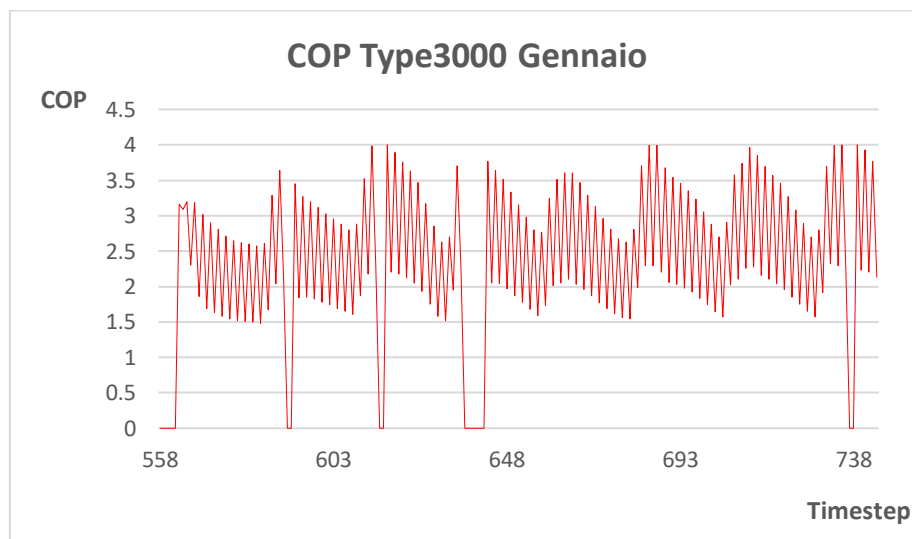


Figura 5.22 Andamento del COP pompa di calore a capacità variabile nell'ultima settimana di Gennaio.

Innanzitutto, si può notare come il COP della pompa di calore a capacità variabili si aggiri su valori lievemente più elevati, rispetto a quelli ottenuti con la pompa on/off. Numericamente il valore massimo raggiunto dal Type3000 è pari a 4.00 mentre quello ottenuto dal Type941 è pari a 3.12.

Altri due aspetti da considerare sono il COP medio e il numero di accensioni delle due pompe:

- Il COP medio con il quale opera la pompa di calore a capacità variabile nell'arco della simulazione è pari a 2.60 , mentre invece il COP medio per la pompa on/off è pari a 2.25. Tenendo conto di questo aspetto, seppur la variazione delle media sia di 0.35, la pompa di calore a capacità variabile opera con un'efficienza maggiore, riuscendo ad aumentare le prestazioni di un 15% rispetto la pompa on/off.

- Trattiamo ora il numero di attivazioni delle due pompe. Nella pompa di calore on/off, ogni qualvolta che la macchina viene attivata, il compressore si attiva subito alla potenza massima. Continua poi a lavorare a pieno regime, indipendentemente da quella che sarà la temperatura degli ambienti da riscaldare. Quando la pompa di calore on-off raggiungerà finalmente la temperatura desiderata, si arresterà completamente, spegnendosi. Il dispositivo ripartirà al massimo, quando la temperatura che avremo impostato non coinciderà più con quella che sarà la reale temperatura da mantenere. Questo fa sì che la pompa on/off si accende per 37 volte con tempi di operatività più ridotti rispetto alla pompa di calore a capacità variabile. La pompa di calore a capacità variabile ha un numero di accensioni molto più esiguo: solamente 5 accensioni con tempi di operatività molto elevati. Questo aspetto è dovuto al fatto che la pompa di calore a capacità variabile una volta raggiunta la temperatura di mandata, non si spegne bensì inizia ad operare al minimo, tutto ciò è possibile grazie alla parzializzazione del carico. In termini di attivazioni, inoltre, il fatto che il Type3000 non si debba spegnere e riaccendere comportato come notato dal grafico in Figura 5.22 e in Figura 5.24 delle efficienze maggiori e dei ridotti consumi di energia elettrica.

Un'altra grandezza principe con la quale si può analizzare il comportamento delle due pompe di calore è la Power, ovvero la potenza elettrica.

Nei grafici riportati di seguito, Figura 5.23 e Figura 5.24, si evidenzia prima l'andamento della Power della pompa di calore on/off e a seguire quello della pompa a capacità variabile. Nell'asse delle ordinate è presente la Power in kW, mentre su quella delle ascisse il Timestep. Anche in questo caso i grafici presentano la stessa scala sulle ordinate che va da 0 a 1.6 per facilitare la lettura dei dati.

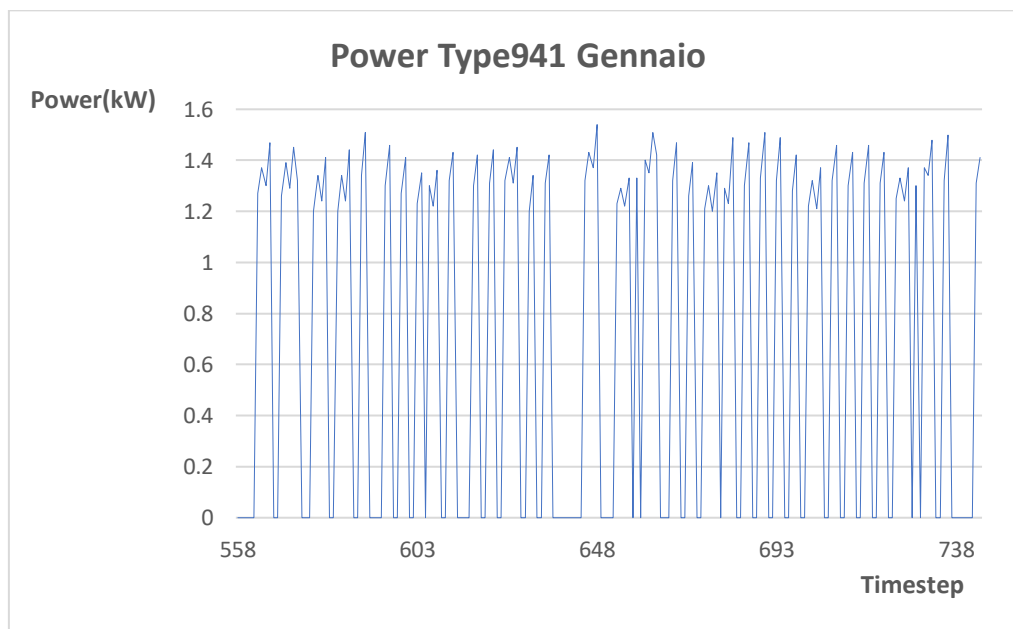


Figura 5.23 Andamento della Power pompa di calore on/off nell'ultima settimana di Gennaio.

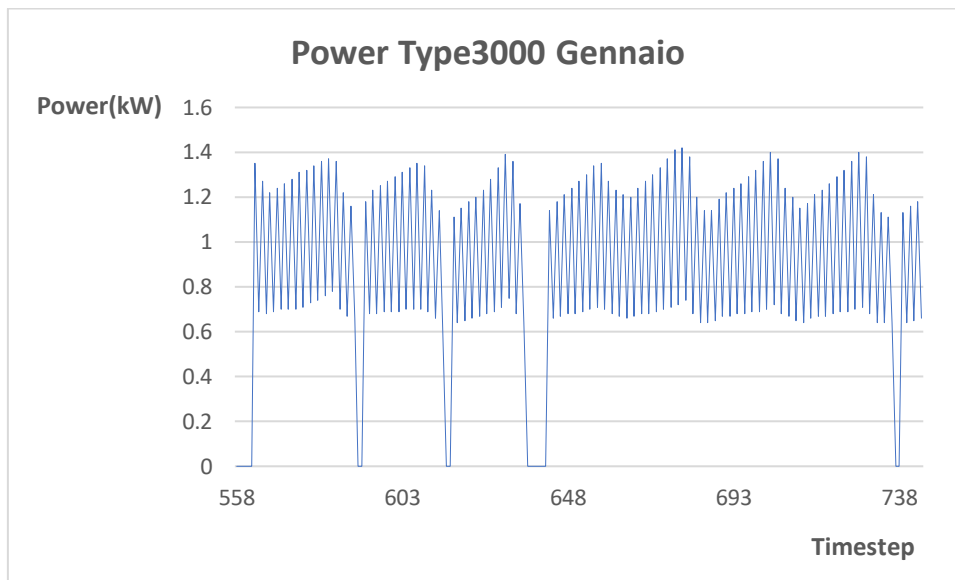


Figura 5.24 Andamento della Power pompa di calore a capacità variabile nell'ultima settimana di Gennaio.

In questo caso si può notare come la Power della pompa di calore a capacità variabile in relazione con quanto detto precedentemente, sia inferiore rispetto a quella della pompa di calore on/off, i cui valori medi sono rispettivamente 0.97 kW per quella a capacità variabile e 1.37 kW per quella on/off; ne consegue che anche in termini potenza elettrica, e quindi di consumi, la scelta migliore risiede nella pompa di calore a capacità variabile. La pompa di calore a capacità variabile consente quindi, di ridurre i consumi del 30% circa. Il poter operare in maniera continuativa e di conseguenza ridurre il numero di accensioni, gioca un ruolo fondamentale nell'ambito dei consumi. Per cui questa differenza di 0.40 kW è dovuta proprio a questa metodologia di operatività.

Un ulteriore caratteristica di cui tener conto risiede nel fatto che l'operatività di entrambe le pompe di calore è strettamente legata alla temperatura dell'aria esterna. Infatti, come si può evidenziare dai grafici nei primi due giorni della settimana a causa delle temperature esterne inferiori alla media, si sono registrate per entrambe le pompe di calore una riduzione del COP e un aumento dei consumi di corrente. Tutto ciò sta ad indicare che in zone temperate, le pompe di calore riescono ad evidenziare i loro aspetti legati all'alta efficienza e ai ridotti consumi. Invece in aree in cui la temperatura esterna raggiunge valori ridotti, la pompa di calore perde delle sue caratteristiche principale e occorre affiancare ad essa un ulteriore dispositivo in grado di produrre calore.

5.3 Risultati ottenuti nel mese di Marzo

In questo paragrafo si analizzeranno i risultati della seconda simulazione nel medesimo caso di studio. In questa seconda simulazione verrà considerato un intero mese: Marzo, il cui Timestep è compreso fra l'ora 1416 e l'ora 2160. Il sistema è impostato affinché ogni ora vengano acquisiti i dati. Il modus operandi è lo stesso del paragrafo 5.2.

Riportiamo inizialmente il grafico relativo alla temperatura dell'aria esterna nel mese di Marzo, Figura 5.25.

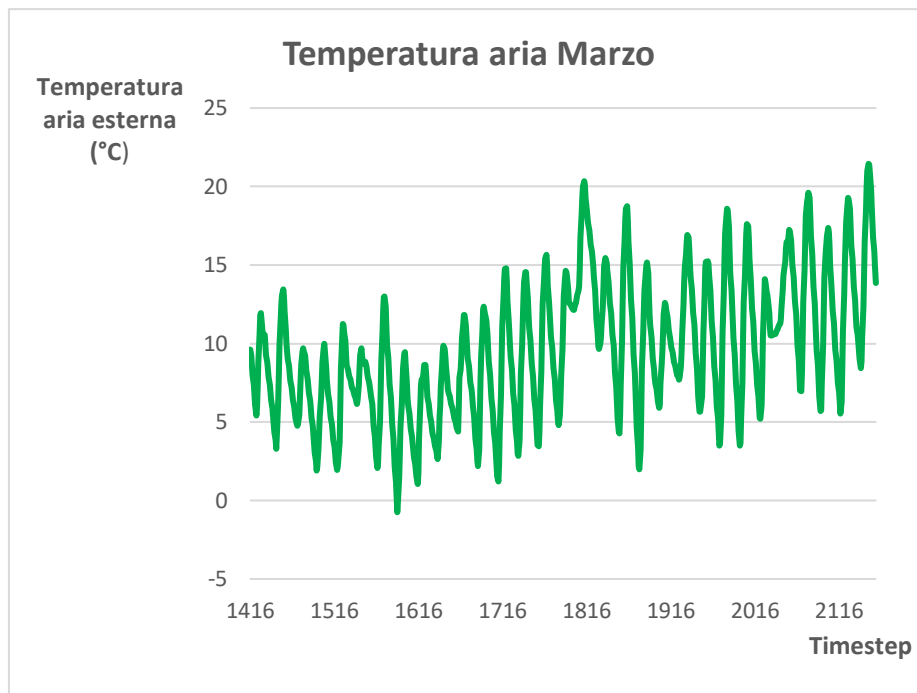


Figura 5.25 Andamento delle temperature dell'aria esterna nel mese di Marzo.

La temperatura media all'interno del mese di Marzo è pari 9.7°C. Nel grafico si può notare che la prima parte del mese presenta una temperatura dell'aria esterna minore rispetto a quella presente nella seconda parte. Questo comporterà un numero di accensioni della pompa on/off maggiore nella prima parte del mese rispetto alla seconda parte, in quanto sarà necessario ripristinare la temperatura all'interno del serbatoio con maggior frequenza. Anche in questo mese l'escursione termica fra il giorno e la notte è notevole, con una variazione massima che va da 18°C ai 3°C. La pompa è spenta nel momento in cui i valori di Power e di COP sono nulli.

Nelle Figura 5.26 e Figura 5.27 è possibile notare l'andamento del COP nella pompa di calore a capacità variabile e in quella on/off. Nell'asse delle ascisse è presente il Timestep della simulazione, mentre in quella delle ordinate il COP. Anche in questo caso la scala va da un valore minimo di 0 ad un valore massimo di 4.5, in modo da avere il medesimo sistema di riferimento, facilitando la visualizzazione dei dati.

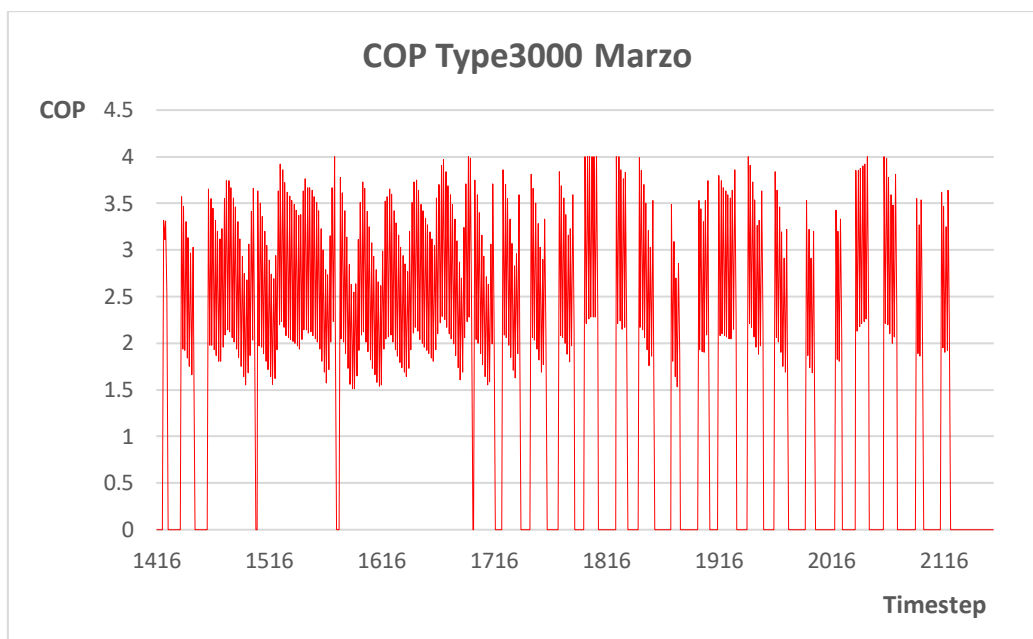


Figura 5.26 Andamento del COP pompa di calore a capacità variabile mese di Marzo.

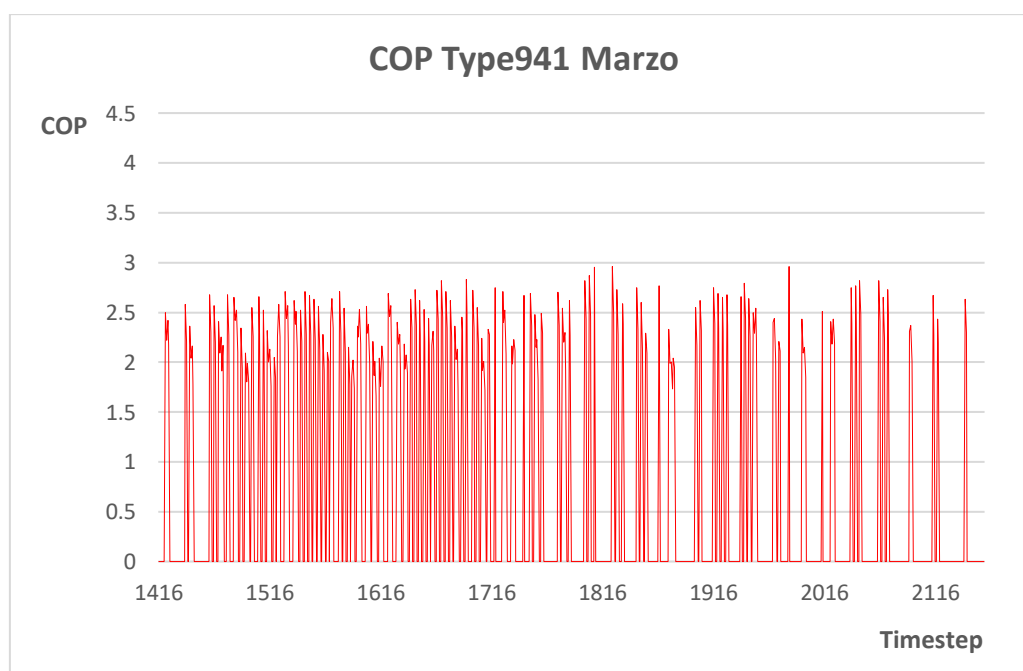


Figura 5.27 Andamento del COP pompa di calore on/off mese di Marzo.

Nelle Figura 5.28 e Figura 5.29 è possibile valutare l'andamento della potenza elettrica (Power) di entrambe le pompe, la struttura dei grafici è la seguente: sull'asse delle ascisse è presente il Timestep, mentre in quella delle ordinate il valore di Power espressa in kW. La scala sull'asse delle Y va da un minimo di 0 ad un massimo di 1.8.

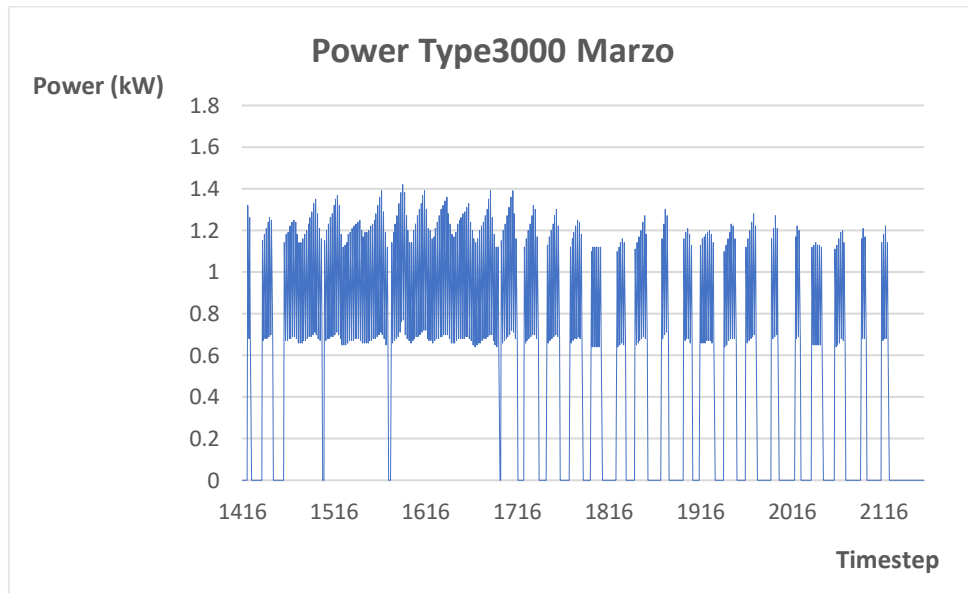


Figura 5.28 Andamento della Power pompa di calore a capacità variabile mese di Marzo.

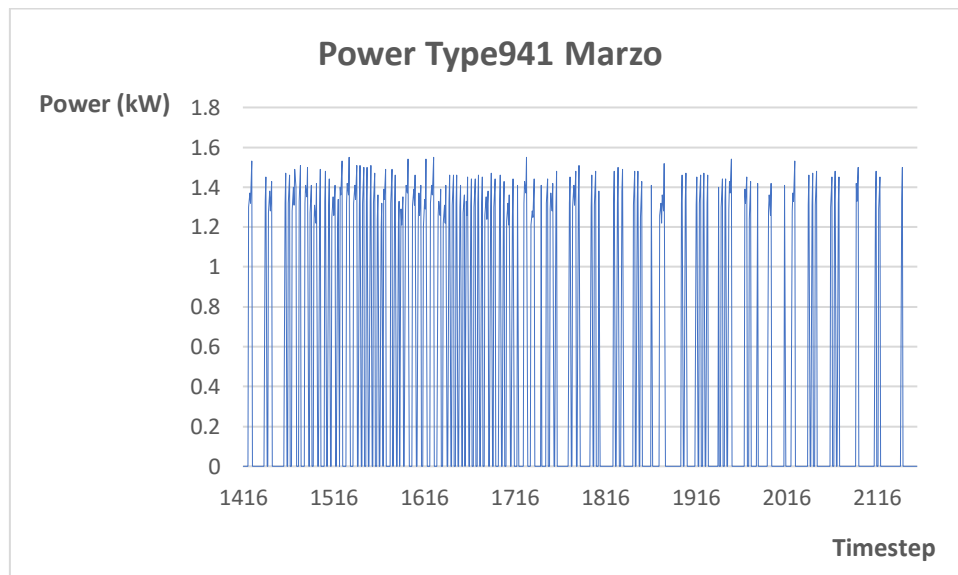


Figura 5.29 Andamento della Power pompa di calore on/off mese di Marzo.

I risultati presenti nella simulazione relativi al mese di Marzo sono molto simili a quelli presenti nella prima simulazione, ciò è dovuto al fatto che la temperatura seppur mediamente maggiore differisce di pochi gradi rispetto al primo caso. Si inizia l'analisi di questa simulazione dalla correlazione presente tra l'andamento della temperatura esterna dell'aria e COP e Power delle due pompe. Entrambe le pompe di calore, come è già stato espresso più volte, dipendono dalla temperatura dell'aria esterna: maggiore è la temperatura esterna e maggiore è il quantitativo di calore che le pompe sono in grado di prelevare. Nel grafico di Figura 5.28 questa relazione è accentuata, in quanto nella prima parte del mese (Timestep 1416-1716) la temperatura media è di 6,9°C e la potenza elettrica (Power) della pompa di calore a capacità variabile è di 0,97kW. Nella seconda parte del mese, invece, la temperatura media è di 11,6°C e la Power di 0,92kW.

Stesso discorso vale per la pompa di calore on/off. Si denota che col diminuire della temperatura dell'aria esterna aumenta la potenza termica necessaria e di conseguenza aumentano i consumi.

Per la pompa di calore on/off l'andamento del COP, come nell'ultima settimana di Gennaio, è inferiore rispetto alla pompa di calore a capacità variabile. Nel caso di pompa di calore a capacità variabile il COP medio è pari a 2.70 mentre per la pompa di calore on/off il COP medio è pari a 2.33. La differenza di COP medio è quindi di 0.37, ciò sta ad indicare che la pompa di calore a capacità variabile è in grado di ottenere prestazioni migliori anche nel mese di Marzo, rispetto alla pompa on/off. Anche in questo caso si è registrato un aumento delle prestazioni da parte della pompa di calore a capacità variabile del 15% rispetto alla pompa di calore on/off.

Si tratta ora la Power. Il valore di Power media nel caso di pompa di calore a capacità variabile è pari 0.94 kW, mentre per la pompa di calore on/off la media della Power è pari a 1.34 kW. Questa differenza di potenza elettrica utilizzata consente di ottenere una riduzione dei consumi pari a circa il 30% da parte della pompa di calore a capacità variabile.

Si effettua ora un confronto tra la simulazione avvenuta nell'ultima settimana di Gennaio e quella avvenuta nel mese di Marzo. Il confronto avverrà nella valutazione delle differenze tra COP medio e Power media. Per la pompa di calore a capacità variabile si è passati da un valore di COP medio da 2.60 a 2.70 ottenendo un +0.10; per la pompa on/off si passati da 2.25 a 2.33 acquisendo un +0.08. Riguardo alla Power media si è passati per la pompa di calore a capacità variabile da 0.97 kW a 0.94 kW, per la pompa on/off da 1.37 kW a 1.34 kW. Registrando così un -0.03 kW per entrambe le pompe. Il motivo per cui il COP medio sia aumentato e la Power media sia diminuita è proprio dovuto al fatto che la temperatura media dell'aria esterna è aumentata rispetto al caso precedente, per cui il calore prelevabile da parte della pompa nei confronti dell'aria è maggiore, di conseguenza diminuisce la potenza elettrica necessaria per portare l'acqua a temperatura e aumenta l'efficienza della macchina. Questo primo vantaggio è comune ad entrambi le pompe.

Nell'ambito delle attivazioni, la pompa di calore a capacità variabile si è attivata 23 volte con tempi di operatività elevati, la pompa di calore on/off ha registrato un numero di accensione più che quadruplicato pari a 95 volte, con periodi di operatività ridotti. Questa differenza di accensioni fra una e l'altra è legata alla parzializzazione del carico che la pompa di calore a capacità variabile è in grado di svolgere, per questo motivo ottimizza la scelta di COP e Power per ciascuna situazione che gli si presenta, riuscendo quindi a modellarsi in base alle necessità. Poter parzializzare il carico consente quindi di far operare il compressore a potenze ottimali, e di conseguenza si ottengono rendimenti del compressore maggiori e consumi di corrente elettrica ridotti. Cosa che la pompa di calore on/off non è in grado di svolgere in quanto opera a carico massimo e quindi con il compressore che eroga sempre la massima potenza per tutta la durata di attivazione. Questo aspetto è fondamentale nelle zone temperate in quanto consente di operare con COP maggiori e Power ridotte, rispetto ad una pompa di calore on/off.

Per ribadire ulteriormente la differenza fra la pompa di calore a capacità variabile e quella on/off, consideriamo due giorni qualsiasi all'interno del mese di Marzo, per esempio i giorni compresi fra il Timestep 1616 e 1670. Questa volta sul medesimo grafico, Figura 5.30 e Figura 5.31, si riportano rispettivamente l'andamento del COP e della Power di entrambe le pompe di calore nei due giorni considerati.

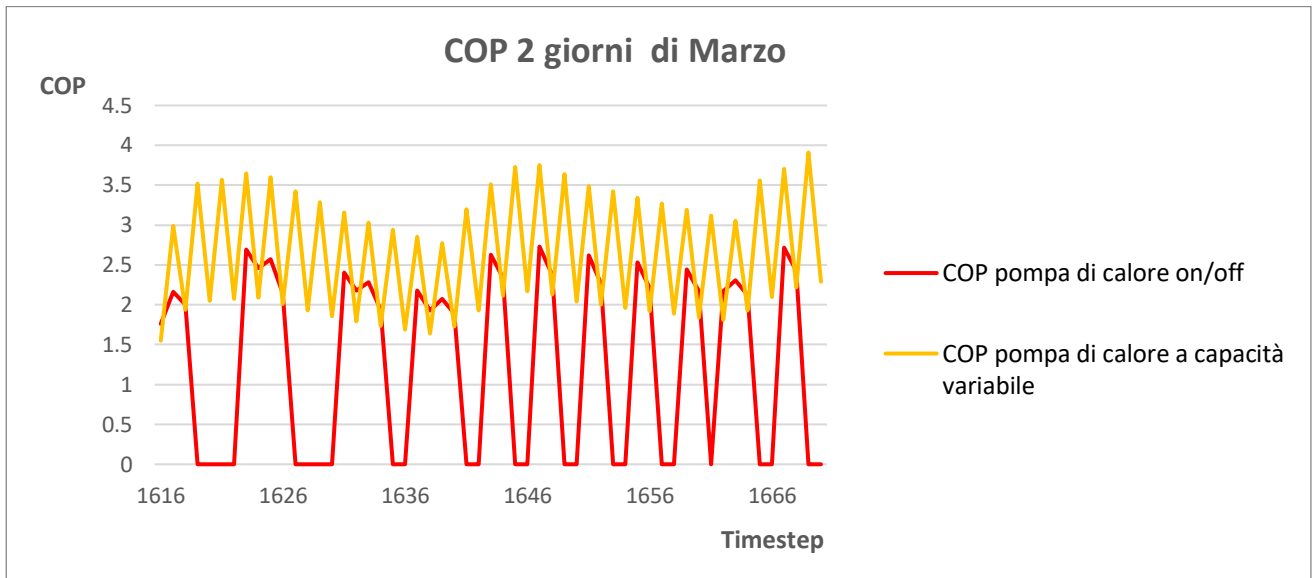


Figura 5.30 Andamento del COP per entrambe le pompe di calore messe a confronto nei due giorni selezionati.

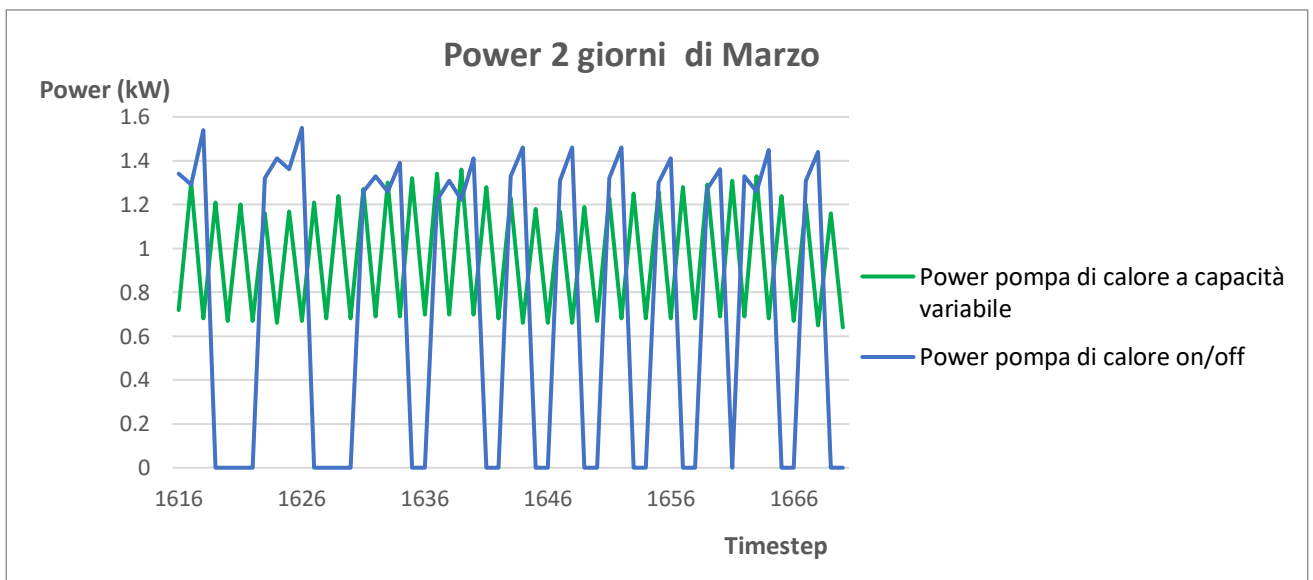


Figura 5.31 Andamento della Power per entrambe le pompe di calore messe a confronto nei due giorni selezionati.

Andiamo ad elencare quali sono le tre differenze principali fra le due pompe:

1. La prima differenza riguarda il numero di accensioni, la pompa di calore a capacità variabile nell'arco di tempo considerato opera continuamente, ovvero per i due giorni considerati è sempre attiva. L'attivazione e lo spegnimento avvengono prima e dopo il periodo considerato. Questo evidenzia il fatto che la pompa regolando il proprio CR, è in grado di operare con i valori di COP e Power più ottimali, consentendo al compressore di operare al minimo e di risparmiare potenza elettrica nella fase di attivazione. Dall'altra parte si può notare, invece, che la pompa di calore on/off non potendo regolare il CR, in quanto opera

sempre alla massima potenza, quando è attiva ha un numero di accensioni/spegnimento superiori, nel caso considerato ben 11 accensioni. Ogni volta che la pompa on/off viene accesa e il compressore viene portato alla potenza massima, si avranno consumi elettrici maggiori.

2. L'altra differenza riguarda l'andamento del COP, nel primo grafico, Figura 2.30, si può notare come la linea gialla, che indica l'andamento del COP della pompa di calore a capacità variabile, sia posta quasi sempre ad ordinate maggiori rispetto quella rossa, che indica l'andamento del COP della pompa di calore on/off. In questo modo si ha la conferma evidente che la pompa a capacità variabile sia in grado di avere prestazioni e rendimenti maggiori rispetto a quella on/off. Numericamente la differenza di prestazioni dei due giorni considerati è del +16% per la pompa di calore a capacità variabile rispetto quella on/off.
3. Per finire l'ultima differenza tra le due tipologie di pompe riguarda l'andamento della potenza elettrica necessaria (Power). Nel secondo grafico, Figura 5.31, la linea marcata in verde evidenzia la Power relativa alla pompa di calore a capacità variabile, mentre quella blu riguarda la pompa di calore on/off. In questo caso la Power della pompa di calore a capacità variabile si trova ad ordinate quasi sempre inferiori rispetto l'altra pompa, nei momenti in cui entrambe le pompe di calore operano. Per cui si può notare come i consumi siano maggiori per la pompa di calore on/off, nei due giorni considerati la pompa di calore a capacità variabile ha dei consumi pari a 0.96 kW mentre quella on/off pari a 1.35 kW.

Per cui dagli aspetti citati nei casi precedenti si può affermare che per le zone temperate e con le grandezze presenti nel Paragrafo 5.1.3 la scelta migliore risiede nell'utilizzo delle pompe di calore a capacità variabile a discapito di quelle on/off, sia per motivazioni relative alle prestazioni che ai consumi. Nel caso in cui la zona geografica fosse diversa o la metratura dell'edificio fosse notevolmente differente allora anche la pompa di calore a capacità variabile si troverebbe di fronte a potenze richieste elevate e di conseguenza non avrebbe più senso parzializzare il carico, in quanto il carico risulterebbe sempre massimo e di conseguenza opererebbe come una pompa di calore on/off.

Per cui i risultati ottenuti in questo modello riguardano solamente una zona temperata e non possono essere estesi in qualsiasi contesto di operatività.

Capitolo 6

6.1 Conclusioni

Lo scopo di questa tesi è quello di presentare la pompa di calore, un dispositivo sempre più utilizzato, in grado di sfruttare l'energia da fonti rinnovabili, per poi usufruirne all'interno delle abitazioni. Dopo aver confrontato tra loro caldaia e la pompa di calore si è notato che quest'ultima è in grado di conferire una molteplicità di vantaggi tra cui: la non produzione di fumi inquinanti, consumi minori e se abbinata ad un impianto fotovoltaico è in grado di azzerare le emissioni.

Successivamente si è palesata la necessità di andare a simulare il funzionamento di due tra le pompe di calore più utilizzate: la pompa di calore a capacità variabile e la pompa di calore on/off. Si è fatto uso di un software adibito alla simulazione dinamica ovvero il Trnsys Simulation Studio. In questo programma è disponibile la pompa di calore on/off, ma non quella a capacità variabile. Si è perciò deciso di sviluppare e integrare al suo interno la pompa di calore a capacità variabile, nominata come Type3000. Attraverso una guida dettagliata si sono spiegati i passi fondamentali della compilazione, dell'integrazione e del funzionamento, con relative equazioni, della pompa di calore a capacità variabile.

Si è andati poi a confrontare il funzionamento delle due pompe all'interno di un caso di studio, in cui si è creato un impianto termotecnico il cui scopo finale è quello di mantenere la temperatura all'interno di un locale costante. Lo scopo delle pompe di calore consiste nel riscaldare l'acqua presente all'interno di un serbatoio; in modo tale che quest'acqua possa essere prelevata in caso di bisogno ed utilizzata da parte di un radiatore per il riscaldamento dell'edificio. Le simulazioni che sono state effettuate sono avvenute entrambe durante due periodi invernali, la prima nell'ultima settimana di Gennaio, la seconda durante l'intero mese di Marzo. La località geografica scelta appartiene alla fascia climatica D, ovvero di zona temperata.

I risultati ottenuti hanno evidenziato che il funzionamento di entrambe le pompe è correlato alla temperatura esterna. Infatti, maggiore è la temperatura dell'aria esterna e maggiori sono le performance di entrambi i dispositivi, con consumi ridotti. Invece col diminuire delle temperature aumentano i consumi e diminuisce l'efficienza delle due macchine, questo perché le pompe di calore sono in grado di operare entro un certo intervallo di temperatura, al di sotto del quale, queste macchine necessitano di essere abbinati ad altri sistemi di produzione di calore. Nella zona geografica considerata, essendo temperata, la temperatura esterna non scende mai al di sotto del limite di funzionamento minimo e per questo motivo la pompa di calore da sola è in grado di fornire la potenza termica richiesta all'edificio.

Si è poi confrontato quale delle due pompe di calore sia la più ottimale in questo caso di studio, ed in entrambi i casi la pompa di calore a capacità variabile ha riportato andamenti migliori sia in termini di efficienza (COP) che in termini di potenza elettrica utilizzata (Power) rispetto alla pompa di calore on/off. La pompa di calore a capacità variabile riesce ad aumentare il COP di circa il 15%, mentre riguardo ai consumi la pompa di calore a capacità variabile ha registrato una diminuzione del 30% rispetto alla pompa on/off.

Per cui nella zona considerata e con le caratteristiche dell'edificio riportate è favorita l'installazione della pompa di calore a capacità variabile, in modo tale da poterne trarre vantaggi sia a livello di consumi che a livello economico.

Il grande vantaggio, che fa della pompa di calore a capacità variabile la favorita rispetto alla pompa di calore on/off, riguarda la capacità di poter parzializzare il carico, in modo da poter operare nelle condizioni di efficienza massime e consumi ridotti in qualunque situazione. Oltretutto la pompa di calore a capacità variabile una volta raggiunta la temperatura fissata opera al minimo, consentendo di ridurre il numero di accensioni. La pompa di calore on/off, invece, opera sempre con il compressore alla massima potenza per poi disattivarsi una volta raggiunta la temperatura prestabilita per cui il numero di accensioni aumenta sensibilmente e di conseguenza anche la potenza elettrica richiesta.

Bibliografia

- [1] Articolo relativo al funzionamento delle pompe di calore e alle fonti di approvvigionamento con relativa immagine: "www.helion.ch/it/pompa-di-calore/funzionamento/".
- [2] Articolo relativo al funzionamento di pompe di calore geotermiche: "https://www.edilportale.com/news/2021/03/focus/pompe-di-calore-geotermiche-come-funzionano_81722_67.html".
- [3] Articolo relativo alle sonde geotermiche: <http://www.fotovoltaicosulweb.it/guida/la-sonda-geotermica.html>.
- [4] Articolo relativo al circuito chiuso e aperto con immagini: "<https://es.rossatogroup.com/guide/pompe-di-calore/progettazione/112-come-usare-l-acqua-di-falda-per-una-pompa-di-calore.html>".
- [5] Dispense del Professor Gianluca Coccia riguardanti il corso di Impianti Termotecnici, anno 2020/2021.
- [6] Immagine ciclo termodinamico prelevata dal sito: "<http://www.ste-pignotti.com/prodotti/climatizzazione/funzionamento.asp>".
- [7] Immagine evaporatore prelevata dal sito : "https://www.rivacold.com/it/it/evaporatori_statici".
- [8] Immagine compressori a capacità variabile prelevata dal catalogo ditta: "Emerson"
- [9] Immagine valvola di laminazione prelevata dal catalogo della ditta: "Sanhua International Europe SL".
- [10] Immagine relativa ai pannelli radianti : "<https://www.brindisireport.it/casa/ristrutturazione/installare-pannelli-radianti-calore-brindisi.html>".
- [11] Articolo relativo ai vantaggi e agli svantaggi pompe di calore sito: "<https://luce-gas.it/guida/efficienza-energetica/pompe-di-calore>".
- [12] Articolo relativo ai vantaggi e agli svantaggi pompe di calore : Bosch, data pubblicazione 2019.
- [13] Articolo sulla temperatura limite di funzionamento e immagini sito: "<https://lamiacasaelettrica.com/temperatura-limite-di-funzionamento-pompa-di-calore/>".
- [14] Manuale di funzionamento del Trnsys Simulation Studio.
- [15] Manuale di programmazione linguaggio Fortran.
- [16] Impianto utilizzata nel caso di studio fornito dall'ingegner Alice Mugnini.
- [17] Immagine relativa all'impianto di canalizzazione ad aria : Edilnet.it.
- [18] Dossier pompe di calore realizzato da Domotecnica a cura di ing. Giorgio Acerbi.
- [19] Energia ed edifici di G. Dell'Olio 2018.
- [20] Catalogo dati pompa di calore a capacità variabile: Viessmann