

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Energetica e Nucleare

Tesi di Laurea Magistrale

Analisi e simulazione termoenergetica dinamica di soluzioni impiantistiche per la climatizzazione di moduli prefabbricati ad alta efficienza energetica



Relatore

Prof. Enrico Fabrizio

Candidato

Davide Brasile

Correlatori

Prof. Filippo Spertino

Ing. Fabrizio Giorgio

A.A. 2018/2019

Ringraziamenti

Voglio dedicare poche parole ma sincere per ringraziare chi mi ha accompagnato in questo percorso di crescita lungo e impegnativo.

Ringrazio il Prof. Enrico Fabrizio per avermi dato la possibilità di trattare un argomento stimolante, per avermi veramente seguito nella stesura di questa tesi, per l'infinita disponibilità e per i preziosi consigli.

Ringrazio il Prof. Filippo Spertino per essere stato un punto di riferimento durante tutto il percorso universitario e per avermi fatto trovare sempre aperta la porta del suo ufficio, per essere una persona straordinaria prima ancora che un ottimo professore.

Ringrazio l'Ing. Fabrizio Giorgio per l'enorme pazienza, per l'aiuto che mi ha dato nell'implementazione del modello e per avermi insegnato a utilizzare al meglio Energy Plus.

Ringrazio i miei genitori per l'amore incondizionato che mi dimostrano ogni giorno, per avermi sempre permesso di realizzare i miei sogni, per avermi appoggiato in ogni scelta e sostenuto nelle difficoltà. Non ce l'avrei mai fatta senza di loro.

Ringrazio mio fratello per il continuo sostegno e per aver sempre creduto in me, per essere un esempio unico di determinazione e forza di volontà.

Ringrazio i miei amici di sempre, quelli su cui posso sempre contare, che ormai considero una seconda famiglia, e che anche se distanti sento sempre vicini.

Ringrazio Lorenzo e Mattia, amici veri con cui parlare di tutto, con cui ho passato serate indimenticabili e che mi hanno fatto sentire in Abruzzo anche a settecento chilometri di distanza.

Ringrazio Anna Irene e Roberto, splendidi e generosi compagni di viaggio, sempre pronti ad aiutarmi.

Infine, ringrazio tutte le persone che ho incontrato in questi anni, chi ha corso al

mio fianco, chi è rimasto indietro, chi mi ha lasciato cadere e chi mi ha dato una mano a rialzarmi. Ognuna di loro, in un modo o nell'altro, ha contribuito a farmi arrivare fin qui.

Indice

Elenco delle figure	8
Introduzione	12
1 Efficienza energetica negli edifici	15
1.1 Edifici ad alta efficienza energetica	15
1.1.1 La Passivhaus	16
1.1.2 La Zero Energy Home	18
1.2 Zero Energy Buildings in Italia	19
2 Moduli prefabbricati ad alta efficienza energetica	22
2.1 Esempi di moduli commerciali	22
2.1.1 Casa GG	22
2.1.2 KODA	23
2.1.3 IT HOUSE	24
2.1.4 Zero House	25
2.2 Rifugi di montagna	27
2.2.1 Monte Rosa Hütte	27
2.2.2 Refuge du Goûter	29
2.2.3 Kezmarskè hut	30
2.2.4 Cabane de Tracuit	31
2.2.5 Rifugio Mollino	33
2.3 Solar Decathlon	35
2.3.1 Rhome	37
2.3.2 SU+RE House	39

2.3.3	The Neighborhub	40
3	Soluzioni impiantistiche per edifici ad alta efficienza energetica	43
3.1	Classificazione degli impianti	44
3.2	Componenti ad alta efficienza energetica	47
3.2.1	Recuperatore di calore	47
3.2.1.1	Il rendimento energetico	49
3.2.1.2	Tipologie di recuperatori di calore	50
3.2.1.3	Scelta tra i recuperatori di calore	54
3.2.2	Pavimento radiante	55
3.2.2.1	Funzionamento	56
3.2.2.2	Criteri di realizzazione di un pavimento radiante	57
3.2.2.3	Tipologie di sistemi radianti	58
3.2.2.4	Pavimento radiante a tubi capillari	60
3.2.3	Pompa di calore	61
3.2.3.1	Funzionamento	62
3.2.3.2	Tipologie di pompe di calore	63
3.2.3.3	Efficienza nominale e stagionale	65
3.2.3.4	Scelta della pompa di calore	66
3.2.4	Aggregato compatto	67
4	Il modulo abitativo eco > Home	69
4.1	Struttura e posizionamento del modulo	70
5	Modellazione degli impianti di climatizzazione e ventilazione	72
5.1	Modellazione del pavimento radiante	73
5.1.1	Calcoli di progetto invernale ed estivo	86
5.2	Modellazione del sistema di ventilazione meccanica	88
6	Risultati della simulazione energetica	94
6.1	Caso con ventilazione naturale	94
6.1.1	Calcolo di progetto invernale ed estivo	94
6.1.2	Andamento annuale	98
6.2	Caso con ventilazione meccanica	107

6.2.1	Calcolo di progetto invernale ed estivo	107
6.2.2	Andamento annuale	110
7	Conclusioni	121
A	Recuperatori di calore	123
A.1	Zehnder	123
A.2	Mitsubishi	126
A.3	Vortice	127
B	Pompe di calore	129
B.1	Mitsubishi	129
B.2	Clivet	131
B.3	EXRG	132
	Bibliografia	133

Elenco delle figure

2.1	Casa GG	23
2.2	Modulo abitativo KODA	24
2.3	IT HOUSE	25
2.4	Schema funzionale del modulo prefabbricato Zero House	26
2.5	Monte Rosa Hütte	28
2.6	Refuge du Goûter	30
2.7	Kezmarkskè hut	31
2.8	Cabane de Tracuit	32
2.9	Rifugio Mollino	33
2.10	Schema funzionale del modulo Rhome	38
2.11	Schema funzionale del modulo SU+RE House	40
2.12	Sistema di ventilazione meccanica del modulo The Neighborhub	41
2.13	Sistema di climatizzazione del modulo The Neighborhub	42
3.1	Rappresentazione del funzionamento di un recuperatore di calore del tipo statico a piastre	53
3.2	Rappresentazione del funzionamento di un recuperatore di calore del tipo rigenerativo rotativo	54
3.3	Sezione di un impianto a pavimento radiante	57
3.4	Distribuzione del calore nel caso ideale, con riscaldamento a radiatori e con riscaldamento a pavimento radiante	58
3.5	Installazione di un pavimento radiante con più circuiti	59
3.6	Installazione di un pavimento radiante a tubi capillari	61
3.7	Schema di funzionamento di una pompa di calore	62
3.8	Componenti di un aggregato compatto	68
4.1	Planimetria del modulo prefabbricato	70

5.1	Definizione di Construction:InternalSource su EnergyPlus	74
5.2	Dati tecnici del pavimento radiante a tubi capillari di Beka Clima .	74
5.3	Definizione di People su EnergyPlus	77
5.4	Definizione di Lights su EnergyPlus	78
5.5	Definizione di ElectricEquipment su EnergyPlus	78
5.6	Definizione di ZoneVentilation:DesignFlowRate su EnergyPlus . . .	79
5.7	Definizione di Pump:VariableSpeed su EnergyPlus	80
5.8	Definizione di Pipe:Adiabatic su EnergyPlus	80
5.9	Definizione di Branch su EnergyPlus	81
5.10	Rappresentazione schematica dell'impianto di climatizzazione: con- nessione Splitter-Mixer con la fonte energetica	82
5.11	Rappresentazione schematica dell'impianto di climatizzazione: con- nessione Splitter-Mixer con il pavimento radiante	82
5.12	Definizione di PlantLoop su EnergyPlus	83
5.13	Definizione di ZoneHVAC:LowTemperatureRadiant:VariableFlow su EnergyPlus	84
5.14	Definizione di Sizing:Plant su EnergyPlus	85
5.15	Definizione di Sizing:Zone su EnergyPlus	86
5.16	Definizione di SizingPeriod:DesignDay su EnergyPlus	88
5.17	Definizione di HVACTemplate:System:DedicatedOutdoorAir su Ener- gyPlus	89
5.18	Definizione di HVACTemplate:Thermostat su EnergyPlus	90
5.19	Definizione di HVACTemplate:Zone:FanCoil su EnergyPlus	91
5.20	Definizione di HVACTemplate:Plant:HotWaterLoop su EnergyPlus	91
5.21	Schema dell'impianto di ventilazione lato aria primaria	93
5.22	Schema impiantistico	93
6.1	Andamento della temperatura per il giorno di progetto invernale . .	95
6.2	Andamento della potenza termica specifica per il giorno di progetto invernale	96
6.3	Andamento della temperatura per il giorno di progetto estivo . . .	97
6.4	Andamento della potenza frigorifera specifica per il giorno di progetto estivo	98

6.5	Andamento annuale della potenza termica/frigorifera specifica nella Sala Controllo	98
6.6	Andamento annuale della potenza termica/frigorifera specifica nelle Sale Studio	99
6.7	Andamento annuale della potenza termica/frigorifera specifica nel Locale Tecnico	99
6.8	Andamento della temperatura nella settimana dal 7 al 13 gennaio .	101
6.9	Andamento della potenza termica specifica nella settimana dal 7 al 13 gennaio	101
6.10	Andamento della temperatura il giorno 8 gennaio	102
6.11	Andamento della potenza termica specifica il giorno 8 gennaio . . .	102
6.12	Andamento della temperatura nella settimana dal 22 al 28 luglio . .	103
6.13	Andamento della potenza frigorifera specifica nella settimana dal 22 al 28 luglio	104
6.14	Andamento della temperatura il giorno 22 luglio	104
6.15	Andamento della potenza frigorifera specifica il giorno 22 luglio . .	105
6.16	Consumi mensili del sistema radiante a pavimento	106
6.17	Andamento della temperatura superficiale del pavimento nel giorno di progetto invernale	107
6.18	Andamento della temperatura nel giorno di progetto estivo	108
6.19	Andamento della potenza frigorifera specifica nel giorno di progetto estivo	108
6.20	Andamento della temperatura superficiale del pavimento nel giorno di progetto estivo	109
6.21	Andamento della potenza frigorifera dell'impianto di ventilazione e della temperatura interna della Sala Studio 1 nel giorno di progetto estivo	110
6.22	Andamento della temperatura nella settimana dal 07/01 al 13/01 .	111
6.23	Andamento della potenza termica specifica nella settimana dal 07/01 al 13/01	111
6.24	Andamento della temperatura di immissione dell'aria nella settimana dal 07/01 al 13/01	112
6.25	Andamento dell'umidità relativa nella settimana dal 07/01 al 13/01	112

6.26	Andamento della temperatura il giorno 8 gennaio	113
6.27	Andamento della temperatura nella settimana dal 22/07 al 28/07 .	114
6.28	Andamento della potenza frigorifera specifica nella settimana dal 22/07 al 28/07	114
6.29	Andamento della temperatura di immissione dell'aria nella settimana dal 22/07 al 28/07	115
6.30	Andamento dell'umidità relativa nella settimana dal 22/07 al 28/07	115
6.31	Andamento della temperatura il giorno 22 luglio	116
6.32	Consumi mensili del sistema radiante a pavimento	117
6.33	Consumi mensili del sistema di ventilazione meccanica	118
6.34	Andamento mensile dell'energia recuperata dal recuperatore di calore	118
6.35	Contributo sensibile e latente dell'impianto di ventilazione in raffre- scamento nelle Sale Studio	119

Introduzione

Negli ultimi anni, la generazione di energia da fonti rinnovabili è aumentata costantemente. Questo crescente sviluppo delle tecnologie per la produzione di energia rinnovabile è dovuto principalmente ad una serie di obblighi internazionali, il più importante dei quali è sicuramente il contrasto del processo di riscaldamento globale, tramite la riduzione dell'utilizzo di combustibili fossili e delle emissioni di gas serra.

A tal proposito, nel 2015, a Parigi, si è tenuta un'importante conferenza internazionale sui cambiamenti climatici. Dopo due settimane di negoziati, l'accordo sul clima è stato firmato dai diversi paesi presenti alla COP 21. L'accordo prevede il raggiungimento di un obiettivo molto ambizioso: contenere l'aumento della temperatura globale del pianeta al di sotto dei 2 °C, perseguendo idealmente il limite di 1.5 °C. Il testo però non indica delle disposizioni esplicite su come conseguire questo traguardo, né pone obiettivi intermedi o a breve termine, ma si attiene completamente alla volontà dei singoli paesi. Tuttavia, gli sforzi effettuati fino ad adesso non sembrano essere sufficienti, e secondo le ultime stime, proseguendo di questo passo, è previsto un aumento di temperatura di oltre 3 °C alla fine del secolo. Di conseguenza, per non oltrepassare il limite ideale di 1.5 °C sarebbe necessario abbattere drasticamente le emissioni, fino a raggiungere emissioni zero a partire dal 2050.

Per fare ciò, si rende indispensabile un processo di decarbonizzazione, che azzeri o comunque riduca considerevolmente l'utilizzo delle fonti fossili convenzionali. A tal fine, inoltre, risulta necessario modificare il mix energetico. Negli ultimi 40 anni, il fabbisogno di energia primaria a livello mondiale è raddoppiato, ma non si è verificato un cambiamento apprezzabile delle percentuali relative alle fonti utilizzate, con i combustibili fossili che soddisfano più dell'80% della richiesta.

Le conseguenze sempre più evidenti e drammatiche del riscaldamento globale, hanno spinto l'uomo a individuare nuove soluzioni per provare a migliorare la situazione o perlomeno a limitare i danni. Temi come la sostenibilità ambientale e l'efficienza energetica sono ormai applicati in tutti gli ambiti, dall'agricoltura all'industria, dai trasporti al residenziale.

Proprio quello residenziale è un settore fondamentale per l'efficienza energetica. Da solo, infatti, rappresenta il 40% dei consumi di energia primaria a livello europeo, con una percentuale molto alta di edifici non efficienti, pari al 75%. Risulta quindi un'assoluta necessità, nei prossimi anni, accelerare l'azione di rinnovamento degli edifici già esistenti, in modo da raggiungere la decarbonizzazione in questo settore alla metà del secolo attuale. L'efficientamento energetico degli edifici diventa, quindi, uno degli elementi principali su cui intervenire, per realizzare una vera e propria rivoluzione energetica e culturale.

Questo avrà un grosso impatto ambientale ed economico, a partire dalla riduzione del costo dell'energia in bolletta. Ma ampliando il raggio, si può pensare, ad esempio, al contributo significativo che potrebbe dare alla riduzione della dipendenza energetica dall'estero. Inoltre, l'efficientamento energetico degli edifici è un relativamente nuovo mercato con un enorme potenziale, destinato a crescere negli anni e a creare nuovi posti di lavoro.

Il concetto di efficienza energetica in un edificio deve essere applicato a più livelli. Per prima cosa, si deve considerare l'involucro edilizio, con un'adeguata scelta dei materiali e dell'isolamento termico, per ridurre il più possibile le perdite per trasmissione. Di pari passo, bisogna effettuare anche la corretta progettazione di impianti ad alta efficienza energetica, per garantire condizioni di comfort ottimali, integrati a sistemi per la produzione di energia rinnovabile. Infine, non meno importante è la regolazione e la gestione ottimale dell'energia, attraverso sensori per ridurre al minimo gli sprechi energetici. Queste caratteristiche rendono necessaria una forte sinergia fra la progettazione dell'involucro e quella impiantistica. Un edificio può dirsi ad alta efficienza energetica, solo se tutti questi aspetti vengono considerati ed applicati.

Da un punto di vista costruttivo, il futuro dell'edilizia sostenibile sembra orientato verso l'utilizzo di moduli abitativi prefabbricati. Inizialmente impiegati come abitazioni di emergenza in zone colpite da catastrofi naturali, quali terremoti e uragani,

sono stati poi adottati come valida alternativa agli alloggi tradizionali. I vantaggi di questo tipo di costruzione sono molteplici. L'utilizzo di materiali ecosostenibili, quali il legno e il sughero per l'isolamento, garantiscono la sostenibilità ambientale e l'efficienza energetica. Altri aspetti convenienti sono il minor costo rispetto ad una casa tradizionale e la velocità di costruzione. Con "l'industrializzazione dell'edilizia", infatti, non sarebbe più necessario un cantiere, ma i moduli, prefabbricati in stabilimenti, verrebbero trasportati e montati sul posto nel giro di pochi giorni. Lo scopo di questo lavoro è quello di analizzare e confrontare diverse soluzioni impiantistiche, impiegate in moduli prefabbricati ad alta efficienza energetica, e progettare, mediante il software di simulazione energetica degli edifici Energy Plus, gli impianti di climatizzazione e ventilazione per il modulo prefabbricato Eco-home, da installare all'interno del Politecnico di Torino.

Capitolo 1

Efficienza energetica negli edifici

1.1 Edifici ad alta efficienza energetica

Dopo i primi tentativi di architettura passiva, risalenti agli anni '70 in California, i concetti di riduzione dei consumi energetici e di sostenibilità ambientale sono stati progressivamente applicati agli edifici, i quali rappresentano una considerevole percentuale del consumo di energia. Questo ha portato alla creazione di diverse formulazioni teoriche con precise indicazioni e metodologie [26]. Si possono citare, tra gli altri, i concetti di Passivhaus, Zero Energy Home, Green Building, Maison autonome, Maison à energie positive, Casa ecologica, Edificio multienergia. Molte delle soluzioni indicate, dei metodi di progettazione e delle tecnologie architettoniche e impiantistiche adottate sono comuni alle diverse teorie, ma ciò che li caratterizza è la diversa area geografica di riferimento e i relativi contesti socio-economici e culturali che ne hanno portato alla costituzione.

Tra questi, il primo concetto in ordine di tempo, ad avere dei principi ben definiti, è stato quello di Passivhaus. Esso pone l'accento sull'utilizzo di tecnologie solari passive, per realizzare un edificio a basso consumo energetico in climi molto freddi, tipici del Nord Europa. Il concetto di Zero Energy Home, invece, è di origine statunitense e, affermando anche esso la necessità di ridurre il più possibile il consumo di energia dell'edificio, si distingue dalla Passivhaus, per l'importanza che dà alla produzione di energia in situ da fonti rinnovabili, necessaria per ottenere un bilancio nullo, tra energia prodotta ed energia consumata, o se possibile, positivo,

come nel caso della Maison à energie positive di area francese. Un altro concetto sviluppato è la Maison autonome en energie, conosciuta con il nome di Off Grid Home negli Stati Uniti. Si tratta di un edificio completamente autosufficiente dal punto di vista energetico che non è collegato né alla rete dell'energia elettrica, né a quella del gas naturale.

1.1.1 La Passivhaus

Con il termine Passivhaus, letteralmente casa passiva, si intende un edificio con un bassissimo fabbisogno, conforme ad un preciso standard energetico, Passivhaus Standard, per cui il fabbisogno netto di energia per il riscaldamento deve essere inferiore ai $15 kWh/m^2$ all'anno. Questo valore non fa riferimento al consumo di energia primaria, in quanto non vengono considerate le perdite energetiche dovute all'impianto di riscaldamento. Per raggiungere un valore così basso del fabbisogno, vengono attuate una serie di strategie ormai ben collaudate, tra le quali il superisolamento, l'orientamento e la distribuzione interna della casa, un basso rapporto di forma dell'edificio, l'uso di sistemi solari passivi.

Il nome di “casa passiva” deriva proprio dallo sfruttamento degli apporti gratuiti attraverso i componenti solari passivi. Tuttavia, la casa passiva si differenzia dalla “casa solare” per l'attenzione dedicata alla riduzione del fabbisogno di riscaldamento piuttosto che alla massimizzazione del guadagno solare. In questo modo, gli apporti gratuiti solari ed interni sono sufficienti a coprire le dispersioni per trasmissione, minimizzate grazie ad un involucro dell'edificio dotato di un notevole isolamento termico, e molto inferiori rispetto a quelle di un edificio tradizionale.

Una volta ridotte le dispersioni per trasmissione, la principale causa di consumo energetico durante la stagione di riscaldamento risulta essere la ventilazione degli ambienti. Di conseguenza, occorre da una parte contenere i consumi per ventilazione, ma dall'altra effettuare un ricambio d'aria al fine di garantire un'adeguata qualità dell'aria per gli occupanti, in particolar modo nel caso di serramenti ad alte prestazioni che riducono le infiltrazioni di aria esterna, che comunque non possono essere controllate. Per questo motivo, invece che effettuare una ventilazione naturale, gestita dall'utente tramite l'apertura delle finestre, è sempre più comune nelle case passive l'utilizzo di un sistema di ventilazione meccanica controllata che permette un

ricambio continuo e regolare di aria, limitando gli sprechi e riducendo il fabbisogno di energia per ventilazione, grazie all'integrazione nell'impianto di un recuperatore di calore, che consente appunto di recuperare il calore dall'aria interna esausta che viene espulsa. Disponendo di una rete di condotti d'aria che si diramano per tutto l'edificio e con bassi carichi di riscaldamento, risulta vantaggioso avvalersi dello stesso impianto per soddisfare anche il carico termico sensibile degli ambienti. In questo modo, l'edificio risulta climatizzato a tutt'aria.

Altre indicazioni riguardanti la progettazione degli impianti sono l'impiego di una pompa di calore, solitamente del tipo aria-aria, in grado di soddisfare il basso fabbisogno per il riscaldamento. Inoltre, essendo una macchina reversibile, la pompa di calore può eventualmente essere usata anche per il raffrescamento estivo degli ambienti. Un sistema a pompa di calore aria-aria non ha efficienze elevate, ma si ritiene accettabile nel caso in cui i carichi dell'edificio siano estremamente bassi. Inoltre la centrale termica non è alimentata a gas e quindi non è soggetta a prescrizioni normative, ma necessita solamente di energia elettrica che può essere presa dalla rete o da un impianto fotovoltaico. In inverno, l'aria di ventilazione viene pre-riscaldata prima in uno scambiatore terreno-aria e successivamente nel recuperatore di calore che scambia con l'aria interna che viene espulsa. Spesso è adottato quello che viene chiamato un "aggregato compatto", che comprende i moduli di ventilazione e trattamento dell'aria, la pompa di calore aria/aria, il recuperatore di calore e un serbatoio di accumulo per l'acqua calda sanitaria, che solitamente viene ottenuta grazie ad un impianto solare termico.

Attualmente si sta cercando di esportare ed adattare il modello di casa passiva anche nel sud dell'Europa. Tuttavia i concetti della Passivhaus validi per il nord Europa non sono sufficienti, questo perché nei paesi come Italia o Spagna si hanno consumi energetici per raffrescamento comparabili con quelli per il riscaldamento. Sono quindi necessarie soluzioni che tengono conto anche del comportamento termico estivo dell'edificio, caratterizzato da fenomeni che variano velocemente, in cui la trasmissione attraverso l'involucro opaco dell'edificio presenta un valore medio minore rispetto alla condizione invernale, ma con forti oscillazioni giornaliere, e in cui l'effetto combinato di apporti e dispersioni rende in generale il carico frigorifero fortemente oscillatorio e di segno variabile.

1.1.2 La Zero Energy Home

Con il termine Zero Energy Home (ZEH) o, più in generale, Zero Energy Building (ZEB), si intende un edificio progettato per avere un consumo di energia estremamente basso e tale da essere soddisfatto dalla produzione di energia in situ da fonti rinnovabili. La denominazione Zero Energy non fa riferimento quindi ad un edificio che non ha bisogno di energia, quanto al bilancio tra energia prodotta da fonti rinnovabili e quella consumata.

Una sottile ma sostanziale differenza tra i paesi che hanno ricevuto ed applicato tale concetto riguarda la definizione del termine Energy. Questo infatti può far riferimento all'energia primaria, che tiene conto del tipo di energia utilizzata e dell'efficienza delle reti di distribuzione, ma è calcolata tramite fattori di conversione che cambiano in base al luogo e con il tempo. Oppure si può far riferimento all'energia netta in entrata e uscita dall'edificio, che è più facile da misurare, ma non considera tutti gli altri aspetti. Per questo motivo si tende ad effettuare il bilancio considerando l'energia primaria.

Le prime case di questo tipo si diffusero negli Stati Uniti intorno agli anni '60 ed erano completamente autonome e indipendenti dalle reti energetiche, per questo vennero chiamate Off Grid Homes. Tuttavia, l'utilizzo di tecnologie non ancora mature, specialmente quelle per l'accumulo, e lo sfruttamento di servizi come il net metering, la possibilità di vendere alla rete l'energia elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico che non veniva utilizzata, favorirono il collegamento alle reti energetiche.

Come per la Passivhaus, anche nello Zero Energy Building il concetto di efficienza energetica è applicato ad ogni aspetto dell'edificio, dall'involucro edilizio al sistema impiantistico. Tutti gli edifici così concepiti hanno caratteristiche simili. In particolare, per quanto riguarda la produzione di energia da fonti rinnovabili, sono spesso adottati, per la produzione di energia elettrica, un impianto fotovoltaico connesso alla rete, in modo da sfruttare il net metering, e per la produzione di acqua calda sanitaria, un impianto solare termico. L'involucro dell'edificio è costruito con materiali efficienti ed un adeguato isolamento termico in modo da ridurre il più possibile il fabbisogno di energia, specialmente per il riscaldamento. A differenza della Passivhaus, le soluzioni impiantistiche adottate negli Zero Energy Building sono

più varie, tutte comunque garantiscono le condizioni di comfort degli occupanti.

1.2 Zero Energy Buildings in Italia

Il termine Nearly Zero Energy Building (NZEB) compare per la prima volta a livello normativo nella Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) emanata nel 2010. Come definito nella legge 90/2013, un edificio NZEB, in italiano edificio ad energia quasi zero, è un "edificio ad altissima prestazione energetica in cui il fabbisogno energetico molto basso o quasi nullo è coperto in misura significativa da energia da fonti rinnovabili, prodotta in situ". Il DM 26 giugno 2015, *Requisiti minimi degli edifici*, indica le caratteristiche che deve possedere un edificio per essere classificato come NZEB. Questo decreto impone, sia per i nuovi edifici che per gli edifici sottoposti a ristrutturazione importante di primo livello, un limite per il consumo di energia primaria inferiore del 15% rispetto alle normative precedenti, e che diventa sempre più restrittivo al 2017, 2019 e 2021. Nella normativa italiana vengono indicati altri requisiti minimi che devono essere rispettati: il coefficiente medio globale di scambio termico per trasmissione per unità di superficie disperdente, l'area solare equivalente estiva per unità di superficie utile, le trasmittanze termiche dell'involucro opaco e dei componenti trasparenti, i rendimenti medi stagionali degli impianti per il riscaldamento, per il raffrescamento e per la produzione di acqua calda sanitaria e gli indici di prestazione termica utile. In particolare questi ultimi valori devono essere confrontati con quelli dell'edificio di riferimento ed avere valori tali da garantire prestazioni migliori. Inoltre, affinché sia considerato NZEB, è necessario che l'edificio sia in grado di produrre energia da fonti rinnovabili, come stabilito dal decreto legislativo 28/2011. La transizione verso edifici NZEB è indispensabile per aumentare l'efficienza energetica, limitare i consumi e rispettare gli accordi ambientali sulla riduzione delle emissioni e dell'uso di combustibili fossili. Nel 2017 è stato presentato il Piano d'Azione Nazionale per aumentare gli edifici NZEB (PANZEB). Nel documento vengono analizzate le prestazioni energetiche di alcuni esempi di NZEB con diverse destinazioni d'uso ed installati in zone climatiche differenti, vengono stimati i costi per la costruzione di nuovi edifici ad energia quasi zero o per la trasformazione di edifici esistenti e confrontati con i costi di un edificio tradizionale, sono indicate possibili direzioni da intraprendere per aumentare la

diffusione di NZEB. Un passo importante è l'obbligo che dal 1° gennaio 2021, tutti i nuovi edifici e quelli sottoposti a ristrutturazione importante di primo livello, dovranno essere realizzati in modo da avere le caratteristiche energetiche di edifici NZEB. Nel caso di edifici pubblici, nuovi o ugualmente ristrutturati, l'obbligo è stato anticipato al 1° gennaio 2019. Sempre nel 2017 l'ENEA ha istituito un Osservatorio nazionale NZEB con lo scopo di raccogliere dati e informazioni sulle politiche adottate, iniziative pubbliche e private e sullo stato della ricerca relativi a questa tipologia di edifici [8]. In base ai dati disponibili per gli edifici NZEB certificati con APE in quattro regioni prese come campione (Abruzzo, Lombardia, Marche, Piemonte), gli NZEB realizzati nel nostro Paese negli anni 2016-2017, che rispettano gli standard prescritti dal decreto 2015, sono circa 600, pari a circa lo 0.005% di tutto il patrimonio edilizio, e costituiti per la maggior parte da edifici di nuova costruzione (80%) e destinati ad uso residenziale (88%). Nonostante la percentuale sia ancora molto piccola, si è verificato un notevole incremento tra un anno e l'altro. Questa tendenza è diffusa in tutto il territorio italiano, in particolare in quelle regioni in cui è stato anticipato l'obbligo per i nuovi edifici e per le ristrutturazioni di primo grado rispetto alle scadenze del 2019 e 2021. La provincia di Bolzano è stata la prima ad adottare le nuove disposizioni, da gennaio 2015, infatti, le nuove costruzioni devono avere classe energetica minima CasaClimaA. In Lombardia, invece, l'obbligo è in vigore dal gennaio 2016, mentre in Emilia Romagna dal 2017 per gli edifici pubblici e dal 2019 per tutti gli altri. Inoltre, grazie ai dati acquisiti dall'Osservatorio, è possibile notare che le soluzioni e le tecnologie adottate in questi edifici sono spesso le stesse. Imprescindibile è l'elevato isolamento termico per la riduzione delle dispersioni termiche. Molto comune è la combinazione pompa di calore, solitamente aria-acqua, per la produzione di acqua calda e acqua refrigerata, e impianto fotovoltaico per la produzione di energia elettrica. In alcuni casi, invece, è presente una caldaia a condensazione abbinata ad un impianto solare termico per la produzione di acqua calda sanitaria. La maggioranza comunque non necessita di combustibili fossili ma è alimentata solamente con energia elettrica. La ventilazione meccanica controllata con recupero di calore è presente in circa il 50% degli edifici analizzati. Poco impiegata è l'opzione del teleriscaldamento e delle biomasse rispettivamente in ambito urbano e rurale, anche nei climi più freddi e in presenza dei soli servizi di riscaldamento e acqua calda sanitaria. Infatti, solo due casi, in

Piemonte, nel limitato campione di edifici esaminati, presentano il collegamento alla rete del teleriscaldamento, soluzione per cui non è obbligatoria la quota di rinnovabili. Attualmente gli APE non forniscono informazioni sull'installazione di sistemi di automazione, tuttavia dai dati che progettisti e proprietari di trenta edifici hanno fornito all'Osservatorio risulta che regolazione, controllo e monitoraggio del calore, della ventilazione e dell'illuminazione sono presenti in circa un quarto di questi edifici. Infine, è importante notare che sempre più frequente è la costruzione in legno, che consente anche realizzazioni di strutture edilizie di dimensioni rilevanti con elevate prestazioni di involucro e tempi di montaggio ridotti.

Capitolo 2

Moduli prefabbricati ad alta efficienza energetica

2.1 Esempi di moduli commerciali

Una ricerca è stata realizzata, su alcuni modelli di case prefabbricate disponibili sul mercato, con lo scopo di ottenere informazioni sul processo di progettazione e sulle tipologie di impianti impiegati.

Il minimo comun denominatore in ogni edificio è stato la riduzione dell'impatto ambientale sia da un punto di vista architettonico che energetico. Tutte le caratteristiche tipiche degli edifici ad alta efficienza energetica sono state adottate. L'involucro dotato di un isolamento ottimale, lo sfruttamento di soluzioni passive, quali l'orientamento della struttura e la ventilazione naturale, l'utilizzo di sistemi per la produzione di energia rinnovabile, in particolar modo i pannelli fotovoltaici. Per quanto riguarda i sistemi di climatizzazione, le scelte progettuali sono state diverse, anche a causa delle differenti zone geografiche per cui sono stati realizzati.

2.1.1 Casa GG

Progettata dallo studio di architetti Alventosa Morell, Casa GG unisce al basso costo e ad un breve periodo di tempo per la costruzione, un'alta efficienza energetica [4]. Situata a Barcellona, è composta da sei moduli prefabbricati in legno collegati tra loro, per una superficie complessiva di $112 m^2$. Per soddisfare il fabbisogno di

riscaldamento, la struttura presenta solamente un radiatore da 1 kW.

Questa soluzione, vincitrice di un concorso sulla realizzazione di moduli autosufficienti, ha voluto dimostrare come sia possibile ridurre al minimo i sistemi per il riscaldamento, progettando con cura tutti gli altri aspetti, in particolare, la disposizione e l'orientamento dei moduli e l'impiego di ampie vetrate che fungono da collettori di luce solare.

Tuttavia, bisogna considerare che la soluzione proposta è stata concepita esclusivamente per essere installata nella zona di Barcellona, caratterizzata da un clima mediterraneo con inverni miti. Di conseguenza, il sistema scelto potrebbe non essere adatto per altre zone con inverni rigidi e con estati afose, tali da richiedere la realizzazione anche di un sistema di raffrescamento.



Figura 2.1: Casa GG

2.1.2 KODA

Il modulo abitativo KODA è, invece, molto più compatto e di dimensioni contenute, con una superficie abitabile di soli $25 m^2$. Sviluppato in Estonia dall'azienda Kodasema, il modello ha trovato acquirenti anche in altri paesi europei, come Finlandia e Regno Unito. Considerate le sue ridotte dimensioni, può essere trasportato sul luogo dell'installazione già montato [19].

L'elevato isolamento termico dell'involucro opaco permette un basso consumo di energia per il riscaldamento. Inoltre le ampie vetrate frontali sono costituite da tripli vetri che garantiscono lo sfruttamento della luce solare durante il giorno e riducono al minimo le dispersioni per trasmissione. Il modulo è dotato di tutti i sistemi per garantire il comfort degli occupanti. All'interno sono installati un riscaldamento elettrico a pavimento ed una caldaia elettrica per la produzione di acqua calda sanitaria. Inoltre è presente un sistema meccanico di ventilazione con recupero del calore. La schermatura della parete vetrata evita il surriscaldamento estivo, anche se in diverse condizioni climatiche potrebbe non essere sufficiente. L'energia elettrica che alimenta tutti gli impianti è prodotta dal sistema fotovoltaico, ma non avendo un accumulo, l'edificio deve essere comunque collegato alla rete.



Figura 2.2: Modulo abitativo KODA

2.1.3 IT HOUSE

Completamente autonoma è invece la IT HOUSE, alloggio da circa $100 m^2$, progettato in California dallo studio di architettura Taalman [18]. L'autonomia

dell'edificio è ottenuta partendo dallo sfruttamento di strategie passive quali l'orientamento dell'edificio e la disposizione delle camere. Inoltre, la parete vetrata esposta a sud raccoglie la radiazione solare durante l'inverno.

I sistemi di energia rinnovabile installati sono un impianto fotovoltaico per l'energia elettrica che funge anche da schermatura e collettori solari termici collegati ad un serbatoio per la produzione di acqua calda. L'acqua calda è utilizzata non solo a scopo sanitario, ma anche per il riscaldamento tramite un pavimento radiante, mentre il raffrescamento è realizzato sfruttando la ventilazione naturale e le schermature che bloccano la radiazione solare.



Figura 2.3: IT HOUSE

2.1.4 Zero House

Altro edificio progettato per essere autonomo è la Zero House, avente una superficie di $60 m^2$, anch'esso progettato negli Stati Uniti dall'architetto Specht

Harpman, ma concepito per essere installato in diverse condizioni climatiche [17]. La climatizzazione della casa avviene grazie ad un sistema multi-split con pompa di calore. I pannelli fotovoltaici, collegati ad una serie di batterie per l'accumulo, producono invece l'energia elettrica per il funzionamento di elettrodomestici e del sistema di illuminazione a LED. Il sistema è in grado di immagazzinare una quantità di energia tale da permettere il funzionamento continuo dell'edificio per una settimana intera in assenza di sole. L'acqua piovana viene raccolta in delle cisterne con una capienza di oltre $8 m^3$, filtrata e poi riscaldata grazie a dei collettori solari collegati ad un serbatoio che funge da scambiatore di calore. Infine, tutti i sistemi della casa sono controllati tramite sensori e possono essere gestiti mediante un dispositivo mobile.

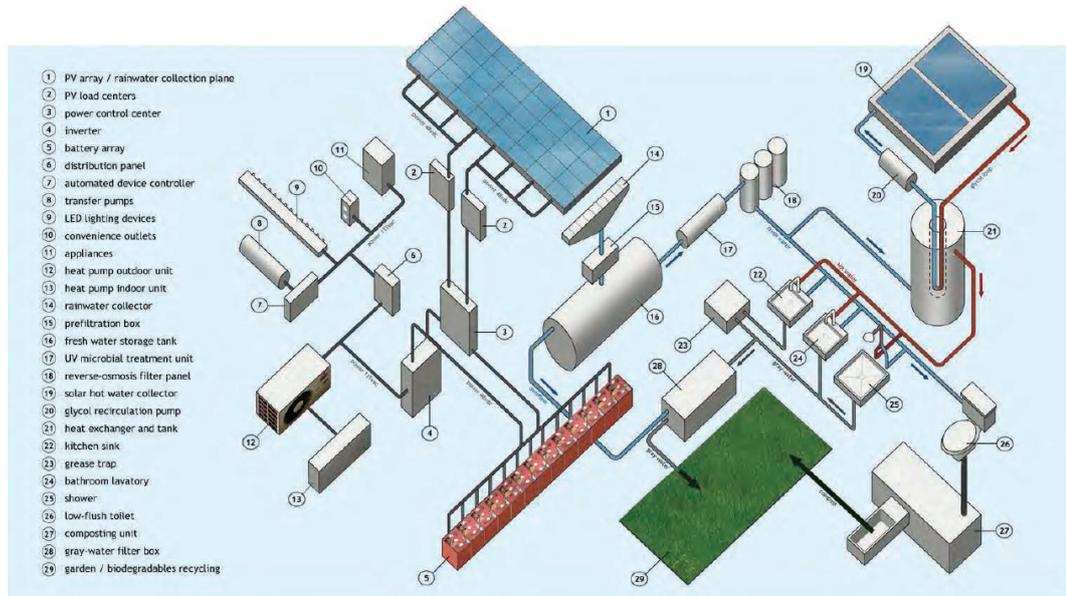


Figura 2.4: Schema funzionale del modulo prefabbricato Zero House

Tabella 2.1: Caratteristiche dei moduli prefabbricati commerciali analizzati

	Casa GG	KODA	IT HOUSE	Zero House
Zona d'installazione	Barcellona	Estonia	California	Texas
Superficie	112 m^2	25 m^2	100 m^2	60 m^2
Sistemi di energia rinnovabili	Nessuno	Pannelli fotovoltaici	Pannelli fotovoltaici Collettori solari	Pannelli fotovoltaici con accumulo Collettori solari
Ventilazione	Naturale	Meccanica con recupero di calore	Naturale	Naturale
Riscaldamento	Radiatore	Pavimento elettrico	Pavimento radiante	Sistema multi-split
Raffrescamento	Ventilazione naturale	Ventilazione meccanica	Ventilazione naturale	Sistema multi-split

2.2 Rifugi di montagna

Ad alte quote, le condizioni climatiche estreme e l'isolamento del luogo rendono necessaria la progettazione di edifici in grado di essere completamente autosufficienti, anche per un periodo di tempo prolungato. Di seguito sono riportati alcuni esempi.

2.2.1 Monte Rosa Hütte

Inaugurato nel 2010, il Monte Rosa Hütte è stato il primo esempio di rifugio alpino realizzato completamente seguendo i criteri di sostenibilità ed autonomia energetica, in grado di garantire al tempo stesso tutti i comfort per i 120 occupanti. Progettata dallo studio svizzero Bearth & Deplazes, la struttura è composta da circa 50 moduli prefabbricati in legno, trasportati tramite elicotteri a 2883 metri di altitudine. I sistemi impiantistici utilizzati permettono di raggiungere un'autosufficienza energetica del 90%, grazie, in particolar modo, allo sfruttamento dell'energia solare [22]. La facciata rivolta a sud ospita un sistema fotovoltaico integrato formato

da $84 m^2$ di pannelli, che coprono la quasi totalità del fabbisogno di energia elettrica. Se non utilizzata, l'energia viene accumulata in batterie, per poi essere sfruttata di notte e nei giorni non soleggiati. L'elettricità è impiegata per il funzionamento dei sistemi di illuminazione, degli elettrodomestici, del sistema per il trattamento delle acque grigie e dell'impianto di ventilazione con recuperatore di calore. La parte di fabbisogno non coperta dai pannelli fotovoltaici è soddisfatta tramite una centrale di cogenerazione integrativa alimentata ad olio di colza. L'energia solare è sfruttata anche per la produzione di acqua calda sanitaria, grazie a $56 m^2$ di collettori solari posti vicino alla struttura. La radiazione solare viene sfruttata al massimo in quanto in alta montagna, grazie all'assenza di inquinamento dell'aria e alla riflessione dovuta all'ambiente circostante, il rendimento dei pannelli aumenta. L'elevata efficienza energetica del rifugio è ottenuta anche tramite un'accurata gestione dell'energia, effettuata con un sistema, direttamente controllato dal Politecnico di Zurigo, che tiene in considerazione le previsioni atmosferiche, il numero di occupanti e l'energia disponibile.



Figura 2.5: Monte Rosa Hütte

2.2.2 Refuge du Goûter

L'innovativo ed ecosostenibile Refuge du Goûter, realizzato su progetto dello studio Groupe-H, è situato a 3.835 metri di altitudine ed è uno dei rifugi più alti d'Europa. Concepito per resistere ai forti venti di alta quota e alle escursioni termiche tipiche di queste altitudini, è in grado di ospitare 120 persone. Il rifugio è aperto da giugno a settembre e utilizza energie rinnovabili e le più avanzate tecnologie per ottenere la massima autonomia nella produzione di energia elettrica, riscaldamento ed acqua [24]. Un sistema di cogenerazione a biomasse, alimentato con olio di colza, è utilizzato per il riscaldamento ed è la principale fonte per la produzione di energia elettrica. Quest'ultima è ottenuta anche dall'installazione di pannelli fotovoltaici sulla facciata. I collettori solari termici sul tetto sono usati per sciogliere la neve, ottenendo così acqua fredda, che viene raccolta in cisterne aventi un volume totale di 18 m^3 , e per riscaldare l'acqua. Inoltre, la struttura è dotata di un sistema di ventilazione ad alta efficienza, con recuperatore di calore rotativo avente un'efficienza maggiore del 75%. La portata di ventilazione varia in base all'effettiva occupazione degli ambienti, monitorata tramite sensori per la rilevazione di CO_2 . Infine, il rifugio impiega un sistema per il riciclaggio ed il trattamento dei rifiuti. Tutto questo, insieme all'estremo isolamento termico dell'edificio ottenuto impiegando fibra di vetro e serramenti con tripli vetri altamente performanti, permette di ridurre al massimo i consumi ed ottenere la totale autonomia energetica.



Figura 2.6: Refuge du Goûter

2.2.3 Kezmarské hut

Sebbene non ancora realizzata, questa innovativa struttura, che ricorda un enorme cubo di ghiaccio, è stata ideata dallo studio di architettura Atelier 8000, per un concorso avente come obiettivo la realizzazione di un rifugio da costruire sulle montagne slovacche. Questo rifugio è stato sviluppato come un edificio passivo per quanto riguarda la produzione e il consumo di energia. La progettazione degli impianti è stata effettuata al fine di soddisfare i requisiti di sostenibilità energetica [23]. La forma e l'orientamento del rifugio sono stati scelti in modo da sfruttare al massimo e per il maggior tempo possibile l'energia solare. I pannelli fotovoltaici per la produzione di energia elettrica e i collettori solari termici per ottenere acqua calda sanitaria sono stati posizionati sulle facciate rivolte a sud e ad est, in

modo da ricevere direttamente la radiazione solare nei mesi invernali, quando la richiesta di energia è maggiore. Anche le finestre sono state progettate in modo da sfruttare al massimo gli apporti solari gratuiti. Inoltre, grazie alle ridotte perdite di calore, il riscaldamento dell'edificio è completamente soddisfatto da un sistema di distribuzione dell'aria. L'aria fresca è fatta passare attraverso un recuperatore di calore con efficienza maggiore dell'85%. L'acqua calda sanitaria è accumulata in cisterne pronta per essere utilizzata. Anche in questo caso, tutti gli impianti sono ottimizzati mediante un avanzato sistema di regolazione che raccoglie dati sulle condizioni climatiche, l'occupazione e i consumi.



Figura 2.7: Kezmarškè hut

2.2.4 Cabane de Tracuit

La Cabane de Tracuit, situata a 3256 metri, è stata progettata dallo studio di architetti Savioz Fabrizzi ed è un altro esempio di rifugio alpino a basso impatto ambientale [11]. La facciata esposta a sud è ricoperta da finestre e pannelli fotovoltaici per sfruttare il più possibile l'energia solare. Oltre alle condizioni climatiche, la struttura è stata realizzata tenendo in considerazione anche i problemi legati al trasporto. Infatti, solo le fondazioni e i serbatoi di acqua e gas sono realizzati in calcestruzzo. La struttura portante invece è in legno e il rifugio è composto da

moduli prefabbricati. Il rivestimento delle facciate e del tetto è in acciaio inox, scelto per la resistenza alla corrosione così che grazie alla stabilità chimica permette di raccogliere ed utilizzare l'acqua piovana. Eccetto che a sud, dove le finestre coprono buona parte della facciata, in modo da massimizzare la quantità di luce naturale e di energia solare, sulle altre facciate, le finestre sono ridotte al minimo indispensabile, per limitare le dispersioni termiche. Non potendo essere collegato a nessuna rete energetica, l'edificio è stato progettato per essere completamente autonomo. A questo contribuiscono la forma compatta, l'involucro edilizio altamente isolato e il ridotto fabbisogno di riscaldamento. Un sistema di ventilazione meccanica, dotato di un recuperatore di calore, garantisce il ricambio dell'aria. Il riscaldamento, possibile solo per gli ambienti maggiormente frequentati, è ottenuto tramite un sistema alimentato a pellet o a gas in caso di necessità. I 95 m^2 di impianto fotovoltaico coprono la maggior parte del fabbisogno di energia elettrica. Un generatore entra in funzione solamente nelle situazioni di picco di richiesta.



Figura 2.8: Cabane de Tracuit

2.2.5 Rifugio Mollino

Il rifugio Mollino, noto anche come Casa Capriata, è il primo rifugio italiano completamente sostenibile, concepito nel 1954 dall'architetto Carlo Mollino, ma realizzato solamente nel 2014 dal Dipartimento di Architettura e Design del Politecnico di Torino sul modello del progetto precedente. Esso rappresenta un esempio di casa passiva, perfettamente rispondente ai parametri della classe A Gold di Casa Clima con un consumo minore di 10 kWh/m^2 [21]. L'edificio unisce le capriate e la struttura in legno, tipiche della tradizionale architettura montana, con la leggerezza della copertura metallica. Inoltre, l'utilizzo di materiali innovativi e di un sistema fotovoltaico integrato permettono il raggiungimento di zero emissioni. L'edificio è rivestito con pannelli di lana di vetro per l'isolamento termico. Gli infissi, a taglio termico con trattamento basso emissivo, riducono ulteriormente le perdite di calore. Il comfort termico all'interno è ottenuto mediante l'utilizzo combinato di sistemi scaldanti a basso consumo energetico, di un sistema di ventilazione meccanica dotato di recuperatore di calore entalpico e di pannelli radianti inseriti negli elementi architettonici come, ad esempio, le porte. Infine, l'acqua viene prima raccolta sfruttando lo scioglimento della neve, la pioggia e il trattamento delle acque di scarico, e successivamente scaldata tramite collettori solari posti sul tetto.



Figura 2.9: Rifugio Mollino

Tabella 2.2: Caratteristiche dei rifugi di montagna analizzati

	Monte Rosa Hütte	Refuge du Goûter	Kez-marskè hut	Cabane de Tracuit	Rifugio Mollino
Zona d'installazione	Monte Rosa	Monte Bianco	Tatra	Alpi Pennine	Gressoney Saint Jean
Sistemi di energia rinnovabili	Pannelli fotovoltaici con accumulo Collettori solari Impianto di cogenerazione a biomasse	Pannelli fotovoltaici Collettori solari Impianto di cogenerazione a biomasse	Pannelli fotovoltaici con accumulo Collettori solari	Pannelli fotovoltaici	Pannelli fotovoltaici Collettori solari
Ventilazione	Meccanica con recupero di calore	Meccanica con recupero di calore	Meccanica con recupero di calore	Meccanica con recupero di calore	Meccanica con recupero di calore
Riscaldamento	Impianto di ventilazione	Impianto di ventilazione	Impianto di ventilazione	Sistema a pellet	Impianto di ventilazione e pannelli radianti
Raffrescamento	Impianto di ventilazione	Impianto di ventilazione	Impianto di ventilazione	Impianto di ventilazione	Impianto di ventilazione

2.3 Solar Decathlon

Il Solar Decathlon è una competizione internazionale tra università, ideata dal dipartimento di energia degli Stati Uniti, composta da 10 categorie, in cui team di studenti sono chiamati a progettare e costruire edifici altamente efficienti ed innovativi alimentati da energia rinnovabile, specialmente energia solare [10]. I vincitori sono quei team che riescono ad unire nel miglior modo possibile l'eccellenza nella progettazione architettonica ed ingegneristica con l'innovazione, il potenziale di mercato, l'efficienza dell'edificio e la produzione intelligente di energia.

Dalla prima edizione nel 2002, il Solar Decathlon si è esteso in tutto il mondo con competizioni in Europa, Cina, America Latina e Caraibi, Medio Oriente, e Africa. Come il decathlon olimpico, il Solar Decathlon è composto da 10 categorie. Queste valutano la progettazione sostenibile, l'innovazione, il potenziale di mercato, l'utilizzo razionale dell'acqua, l'efficienza energetica e le strategie di comunicazione. Ogni categoria vale un massimo di 100 punti, per un punteggio complessivo che può arrivare a 1000 punti. Le squadre guadagnano punti grazie al completamento di obiettivi, al monitoraggio delle prestazioni e alla valutazione della giuria. Le categorie possono cambiare ad ogni competizione in risposta al feedback dei partecipanti, alle dinamiche del mercato e agli obiettivi del dipartimento di energia degli Stati Uniti.

Solar Decathlon offre un'esperienza pratica e una formazione unica che prepara gli studenti in competizione a entrare nel mondo del lavoro dell'energia pulita. Questa competizione internazionale è stata una forza trainante nella sensibilizzazione sull'energia pulita sin dalla prima edizione nel 2002. Le tecnologie e le soluzioni utilizzate nelle case del Solar Decathlon sono state poi adottate nel settore dell'edilizia residenziale non solo negli Stati Uniti, ma in tutto il mondo. Lo scopo del Solar Decathlon è quello di educare gli studenti e il pubblico sulle ultime tecnologie e sui materiali impiegati nel campo della progettazione di edifici ad alta efficienza energetica, delle tecnologie per produrre energia pulita, delle soluzioni intelligenti per la casa e della mobilità elettrica. Inoltre, vuole dimostrare al pubblico il comfort e il risparmio che si possono ottenere con case che applicano il concetto di efficienza energetica alla costruzione, ai sistemi domestici, agli elettrodomestici e lo uniscono ad un design innovativo con produzione di energia rinnovabile in loco. Merito del

Solar Decathlon è sicuramente quello di sensibilizzare ed educare il pubblico sui vantaggi, sulla convenienza e sulla disponibilità di soluzioni per produrre energia pulita.

Al fine di conoscere gli impianti maggiormente utilizzati e le ultime novità tecnologiche nell'ambito della climatizzazione in edifici prefabbricati sono stati analizzati i progetti dell'ultima edizione disponibile del Solar Decathlon Europe (2014) e le ultime due edizioni del Solar Decathlon International (2015 e 2017).

Uno dei punti fondamentali per la realizzazione di un edificio ad alta efficienza energetica è la riduzione del fabbisogno energetico per il riscaldamento e raffrescamento. Questo obiettivo è conseguito grazie all'attuazione congiunta di diverse soluzioni. Partendo dall'involucro opaco, che deve essere dotato di uno strato di isolante tale da minimizzare le perdite per trasmissione. Allo stesso modo gli elementi vetrati adottano tecnologie all'avanguardia che permettono di ridurre le perdite di calore e di massimizzare la quantità di luce durante il giorno. Un'altra scelta per il raggiungimento di un basso fabbisogno energetico è l'utilizzo di sistemi passivi e semi-passivi come la ventilazione naturale, specialmente la ventilazione notturna nel periodo estivo, per ridurre i carichi di raffrescamento durante la giornata, dispositivi di schermatura, in particolar modo nelle stanze a sud, più esposte alla radiazione solare e pannelli di PCM in grado di assorbire e rilasciare calore a seconda della temperatura. Una volta utilizzati tutti gli accorgimenti possibili per ridurre il fabbisogno, si passa alla progettazione dei sistemi attivi di climatizzazione. Sebbene le condizioni climatiche differiscono da località a località, per cui, ad esempio, nelle zone più fredde, il raffrescamento estivo non è necessario o comunque viene effettuato tramite sistemi passivi, le soluzioni adottate per la climatizzazione dell'edificio si riducono a due tipologie: impianto ad aria condizionata o sistema radiante, in particolare pavimento radiante. Inoltre, non potendo utilizzare combustibili fossili e quindi caldaie a gas, come indicato nelle regole della competizione, gli impianti di riscaldamento, il cui fluido termovettore non deve raggiungere temperature elevate, sia che si tratti di sistemi ad aria o ad acqua, vengono alimentati prevalentemente usando pompe di calore. Per quanto riguarda l'acqua calda sanitaria, che necessita di temperature maggiori, la principale soluzione adottata risulta essere l'impianto solare termico con un accumulo ed una soluzione di backup che prevede l'utilizzo della pompa di calore o di una resistenza elettrica. In edifici ad alta efficienza

energetica, un ruolo importante è svolto dal sistema di ventilazione meccanica. Infatti, la realizzazione di un edificio altamente isolato con conseguente riduzione delle infiltrazioni, necessita un sistema di ventilazione meccanica per garantire il ricambio e una buona qualità dell'aria. Componente indispensabile di tale sistema è il recuperatore di calore, presente in tutti o quasi i modelli analizzati. Infine, il fabbisogno elettrico è completamente soddisfatto da un impianto fotovoltaico con accumulo.

2.3.1 Rhome

Università Degli Studi di Roma TRE – 1° Classificato Solar Decathlon Europe 2014

L'edificio, progettato e realizzato dal team degli studenti dell'Università Roma Tre in collaborazione con Rubner Haus, è dotato di una zona detta "3D Core" in cui sono alloggiati tutti i componenti interni che servono alla casa. Il "3D Core" è connesso all'impianto fotovoltaico e ai pannelli solari termodinamici che forniscono rispettivamente elettricità e acqua calda sanitaria. In particolare, l'acqua calda sanitaria è prodotta da un sistema integrato di pannelli solari termodinamici e pompa di calore. I pannelli di alluminio hanno serpentine contenenti il gas refrigerante, e fungono da evaporatore della pompa di calore, la quale è dotata di compressore e condensatore per la produzione di acqua calda sanitaria, che eventualmente viene inviata ad un serbatoio di accumulo. In questo modo viene aumentata l'efficienza del sistema e ridotta l'energia necessaria per il funzionamento.

Per il riscaldamento e il raffrescamento degli ambienti, il "3D Core" è connesso al pavimento radiante. Il sistema radiante Zeromax di Eurotherm riduce lo spessore a zero, in quanto è ottenuto fresando il supporto alla pavimentazione in modo da poter inserire la tubazione nelle zone di fresatura così create. In questo modo il tempo d'installazione diminuisce significativamente e il ridotto spessore del sistema consente un minor tempo di riscaldamento e raffrescamento della superficie radiante. L'acqua che scorre nelle tubazioni è riscaldata o raffreddata dalla stessa pompa di calore utilizzata per l'acqua calda sanitaria.

Considerando l'utilizzo di sistemi radianti per la climatizzazione, risulta necessario

l'utilizzo di un sistema di ventilazione meccanica dotato di un recuperatore di calore. La qualità dell'aria è controllata da sensori per la CO₂ e altre sostanze inquinanti che attivano il sistema. L'aria viene prelevata dall'esterno e viene trattata prima di essere inserita in ambiente. La temperatura dell'aria immessa viene modificata, sia in estate che in inverno, grazie al recupero di calore con l'aria espulsa, permettendo un notevole risparmio di energia. Inoltre, il recuperatore di calore è dotato di una piccola pompa di calore che consente, a seconda della stagione, il riscaldamento o il raffreddamento, l'umidificazione o la deumidificazione dell'aria. Il recuperatore permette il by-pass del sistema nel caso in cui le condizioni dell'aria esterna lo permettano.

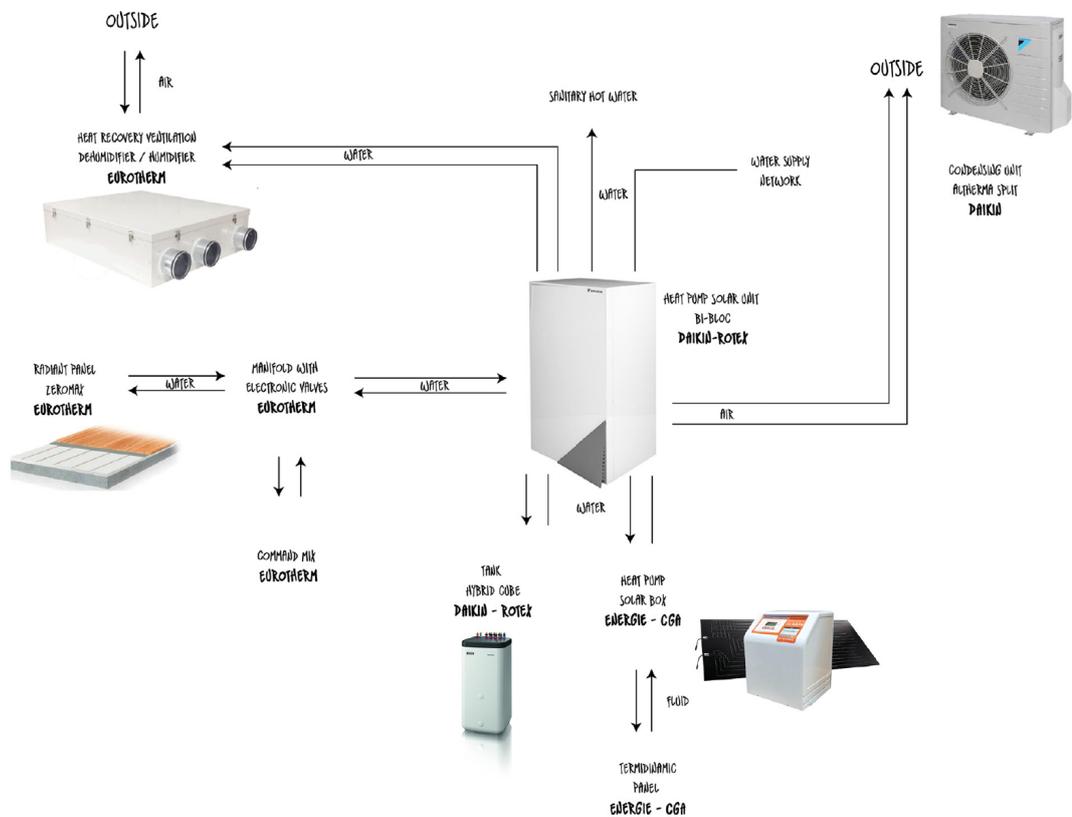


Figura 2.10: Schema funzionale del modulo Rhome

2.3.2 SU+RE House

Stevens Institute of Technology – 1° Classificato Solar Decathlon International 2015

Studenti provenienti da diversi dipartimenti dello Stevens Institute of Technology hanno realizzato il prototipo Su+RE House, vincitore dell'edizione 2015. Per il riscaldamento e il raffrescamento degli ambienti è stato scelto un sistema multi-split per l'aria condizionata, in quanto unisce l'efficienza energetica al controllo della temperatura nelle differenti zone. Il flusso d'aria attraverso le condotte è regolato da serrande motorizzate, le quali sono connesse con termostati wireless collocati in ogni zona. Questo permette di personalizzare i parametri di riscaldamento e raffrescamento a seconda delle preferenze degli occupanti, aumentando il comfort e riducendo il consumo di energia. Per controllare l'umidità, il sistema di climatizzazione può essere impostato, se necessario, nella modalità "dry", dedicata più alla riduzione dell'umidità che della temperatura. Infine, per massimizzare l'efficienza del sistema, particolare attenzione è stata rivolta alla minimizzazione della lunghezza e alla tenuta d'aria delle condotte.

L'alta impermeabilità dell'edificio alle infiltrazioni esterne richiede un sistema di ventilazione meccanica per il rinnovo dell'aria e il mantenimento della qualità dell'aria. Il sistema di ventilazione meccanica è dotato di un recuperatore di calore, ed immette continuamente aria dall'esterno mentre preleva aria dalla cucina e dal bagno. Lo scambiatore di calore permette all'aria espulsa di preconditionare l'aria immessa, così da ridurre l'energia richiesta per il riscaldamento e il raffrescamento e allo stesso tempo mantenere la qualità dell'aria nella casa.

La produzione di acqua calda sanitaria avviene grazie ad un sistema personalizzato solare elettrico a corrente continua. Per riscaldare l'acqua calda sanitaria ben oltre la temperatura di progetto, la SU+RE House è in grado di ottenere un valore notevolmente alto della frazione solare pari al 75%. Il serbatoio di accumulo funge da "batteria solare" che immagazzina il calore sotto forma di acqua calda ad almeno 65 gradi, rilasciandolo quando il sole non fornisce sufficiente energia per alimentare il sistema o durante la notte. Il sistema, che utilizza l'energia elettrica e non un fluido da riscaldare, si distingue rispetto ai tradizionali pannelli solari termici,

poiché vengono eliminati i rischi e i problemi di manutenzione associati a questo tipo di sistemi.

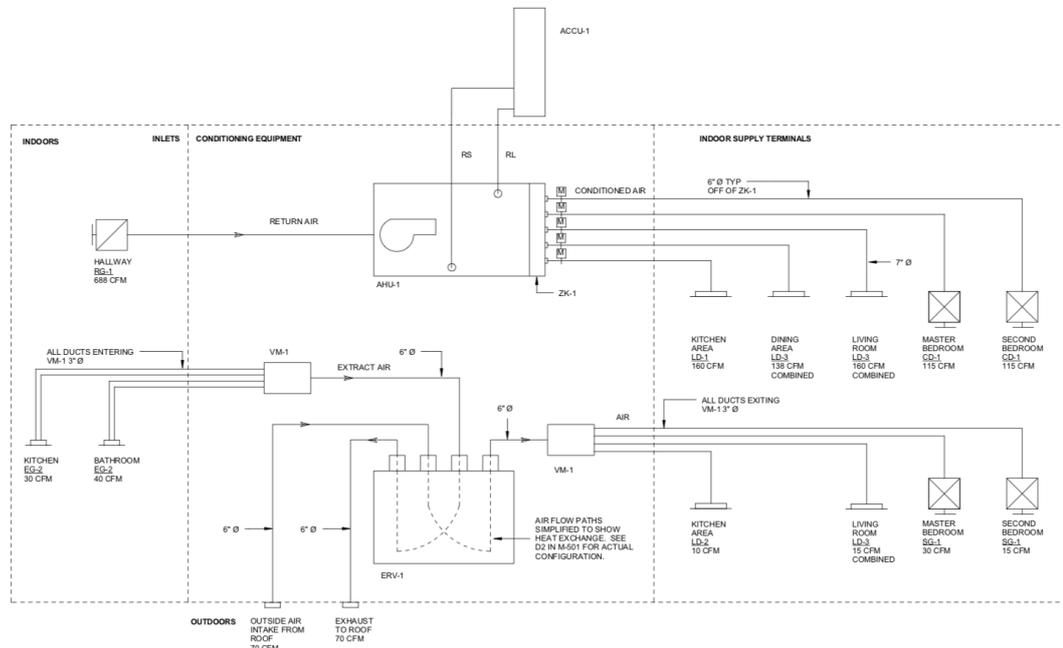


Figura 2.11: Schema funzionale del modulo SU+RE House

2.3.3 The Neighborhub

Swiss Team – 1° Classificato Solar Decathlon International 2017

Lo Swiss Team, composto da studenti provenienti dall'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, School of Engineering and Architecture Fribourg, Geneva University of Art and Design e University of Fribourg, ha progettato il modulo abitativo vincitore dell'edizione del Solar Decathlon International 2017. L'impianto di climatizzazione dell'aria e il sistema di ventilazione meccanica sono stati separati in modo da aumentare la loro flessibilità di utilizzo. La ventilazione meccanica è usata per fornire aria fresca all'ambiente e regolare i livelli di umidità relativa e di concentrazione di CO₂. Il sistema è dotato di un recuperatore di calore ad alta efficienza che riduce significativamente il consumo di energia. Infatti, il recuperatore

di tipo entalpico può recuperare fino al 70% di calore latente. Questa soluzione permette all'aria da immettere in ambiente di essere preriscaldata durante l'inverno, mentre in estate l'aria espulsa riesce a raffreddare l'aria esterna più calda. Come conseguenza, il sistema di ventilazione riduce entrambi i fabbisogni di riscaldamento e raffreddamento, mantiene un'accettabile livello della concentrazione di CO₂ e riduce l'energia necessaria per la deumidificazione dell'aria. Infine, un bypass permette all'aria esterna di essere immessa senza passare dal recuperatore di calore qualora le condizioni lo consentano.

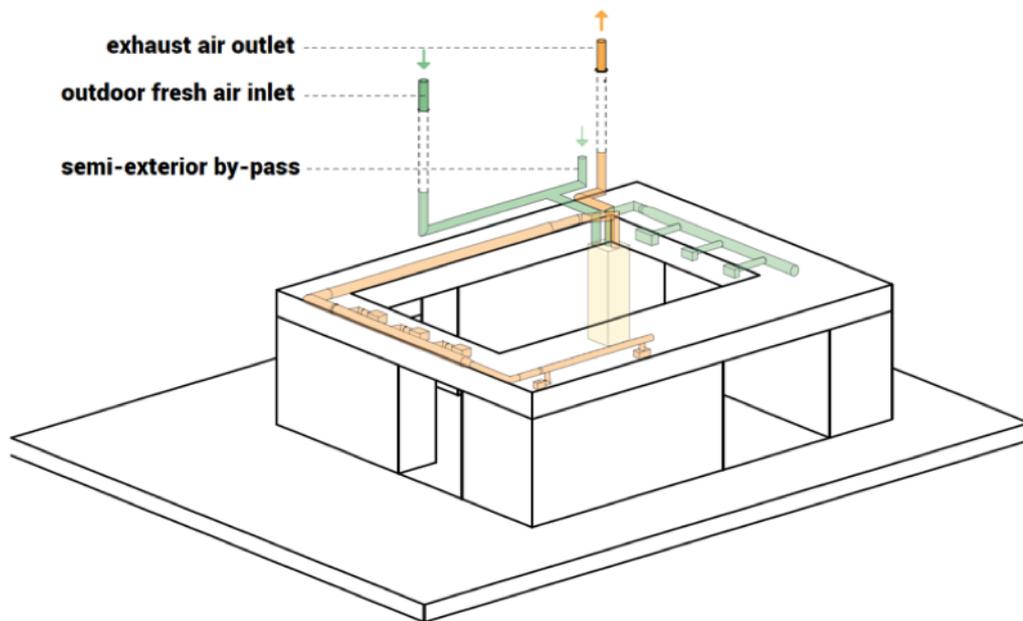


Figura 2.12: Sistema di ventilazione meccanica del modulo The Neighborhub

Il riscaldamento e il raffreddamento degli ambienti è ottenuto mediante un impianto di climatizzazione dell'aria, scelto per la sua compattezza, semplicità di integrazione e reattività. Il sistema è composto da un'unità interna e una pompa di calore posta all'esterno. L'aria condizionata è distribuita attraverso tre elementi autoportanti a soffitto che fungono da condotte. Invece dei tradizionali ventilatori, dei fori sono stati effettuati direttamente sui pannelli di legno del soffitto per l'introduzione dell'aria.

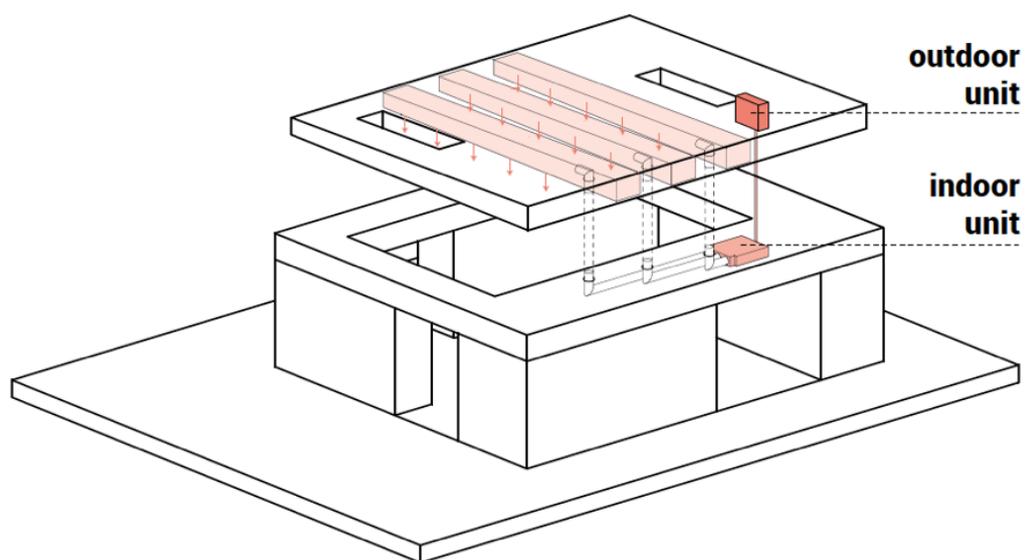


Figura 2.13: Sistema di climatizzazione del modulo The Neighborhub

L'acqua calda sanitaria è prodotta mediante l'utilizzo di pannelli solari termici montati sulle facciate dell'edificio. Questi pannelli possono variare l'inclinazione tra 90° e 17° . Infatti l'inclinazione a 90° dei pannelli smussa la produzione annuale e fornisce una maggiore produzione di calore durante l'inverno rispetto all'inclinazione di 30° . I pannelli solari termici sono accoppiati ad una pompa di calore aria-acqua che riscalda l'acqua quando i pannelli solari termici non sono sufficienti.

Capitolo 3

Soluzioni impiantistiche per edifici ad alta efficienza energetica

La progettazione degli impianti in un edificio ad alta efficienza energetica ha come scopo quello di assicurare elevate prestazioni durante tutto il periodo di funzionamento per garantire le migliori condizioni di comfort, in termini di temperatura, umidità relativa e qualità dell'aria, minimizzando al tempo stesso il consumo energetico e le emissioni e sfruttando il più possibile le fonti di energia rinnovabili. Per raggiungere questi obiettivi, e considerata l'attuale situazione energetica ed ambientale, il settore della climatizzazione ha effettuato negli ultimi anni un notevole sforzo per incrementare l'efficienza dei sistemi e dei componenti, emanando normative con standard sempre più restrittivi, sviluppando nuove soluzioni e sperimentando diversi approcci progettuali. Risulta necessario, quindi, proseguire in questa direzione, affinché la progettazione sostenibile degli impianti diventi una pratica comune. Per questo motivo, quello del progettista di impianti HVAC è un ruolo fondamentale per la progettazione di un edificio ad alta efficienza energetica. Il progettista deve considerare le diverse soluzioni in grado di soddisfare le esigenze degli occupanti, analizzarle attraverso modelli e mostrare i vantaggi e gli svantaggi di ogni alternativa in modo da poter scegliere quella più adatta. Egli deve sempre avere come riferimento i tre concetti principali di una progettazione sostenibile: ridurre i carichi termici, adottare gli impianti più efficienti, utilizzare un approccio integrato [25]. Quest'ultimo è molto importante, in quanto integrare

al meglio i componenti di un sistema permette di ottenere una migliore funzionalità complessiva ed alte prestazioni. Per scegliere, tra le numerose opzioni, l'impianto di climatizzazione più adatto a soddisfare le condizioni termoigrometriche e di qualità dell'aria desiderate in ambiente, il progettista deve basarsi su alcuni criteri, spesso strettamente connessi tra di loro e aventi diversa importanza a seconda della tipologia di edificio, degli occupanti e di altri fattori. Questi criteri possono essere distinti in tre tipologie: criteri architettonici e di utilizzo, criteri prestazionali e gestionali, criteri energetici ed economici. Considerando la tipologia di edificio in esame, risulta evidente che i criteri più importanti in questo caso siano quelli prestazionali ed energetici. In particolare l'attenzione sarà rivolta ai carichi termici, al comfort termoigrometrico, alla qualità dell'aria, all'efficienza dei componenti e al risparmio energetico.

3.1 Classificazione degli impianti

I diversi impianti di climatizzazione, tra cui il progettista deve scegliere, sono classificati in tre tipologie, a seconda del tipo di fluido termovettore utilizzato, che può essere aria, acqua, un fluido frigorigeno o una combinazione di questi.

Impianti a tutt'aria

In questo tipo di impianti, l'aria è l'unico fluido termovettore utilizzato sia per la climatizzazione degli ambienti sia per garantire il rinnovo d'aria tramite la ventilazione meccanica. L'aria prelevata dall'esterno può essere miscelata con aria ricircolata dall'ambiente, e dopo essere stata filtrata e trattata in un'unità di trattamento aria, viene distribuita da una rete di condotte per essere immessa in ambiente tramite terminali di diffusione.

L'impianto a tutt'aria è tipicamente utilizzato in edifici caratterizzati da grandi volumi e un elevato numero di occupanti. Gli impianti a tutt'aria si distinguono a loro volta in impianti a portata costante e impianti a portata variabile.

I vantaggi di questi tipi di impianto sono quelli di ottenere un buon comfort sia con carichi costanti che con carichi variabili. In estate, se le condizioni lo permettono, è possibile utilizzare direttamente l'aria esterna per effettuare il raffrescamento

degli ambienti. Tuttavia con portate d'aria elevate, le dimensioni dei componenti e specialmente delle condotte possono diventare un problema se gli spazi sono ridotti. Inoltre, specialmente in estate, causa di discomfort è la corrente d'aria fredda proveniente dai terminali di diffusione.

Infine, la regolazione di temperatura e umidità relativa può diventare complessa se l'edificio presenta molte zone con esigenze di condizionamento diverse.

Impianti misti di tipo idronico

Gli impianti misti del tipo aria-acqua utilizzano due sistemi separati, ognuno con funzioni distinte e indipendenti. L'aria, detta primaria, è impiegata per il controllo dell'umidità relativa e per garantire una buona qualità dell'aria in ambiente tramite il sistema di ventilazione. Il carico sensibile e quindi il controllo della temperatura è effettuato invece tramite un sistema alimentato con acqua calda per il riscaldamento invernale e acqua fredda per il raffrescamento estivo.

A differenza degli impianti a tutt'aria, avendo una portata d'aria minore, definita dalla normativa UNI 10339, le dimensioni delle condotte d'aria si riducono notevolmente. Inoltre, nel caso di più zone, con un impianto dedicato esclusivamente alla neutralizzazione del carico sensibile è più facile progettare un sistema che permette un controllo di zona o individuale.

Tra gli impianti misti aria-acqua, quelli con pavimento radiante sono un'ottima soluzione in termini di comfort ambientale e risparmio energetico.

Come già evidenziato, la funzione del pavimento radiante è quella di mantenere in ambiente la temperatura desiderata. Esso è costituito da serpentine di tubazioni poste sotto il pavimento, in cui scorre acqua calda o acqua fredda a seconda delle necessità. Per il riscaldamento, la temperatura dell'acqua deve essere tale che la temperatura superficiale del pavimento non superi i 29°C, per evitare problemi alle gambe. In raffrescamento invece, a causa dei problemi relativi alla formazione di condensa, la temperatura dell'acqua deve essere superiore a quella di rugiada dell'aria in ambiente. I vantaggi del pavimento radiante sono il ridotto consumo energetico e le ottime condizioni di comfort, dovute al trasferimento di calore principalmente per irraggiamento, andando così ad evitare indesiderate correnti d'aria. La caratteristica limitante che bisogna tenere in considerazione in fase di progettazione è la bassa resa frigorifera.

Impianti misti a espansione diretta a portata di refrigerante variabile. Questa tipologia di impianto, noto comunemente come VRF (Variable Refrigerant Flow), è costituito da una o più unità motocondensanti collegate tramite tubazioni capillari, in cui scorre il fluido frigorigeno, alle unità terminali a espansione diretta poste in ambiente, che possono funzionare sia in raffreddamento sia in riscaldamento come pompe di calore. La portata di refrigerante che circola nel circuito varia in modo lineare e direttamente proporzionale al carico di raffreddamento o di riscaldamento che l'unità motocondensante deve fornire alle unità terminali.

Il suo vantaggio principale consiste nell'elevata modularità e flessibilità di gestione. Bisogna fare attenzione, specialmente in sistemi di grandi dimensioni, in caso di fuoriuscita del fluido refrigerante, in quanto questo è dannoso per l'ambiente.

Tabella 3.1: Vantaggi e svantaggi degli impianti a tutt'aria, impianti misti aria acqua con pavimento radiante e impianti misti ad espansione diretta

	Vantaggi	Svantaggi
Impianti a tutt'aria	Unico impianto per ventilazione e condizionamento Buone condizioni di comfort Possibilità di sfruttare il free cooling	Elevate dimensioni dell'impianto Rischio di discomfort causato da correnti d'aria Rumorosità
Impianti misti aria-acqua con pavimento radiante	Spazi tecnici ridotti Assenza di rumore Non occupa spazio utile in ambiente Ottime condizioni di comfort Correnti d'aria limitate alla ventilazione	Limitata capacità frigorifera specifica Elevati costi iniziali
Impianti misti a espansione diretta VRF	Spazi tecnici ridotti Ottima regolazione di zona Alta efficienza ai carichi parziali	Possibile fuoriuscita di fluido frigorigeno Rischio di discomfort causato da correnti d'aria

3.2 Componenti ad alta efficienza energetica

Come osservato nel capitolo precedente, il risparmio energetico negli edifici è ottenuto adottando alcuni componenti ad alta efficienza negli impianti di ventilazione e climatizzazione, che verranno analizzati qui di seguito.

3.2.1 Recuperatore di calore

Mentre l'isolamento termico riduce le dispersioni per trasmissione, per ridurre il carico di ventilazione, una delle soluzioni sempre più diffuse negli edifici ad alta efficienza energetica è l'utilizzo di un recuperatore di calore nel sistema di ventilazione meccanica. Infatti, per garantire un'elevata qualità dell'aria interna si rende necessaria una continua ventilazione con notevoli portate d'aria che causano un aumento del carico termico. Utilizzare un recuperatore per scambiare calore tra la corrente d'aria espulsa e quella in ingresso consente di ridurre notevolmente il consumo energetico per la climatizzazione [26]. Negli ultimi anni, le case costruttrici di componenti per la climatizzazione hanno sviluppato macchinari sempre più efficienti e vari, adatti alle diverse esigenze.

Il recuperatore di calore è uno scambiatore di calore che permette un trasferimento di calore, e in alcuni casi di vapor d'acqua, tra il flusso d'aria espulso all'esterno e il flusso d'aria immesso in ambiente, a causa di una differenza tra le temperature e le pressioni parziali di vapore. Sia che essi recuperino solamente il calore sensibile, e per questo vengono detti recuperatori sensibili, sia che permettano anche il recupero del calore latente, e sono detti quindi recuperatori totali o entalpici, il risparmio energetico ottenibile è considerevole. Ovviamente, i recuperatori totali sono in grado di fornire un maggiore risparmio di energia, specialmente durante la stagione estiva, tuttavia essi richiedono generalmente un investimento iniziale maggiore.

La scelta del tipo di recuperatore deve essere effettuata tramite un'attenta valutazione, considerando le condizioni di applicazione e il risparmio energetico ed economico conseguito. Ad esempio, se il carico latente all'interno dell'ambiente è molto alto, l'utilizzo di un recuperatore di calore totale potrebbe non portare ulteriori benefici rispetto ad un recupero del solo calore sensibile. L'adozione di un recuperatore totale risulta invece vantaggiosa nel caso in cui contribuisce a ridurre

i carichi di umidificazione e deumidificazione.

Un fattore fondamentale che incide sulle prestazioni e quindi sul risparmio energetico di questo componente è sicuramente il numero di ore di funzionamento. Maggiore sarà il tempo di funzionamento, maggiori saranno i risparmi, riducendo così il tempo di ritorno dell'investimento. Inoltre, all'aumentare della portata trattata diminuisce il costo specifico. I vantaggi legati all'utilizzo di un recuperatore di calore sono doppi. Infatti, oltre a preriscaldare o preraffrescare l'aria di rinnovo, recuperando energia termica che altrimenti andrebbe persa, permette di ridurre la potenza e il consumo energetico dei macchinari utilizzati per la climatizzazione di circa il 20%. Nel decreto legislativo 192/05, così come modificato dal 311/06, è prevista l'adozione di sistemi di ventilazione meccanica controllata nel caso la ventilazione naturale non sia sufficiente a garantire le condizioni di comfort desiderate. In questo caso, si ritiene necessaria l'integrazione di un recuperatore di calore ogni volta che la portata totale di ricambio e il numero di ore di funzionamento del sistema di ventilazione siano superiori ai valori limite, in funzione della zona climatica in cui l'impianto dovrà operare. La normativa impone, qualora si rientri nell'obbligo di installare un recuperatore di calore, che questo presenti un'efficienza di trasferimento di calore sensibile almeno pari al 50%. Non c'è nessun riferimento, invece, al recupero nella stagione estiva, né alla possibilità che possa essere recuperato anche il calore latente dall'aria espulsa. Recuperare il calore latente può rappresentare, invece, una componente rilevante nel risparmio energetico ottenibile, specialmente nel caso in cui, per la tipologia di edificio e di utenza sia richiesto il controllo di umidità in ambiente e allo stesso tempo siano necessarie elevate portate d'aria esterna per la ventilazione.

La quantità di calore recuperato dipende da molti fattori, sia relativi alle condizioni ambientali in cui il componente deve operare, sia relativi alle caratteristiche del recuperatore stesso, come ad esempio la geometria o la conduttività termica dei materiali impiegati per le superfici dello scambiatore. Inoltre mentre in un recuperatore sensibile avviene solamente scambio d'energia tra i due flussi d'aria, in un recuperatore totale avviene anche scambio di massa, con trasferimento di vapore d'acqua, con meccanismi diversi a seconda della tipologia di recuperatore adottato.

3.2.1.1 Il rendimento energetico

Si possono dare molte definizioni di rendimento per una unità di recupero calore. L'efficienza di un recuperatore di calore aria-aria è espressa secondo la definizione introdotta dalla norma ASHRAE Standard 84, come rapporto tra la potenza termica sensibile e/o latente effettivamente trasferita e il valore massimo teoricamente recuperabile.

$$\epsilon = \frac{G_e(X_2 - X_1)}{G_{min}(X_3 - X_1)} = \frac{G_r(X_3 - X_4)}{G_{min}(X_3 - X_1)} \quad (3.1)$$

dove:

ϵ = efficienza di recupero sensibile, latente o totale

X = temperatura di bulbo asciutto θ (°C), umidità specifica x (g/kg), entalpia specifica h (kJ/kg) a seconda che il recupero di calore operato sia solo sensibile, latente o totale.

G_e = portata massica dell'aria esterna (kg/s)

G_r = portata massica dell'aria espulsa (kg/s)

G_{min} = portata massica più piccola tra G_e e G_r (kg/s)

I pedici rappresentano le condizioni di:

1. Ingresso aria di immissione
2. Uscita aria di immissione
3. Ingresso aria espulsa
4. Uscita aria espulsa

L'efficienza di un recuperatore di calore aria-aria (sensibile, latente e totale) è influenzata da molte variabili tra le quali è possibile elencare:

- la tipologia costruttiva dello scambiatore e la sua configurazione geometrica
- i materiali di cui è composto il recuperatore
- le proprietà che influenzano il trasferimento del vapor d'acqua
- la superficie di scambio
- le proprietà termoigrometriche dei due flussi d'aria all'ingresso del recuperatore, comprese la velocità di attraversamento e le pressioni

- le portate in massa dei due flussi che scambiano calore (la variazione di entalpia sarà più elevata per il flusso d'aria caratterizzato dalla più piccola portata in massa)
- la modalità con cui i due flussi d'aria che scambiano calore attraversano il recuperatore

3.2.1.2 Tipologie di recuperatori di calore

I recuperatori di calore possono essere classificati tra quelli che effettuano il recupero sul solo calore sensibile e quelli che operano anche sul calore latente. Un'ulteriore possibile classificazione suddivide i dispositivi in quelli di tipo recuperativo e quelli di tipo rigenerativo. I primi operano per contatto indiretto tra due flussi d'aria attraverso una parete di separazione o un fluido intermedio, senza che vi sia alcuna possibilità di contaminazione tra i due flussi. I recuperatori di tipo rigenerativo, invece, operano ponendo alternativamente in contatto un elemento dotato di elevata capacità termica con i due flussi d'aria partecipanti allo scambio energetico. In questo caso, esiste sempre un grado di contaminazione più o meno grande tra i flussi.

La norma UNI 9953, *Recuperatori di calore aria-aria negli impianti di condizionamento dell'aria. Definizioni, classificazione, requisiti e prove*, classifica i recuperatori di calore aria-aria in tre categorie principali, di seguito elencate, suddivise a loro volta in sottoclassi che individuano, per la stessa tipologia di recuperatore, caratteristiche costruttive, funzionali e di modalità di scambio termico, che ne influenzano la logica di recupero.

Categoria I – Recuperatori con scambiatore statico (a scambio diretto)

I.a) con parete di separazione impermeabile

Per questa tipologia di recuperatori le correnti d'aria che scambiano calore lambiscono le superfici di separazione in controcorrente o a correnti incrociate senza alcuno scambio di massa. Nel caso in cui la corrente di aria con maggiore umidità specifica si raffredda al di sotto della temperatura di rugiada, si verifica condensazione e quindi scambio di calore latente senza che vi sia scambio di vapor d'acqua.

I.b) con parete di separazione porosa

Per questa categoria, invece, attraverso una parete di separazione porosa è possibile

operare anche lo scambio di calore latente per trasferimento di vapor d'acqua da un flusso d'aria all'altro.

Categoria II – Recuperatori con scambiatori statici a fluido intermedio circolante (a scambio indiretto)

Il sistema di recupero è caratterizzato da almeno due recuperatori statici collegati termicamente da un fluido che evolve per circolazione forzata, naturale o per capillarità.

II.a) senza cambiamento di fase

Per questa tipologia di recuperatore due batterie collegate da un circuito idraulico, in cui circola un fluido vettore per mezzo di una pompa, sono attraversate dai flussi d'aria che scambiano calore sensibile.

II.b) con cambiamento di fase

In questa tipologia di recuperatori il trasferimento di calore sensibile tra le correnti d'aria è realizzato attraverso un ciclo continuo di evaporazione e condensazione di un fluido intermedio.

Categoria III – Recuperatori di calore a rigenerazione con superficie di contatto

III.a) recuperatori con termovettore solido rotante

- non igroscopico: questi recuperatori sono costituiti da un rotore cilindrico di massa eterogenea e permeabile all'aria con ampia superficie di contatto ed elevata capacità termica esposta alternativamente, durante la rotazione, alle correnti calda e fredda, che fluiscono in controcorrente separate da uno schermo diametrale. In questa variante è possibile lo scambio di calore sensibile ed eventualmente di massa per condensazione e rievaporazione superficiale dell'umidità.

- igroscopico: in questa variante il materiale metallico o ceramico che costituisce la matrice del rotore riceve un trattamento superficiale con sostanze igroscopiche, quali allumina o cloruro di litio, consentendo lo scambio sia di calore sensibile, sia di calore latente per assorbimento e cessione di vapor d'acqua.

III.b) recuperatori a rigenerazione con accumulo e flussi alternati

Questi recuperatori sono costituiti essenzialmente da una massa di accumulo, in genere di pacco alveolare, permeabile all'aria e caratterizzata da una notevole capacità termica. Tale massa è attraversata nella fase di riscaldamento dalla corrente di aria calda che cede a essa il calore, che viene accumulato. Nella fase successiva la corrente di aria fredda attraversa la stessa massa che cede il calore accumulato,

riscaldandola. È chiaro che per garantire continuità di funzionamento è necessario prevedere almeno due batterie a funzionamento sfasato. Tale tipologia di recuperatore è utilizzata prevalentemente in ambito industriale.

III.c) recuperatori con termovettore liquido assorbente circolante

Per questa tipologia di recuperatori lo scambio di calore sensibile e latente si realizza riscaldando o raffreddando alternativamente un fluido igroscopico intermedio, di solito una soluzione di cloruro di litio, che circola tra due torri dotate di un pacco di scambio per mezzo del quale la soluzione stessa viene in contatto con la corrente di aria espulsa e di rinnovo.

In ambito residenziale, le tipologie di recuperatore utilizzate sono prevalentemente due: recuperatori statici a piastre e recuperatori rigenerativi rotativi.

Recuperatori statici a piastre

Questi recuperatori sono i più diffusi sia perché sono economici sia perché l'assenza di parti in movimento garantisce affidabilità e sicurezza di funzionamento. Essi sono costituiti da un pacco di piastre parallele distanti l'una dall'altra tra i 2.5 e i 12.5 mm a seconda dell'applicazione. Le piastre sono disposte in modo da consentire l'alternanza della portata d'aria da immettere in ambiente e quella da espellere all'esterno. In questo modo non c'è alcuna possibilità che le due portate vengano in contatto. Lo scambio di calore avviene a causa della differenza di temperatura tra le due portate separate dalle piastre. Esistono diverse configurazioni di un recuperatore statico a piastre. Il tipo maggiormente diffuso è quello a flussi incrociati, poiché permette un'installazione più semplice con le condotte di distribuzione, anche se la configurazione in controcorrente permette di raggiungere efficienze maggiori. I recuperatori a piastre appartenenti alla categoria I.a non permettono lo scambio di massa da un flusso all'altro, ma qualora le condizioni lo permettano, il calore latente dovuto alla condensazione del vapor d'acqua contenuto nell'aria umida, viene trasferito alla parete dello scambiatore, aumentando la quantità di calore recuperato. I recuperatori di calore appartenenti alla categoria I.b sono costituiti da piastre che formano una membrana microporosa, realizzata tramite sovrapposizione di più strati di carta speciale trattata, ondulata al fine di aumentarne la superficie, e permeabile al vapor d'acqua in modo da permettere il passaggio di massa per

capillarità o per osmosi. Il materiale di cui sono fatte queste membrane è cellulosa, polimeri o altri materiali sintetici, e sono prodotte in modo da massimizzare lo scambio di vapor d'acqua e di calore tra le due portate e minimizzare, invece i trafiletti d'aria, che tuttavia a causa della struttura delle membrane rimangono possibili.

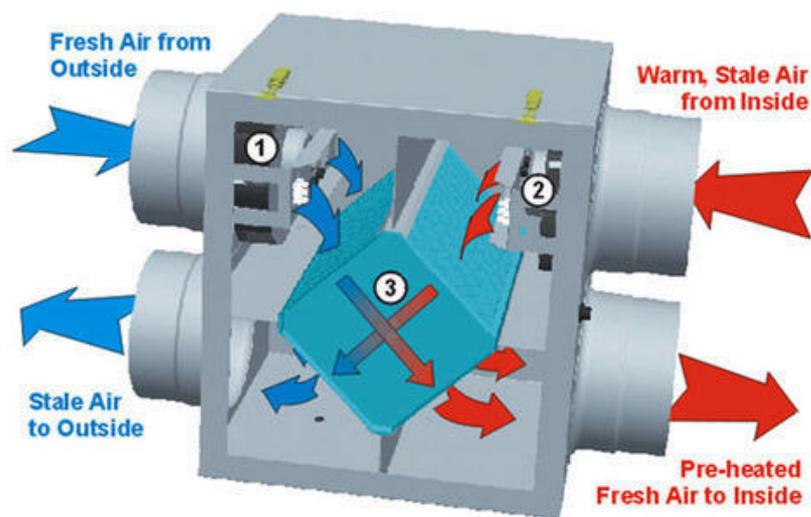


Figura 3.1: Rappresentazione del funzionamento di un recuperatore di calore del tipo statico a piastre

Recuperatori rigenerativi rotativi

Il recuperatore di calore rigenerativo rotativo appartiene alla III categoria della classificazione presente nella norma UNI 9953. Esso è composto da una ruota, al cui interno è inserito un materiale permeabile all'aria, lavorato in modo da avere un'estensione superficiale molto elevata, che permette lo scambio di calore sensibile o totale tra i due flussi d'aria che lo attraversano in controcorrente, mentre un motore elettrico lo fa ruotare. Il meccanismo di trasferimento del calore è molto semplice. Il flusso d'aria più caldo passa attraverso la ruota cedendo calore e riscaldandola. Questa proseguendo nella rotazione, incontra il flusso d'aria più freddo a cui cede il calore precedentemente ricevuto e si raffredda, in modo da tornare allo stato iniziale ed effettuare ciclicamente l'operazione. Ovviamente il flusso più caldo risulta essere quello in uscita in inverno e quello in ingresso in estate. È possibile

inoltre effettuare anche il recupero del calore latente, applicando allo scambiatore uno speciale rivestimento di materiale igroscopico, come allumina o cloruro di litio. Così facendo, oltre allo scambio di energia termica tra i due flussi, avviene anche il trasferimento di vapor d'acqua dalla corrente con contenuto maggiore a quella con contenuto minore. Il principale svantaggio di questa tipologia di recuperatori è la possibile contaminazione tra i due flussi, che può verificarsi sia per trafilamento che per trascinamento.

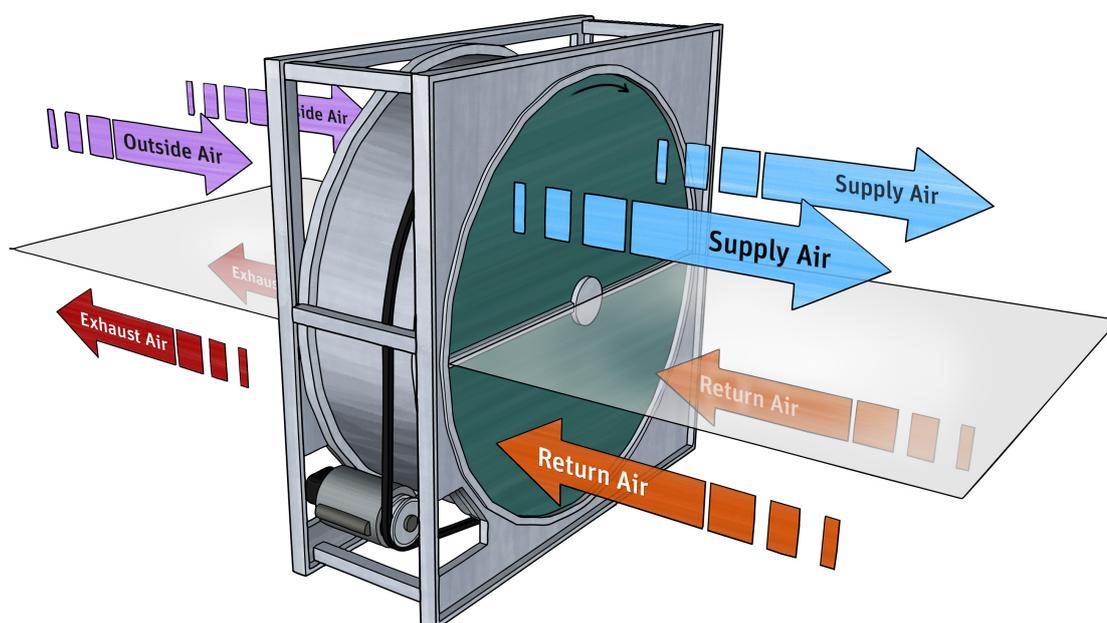


Figura 3.2: Rappresentazione del funzionamento di un recuperatore di calore del tipo rigenerativo rotativo

3.2.1.3 Scelta tra i recuperatori di calore

La scelta del recuperatore di calore più idoneo per una determinata applicazione deve tener conto di molti aspetti. Primo fra tutti, l'efficienza nominale del macchinario fornisce un'importante indicazione sulle prestazioni. Tuttavia, questo non è l'unico parametro da considerare. Anche le perdite di carico, la potenza elettrica richiesta dai ventilatori, le perdite d'aria ed eventuali sistemi di preriscaldamento

dell'aria hanno un impatto significativo sul corretto funzionamento di un recuperatore. Generalmente, i recuperatori di calore rotativi sono maggiormente impiegati in caso di recupero totale del calore, mentre i recuperatori statici sono più adatti al recupero del solo calore sensibile. Inoltre, nel caso in cui sia richiesta un'elevata qualità dell'aria interna, bisogna tenere presente che nei recuperatori rigenerativi rotativi è possibile una contaminazione tra i flussi in uscita e in ingresso. Infine, un aspetto fondamentale per la decisione finale è sicuramente l'analisi economica che tenga conto del costo d'investimento iniziale e dei costi di operazione e di manutenzione. La scelta deve essere indirizzata verso quel sistema che unisce un accettabile tempo di ritorno dell'investimento a prestazioni ottimali. Non sempre la soluzione più efficiente risulta anche quella migliore da un punto di vista economico. Per piccole e medie applicazioni la portata d'aria dell'impianto di ventilazione è solitamente inferiore ai $1000\text{ m}^3/h$. Le aziende che producono recuperatori di calore in grado di processare tali portate sono molte. Tra queste si distinguono Zehnder, la cui serie di recuperatori di calore a piastre controcorrente ComfoAir XL è in grado di raggiungere un'efficienza di recupero del calore totale superiore al 90% in determinate condizioni di temperatura e umidità relativa [28]. Un'altra azienda leader nel settore della climatizzazione è la Mitsubishi, che presenta lo scambiatore LGH-RVX che realizza un efficace scambio termico totale utilizzando divisori in carta trattata appositamente e permeabili all'umidità [6]. Vortice presenta diverse configurazioni tra cui gli scambiatori di calore aria-aria della serie VORT NRG ECR in alluminio del tipo rotativo la cui efficienza, certificata Eurovent, supera l'80% secondo lo standard normativo EN 308 [27].

Le schede tecniche di questi prodotti sono riportate nell'appendice A.

3.2.2 Pavimento radiante

Il pavimento radiante è tra le soluzioni più adottate per la climatizzazione di edifici ad alta efficienza energetica. I sistemi radianti erano già noti in età romana, dove fumi caldi sotto al pavimento erano utilizzati per scaldare terme e ville. Tuttavia solamente negli anni '60 vengono realizzati impianti radianti di tipo moderno con acqua calda per il riscaldamento.

Inizialmente i tubi erano in materiale metallico, che però mostrava alcune problematiche. Inoltre, la mancanza di un adeguato isolamento termico, costringeva ad utilizzare temperature di esercizio più alte di quelle attuali, provocando movimenti d'aria indesiderati e problemi di vasodilatazione alle gambe. Grazie agli isolamenti imposti prima dalla Legge 10/91, poi dal D.Lgs. 192/05 e 311/07, è possibile alimentare l'impianto con temperature più basse, evitando fastidiosi inconvenienti. Negli anni '80 il sistema a pavimento ha ricevuto ulteriore slancio, grazie al miglioramento dei materiali plastici impiegati per le tubazioni, dotati di maggiore durabilità.

Negli anni '90 si è iniziato ad utilizzare il pavimento radiante anche per il raffrescamento e sono stati sviluppati anche i sistemi a parete e a soffitto.

Il riscaldamento a pavimento consiste in una serie di tubazioni o resistenze elettriche poste sotto il pavimento che irradiano calore dal basso verso l'alto. Nel caso di tubazioni annegate nel massetto di sottofondo della pavimentazione, in cui scorre acqua, il sistema radiante può essere usato sia per il riscaldamento invernale che per il raffrescamento estivo.

La superficie scaldante non è rappresentata dai tubi bensì dalla struttura del pavimento in cui sono immersi. Si tratta di una concezione diversa della climatizzazione degli ambienti. Invece di avere terminali localizzati ad alta temperatura, si ha una superficie scaldante che si estende per tutto l'ambiente ad una temperatura più bassa.

Con l'impiego di tubazioni plastiche è stato possibile realizzare più circuiti indipendenti a seconda degli ambienti da climatizzare, disponendo inoltre l'impianto con la geometria a spirale che permette di avere una temperatura media superficiale più uniforme rispetto alla configurazione a serpentina.

3.2.2.1 Funzionamento

La differenza principale tra pavimento radiante ed un impianto con radiatori è la modalità di trasmissione del calore. Nel pavimento radiante, questa avviene per irraggiamento della struttura che ospita le tubazioni. Nei radiatori invece il calore è trasmesso all'ambiente in prevalenza per convezione. L'irraggiamento,

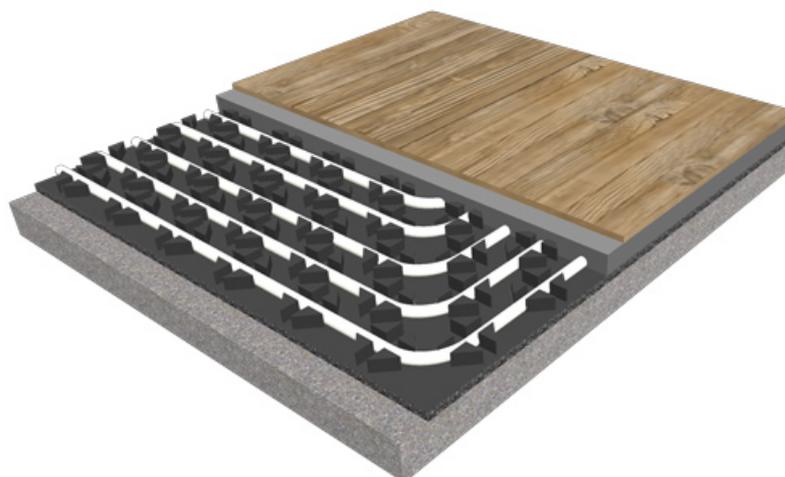


Figura 3.3: Sezione di un impianto a pavimento radiante

che è lo stesso meccanismo con cui riceviamo il calore dal sole, è la modalità di trasmissione del calore maggiormente apprezzata dal corpo umano, e per questo procura condizioni di benessere migliori. I radiatori trasmettono il calore per il 60 – 70% mediante convezione e la restante parte, minoritaria, per irraggiamento. Sarebbe infatti più giusto chiamarli convettori. Per convezione, il radiatore riscalda l'aria circostante che, diminuendo di densità, sale verso l'alto, lasciando spazio ad aria più fredda che a sua volta viene scaldata. Si innescano così moti convettivi, che oltre a provocare lo spostamento di correnti d'aria e polveri, garantiscono un minore comfort termico. Infatti, si crea una stratificazione di temperatura elevata e lontana dalla distribuzione ideale, per cui per raggiungere la temperatura desiderata di 20°C a circa 150 cm, all'altezza del torace, si raggiungono tra i 22 e i 24 °C al soffitto, con conseguente spreco di calore. La distribuzione di temperatura nel caso del pavimento radiante è praticamente verticale, molto simile a quella ideale, con un salto termico tra le due estremità molto ridotto.

3.2.2.2 Criteri di realizzazione di un pavimento radiante

Le norme Uni En 1264-2-3 4-5 del 2009 e la Uni En 1264-1 del 2011 hanno codificato i criteri fondamentali di progettazione e posa in opera di questa tecnica. Questo gruppo di norme fissa le prestazioni termiche, anche in fase di raffrescamento, i criteri di progettazione e le modalità della posa in opera.

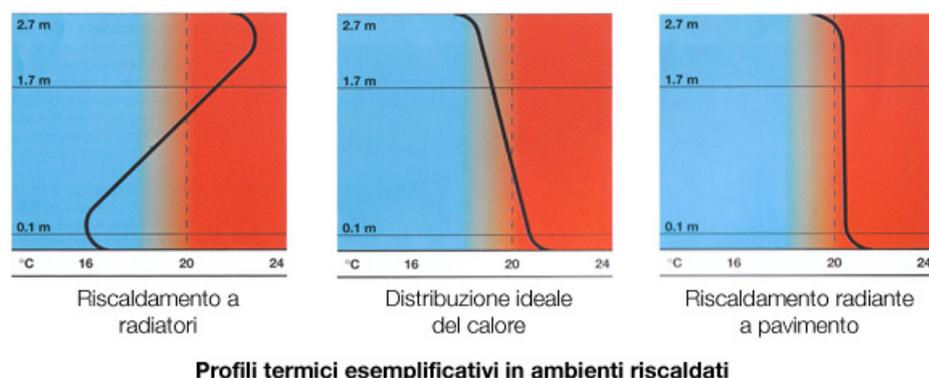


Figura 3.4: Distribuzione del calore nel caso ideale, con riscaldamento a radiatori e con riscaldamento a pavimento radiante

La progettazione si esegue per ogni singolo locale. Prima si determinano la potenza termica e frigorifera, per l'eventuale raffrescamento, richieste per il locale; quindi si passa alla potenza termica per unità di superficie e si calcola la lunghezza complessiva dei circuiti. Successivamente si determinano la temperatura di mandata e la portata di progetto. Infine, si calcolano le perdite di carico e, eventualmente, si rivede il numero dei circuiti; infatti, se le portate previste determinano perdite di carico eccessive, è necessario ridurre le loro lunghezze suddividendoli. In genere, la lunghezza è compresa tra 20 e 100 m.

3.2.2.3 Tipologie di sistemi radianti

Vi sono tre sistemi di riscaldamento con pannelli radianti: a pavimento, a parete, a soffitto. Rispetto a quelli a pavimento, i pannelli a parete hanno una posa più semplice, si trovano anche prefabbricati, hanno minore inerzia termica e forniscono migliore benessere perché la radiazione orizzontale è meglio accettata dal nostro corpo. Di contro, non consentono l'accostamento di mobili voluminosi alla parete radiante e se si pianta un chiodo o un tassello nella parete occorre sapere dove passano i tubi.

I pannelli a soffitto sono realizzati con pannelli metallici, a vista o con parziale copertura con cartongesso, di facile montaggio perché non occorre intervenire sulla struttura edilizia, con trascurabile inerzia termica e, quindi, immediata messa a regime con possibilità di funzionamento on-off, nessun ostacolo alla trasmissione



Figura 3.5: Installazione di un pavimento radiante con più circuiti

del calore, buon comfort in fase di raffrescamento. Occorre controllare che la temperatura non crei disagio al capo delle persone.

Volendo confrontare i tre sistemi radianti in fase di riscaldamento, quando la differenza media di temperatura tra la superficie radiante e l'ambiente è, ad esempio, di 10°C , la potenza termica scambiata è di circa $110 \text{ W}/\text{m}^2$ per i pavimenti, $80 \text{ W}/\text{m}^2$ per le pareti e $60 \text{ W}/\text{m}^2$ per i soffitti; in fase di raffrescamento, sempre per una differenza di temperatura di 10°C , la potenza termica scambiata è di circa $110 \text{ W}/\text{m}^2$ per i soffitti, $80 \text{ W}/\text{m}^2$ per le pareti e $55 \text{ W}/\text{m}^2$ per i pavimenti. In pratica, non è possibile superare il valore di $100 \text{ W}/\text{m}^2$ nelle aree di soggiorno e nei bagni e di $175 \text{ W}/\text{m}^2$ nelle aree periferiche non frequentabili da persone.

Tabella 3.2: Vantaggi e svantaggi dei sistemi radianti a pavimento

Vantaggi	<ul style="list-style-type: none"> • Il calore è diffuso in maniera uniforme dal basso verso l'alto • Il pavimento radiante cede calore principalmente per irraggiamento, evitando la formazione di correnti convettive d'aria calda a soffitto e fredda a pavimento che producono inoltre uno spostamento di polvere • È migliore da un punto di vista estetico. Infatti, essendo posto sotto il rivestimento superficiale non occupa spazio all'interno dell'ambiente e non è visibile • Il vantaggio più importante si ha da un punto di vista energetico e di conseguenza economico. Avendo un'elevata superficie disperdente, la temperatura del fluido che scorre all'interno dei tubi è minore (30-40°C). Per questo motivo spesso il pavimento radiante è associato a sorgenti di calore con una resa migliore a bassa temperatura come pompe di calore, sistemi di recupero del calore, pannelli solari, caldaie a condensazione • Può essere utilizzato anche per il raffrescamento estivo • Minore gradiente di temperatura tra testa e piedi
Svantaggi	<ul style="list-style-type: none"> • Costi di realizzazione e messa in opera maggiori • Per garantire il benessere termico e fisico la temperatura del pavimento non deve superare i 29 °C • Il pavimento radiante è caratterizzato da un'elevata inerzia termica in quanto, per cedere calore, utilizza le strutture in cui sono immersi i pannelli stessi. Di conseguenza l'accensione e lo spegnimento dell'impianto deve essere anticipata • Rimozione del pavimento in caso di manutenzione

3.2.2.4 Pavimento radiante a tubi capillari

La versione più evoluta del sistema radiante a pavimento è costituita dal pavimento radiante a tubi capillari [9]. I pannelli radianti sono composti da tubazioni capillari in polipropilene aventi un diametro molto piccolo (3.35x0.5 mm) ed un limitato interasse compreso tra i 10 e i 15 mm. La riduzione delle dimensioni permette di incrementare ulteriormente i vantaggi già presenti in un impianto radiante a pavimento tradizionale. Infatti, il ridotto diametro dei tubi permette di ottenere un migliore rapporto tra superfici di scambio e massa di fluido. Di conseguenza, migliorando l'efficienza dello scambio termico, è possibile ridurre

ulteriormente la quantità di energia e quindi la portata d'acqua necessaria. Inoltre, la limitata distanza tra i capillari garantisce una migliore distribuzione del calore ed una temperatura superficiale uniforme. Un altro vantaggio è il minimo spazio necessario per l'installazione. I tubi possono essere collocati appena al di sotto del rivestimento del pavimento e solitamente vengono ricoperti con un centimetro di intonaco. In questo modo la potenza calorifica o frigorifera viene ceduta all'ambiente con dispersioni estremamente ridotte. Questo vuol dire che a parità di resa, rispetto ad un impianto a pavimento tradizionale, è possibile abbassare la temperatura di funzionamento in caso di riscaldamento, con valori prossimi a quelli desiderati in ambiente. È in assoluto il sistema radiante a pavimento più rapido ed efficiente attualmente sul mercato, ed è l'unico che permette un utilizzo di tipo discontinuo grazie alla breve messa a regime dell'impianto. Inoltre, più performante sarà l'isolamento termico dell'edificio, più veloce sarà la risposta dell'impianto. Come per tutti i sistemi radianti, il trasferimento di calore per irraggiamento procura un'ottima sensazione di comfort termico ed evita la creazione di correnti d'aria. Inoltre le basse temperature di funzionamento permettono di sfruttare al meglio impianti a pompe di calore, aumentandone l'efficienza. L'azienda tedesca Beka Klima è tra i principali produttori di sistemi radianti a tubi capillari.



Figura 3.6: Installazione di un pavimento radiante a tubi capillari

3.2.3 Pompa di calore

Le pompe di calore sono un sistema avanzato dal punto di vista dell'ecosostenibilità, del risparmio energetico e di quello economico. Per questo motivo il loro utilizzo in edifici ad alta efficienza energetica è sempre più comune.

La pompa di calore è in grado di climatizzare gli ambienti in maniera sostenibile perché trasferisce calore da una sorgente di energia termica gratuita e rinnovabile:

aria, acqua o terreno. Questo permette di fare a meno di combustibili fossili e ridurre le emissioni di CO₂ a vantaggio dell'ambiente. Oltre al basso impatto ambientale, utilizzando un impianto a pompa di calore il risparmio energetico, e di conseguenza quello economico, è evidente: con una minima quantità d'energia elettrica è possibile produrre molta energia termica. Un investimento iniziale ripaga nel breve tempo con un abbassamento dei costi in bolletta. Inoltre, un ottimo abbinamento alla pompa di calore è l'impianto fotovoltaico, che produce l'energia elettrica necessaria per il funzionamento della pompa di calore, con la possibilità di aumentare le possibilità di risparmio.

3.2.3.1 Funzionamento

Qualsiasi corpo ad una temperatura maggiore dello zero assoluto possiede energia termica. Il calore a bassa temperatura, di cui l'ambiente è ricco, è spesso poco considerato come risorsa da sfruttare, ma le pompe di calore riescono ad utilizzarlo al meglio.

Alla base del funzionamento della pompa di calore vi è un principio basilare: essa

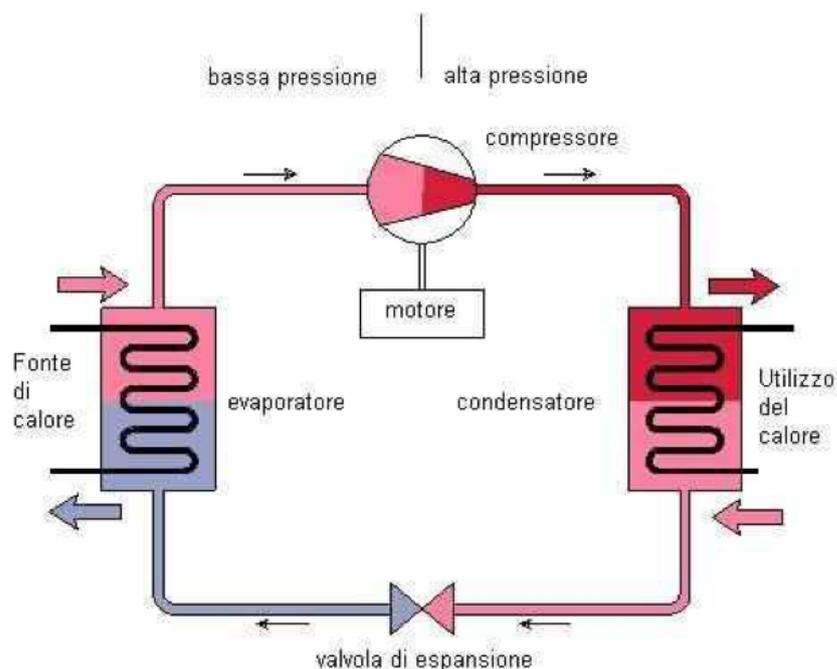


Figura 3.7: Schema di funzionamento di una pompa di calore

va a prelevare il calore da una sorgente, innalza la temperatura e la restituisce in un altro ambiente. La pompa di calore trasferisce energia termica in verso contrario a quello che si avrebbe naturalmente per differenza di temperatura, per cui per fare ciò richiede energia elettrica.

È formata da un circuito, attraversato da un fluido refrigerante e costituito da un compressore, un condensatore, una valvola di espansione e infine vi è un evaporatore. Questo strumento si basa sul principio secondo cui un gas, sottoposto a compressione, viene riscaldato. Per questo motivo la struttura di una pompa di calore prevede come mezzo fondamentale la presenza di un compressore meccanico che svolga questo ruolo. Per le potenze inferiori ai 100 kW, i compressori utilizzati sono del tipo rotativo o scroll [20]. Questi sono caratterizzati da minore ingombro, ridotta rumorosità, migliore regolarità e gradualità della fase di compressione. I modelli più avanzati, presentano un inverter in grado di modificare la frequenza di alimentazione del motore elettrico collegato al compressore. Questa applicazione permette di migliorare le condizioni di funzionamento della pompa di calore, aumentandone l'efficienza istantanea e quindi stagionale.

Le pompe di calore reversibili possono essere utilizzate non solo per riscaldare ma anche per il raffrescamento estivo degli ambienti, semplicemente invertendo il ciclo di funzionamento della macchina: il calore viene catturato dall'interno dell'abitazione e trasferito all'aria esterna.

3.2.3.2 Tipologie di pompe di calore

Le pompe di calore si differenziano in base al mezzo da cui viene estratto il calore. In tal caso si fa riferimento all'aria, acqua oppure il terreno.

Aria

Le pompe di calore ad aria sono la scelta più diffusa per piccole e medie applicazioni. L'aria, infatti, è una risorsa gratuita, disponibile ovunque e senza limitazioni. Lo svantaggio principale è dovuto alla temperatura non costante della sorgente che influisce sull'efficienza della pompa di calore. Le pompe aria-aria hanno un costo d'investimento contenuto ed una facile installazione. Sono costituite da due unità connesse tra loro mediante tubazioni in cui circola il fluido refrigerante. Nel caso

d'installazione in climi freddi è necessario integrare un sistema di sbrinamento per evitare problemi all'impianto quando la temperatura è inferiore a 0 °C. Le pompe di calore aria-acqua sono un prodotto interessante in quanto riescono a produrre acqua calda o acqua fredda a seconda della necessità. Differentemente dal modello aria-aria, questo tipo di pompa di calore presenta dimensioni maggiori ed è più costosa in quanto dovrà essere installato anche un sistema di distribuzione dell'acqua.

Acqua

A differenza di quelle ad aria le pompe di calore ad acqua hanno un'efficienza maggiore in quanto la temperatura della sorgente può essere considerata costante, evitando così un calo delle prestazioni a basse temperature, tuttavia sono meno diffuse principalmente per motivi economici, normativi e di spazio. Infatti, lo sfruttamento dell'acqua di falda come sorgente richiede la realizzazione di pozzi per il prelievo e l'immissione. Oltre ad un maggiore investimento economico, questo comporta che devono essere ottenute le autorizzazioni necessarie che garantiscono il rispetto delle normative a protezione delle acque e del territorio. Inoltre, l'acqua di falda porta con sé detriti e impurità che riducono l'efficienza e possono danneggiare l'impianto. Per questo motivo è necessario dotare il pozzo di prelievo dell'acqua di falda di un meccanismo filtrante.

Terreno

Lo sfruttamento del terreno come sorgente di calore è solitamente usato per grandi applicazioni tali da giustificare l'elevato costo iniziale. Il vantaggio principale della geotermia è la temperatura relativamente elevata e costante durante tutto l'anno della sorgente. Le tubazioni devono essere installate ad una profondità di almeno 1,5 metri dove la temperatura ha valori di circa 14 °C. La temperatura aumenta all'aumentare della profondità e con essa la quantità di calore estraibile, ma allo stesso tempo aumentano i costi. Come per le pompe di calore ad acqua sono necessari ampi spazi ed esistono regolamentazioni da rispettare per la realizzazione di un sistema geotermico, ad esempio riguardanti la distanza da pozzi di prelievo dell'acqua potabile.

Tabella 3.3: Vantaggi e svantaggi delle pompe di calore a seconda della sorgente termica

	Aria	Acqua	Terreno
Vantaggi	Facilità d'installazione Costi contenuti	Temperatura della sorgente costante Scambio termico più efficiente	Temperatura della sorgente costante Scambio termico più efficiente
Svantaggi	Temperatura della sorgente variabile Necessità di sbrinamento in climi freddi	Aspetti autorizzativi Sistema più complesso Necessità di filtrazione	Disponibilità di spazio Costi elevati

3.2.3.3 Efficienza nominale e stagionale

Una pompa di calore è in grado di fornire all'impianto una quantità di energia maggiore rispetto a quella che necessita per il funzionamento e il suo rendimento dipende dalle temperature di lavoro. In riscaldamento, l'efficienza nominale di una pompa di calore è indicata dal COP (Coefficient of Performance). Il COP è definito come il rapporto tra la potenza termica resa all'impianto e la potenza elettrica spesa dalla pompa di calore. È un dato tecnico fornito dal costruttore, calcolato in determinate condizioni di lavoro e temperatura, ed è utile per confrontare l'efficienza di diverse pompe di calore. Ovviamente le condizioni di lavoro della pompa di calore variano nel tempo per cui il COP è solo un valore indicativo. Per valutare la resa e i consumi effettivi della pompa di calore è stato definito il SCOP (Seasonal Coefficient of Performance). Il SCOP dipende da vari fattori, tra cui le condizioni climatiche in cui è installata la pompa di calore, il tipo di impianto a cui è collegata, e tiene conto delle effettive condizioni in cui opera la macchina. Questo rendimento stagionale non è dichiarato dal costruttore, ma può essere stimato in fase di progettazione. Allo stesso modo per il raffrescamento sono stati definiti l'EER (Energy Efficiency Ratio), come rapporto tra la potenza termica assorbita e la potenza elettrica spesa, e il SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio).

3.2.3.4 Scelta della pompa di calore

La scelta della pompa di calore dipende dalle caratteristiche dell'edificio e dai suoi fabbisogni termici: il funzionamento ottimale si ottiene abbinando la macchina con sistemi radianti a bassa temperatura in edifici nuovi con perdite di calore ridotte. In questo caso la pompa di calore può essere sufficiente a soddisfare da sola i fabbisogni termici dell'edificio. Meno adatto è l'utilizzo in edifici vecchi, dotati di un isolamento termico non adeguato e di terminali ad alta temperatura. Spesso in questi casi è necessaria l'integrazione con un generatore di calore di supporto. La scelta della sorgente di calore della macchina dipende delle caratteristiche climatiche del luogo di installazione e dal fabbisogno termico che deve essere coperto. È importante valutare bene l'andamento di temperatura della sorgente in modo che la pompa di calore possa lavorare nelle condizioni ottimali. Queste macchine hanno dei limiti operativi, devono lavorare entro determinati range di temperatura, e la loro efficienza dipende dalle condizioni di funzionamento. Le pompe di calore più avanzate riescono a garantire elevate temperature di mandata anche nelle condizioni climatiche più estreme, ma in queste condizioni il loro funzionamento potrebbe non risultare conveniente.

Per piccole e medie applicazioni, la potenza di una pompa di calore può arrivare fino a 20 kW. Le opzioni disponibili sul mercato, per qualsiasi tipologia, sono numerose. Per pompe di calore aria-acqua, l'azienda Clivet presenta una soluzione ad alta efficienza [3]. ElfoEnergy Edge è una pompa di calore reversibile con tecnologia inverter applicata ai compressori del tipo twin rotary, che permette di modulare la velocità in funzione del reale fabbisogno energetico richiesto. Per temperature di funzionamento tipiche dei sistemi radianti può raggiungere valori di COP ed EER prossimi a 5. L'azienda italiana EXRG, specializzata in soluzioni per NZEB, propone un'unità aria-acqua AIRTRANSYS EASR-DC con compressori di tipo scroll, dotati di inverter e abbinati a motori sincroni a magneti permanenti. Particolarmente efficiente durante il raffrescamento, abbinata ad un sistema radiante, è in grado di raggiungere valori di EER superiori a 5 ai carichi parziali [12]. Presente anche nel settore delle pompe di calore è la Mitsubishi, la cui serie PUAZ-SHW, dotata di compressore scroll con inverter, offre buone prestazioni sia in riscaldamento che in raffrescamento [7].

Le schede tecniche di questi prodotti sono riportate nell'appendice B.

3.2.4 Aggregato compatto

Sebbene non ancora molto diffuso, l'aggregato compatto rappresenta una valida soluzione per la climatizzazione di edifici ad alta efficienza e a basso consumo energetico [14]. È composto dall'insieme di un sistema di ventilazione meccanica con recupero di calore e filtrazione dell'aria, un bollitore per l'accumulo di acqua calda sanitaria ed una pompa di calore con potenze ridotte in grado di soddisfare il fabbisogno per il riscaldamento e per l'eventuale raffrescamento. Il tutto è racchiuso all'interno di un unico involucro con dimensioni davvero limitate. Caratteristica principale di questo sistema è proprio la compattezza. Sono stati concepiti in modo da ottenere una perfetta integrazione tra i diversi componenti e riducendo il più possibile gli spazi.

Quello che differenzia i vari modelli è soprattutto la tipologia della pompa di calore. Infatti, si può avere una pompa di calore aria-aria, che in inverno utilizza il calore residuo presente nell'aria espulsa dopo il passaggio nel recuperatore di calore, mentre in estate estrae il calore dall'aria esterna così da garantire condizioni ottimali dell'aria immessa in ambiente. La stessa pompa di calore è utilizzata per la produzione di acqua calda sanitaria. Possono essere utilizzate anche pompe di calore aria-acqua o acqua glicolata-acqua, in grado di produrre acqua calda per il riscaldamento oltre che per l'acqua calda sanitaria e acqua fredda per il raffrescamento.

Proprio le ridotte dimensioni e quindi le ridotte potenze, limitano l'applicazione di questo sistema ad edifici caratterizzati da bassi consumi energetici. Per altri edifici questa soluzione può non essere ottimale. I limiti operativi sono infatti 300-400 m^3/h per la portata di ventilazione, 200 l per l'accumulo di acqua calda sanitaria e 5-10 kW di potenza termica. Il bollitore generalmente è dotato di una resistenza elettrica per aumentare la produzione di acqua calda sanitaria ed evitare i problemi relativi alla legionella. È possibile sfruttare l'aggregato compatto per diverse soluzioni impiantistiche, ed è possibile integrarlo con sistemi solari o geotermici.

In conclusione, l'aggregato compatto dimostra che in edifici caratterizzati da una

progettazione intelligente, volta alla riduzione dei consumi, è possibile garantire ottime prestazioni in termini di climatizzazione, ventilazione e produzione di acqua calda sanitaria con un unico sistema completo e affidabile, senza ricorrere ad impianti complessi e costosi.

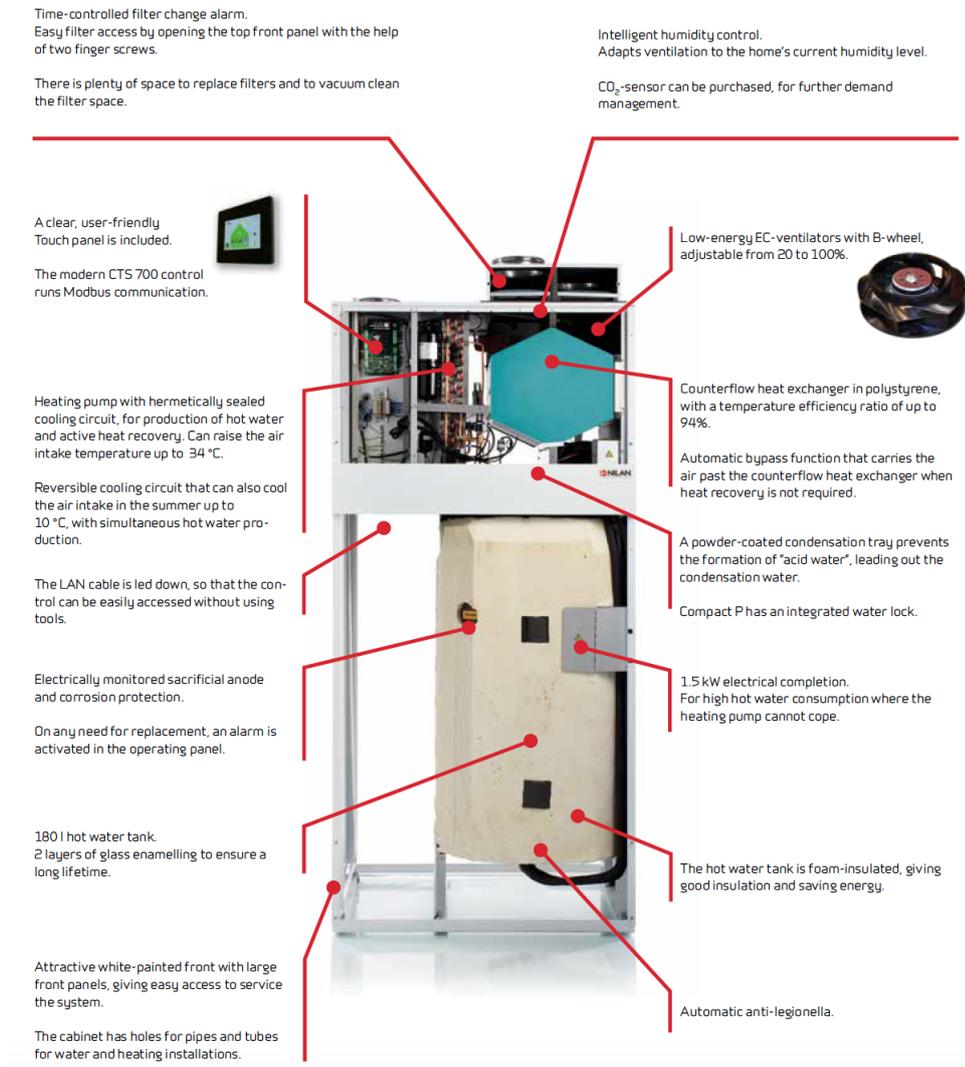


Figura 3.8: Componenti di un aggregato compatto

Capitolo 4

Il modulo abitativo eco > Home

L'innovativo sistema abitativo eco > Home nasce da una attività di ricerca sviluppata in Italia da be-eco, società di ricerca e sviluppo insediata presso l'incubatore delle imprese innovative del Politecnico di Torino I3P, specializzata sugli ambiti specifici delle tecnologie costruttive in legno, dei sistemi di prefabbricazione leggera e della certificazione ambientale. Il modulo eco > Home è sicuro ed efficiente ed è in grado di resistere ai fenomeni sismici grazie ad un sistema di connessione meccanica innovativo sviluppato in collaborazione con una multinazionale giapponese. L'azienda garantisce inoltre la sostenibilità del modulo, realizzato esclusivamente con materiali provenienti da filiere europee certificate e gestite in modo sostenibile [5]. La struttura del modulo prefabbricato è composta da legno lamellare, caratterizzato da ottime proprietà in termini di stabilità e durata. I vantaggi dell'utilizzo del legno sono molteplici, dalla resistenza strutturale al comfort termico. Il legno, infatti, è un materiale naturalmente elastico e flessibile, particolarmente adatto per realizzare strutture antisismiche. Caratterizzato da una scarsa conducibilità termica, il legno è in grado di rallentare la dispersione del calore verso l'esterno. Inoltre, assorbe umidità quando è in eccesso e la rilascia quando l'aria è troppo secca, aiutando a mantenere il comfort termico.

4.1 Struttura e posizionamento del modulo

Il modulo prefabbricato dovrà essere montato all'interno dell'area del Politecnico di Torino nota come "cittadella politecnica", nei pressi dei giardini sopra le aule I. Le esatte coordinate sono:

- Latitudine: 45.0657 N;
- Longitudine: 7.6584 E.

Data la forma e le dimensioni dell'edificio e considerando lo spazio a disposizione, il modulo può essere orientato solamente verso Nord-Est, con un angolo di inclinazione rispetto all'asse Nord di circa 30°. Inoltre, è importante notare la vicinanza con l'edificio che ospita l'incubatore di imprese I3P, causa di ombreggiamento.

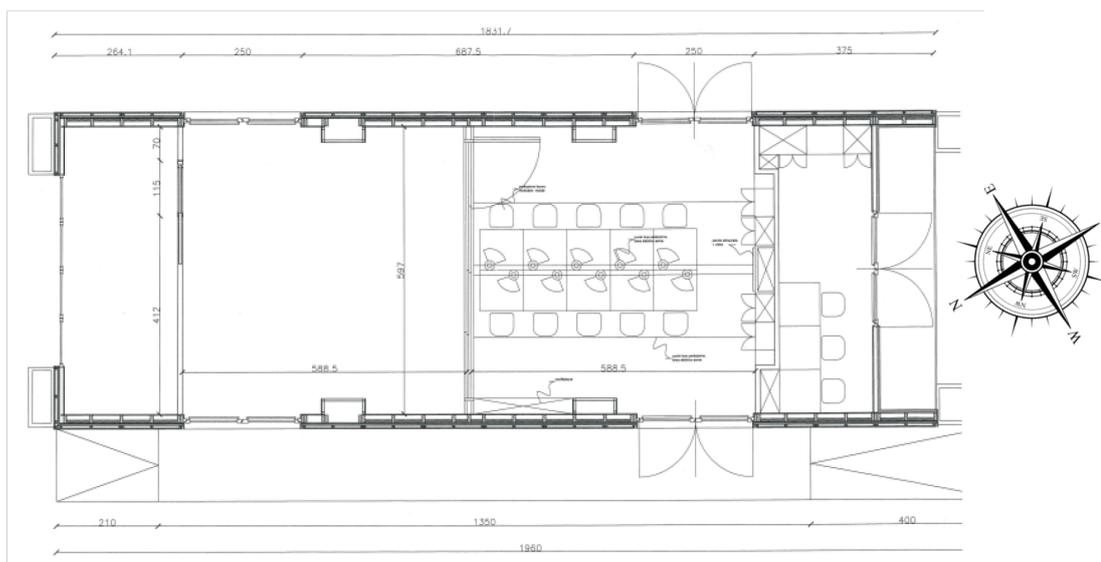


Figura 4.1: Planimetria del modulo prefabbricato

L'edificio prefabbricato presenta una pianta rettangolare, avente dimensioni interne 17,28x5,97x3 m per un totale di 103,16 m^2 . Lo spazio interno è stato suddiviso in quattro locali, aventi destinazione d'uso differente e disposti in maniera simmetrica.

- Due aule studio aventi le stesse dimensioni nette 5,88x5,97 m per un totale di 35,1 m^2 per ogni locale, posizionate nella parte centrale. Sono state inoltre progettate per avere le stesse caratteristiche termofisiche e lo stesso profilo di utilizzo. Ognuna è in grado di ospitare un massimo di 10 persone.
- Una sala controllo con esposizione Sud-Ovest, avente dimensioni nette di 2,64x5,97 m per un'area complessiva di 15,76 m^2 , progettata per ospitare un massimo di 3 persone.
- Un locale tecnico con esposizione Nord-Est, avente le stesse dimensioni della sala controllo, ma destinato ad ospitare i componenti impiantistici dell'edificio, quali inverter, batterie e alcuni componenti del sistema di climatizzazione e ventilazione. Informazioni più dettagliate sulla struttura, sulla stratigrafia delle costruzioni, sulle caratteristiche degli elementi vetrati, sull'impianto fotovoltaico e sulla relativa modellazione in Energy Plus sono disponibili nella tesi di Tommaso Gasco *Analisi della generazione fotovoltaica e termo-energetica di un edificio ad alta efficienza energetica* [16].

Capitolo 5

Modellazione degli impianti di climatizzazione e ventilazione

Per la climatizzazione e la ventilazione dell'edificio si è deciso di optare per un impianto misto aria-acqua, per i suoi numerosi vantaggi già analizzati nei capitoli precedenti. Al fine di combinare il comfort termico con il risparmio energetico, si è scelto come terminale del sistema di climatizzazione un sistema radiante a bassa temperatura, il pavimento radiante a tubi capillari. Per garantire un'adeguata ventilazione degli ambienti ed ottenere una buona qualità dell'aria interna si è deciso di progettare un impianto di ventilazione con recupero del calore.

Per la simulazione energetica dell'edificio è stato utilizzato il software EnergyPlus. Si tratta di un programma di simulazione dei carichi termici e di analisi energetica diffuso sia a livello accademico che commerciale. Uno dei punti di forza di EnergyPlus è la totale integrazione di tutti gli aspetti della simulazione. La simulazione dei carichi, dei sistemi e degli impianti avviene contemporaneamente tenendo conto degli effetti reciproci, e non in maniera sequenziale. Sebbene non sia dotato di un'interfaccia grafica user-friendly, la sua struttura modulare permette di aggiungere o rimuovere facilmente i moduli relativi ad un determinato aspetto senza interferire con gli altri.

5.1 Modellazione del pavimento radiante

Seguendo l'esempio *RadLoHydrHeatCoolAuto.idf*, tra quelli disponibili in EnergyPlus, il sistema radiante a pavimento è stato modellato per essere applicato all'edificio in esame, apportando le dovute correzioni. Il file è stato creato in modo da eseguire inizialmente il dimensionamento, sulla base delle condizioni relative ai giorni di progetto invernale ed estivo, e successivamente la simulazione annuale con carichi inferiori ma realistici. Il primo elemento da definire è la stratigrafia del pavimento. Partendo dalla stratigrafia indicata nella tesi di Tommaso Gasco, l'intercapedine d'aria è stata sostituita con il massetto in cui saranno inseriti i tubi capillari del pavimento radiante. Inoltre è stato aggiunto un ulteriore strato di isolante appena sotto al massetto, per ridurre la dispersione di calore verso il terreno. Su EnergyPlus è stato quindi definito un nuovo oggetto in *Material*, relativo al massetto, con le seguenti proprietà:

Tabella 5.1: Proprietà termofisiche del massetto

Spessore [mm]	Conducibilità termica [W/(m * K)]	Capacità termica [J/(kg * K)]	Densità [kg/m ³]
10	1.4	1000	2000

Una volta specificati i materiali dei singoli strati, è necessario unirli per formare la stratigrafia voluta. Poiché in questo caso la costruzione è destinata ad ospitare un sistema radiante, in modo da fornire o rimuovere calore a seconda che sia necessario il riscaldamento o il raffrescamento della zona, l'oggetto da utilizzare non è quello della semplice *Construction*, ma *Construction:InternalSource*.

In EnergyPlus questi due oggetti sono molto simili. *Construction:InternalSource* necessita di alcune informazioni aggiuntive sul sistema radiante. Nella definizione degli strati, partendo da quello più esterno a quello più interno, se la sorgente è posta all'interno di uno strato omogeneo, come nel caso del massetto, questo strato deve essere diviso in due strati e la sorgente aggiunta nel mezzo. Inoltre, è richiesto il valore di interasse tra i tubi, che come indicato nel prodotto di Beka Klima K.S15 [2], a cui si è fatto riferimento per i dati tecnici, è pari a 15 mm.

Field	Units	Obj1
Name		Slab Floor with Radiant System
Source Present After Layer Number		6
Temperature Calculation Requested After Layer Number		7
Dimensions for the CTF Calculation		1
Tube Spacing	m	0,015
Outside Layer		Sughero tostato 160
Layer 2		Pannello OSB 25
Layer 3		Sughero tostato 40
Layer 4		Pannello OSB 21
Layer 5		Sughero tostato 40
Layer 6		Massetto 1
Layer 7		Massetto 2
Layer 8		Guaina Impermeabile
Layer 9		Pannello OSB 25
Layer 10		

Figura 5.1: Definizione di Construction:InternalSource su EnergyPlus

BEKA Capillary tubes mats Type K.S15	
Material: Polypropylene Random-Copolymer Type 3 DIN 8078	
Geometry:	
Collector pipe	20 x 2 mm
Capillary tube	3.35 x 0.5 mm
Capillary pipe distance	15 mm
Exchanging area	0.71 m ²
Size:	
Length:	600-6000 mm (in steps of 10 mm)
Width:	150-1200 mm (in steps of 30 mm)
Masses:	
	0.44 kg/m ² (empty, without collector)
	0.71 kg/m ² (filled, without collector)
Water contents	0,27 l/m ²
Heating capacity:	
	Depending upon type
	180 W/m ²

Figura 5.2: Dati tecnici del pavimento radiante a tubi capillari di Beka Clima

Il passaggio successivo è quello di associare la costruzione realizzata alle superfici corrispondenti al pavimento in ogni zona. Per fare ciò si seleziona su EnergyPlus, negli oggetti della classe *BuildingSurface:Detailed* corrispondenti al pavimento, la costruzione precedentemente creata Slab Floor with Radiant System.

Dalla stratigrafia è possibile calcolare la resistenza superficiale del pavimento, composta dai due strati sovrastanti il massetto, che andrà ad influire sulle prestazioni del sistema radiante.

$$R_{sup} = R_1 + R_2 = \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} = \frac{0.025}{0.12} + \frac{0.003}{0.17} = 0.226 \text{ m}^2\text{K/W} \quad (5.1)$$

Minore è la resistenza superficiale, migliore è il funzionamento del pavimento radiante. In questo caso, a causa dello strato di pannelli OSB, la resistenza superficiale ha un valore maggiore rispetto al valore di riferimento di $0.1 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Un elemento molto importante per una giusta configurazione del modello è la definizione delle *Schedules*. Queste infatti servono per specificare la programmazione oraria di alcuni elementi, tra cui il numero di occupanti, l'illuminazione, l'utilizzo di apparecchi elettrici e il controllo termostatico.

In EnergyPlus le schedules sono organizzate in tre parti: una programmazione giornaliera, una settimanale ed una annuale. Ognuna di queste parti necessita della precedente per essere definita. La descrizione giornaliera fa riferimento all'orario di una giornata per tutte le 24 ore. È possibile creare più schedules giornaliere, ad esempio per differenziare tra giorni della settimana e giorni del weekend. Inoltre, devono essere definite le schedules per i giorni di progetto invernale ed estivo. La descrizione settimanale si compone di dodici descrizioni giornaliere, una per ogni giorno della settimana con in più quelle dedicate alle vacanze, ai giorni di progetto invernale ed estivo e due giorni personalizzati. Infine, la programmazione annuale, si compone delle descrizioni settimanali per definire tutto l'anno.

In questo caso le schedules sono state utilizzate per l'occupazione, l'illuminazione, gli apparecchi elettrici, la ventilazione, e il controllo dei termostati invernale ed estivo.

- Il profilo di occupazione della sala controllo è diverso da quello delle sale studio.

La sala controllo, che può ospitare al massimo 3 persone, si è deciso di considerarla sempre totalmente occupata nell'orario di apertura dalle 08:00 alle 19:00. Le sale studio invece hanno un'occupazione variabile lungo l'arco della giornata. Dalle 08:00 alle 10:30 l'occupazione è del 50%, tra le 12:30 e le 14:00, in corrispondenza della pausa pranzo, l'occupazione è del 30%, nelle ore restanti l'occupazione è del 100%. Inoltre, l'intero edificio è chiuso nel periodo delle vacanze di Natale, dall'1 al 6 Gennaio e dal 23 al 31 Dicembre, e durante tutto il mese di Agosto per le vacanze estive.

- L'illuminazione è stata separata in un'illuminazione centrale delle sale, sempre accesa durante gli orari di apertura, ed una illuminazione individuale a LED che per questo ha lo stesso profilo dell'occupazione.

- Gli apparecchi elettrici considerati sono un proiettore per ogni sala studio, sempre acceso dalle 08:00 alle 19:00, ed i computer degli occupanti che per questo sono caratterizzati dallo stesso profilo orario.

- La ventilazione è attiva quando l'edificio è occupato, con la portata d'aria che dipende dal numero di persone presenti.

- Il termostato invernale è stato impostato alla temperatura di 20 °C durante l'orario di apertura, mentre per le ore in cui l'edificio non è occupato, per i weekends e per i giorni festivi, il termostato è stato fissato a 16 °C, così da evitare un eccessivo raffreddamento degli ambienti ed un elevato picco di richiesta alla riapertura. Per il locale tecnico invece, non essendo occupato, si è stabilita una temperatura di setpoint di 16 °C in orario di apertura e 13 °C per il resto del tempo.

- Il termostato estivo è stato impostato per tutti e quattro i locali alla temperatura di 26 °C durante l'orario di apertura, mentre per le ore in cui l'edificio non è occupato e per i weekends, il termostato è stato fissato a 30 °C. Per il mese di vacanze di Agosto il setpoint è stato portato a 35 °C per evitare un eccessivo riscaldamento degli ambienti, in particolare nel locale tecnico che ospita componenti sensibili alla temperatura.

Gli apporti interni contribuiscono in modo sostanziale alla variazione del carico durante la giornata. Questi forniscono un contributo positivo nella stagione di riscaldamento, in quanto riducono il fabbisogno di energia, mentre in estate hanno una funzione negativa dal punto di vista energetico, incrementando il carico per raffrescamento.

Su EnergyPlus gli apporti interni sono distinti in *People*, *Lights* ed *Electric Equipment*.

Per quanto riguarda l'occupazione, è stato inserito il numero massimo di persone presenti in ogni zona, in modo che il programma moltiplichi questo valore con quelli del profilo occupazionale già descritto nelle schedules, per ottenere il numero di persone effettivamente presenti. Inoltre, sono stati specificati alcuni dati relativi alla quantità di calore emesso.

The screenshot shows the EnergyPlus configuration window for the 'People' object. The left pane lists various object types, with 'People' selected. The right pane provides an explanation of the object and its current field values. Below this, a table lists the specific field values for three different zones.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3
Name		OCCUPAZIONE AULA STUDIO	OCCUPAZIONE AULA STUDIO 2	OCCUPAZIONE SALA CONTROLLO
Zone or ZoneList Name		Thermal Zone 2	Thermal Zone 3	Thermal Zone 1
Number of People Schedule Name		People SS Year	People SS Year	People SC Year
Number of People Calculation Method		People	People	People
Number of People		10	10	3
People per Zone Floor Area	person/m2			
Zone Floor Area per Person	m2/person			
Fraction Radiant		0,3	0,3	0,3
Sensible Heat Fraction		autocalculate	autocalculate	autocalculate
Activity Level Schedule Name		Metabolismo Occupanti	Metabolismo Occupanti	Metabolismo Occupanti
Carbon Dioxide Generation Rate	m3/s-w	0,0000000382	0,0000000382	0,0000000382
Enable ASHRAE 55 Comfort Warnings		No	No	No
Mean Radiant Temperature Calculation Type		ZoneAveraged	ZoneAveraged	ZoneAveraged
Surface Name/Angle Factor List Name				
Work Efficiency Schedule Name				
Clothing Insulation Calculation Method		ClothingInsulationSchedule	ClothingInsulationSchedule	ClothingInsulationSchedule

Figura 5.3: Definizione di People su EnergyPlus

Similmente per l'illuminazione e le apparecchiature elettriche, dopo averle associate alle rispettive schedules di funzionamento, sono stati inseriti i dati necessari al software per determinare la quantità di calore emessa da ogni dispositivo.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3
Name		LUCI LED SALA STUDIO	LUCI LED SALA STUDIO 2	LUCI SALA CONTROLLO
Zone or ZoneList Name		Thermal Zone 2	Thermal Zone 3	Thermal Zone 1
Schedule Name		People SS Year	People SS Year	People SC Year
Design Level Calculation Method		LightingLevel	LightingLevel	LightingLevel
Lighting Level	W	90	90	27
Watts per Zone Floor Area	W/m2			
Watts per Person	W/person			
Return Air Fraction		0,23	0,23	0,23
Fraction Radiant		0,09	0,09	0,09
Fraction Visible		0,13	0,13	0,13
Fraction Replaceable		1	1	1
End-Use Subcategory		General	General	General
Return Air Fraction Calculated from Plenum Temperature		No	No	No

Figura 5.4: Definizione di Lights su EnergyPlus

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
Name		COMPUTER_ZONA_2	COMPUTER_ZONA_3	PROIETTORE_ZONA_2	PROIETTORE_ZONA_3
Zone or ZoneList Name		Thermal Zone 2	Thermal Zone 3	Thermal Zone 2	Thermal Zone 3
Schedule Name		People SS Year	People SS Year	Lights Year	Lights Year
Design Level Calculation Method		Watts/Person	Watts/Person	EquipmentLevel	EquipmentLevel
Design Level	W			70	70
Watts per Zone Floor Area	W/m2				
Watts per Person	W/person	90	90		
Fraction Latent		0	0	0	0
Fraction Radiant		0,5	0,5	0,5	0,5
Fraction Lost					
End-Use Subcategory		General	General	General	General

Figura 5.5: Definizione di ElectricEquipment su EnergyPlus

Per la ventilazione, si deve distinguere tra ventilazione incontrollata, dovuta alle infiltrazioni e considerata costante nel tempo, e ventilazione controllata, dipendente dal numero di persone presenti in ambiente. In EnergyPlus, le infiltrazioni sono state modellate creando quattro oggetti in *ZoneInfiltration:DesignFlowRate*. Si è inserito un valore di ricambio orario, dovuto alle infiltrazioni, tipico di uffici, pari a 0.15. Il contributo delle infiltrazioni può essere positivo o negativo a seconda della temperatura esterna, solitamente in inverno le infiltrazioni portano in ambiente aria più fredda e quindi aumentano il fabbisogno di riscaldamento, in estate invece

forniscono un contributo favorevole finchè la temperatura esterna non diventa troppo alta.

Prima di progettare il sistema di ventilazione meccanica, si è deciso di considerare una ventilazione naturale. In *ZoneVentilation:DesignFlowRate* sono stati impostati i valori, per garantire una corretta ventilazione degli ambienti. In particolare, per gli ambienti occupati da persone, la normativa UNI 10339 impone, per edifici adibiti ad uso ufficio, una portata d'aria pari a 10 l/s a persona. Invece, per il locale tecnico, non essendo occupato, è previsto, in base alle sue dimensioni, un ricambio orario pari a 0.3.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
Name		Ventilazione SC	Ventilazione SS1	Ventilazione SS2	Ventilazione LT
Zone or ZoneList Name		Thermal Zone 1	Thermal Zone 2	Thermal Zone 3	Thermal Zone 4
Schedule Name		People SC Year	People SS Year	People SS Year	Lights Year
Design Flow Rate Calculation Method		Flow/Person	Flow/Person	Flow/Person	AirChanges/Hour
Design Flow Rate	m3/s				
Flow Rate per Zone Floor Area	m3/s-m2				
Flow Rate per Person	m3/s-person	0,01	0,01	0,01	
Air Changes per Hour	1/hr				0,0039
Ventilation Type		Natural	Natural	Natural	Natural
Fan Pressure Rise	Pa				
Fan Total Efficiency		1	1	1	1
Constant Term Coefficient		1	1	1	1
Temperature Term Coefficient					
Velocity Term Coefficient					
Velocity Squared Term Coefficient					
Minimum Indoor Temperature	C	20	20	20	16
Minimum Indoor Temperature Schedule Name					
Maximum Indoor Temperature	C	100	100	100	100
Maximum Indoor Temperature Schedule Name					
Delta Temperature	deltaC	-100	-100	-100	-100
Delta Temperature Schedule Name					
Minimum Outdoor Temperature	C	-100	-100	-100	-100
Minimum Outdoor Temperature Schedule Name					
Maximum Outdoor Temperature	C	100	100	100	100
Maximum Outdoor Temperature Schedule Name					
Maximum Wind Speed	m/s	40	40	40	40

Figura 5.6: Definizione di ZoneVentilation:DesignFlowRate su EnergyPlus

L'oggetto *ZoneControl:Thermostat* serve per controllare la temperatura in una determinata zona. È necessario fare riferimento ad una schedule che definisce il tipo di controllo che si vuole utilizzare nella simulazione. Le possibili opzioni sono 5.

- 0 – Uncontrolled
- 1 – Single Heating Setpoint
- 2 – Single Cooling Setpoint
- 3 – Single Heating/Cooling Setpoint
- 4 – Dual Setpoint (Heating and Cooling) with deadband

Di conseguenza, il funzionamento in solo riscaldamento (1) è stato impostato nei periodi dal 1° Gennaio al 31 Marzo e dal 16 Ottobre al 31 Dicembre, nei restanti giorni è stato impostato il funzionamento in solo raffrescamento (2). I termostati sono stati poi collegati con le rispettive schedules.

A questo punto si passa a realizzare l'impianto a pavimento radiante con i vari componenti che ne fanno parte. Uno di questi è la pompa di circolazione. Creo un oggetto in *Pump:VariableSpeed* sia per il circuito di riscaldamento che per quello di raffrescamento. Utilizzo la funzione autosize per determinare la potenza e la massima portata di progetto.

The screenshot shows the EnergyPlus software interface for defining a *Pump:VariableSpeed* object. The left pane lists object types, with *Pump:VariableSpeed* selected. The right pane shows the object description and field requirements. The bottom pane is a table with the following data:

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		Circ Pump	HW Circ Pump
Inlet Node Name		CW Supply Inlet Node	HW Supply Inlet Node
Outlet Node Name		CW Pump Outlet Node	HW Pump Outlet Node
Design Maximum Flow Rate	m ³ /s	autosize	autosize
Design Pump Head	Pa	179352	179352
Design Power Consumption	W	autosize	autosize
Motor Efficiency		0.9	0.9
Fraction of Motor Inefficiencies to Fluid Stream		0	0
Coefficient 1 of the Part Load Performance Curve		0	0
Coefficient 2 of the Part Load Performance Curve		1	1
Coefficient 3 of the Part Load Performance Curve		0	0
Coefficient 4 of the Part Load Performance Curve		0	0
Design Minimum Flow Rate	m ³ /s	0	0
Pump Control Type		Intermittent	Intermittent

Figura 5.7: Definizione di Pump:VariableSpeed su EnergyPlus

Nella realtà, i componenti dell'impianto sono collegati tra di loro attraverso tubi. In EnergyPlus l'oggetto *Pipe:Adiabatic* è usato come elemento di connessione o di bypass. Bisogna semplicemente definire il nodo di ingresso e il nodo di uscita.

The screenshot shows the EnergyPlus software interface for defining a *Pipe:Adiabatic* object. The left pane lists object types, with *Pipe:Adiabatic* selected. The right pane shows the object description and field requirements. The bottom pane is a table with the following data:

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		Demand Side Inlet Pipe	Demand Side Bypass
Inlet Node Name		CW Demand Inlet Node	CW Demand Bypass Inlet Node
Outlet Node Name		CW Demand Entrance Pipe Outlet Node	CW Demand Bypass Outlet Node

Figura 5.8: Definizione di Pipe:Adiabatic su EnergyPlus

I *Nodes* e i *Branches* definiscono la topografia delle connessioni dell'impianto HVAC. Ogni componente deve avere almeno due nodi associati ad esso, uno d'ingresso ed uno d'uscita. Un gruppo di componenti in serie forma un branch. Ogni branch deve avere almeno un componente, ma può avere anche più componenti collegati in serie. L'insieme di più branches e delle loro informazioni di connessione formano un circuito chiuso, un loop. Perciò, mentre un branch è un insieme di componenti, un loop è un insieme di branches. Per impianti idronici, questo oggetto è usato sia sul lato demand che sul lato supply del loop. E' necessario per ogni componente indicare la tipologia, il nome e i nodi di ingresso e uscita.

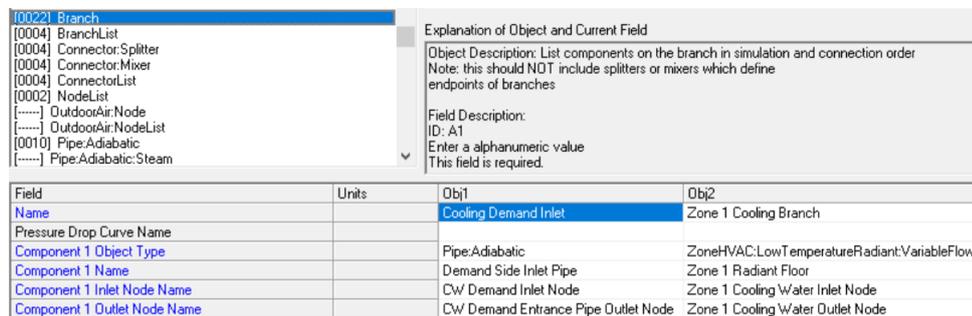


Figura 5.9: Definizione di Branch su EnergyPlus

Per convenienza, l'oggetto *BranchList* raggruppa tutti i branches che costituiscono un determinato loop dell'impianto. Devono essere elencati nel seguente ordine: branch d'ingresso, branches paralleli e branch d'uscita. Il vantaggio è quello di inserire in alcuni campi il gruppo di branches piuttosto che elencarli singolarmente.

L'oggetto *ConnectorList* è l'insieme di uno o due elementi di connessione (*Connector:Mixer* o *Connector:Splitter*).

Gli oggetti *Connector:Splitter* e *Connector:Mixer* sono simili. Entrambi sono identificati dal nome del branch del componente con un solo flusso. Nel caso dello Splitter, questo è l'ingresso, in quanto il flusso in entrata è diviso in più flussi in uscita. Nel caso del Mixer è l'opposto, in quanto più flussi in ingresso sono miscelati insieme a formare un unico flusso in uscita.

In questo caso sono stati creati due oggetti splitter per il riscaldamento e due oggetti splitter per il raffrescamento. Lo stesso è stato fatto per gli oggetti mixer. Una coppia Mixer-Splitter è riferita ai pavimenti radianti delle diverse zone e al

relativo bypass, l'altra coppia è riferita alla connessione con la fonte energetica e al relativo bypass.



Figura 5.10: Rappresentazione schematica dell'impianto di climatizzazione: connessione Splitter-Mixer con la fonte energetica

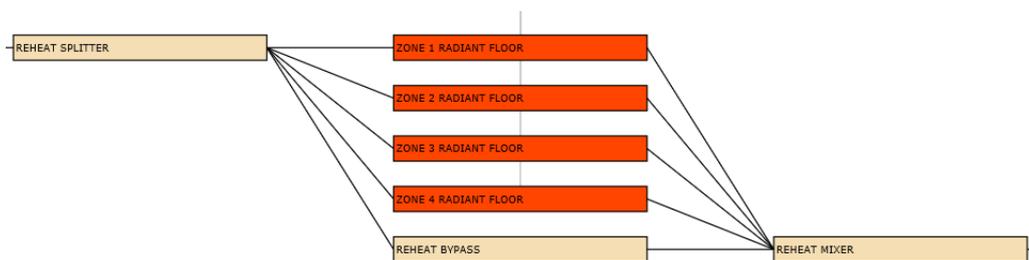


Figura 5.11: Rappresentazione schematica dell'impianto di climatizzazione: connessione Splitter-Mixer con il pavimento radiante

Poiché al momento non si è interessati in una simulazione del generatore di calore, si utilizzano gli oggetti *DistrictHeating* e *DistrictCooling*, che simulano la connessione con una sorgente centralizzata di acqua calda o fredda come il teleriscaldamento.

Per definire completamente l'impianto di climatizzazione si devono aggiungere le informazioni richieste nell'oggetto *PlantLoop*.

In particolare, è richiesto di specificare il tipo di fluido che circola nell'impianto, le temperature minima e massima ammissibili e la portata massima consentita, che può essere determinata tramite la funzione *autosize*.

Inoltre, il circuito viene idealmente separato in due parti di cui devono essere definiti i componenti. Per ognuna delle due parti, Supply e Demand, sono richiesti il nodo d'ingresso, il nodo d'uscita, l'insieme dei branches che ne fanno parte e l'insieme dei connectors, ovvero Splitters e Mixers.

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		Chilled Water Loop	Hot Water Loop
Fluid Type		Water	Water
User Defined Fluid Type			
Plant Equipment Operation Scheme Name		CW Loop Operation	Hot Loop Operation
Loop Temperature Setpoint Node Name		CW Supply Outlet Node	HW Supply Outlet Node
Maximum Loop Temperature	C	99	99
Minimum Loop Temperature	C	1	10
Maximum Loop Flow Rate	m3/s	autosize	autosize
Minimum Loop Flow Rate	m3/s	0	0
Plant Loop Volume	m3	autocalculate	autocalculate
Plant Side Inlet Node Name		CW Supply Inlet Node	HW Supply Inlet Node
Plant Side Outlet Node Name		CW Supply Outlet Node	HW Supply Outlet Node
Plant Side Branch List Name		Cooling Supply Side Branches	Heating Supply Side Branches
Plant Side Connector List Name		Cooling Supply Side Connectors	Heating Supply Side Connectors
Demand Side Inlet Node Name		CW Demand Inlet Node	HW Demand Inlet Node
Demand Side Outlet Node Name		CW Demand Outlet Node	HW Demand Outlet Node
Demand Side Branch List Name		Cooling Demand Side Branches	Heating Demand Side Branches
Demand Side Connector List Name		Cooling Demand Side Connectors	Heating Demand Side Connectors
Load Distribution Scheme		Optimal	Optimal

Figura 5.12: Definizione di PlantLoop su EnergyPlus

Rimane solamente da modellare il terminale dell'impianto, ovvero il pavimento radiante a tubi capillari. Per farlo si creano quattro oggetti, uno per ogni zona, in *ZoneHVAC:LowTemperatureRadiant:VariableFlow*. Questo oggetto è utilizzato per modellare qualunque tipo di sistema radiante dove l'acqua è impiegata per fornire/rimuovere energia ad/da una superficie dell'edificio (pavimento, soffitto o parete). Dopo aver associato i componenti alle rispettive superfici, si inserisce il valore del diametro interno delle tubazioni, che essendo capillari, risulta molto piccolo e pari a 2,35 mm. La lunghezza delle tubazioni viene calcolata da EnergyPlus utilizzando la funzione *autosize* così come la potenza di progetto di riscaldamento e raffrescamento calcolate tramite il dimensionamento.

Un aspetto importante riguarda il controllo dell'impianto. Avendo scelto un sistema radiante a flusso variabile, il componente è controllato regolando il flusso di acqua calda o fredda inviato al componente, mantenendo costante la temperatura. A differenza di come avviene con il sistema ad aria forzata, il pavimento radiante non è controllato mediante un termostato di zona ma richiede un controllo personalizzato.

Si può scegliere quale aspetto monitorare per il controllo del sistema tra diverse opzioni: temperatura media dell'aria, temperatura media radiante, temperatura operativa, temperatura di bulbo secco esterna e temperatura di bulbo umido esterna. In questo caso, conoscendo la temperatura che si vuole ottenere all'interno dei locali, si è scelto la temperatura media dell'aria.

Inoltre, è stato stabilito il range di temperatura associato al controllo pari ad 1 °C. Questo significa che, considerando ad esempio la temperatura di setpoint invernale di 20 °C, se la temperatura media dell'aria all'interno dell'ambiente da climatizzare è minore o uguale a 19,5 °C, la portata dell'impianto è massima, mentre se il valore è maggiore o uguale a 20,5 °C, la portata dell'impianto è nulla, per i valori intermedi tra questi due estremi la portata segue un andamento lineare. Infine, con i dati ricavati dalla prima simulazione sulla portata d'acqua e sulla lunghezza totale delle tubazioni, è stata calcolata la lunghezza massima di un circuito in modo da avere una velocità media dell'acqua all'interno delle tubazioni di 2.5 m/s.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
Name		Zone 1 Radiant Floor	Zone 2 Radiant Floor	Zone 3 Radiant Floor	Zone 4 Radiant Floor
Availability Schedule Name		RadiantSysAvailSched	RadiantSysAvailSched	RadiantSysAvailSched	RadiantSysAvailSched
Zone Name		Thermal Zone 1	Thermal Zone 2	Thermal Zone 3	Thermal Zone 4
Surface Name or Radiant Surface Group Name		Surface 1	Surface 7	Surface 13	Surface 19
Hydronic Tubing Inside Diameter	m	0,00235	0,00235	0,00235	0,00235
Hydronic Tubing Length	m	autosize	autosize	autosize	autosize
Temperature Control Type		MeanAirTemperature	MeanAirTemperature	MeanAirTemperature	MeanAirTemperature
Heating Design Capacity Method		HeatingDesignCapacity	HeatingDesignCapacity	HeatingDesignCapacity	HeatingDesignCapacity
Heating Design Capacity	W	autosize	autosize	autosize	autosize
Heating Design Capacity Per Floor Area	W/m2				
Fraction of Autosized Heating Design Capacity					
Maximum Hot Water Flow	m3/s	autosize	autosize	autosize	autosize
Heating Water Inlet Node Name		Zone 1 Radiant Water Inlet Node	Zone 2 Radiant Water Inlet Node	Zone 3 Radiant Water Inlet Node	Zone 4 Radiant Water Inlet Node
Heating Water Outlet Node Name		Zone 1 Radiant Water Outlet Node	Zone 2 Radiant Water Outlet Node	Zone 3 Radiant Water Outlet Node	Zone 4 Radiant Water Outlet Node
Heating Control Throttling Range	deltaC	1	1	1	1
Heating Control Temperature Schedule Name		Heating Setpoint Year	Heating Setpoint Year	Heating Setpoint Year	Heating Setpoint LT
Cooling Design Capacity Method		CoolingDesignCapacity	CoolingDesignCapacity	CoolingDesignCapacity	CoolingDesignCapacity
Cooling Design Capacity	W	autosize	autosize	autosize	autosize
Cooling Design Capacity Per Floor Area	W/m2				
Fraction of Autosized Cooling Design Capacity					
Maximum Cold Water Flow	m3/s	autosize	autosize	autosize	autosize
Cooling Water Inlet Node Name		Zone 1 Cooling Water Inlet Node	Zone 2 Cooling Water Inlet Node	Zone 3 Cooling Water Inlet Node	Zone 4 Cooling Water Inlet Node
Cooling Water Outlet Node Name		Zone 1 Cooling Water Outlet Node	Zone 2 Cooling Water Outlet Node	Zone 3 Cooling Water Outlet Node	Zone 4 Cooling Water Outlet Node
Cooling Control Throttling Range	deltaC	1	1	1	1
Cooling Control Temperature Schedule Name		Cooling Setpoint Year	Cooling Setpoint Year	Cooling Setpoint Year	Cooling Setpoint Year
Condensation Control Type		Off	Off	Off	Off
Condensation Control Dewpoint Offset	C				
Number of Circuits		CalculateFromCircuitLength	CalculateFromCircuitLength	CalculateFromCircuitLength	OnePerSurface
Circuit Length	m	129	101	101	

Figura 5.13: Definizione di ZoneHVAC:LowTemperatureRadiant:VariableFlow su EnergyPlus

Per permettere il dimensionamento da parte di EnergyPlus è necessario definire gli oggetti della categoria *Sizing*.

In un pavimento radiante a flusso variabile, la temperatura di mandata è costante e si indica una differenza di temperatura di progetto per calcolare la portata d'acqua richiesta dall'impianto.

In *Sizing:Plant* è stato creato l'oggetto Hot Water Loop per l'acqua calda per il riscaldamento, con una temperatura di mandata di 35°C e un ΔT di 5°C compatibile con una pompa di calore. Un altro oggetto, Chilled Water Loop, è stato creato per l'acqua fredda per il raffrescamento, con una temperatura di mandata di 18°C e un ΔT di 2°C.

Explanation of Object and Current Field

Object Description: Specifies the input needed to autosize plant loop flow rates and equipment capacities. This information is initially used by components that use water for heating or cooling such as hot or chilled water coils to calculate their maximum water flow rates. These flow rates are then summed for use in calculating the Plant Loop flow rates.

Field Description: Enter the name of a PlantLoop or a CondenserLoop object
ID: A1
Select from list of objects

Field	Units	Obj1	Obj2
Plant or Condenser Loop Name		Hot Water Loop	Chilled Water Loop
Loop Type		Heating	Cooling
Design Loop Exit Temperature	C	35	18
Loop Design Temperature Difference	deltaC	5	2
Sizing Option			
Zone Timesteps in Averaging Window			
Coincident Sizing Factor Mode			

Figura 5.14: Definizione di Sizing:Plant su EnergyPlus

In *Sizing:Zone* devono essere specificati i dati necessari al programma per effettuare il calcolo di progetto dei flussi d'aria in ogni zona. Il calcolo viene eseguito considerando una portata variabile di aria con un valore costante di temperatura e umidità. Le informazioni richieste da EnergyPlus sono le condizioni d'ingresso dell'aria, ovvero la temperatura e l'umidità sia per il caso invernale che per quello estivo. Il massimo carico di riscaldamento e il massimo carico di raffrescamento e le relative portate d'aria sono salvate dal programma per i calcoli di progetto e il dimensionamento dei componenti.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
Zone or ZoneList Name		Thermal Zone 1	Thermal Zone 2	Thermal Zone 3	Thermal Zone 4
Zone Cooling Design Supply Air Temperature Input Met		SupplyAirTemperature	SupplyAirTemperature	SupplyAirTemperature	SupplyAirTemperature
Zone Cooling Design Supply Air Temperature	C	23	23	23	23
Zone Cooling Design Supply Air Temperature Difference	deltaC				
Zone Heating Design Supply Air Temperature Input Met		SupplyAirTemperature	SupplyAirTemperature	SupplyAirTemperature	SupplyAirTemperature
Zone Heating Design Supply Air Temperature	C	23	23	23	23
Zone Heating Design Supply Air Temperature Difference	deltaC				
Zone Cooling Design Supply Air Humidity Ratio	kgWater/kgDryA	0,0085	0,0085	0,0085	0,0085
Zone Heating Design Supply Air Humidity Ratio	kgWater/kgDryA	0,00525	0,00525	0,00525	0,00525
Design Specification Outdoor Air Object Name		OA_Zone 1	OA_Zone 2	OA_Zone 3	OA_Zone 4
Zone Heating Sizing Factor		0	0	0	0
Zone Cooling Sizing Factor		0	0	0	0
Cooling Design Air Flow Method		DesignDay	DesignDay	DesignDay	DesignDay
Cooling Design Air Flow Rate	m3/s				
Cooling Minimum Air Flow per Zone Floor Area	m3/s-m2				
Cooling Minimum Air Flow	m3/s				
Cooling Minimum Air Flow Fraction					
Heating Design Air Flow Method		DesignDay	DesignDay	DesignDay	DesignDay

Figura 5.15: Definizione di Sizing:Zone su EnergyPlus

5.1.1 Calcoli di progetto invernale ed estivo

Affinchè l'impianto possa far fronte alle condizioni peggiori deve essere dimensionato seguendo le indicazioni prescritte dalle normative.

In particolare, per il dimensionamento invernale si fa riferimento alla normativa UNI EN 12831, ipotizzando nulli i contributi dovuti agli apporti interni ed alla radiazione solare. La temperatura esterna viene considerata costante ed il suo valore, che cambia da località a località, è elencato nella normativa UNI/TR 10349-2. Per Torino è pari a $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$. L'impianto deve essere in grado di mantenere, in queste condizioni, la temperatura di setpoint desiderata, stabilita dal DPR 412/93, secondo cui, per edifici adibiti ad uffici e assimilabili, il valore di temperatura ambiente deve essere di $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ con $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ di tolleranza.

Per il dimensionamento estivo invece si fa riferimento alle normative UNI EN ISO 13786:2008 e UNI-TR 10349-2. A differenza del dimensionamento invernale, la temperatura esterna non è più considerata costante, ma presenta un andamento sinusoidale. Inoltre, le condizioni peggiori in estate si verificano quando i carichi dovuti agli apporti interni e alla radiazione solare sono massimi. Nella UNI-TR 10349-2 sono indicati i valori della temperatura massima, che per Torino è pari a $30.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, con un'escursione giornaliera di $11\text{ }^{\circ}\text{C}$ ed un'umidità relativa del 50%.

Queste condizioni devono essere inserite in EnergyPlus, affinché il software sia

in grado di effettuare il dimensionamento dell'impianto. Per fare ciò si creano due oggetti in *SizingPeriod:DesignDay*, uno per il *WinterDesignDay* e uno per il *SummerDesignDay*.

A questo punto si inseriscono le corrispettive informazioni dei giorni di progetto. Per il caso invernale si è scelto il giorno 15 Gennaio, con una temperatura di bulbo secco esterna di $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$, ed una temperatura di bulbo bagnato di $-8.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, si sono inserite la velocità e la direzione del vento e si è impostata la limpidezza del cielo a 0 per annullare il contributo della radiazione solare.

Allo stesso modo per il caso estivo si è scelto il giorno 15 Luglio, caratterizzato da una temperatura di bulbo secco esterna massima di $30.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ed una escursione termica giornaliera di $11\text{ }^{\circ}\text{C}$. La corrispondente temperatura di bulbo umido è di $23\text{ }^{\circ}\text{C}$. La velocità e la direzione del vento sono uguali al caso invernale, mentre la limpidezza del cielo ha come valore 1, così da considerare il massimo apporto dovuto alla radiazione solare.

Le impostazioni riguardanti gli apporti interni dovuti agli occupanti, all'illuminazione e agli apparecchi elettrici sono state definite per entrambi i casi nelle rispettive schedules. Così come nelle schedules dei termostati sono stati definiti i valori di temperatura di setpoint pari a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ in inverno e $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ in estate per i locali occupati.

Tabella 5.2: Condizioni termoigrometriche di progetto

Ambiente	Inverno		Estate	
	t [$^{\circ}\text{C}$]	ϕ [%]	t [$^{\circ}\text{C}$]	ϕ [%]
Sala Controllo	20	50	26	50
Sala Studio 1	20	50	26	50
Sala Studio 2	20	50	26	50
Locale Tecnico	16		26	

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		Inverno	Estate
Month		1	7
Day of Month		15	15
Day Type		WinterDesignDay	SummerDesignDay
Maximum Dry-Bulb Temperature	C	-8	30,8
Daily Dry-Bulb Temperature Range	deltaC		11
Dry-Bulb Temperature Range Modifier Type		DefaultMultipliers	DefaultMultipliers
Dry-Bulb Temperature Range Modifier Day Schedule N.			
Humidity Condition Type		WetBulb	WetBulb
Wetbulb or DewPoint at Maximum Dry-Bulb	C	-8,5	23
Humidity Condition Day Schedule Name			
Humidity Ratio at Maximum Dry-Bulb	kgWater/kgDryA		
Enthalpy at Maximum Dry-Bulb	J/kg		
Daily Wet-Bulb Temperature Range	deltaC		
Barometric Pressure	Pa		
Wind Speed	m/s	0,8	0,8
Wind Direction	deg	26	26
Rain Indicator		No	No
Snow Indicator		No	No
Daylight Saving Time Indicator		No	No
Solar Model Indicator		ASHRAEClearSky	ASHRAEClearSky
Beam Solar Day Schedule Name			
Diffuse Solar Day Schedule Name			
ASHRAE Clear Sky Optical Depth for Beam Irradiance (dimensionless		
ASHRAE Clear Sky Optical Depth for Diffuse Irradiance	dimensionless		
Sky Clearness		0	1

Figura 5.16: Definizione di SizingPeriod:DesignDay su EnergyPlus

5.2 Modellazione del sistema di ventilazione meccanica

In questo caso si è fatto uso degli HVAC Template disponibili su EnergyPlus, che rendono più semplice la modellazione di alcuni impianti HVAC. Utilizzando un file con le stesse impostazioni fin qui descritte, ad eccezione del pavimento radiante, si è simulato un impianto a fan coil con DOAS (Dedicated Outdoor Air System), in quanto più simile tra quelli disponibili alla soluzione scelta. Per creare questa tipologia di impianto è necessario definire all'interno del programma alcuni moduli con le adeguate impostazioni [13].

Partendo dalla modellazione del DOAS, si definiscono in *HVACTemplate:System:DedicatedOutdoorAir* i moduli per ogni tipologia di zona. Questo template simula un impianto ad aria esterna a volume costante, per cui la portata d'aria non segue il profilo di occupazione. A seconda delle esigenze può essere dotato di batteria di

riscaldamento, batteria di raffreddamento, recuperatore di calore, umidificatore e deumidificatore.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3
Name		DOAS SC	DOAS SS	DOAS LT
System Availability Schedule Name		People SC Year	People SS Year	Lights Year
Air Outlet Type		DirectIntoZone	DirectIntoZone	DirectIntoZone
Supply Fan Flow Rate	m3/s	autosize	autosize	autosize
Supply Fan Total Efficiency		0.7	0.7	0.7
Supply Fan Delta Pressure	Pa	1000	1000	1000
Supply Fan Motor Efficiency		0.9	0.9	0.9
Supply Fan Motor in Air Stream Fraction		1	1	1
Supply Fan Placement		DrawThrough	DrawThrough	DrawThrough
Cooling Coil Type		ChilledWater	ChilledWater	ChilledWater
Cooling Coil Availability Schedule Name				
Cooling Coil Setpoint Control Type		FixedSetpoint	FixedSetpoint	FixedSetpoint
Cooling Coil Design Setpoint	C	23	23	23
Cooling Coil Setpoint Schedule Name				
Cooling Coil Setpoint at Outdoor Dry-Bulb Low	C			
Cooling Coil Reset Outdoor Dry-Bulb Low	C			
Cooling Coil Setpoint at Outdoor Dry-Bulb High	C			
Cooling Coil Reset Outdoor Dry-Bulb High	C			
DX Cooling Coil Gross Rated Total Capacity	W			
DX Cooling Coil Gross Rated Sensible Heat Ratio				
DX Cooling Coil Gross Rated COP	W/W			
Heating Coil Type		HotWater	HotWater	HotWater
Heating Coil Availability Schedule Name				
Heating Coil Setpoint Control Type		FixedSetpoint	FixedSetpoint	FixedSetpoint
Heating Coil Design Setpoint	C	23	23	23
Heating Coil Setpoint Schedule Name				
Heating Coil Setpoint at Outdoor Dry-Bulb Low	C			
Heating Coil Reset Outdoor Dry-Bulb Low	C			
Heating Coil Setpoint at Outdoor Dry-Bulb High	C			
Heating Coil Reset Outdoor Dry-Bulb High	C			
Gas Heating Coil Efficiency				
Gas Heating Coil Parasitic Electric Load	W			
Heat Recovery Type		Enthalpy	Enthalpy	Enthalpy
Heat Recovery Sensible Effectiveness		0.8	0.8	0.8
Heat Recovery Latent Effectiveness		0.7	0.7	0.7
Heat Recovery Heat Exchanger Type		Plate	Plate	Plate
Heat Recovery Frost Control Type		MinimumExhaustTemperature	MinimumExhaustTemperature	MinimumExhaustTemperature
Dehumidification Control Type		CoolReheatHeatingCoil	CoolReheatHeatingCoil	None
Dehumidification Setpoint	kgWater/kgDryA	0.01	0.01	
Humidifier Type		ElectricSteam	ElectricSteam	None
Humidifier Availability Schedule Name				
Humidifier Rated Capacity	m3/s	0,000001	0,000001	
Humidifier Rated Electric Power	W	autosize	autosize	
Humidifier Constant Setpoint	kgWater/kgDryA	0,0074	0,0074	

Figura 5.17: Definizione di HVACTemplate:System:DedicatedOutdoorAir su EnergyPlus

In questa applicazione è stato impostato il funzionamento dell'impianto solamente durante le ore di occupazione dell'edificio. Sono state impostate le temperature di immissione dell'aria in ambiente. Sia in riscaldamento che in raffrescamento la temperatura di immissione è stata impostata a 23 °C, così da ridurre il carico destinato all'impianto di climatizzazione.

Successivamente, nella parte inferiore del modulo vengono definite le impostazioni relative al recuperatore di calore, ovvero la tipologia di recupero, l'efficienza di recupero sensibile e latente, il tipo di scambiatore e il tipo di controllo dello sbrinamento. Per i dati tecnici è stato preso come riferimento lo scambiatore di calore della Mitsubishi presente in Appendice.

Infine, il sistema di ventilazione deve garantire il mantenimento all'interno dei locali di condizioni di umidità relativa accettabili. Per questo motivo sono stati impostati anche i valori relativi al titolo specifico dell'aria di immissione sia in condizioni di riscaldamento che raffrescamento corrispondenti a circa il 50% di umidità relativa.

Successivamente sono stati definiti i termostati in *HVACTemplate:Thermostat*, con riferimento alle schedules che definiscono la temperatura desiderata in ambiente durante il riscaldamento e il raffrescamento.

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		Termostato Zone Climatizzate	Termostato Locale Tecnico
Heating Setpoint Schedule Name		Heating Setpoint Year	Heating Setpoint LT Year
Constant Heating Setpoint	C		
Cooling Setpoint Schedule Name		Cooling Setpoint Year	Cooling Setpoint Year
Constant Cooling Setpoint	C		

Figura 5.18: Definizione di *HVACTemplate:Thermostat* su EnergyPlus

Si passa quindi alla modellazione dei fan coil, in cui sono stati creati, in *HVACTemplate:Zone:FanCoil*, tanti oggetti quante sono le zone servite dall'impianto. In questi moduli si trova una parte relativa alla portata di aria esterna necessaria che funge da integrazione dei moduli precedentemente definiti relativi al DOAS. Per quanto riguarda gli aspetti strettamente legati ai fan coil, sono stati associati i termostati, ed impostate le temperature di progetto a cui operano.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
Zone Name		Thermal Zone 1	Thermal Zone 2	Thermal Zone 3	Thermal Zone 4
Template Thermostat Name		Termostato Zone Climatizzate	Termostato Zone Cl	Termostato Zone Cl	Termostato Locale
Supply Air Maximum Flow Rate	m3/s	autosize	autosize	autosize	autosize
Zone Heating Sizing Factor					
Zone Cooling Sizing Factor					
Outdoor Air Method		Flow/Person	Flow/Person	Flow/Person	Flow/Zone
Outdoor Air Flow Rate per Person	m3/s	0,01	0,01	0,01	
Outdoor Air Flow Rate per Zone Floor Area	m3/s-m2				
Outdoor Air Flow Rate per Zone	m3/s				0,0039
System Availability Schedule Name					
Supply Fan Total Efficiency		0,7	0,7	0,7	0,7
Supply Fan Delta Pressure	Pa	75	75	75	75
Supply Fan Motor Efficiency		0,9	0,9	0,9	0,9
Supply Fan Motor in Air Stream Fraction		1	1	1	1
Cooling Coil Type		ChilledWater	ChilledWater	ChilledWater	ChilledWater
Cooling Coil Availability Schedule Name					
Cooling Coil Design Setpoint	C	18	18	18	18
Heating Coil Type		HotWater	HotWater	HotWater	HotWater
Heating Coil Availability Schedule Name					
Heating Coil Design Setpoint	C	35	35	35	35
Dedicated Outdoor Air System Name		DDAS SC	DDAS SS	DDAS SS	DDAS LT
Zone Cooling Design Supply Air Temperature Input Met		SupplyAirTemperature	SupplyAirTemperature	SupplyAirTemperature	SupplyAirTemperature
Zone Cooling Design Supply Air Temperature Difference	deltaC				
Zone Heating Design Supply Air Temperature Input Met		SupplyAirTemperature	SupplyAirTemperature	SupplyAirTemperature	SupplyAirTemperature

Figura 5.19: Definizione di HVACTemplate:Zone:FanCoil su EnergyPlus

Si definiscono poi i circuiti caldo e freddo di alimentazione dei fan coil in *HVAC-Template:Plant:HotWaterLoop* e *HVACTemplate:Plant:ChilledWaterLoop*.

Field	Units	Obj1
Name		Hot Water Loop
Pump Schedule Name		Intermittent
Pump Control Type		Default
Hot Water Plant Operation Scheme Type		
Hot Water Plant Equipment Operation Schemes Name		
Hot Water Setpoint Schedule Name		
Hot Water Design Setpoint	C	50
Hot Water Pump Configuration		ConstantFlow
Hot Water Pump Rated Head	Pa	179352
Hot Water Setpoint Reset Type		None
Hot Water Setpoint at Outdoor Dry-Bulb Low	C	
Hot Water Reset Outdoor Dry-Bulb Low	C	
Hot Water Setpoint at Outdoor Dry-Bulb High	C	
Hot Water Reset Outdoor Dry-Bulb High	C	
Hot Water Pump Type		
Supply Side Bypass Pipe		
Demand Side Bypass Pipe		
Fluid Type		Water

Figura 5.20: Definizione di HVACTemplate:Plant:HotWaterLoop su EnergyPlus

Come già detto nella modellazione del pavimento radiante, non essendo interessati alla simulazione del generatore di acqua calda e di acqua fredda, si utilizzano i moduli in *HVACTemplate:Plant:Chiller* e *HVACTemplate:Plant:Boiler*, che potranno essere successivamente sostituiti con una pompa di calore. Impostando la condensazione ad aria nel modulo del chiller, si evita di definire anche il modulo *HVACTemplate:Plant:Tower*, altrimenti necessario. Se non fossero già stati definiti, sarebbero necessari anche i moduli relativi ai giorni di progetto in *SizingPeriod:DesignDay*, il modulo *Sizing:Parameters*, e tutte le schedules necessarie nei moduli precedentemente definiti.

Dopo aver finito la modellazione dell'impianto, si effettua una prima simulazione che, se corretta, genera un file con estensione ".expidf". Questo file è una versione "espansa" di quello creato in precedenza. Di conseguenza, semplicemente modificando l'estensione del file da ".expidf" ad ".idf", è possibile avere lo stesso file con tutti gli oggetti del sistema Node-Branch, relativi agli impianti modellati, già definiti, evitando la lunga e complessa implementazione manuale effettuata con il pavimento radiante.

La fase successiva consiste nel riportare tutti i moduli relativi all'impianto di ventilazione dal file relativo all'impianto con fan-coil a quello relativo all'impianto con pavimento radiante. A questo punto è possibile effettuare le ultime modifiche al file definitivo comprendente il pavimento radiante e il sistema di ventilazione meccanica.

Il controllo dell'umidità relativa permette di ridurre ulteriormente a 16 °C la temperatura di mandata dell'acqua nel pavimento radiante. Infatti, la normativa UNI EN 1264 raccomanda, in caso di controllo dell'umidità relativa, di utilizzare una temperatura di mandata non più bassa di 1 °C rispetto al valore della temperatura di rugiada calcolata sulle condizioni dell'aria ambiente. Inoltre, con le temperature di immissione dell'aria precedentemente impostate, le temperature negli ambienti occupati risultavano troppo alte sia in riscaldamento che in raffrescamento. Di conseguenza, la temperatura è stata gradualmente ridotta, fino ad ottenere i risultati voluti. In particolare durante il riscaldamento la temperatura di immissione è stata impostata a 16 °C. Seppur conveniente, non è possibile abbassare ulteriormente la temperatura per non generare discomfort locale dovuto a correnti d'aria fredda. In

raffrescamento, invece, la temperatura d'immissione è stata impostata a 18 °C per permettere il mantenimento in ambiente della temperatura di setpoint.

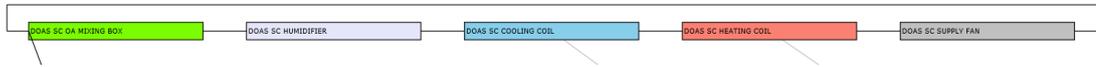


Figura 5.21: Schema dell'impianto di ventilazione lato aria primaria

La figura 5.21 mostra lo schema dell'impianto di ventilazione lato aria con i componenti in serie della mixing box, che riceve l'aria di ricambio in uscita dal recuperatore di calore, l'umidificatore nel caso sia necessario umidificare l'aria specialmente in inverno, le batterie di raffreddamento e deumidificazione e riscaldamento, ognuna collegata al corrispondente circuito idronico, e infine il ventilatore di immissione in ambiente. Infine, uno schema impiantistico semplificato è riportato nella figura 5.22.

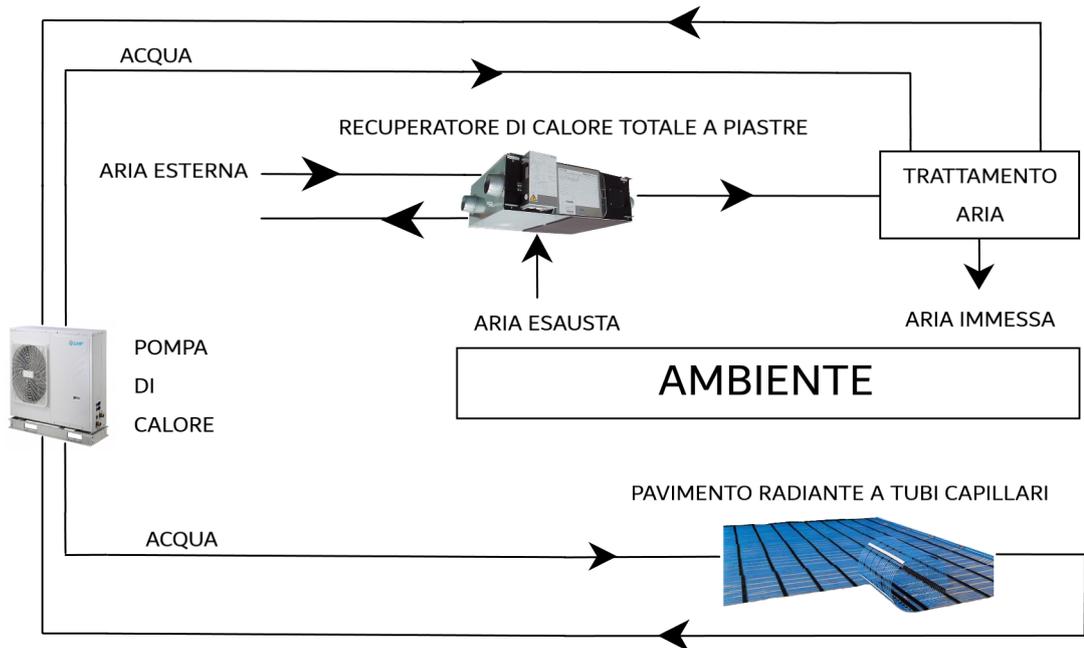


Figura 5.22: Schema impiantistico

Capitolo 6

Risultati della simulazione energetica

In questo capitolo sono presentati i risultati delle simulazioni effettuate non solo per la configurazione finale, con ventilazione meccanica e pavimento radiante, ma anche con pavimento radiante e ventilazione naturale per meglio osservare l'impatto dovuto all'introduzione del sistema di ventilazione.

6.1 Caso con ventilazione naturale

6.1.1 Calcolo di progetto invernale ed estivo

Per il calcolo del carico termico di progetto invernale si fa riferimento alla UNI EN 12831.

Considerato il funzionamento intermittente dell'impianto, con attenuazione notturna della temperatura, è importante determinare la potenza di ripresa.

In inverno si è considerata una temperatura esterna costante di -8°C e assenza di apporti interni e radiazione solare. Con queste impostazioni, il software ha calcolato la potenza necessaria per mantenere la temperatura di setpoint che per i locali occupati è di 20°C , mentre per il locale tecnico è di 16°C .

Come riportato nella tabella 6.1, il sistema radiante riesce a raggiungere i 20°C prestabiliti nei locali occupati, tuttavia nella Sala Controllo la temperatura cresce più lentamente a causa delle maggiori dispersioni termiche e raggiunge la massima

temperatura solo a fine giornata, mentre nelle Sale Studio la temperatura è già raggiunta a partire dalle 14:00. Nel locale tecnico invece, la temperatura supera i 16°C. Questo è dovuto al controllo del pavimento radiante. Non si tratta di un controllo On/Off ma è presente un range di temperatura che regola la portata d'acqua nei circuiti.

Probabilmente questo discostamento è determinato da una non perfetta regolazione della temperatura dell'impianto radiante.

Bisogna considerare inoltre che la resistenza superficiale del pavimento è elevata e impedisce il funzionamento ottimale del sistema radiante.

Tabella 6.1: Massime temperature raggiunte nel giorno di progetto invernale

Temperatura esterna [°C]	Temperatura Sala Controllo [°C]	Temperatura Sala 1 [°C]	Temperatura Sala Studio [°C]	Temperatura Sala 2 [°C]	Temperatura Locale Tecnico [°C]
-8	19.9	20.2	20.2	20.2	16.6

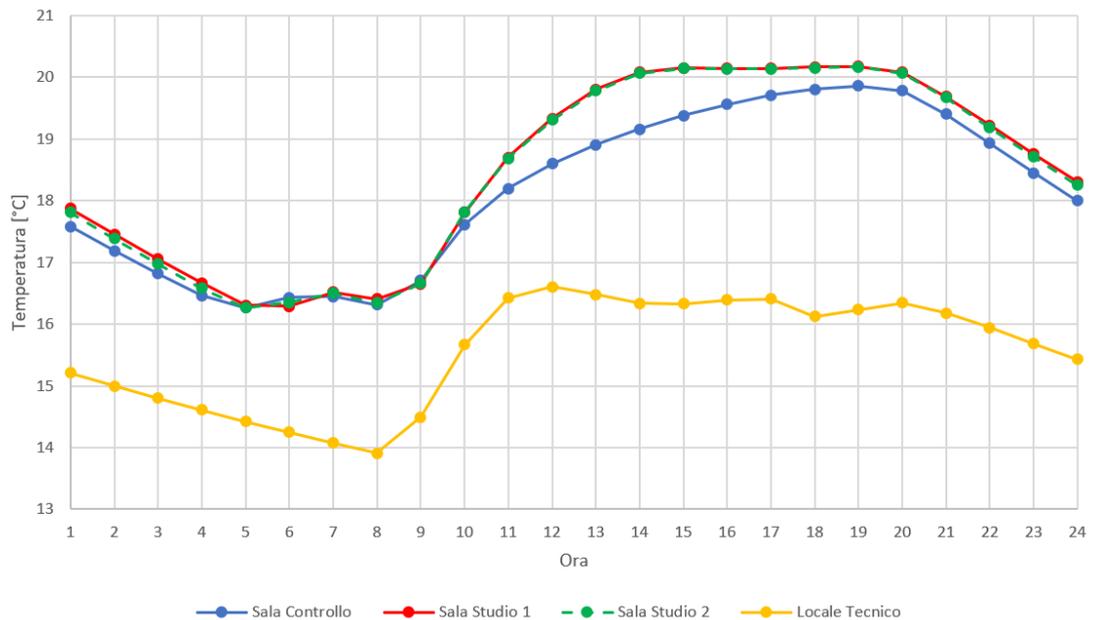


Figura 6.1: Andamento della temperatura per il giorno di progetto invernale

Infine, un'altra osservazione riguarda la potenza di ripresa dell'impianto. Tutti i locali all'apertura richiedono una potenza termica specifica maggiore di 100 W/m^2 . Una volta raggiunta la temperatura di setpoint la potenza termica specifica si assesta sui 30 W/m^2 per le Sale Studio e 40 W/m^2 per la Sala Controllo.

Tabella 6.2: Potenza di ripresa nel giorno di progetto invernale

Potenza di ripresa Sala Controllo [W]	Potenza di ripresa Sala Studio 1 [W]	Potenza di ripresa Sala Studio 2 [W]	Potenza di ripresa Sala Tecnico [W]	Potenza di ripresa totale [W]
1641	3747	3670	1858	10916

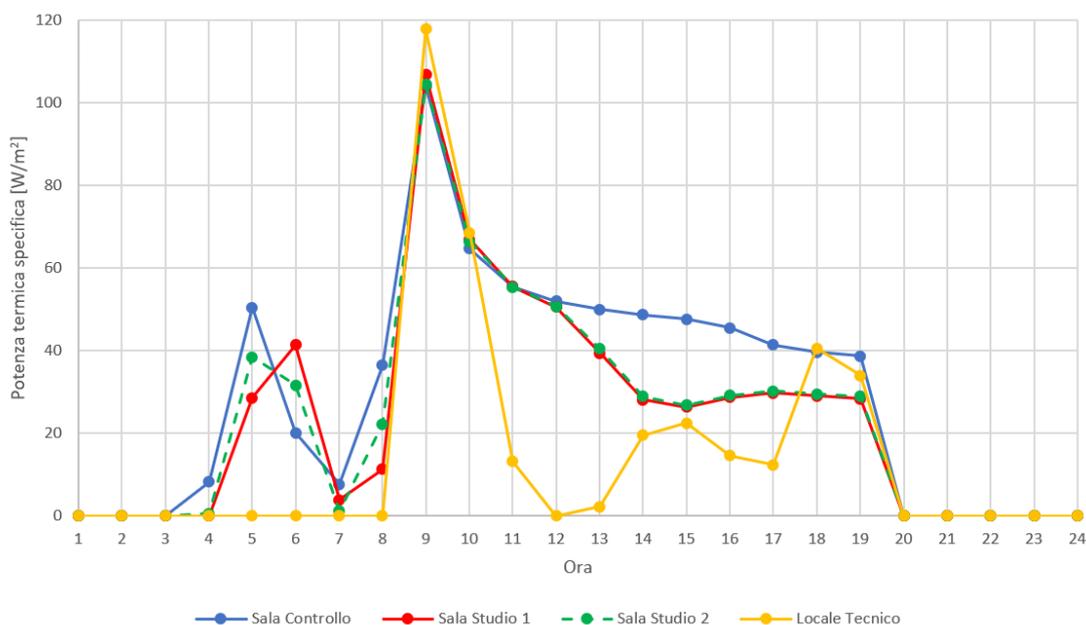


Figura 6.2: Andamento della potenza termica specifica per il giorno di progetto invernale

Non positiva è la situazione per il giorno di progetto estivo.

Come si vede immediatamente dalla figura 6.3 la temperatura di setpoint è mantenuta solamente nel locale tecnico, negli altri tre ambienti la temperatura cresce rapidamente sin dalle prime ore di occupazione fino a raggiungere la temperatura di 32°C nelle sale studio, inaccettabile dal punto di vista del comfort termico.

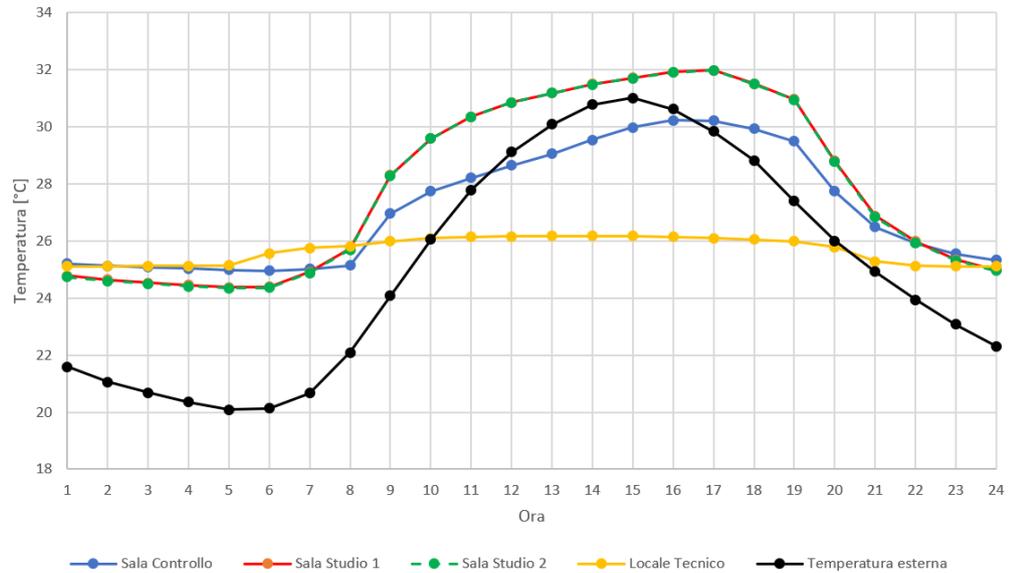


Figura 6.3: Andamento della temperatura per il giorno di progetto estivo

Questo è causato dagli elevati apporti interni dovuti alle persone, alle luci e alle apparecchiature elettriche. La ventilazione fornisce un contributo favorevole finché la temperatura esterna è inferiore a quella di setpoint, dopodiché contribuisce ad aumentare il carico di raffrescamento. Inoltre, l'inerzia termica dell'edificio e l'esposizione dei serramenti ad Ovest/Nord-Ovest fanno sì che il picco di temperatura interna, 32°C alle 17:00, non coincida con quello della temperatura esterna, 30.8°C alle 15:00.

Nella figura 6.4 è evidente il limite tecnico del pavimento radiante in caso di raffrescamento che non è in grado a regime di superare la potenza di 40 W/m^2 con questa temperatura di alimentazione e questa resistenza superficiale.

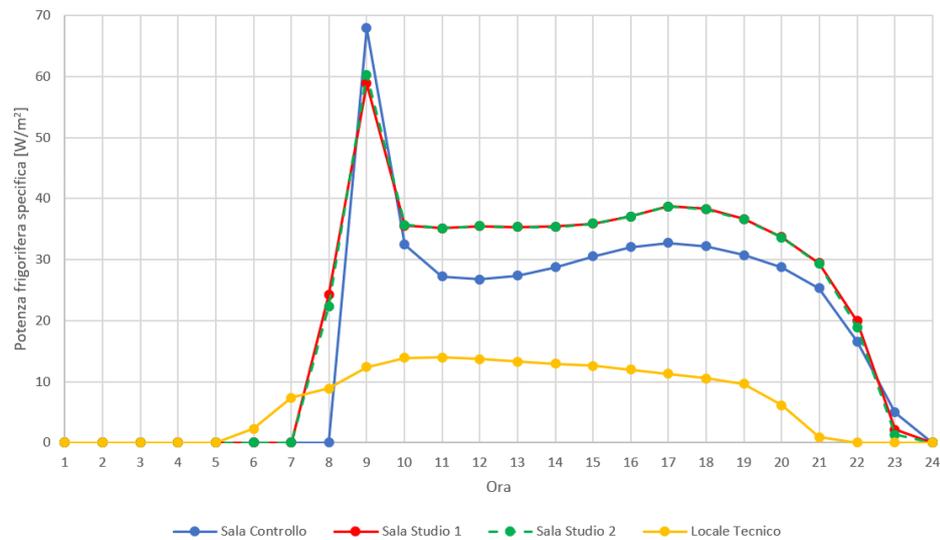


Figura 6.4: Andamento della potenza frigorifera specifica per il giorno di progetto estivo

6.1.2 Andamento annuale

Dal punto di vista del comfort termico l'andamento annuale rispecchia le considerazioni già effettuate per i giorni di progetto.

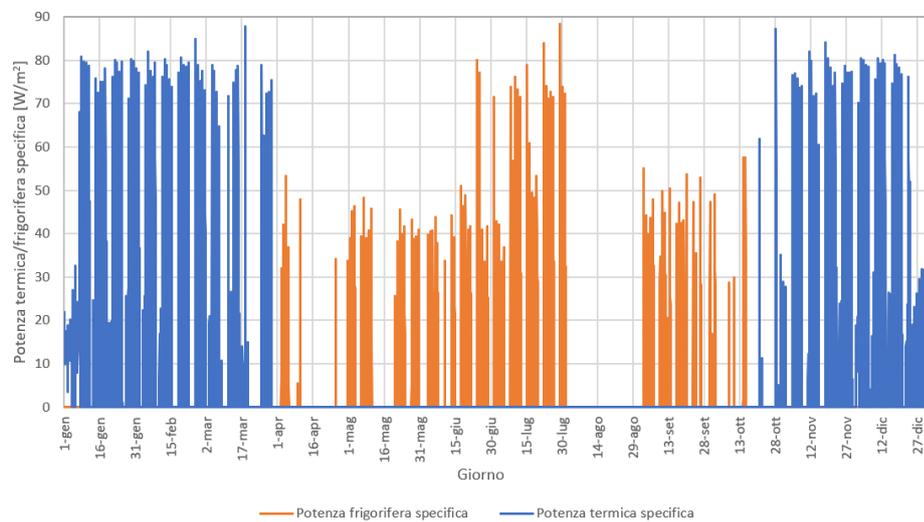


Figura 6.5: Andamento annuale della potenza termica/frigorifera specifica nella Sala Controllo

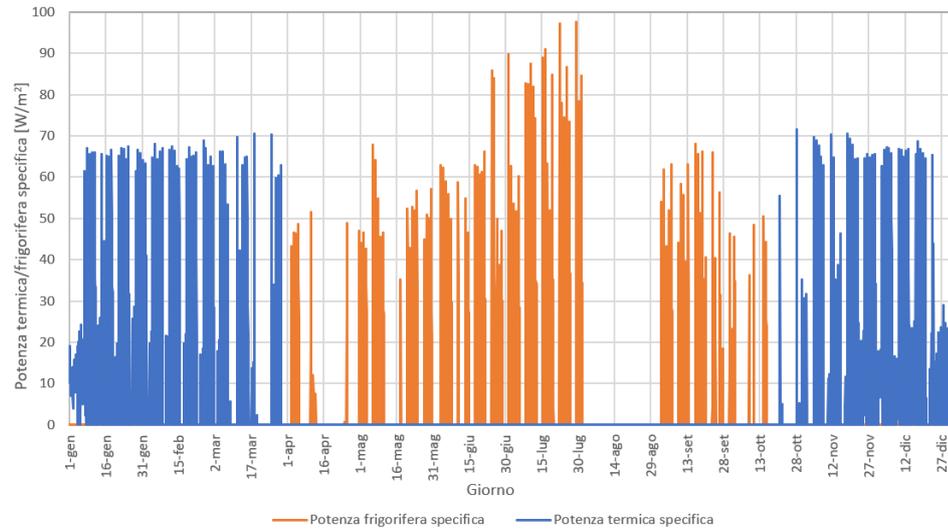


Figura 6.6: Andamento annuale della potenza termica/frigorifera specifica nelle Sale Studio

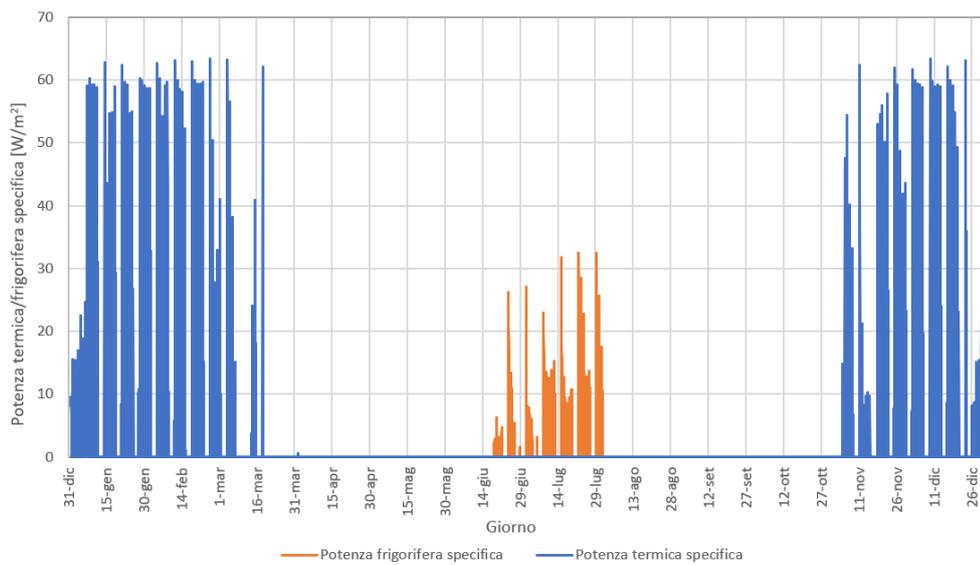


Figura 6.7: Andamento annuale della potenza termica/frigorifera specifica nel Locale Tecnico

Nei precedenti grafici è stata considerata la potenza specifica in modo da poter effettuare un confronto oggettivo.

Come si può vedere, la potenza specifica durante il riscaldamento è maggiore nella

sala controllo, principalmente a causa dei minori apporti interni. I picchi corrispondono agli orari di apertura, in particolare dopo i weekends, quando la temperatura si abbassa notevolmente, e il sistema radiante cerca di compensare la differenza di temperatura operando con la portata massima. L'andamento è all'incirca costante durante tutta la stagione di riscaldamento. Viceversa durante il raffrescamento sono le aule studio quelle con la maggior richiesta di energia. Questo è dovuto sia al maggior contributo dovuto agli apporti interni, sia al fatto che una parete è esposta a sud per cui riceve maggiore radiazione solare. Per quanto riguarda il locale tecnico, la quantità di energia richiesta è inferiore rispetto agli altri locali, specialmente per il raffrescamento, e non contribuisce in maniera significativa ad aumentare il fabbisogno energetico. Infine come si vede da tutti grafici, nel periodo di agosto l'impianto non è mai attivo, questo significa che la temperatura nei locali non supera mai i 35°C. La richiesta di raffrescamento è già presente in alcuni giorni di aprile ed aumenta fino a raggiungere i valori massimi tra giugno e luglio.

Per avere una visione migliore del comportamento dell'impianto, si prendono due settimane campione, una per il riscaldamento ed una per il raffrescamento. Per il riscaldamento è stata presa la settimana dal 7 al 13 gennaio. Osservando più in dettaglio il funzionamento in riscaldamento si aggiungono due considerazioni.

La prima riguarda il raggiungimento della temperatura di setpoint all'apertura dei locali. A causa della ventilazione naturale che porta aria a temperature molto basse, l'impianto nei giorni più freddi impiega alcune ore prima di raggiungere la temperatura desiderata. Inizialmente si registra persino un lieve calo di temperatura a causa della ventilazione. Questo problema può essere aggirato avviando l'impianto prima dell'apertura, in modo da essere già a regime quando i locali iniziano ad essere occupati. Una seconda osservazione riguarda, invece, lo spegnimento dell'impianto. Questo è impostato in modo da funzionare fino alle 19:00, orario di chiusura dell'edificio. Di conseguenza anche se i locali sono vuoti e nell'impianto la portata d'acqua è nulla, l'inerzia termica del pavimento continua a riscaldare l'ambiente e ad aumentarne la temperatura. Perciò contrariamente a quanto pensato per l'avviamento, si potrebbe spegnere l'impianto poco prima della chiusura.

Questo è ancora più evidente se si analizza il comportamento giornaliero, prendendo ad esempio il giorno 8 gennaio.

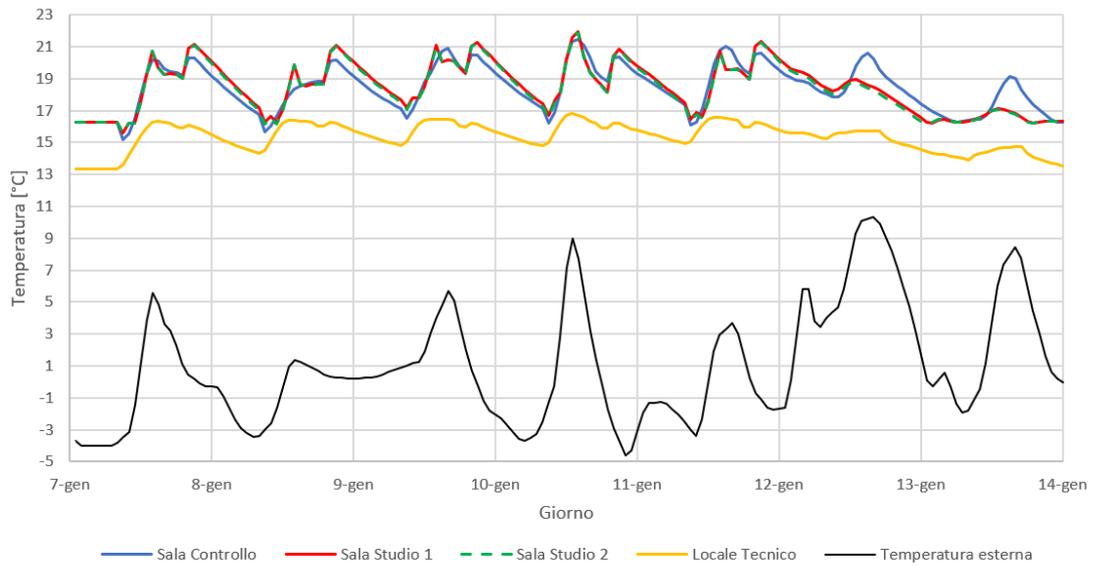


Figura 6.8: Andamento della temperatura nella settimana dal 7 al 13 gennaio

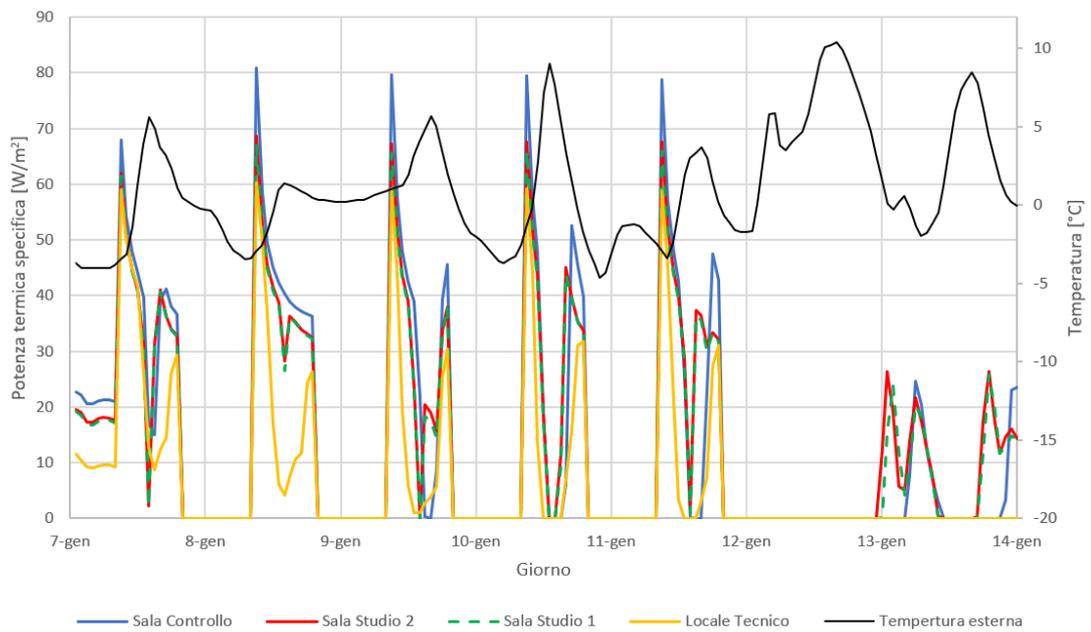


Figura 6.9: Andamento della potenza termica specifica nella settimana dal 7 al 13 gennaio

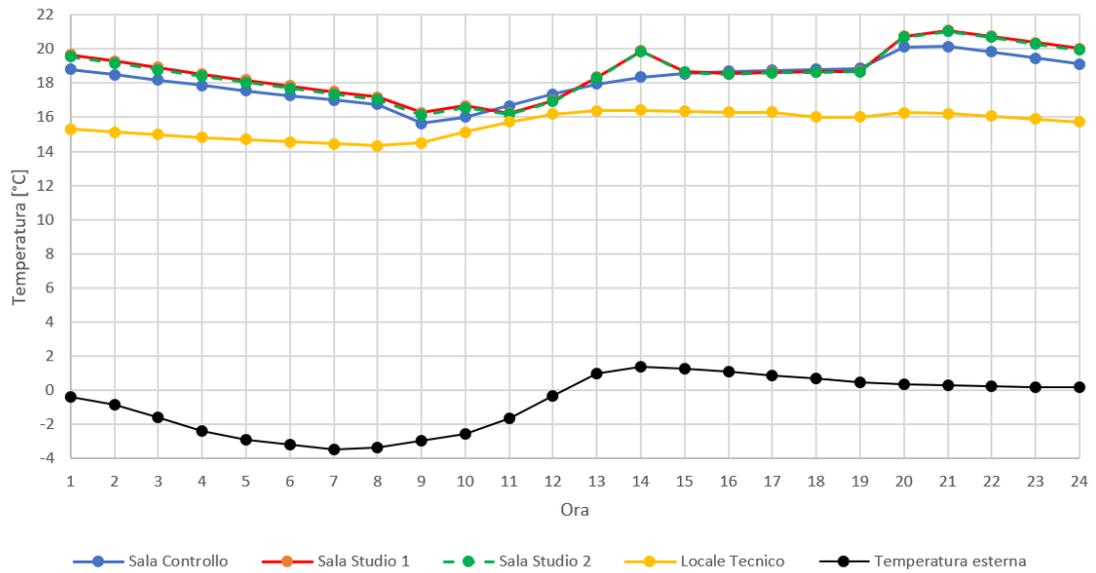


Figura 6.10: Andamento della temperatura il giorno 8 gennaio

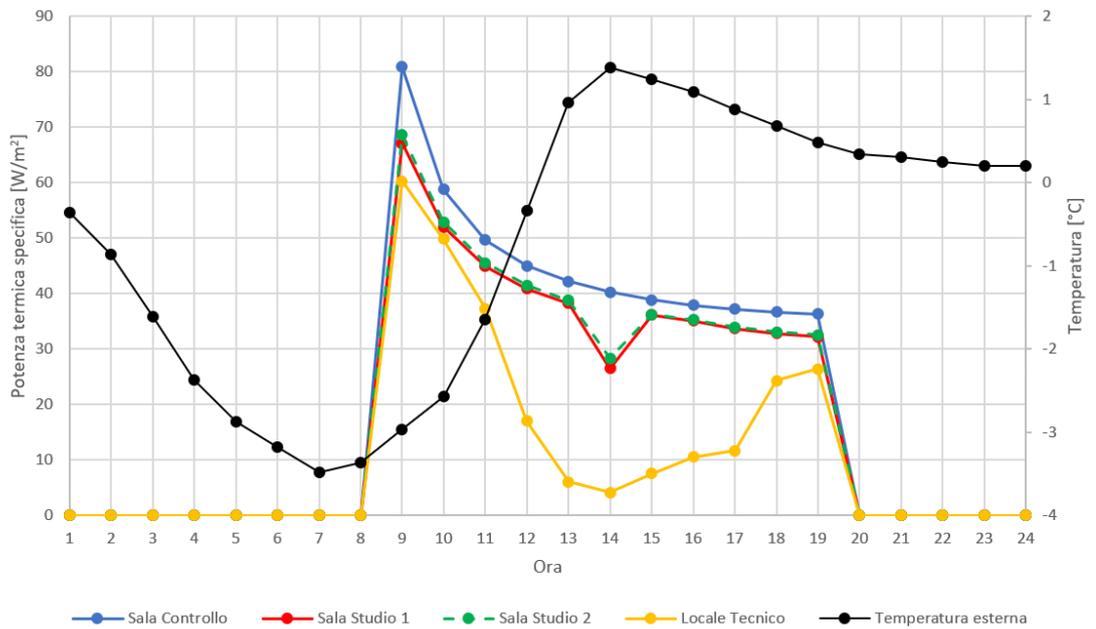


Figura 6.11: Andamento della potenza termica specifica il giorno 8 gennaio

Per il raffrescamento si è considerata la settimana dal 22 al 28 luglio. È importante notare prima di tutto il comportamento della temperatura esterna, fortemente oscillatorio e con variazioni repentine. Per tutta la settimana l'impianto non riesce a mantenere la temperatura di setpoint di 26 °C nelle sale occupate. Il calo di temperatura che si verifica dopo mezzogiorno nelle sale studio coincide con la pausa pranzo ed è dovuto alla riduzione degli apporti interni. Tuttavia la temperatura torna subito a crescere quando l'occupazione torna ad essere massima e la temperatura esterna raggiunge il suo picco, fino a toccare valori oltre i 30 °C per diverse ore in cui l'edificio è occupato. La potenza frigorifera dell'impianto, dopo il picco iniziale, si stabilisce su valori inferiori ai 40 W/m². Il valore di potenza teoricamente può essere aumentato sia riducendo la temperatura di alimentazione, che però è limitata dai problemi di condensa, sia riducendo la resistenza superficiale del pavimento. Si può analizzare più in dettaglio il comportamento in raffrescamento dai grafici 6.14 e 6.15 che riportano l'andamento giornaliero della temperatura e della potenza frigorifera specifica per il giorno 22 luglio.

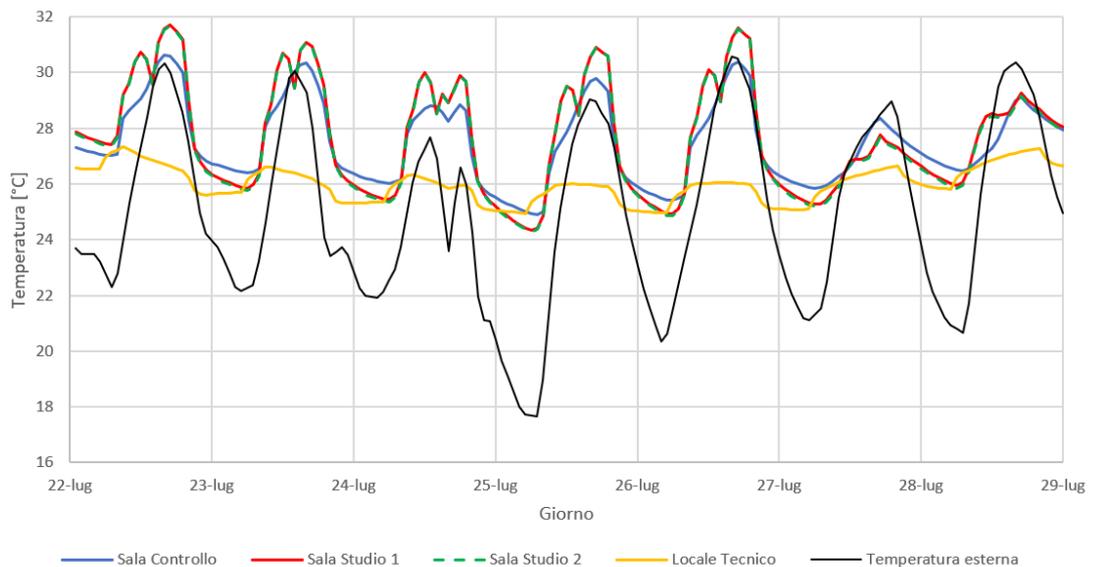


Figura 6.12: Andamento della temperatura nella settimana dal 22 al 28 luglio

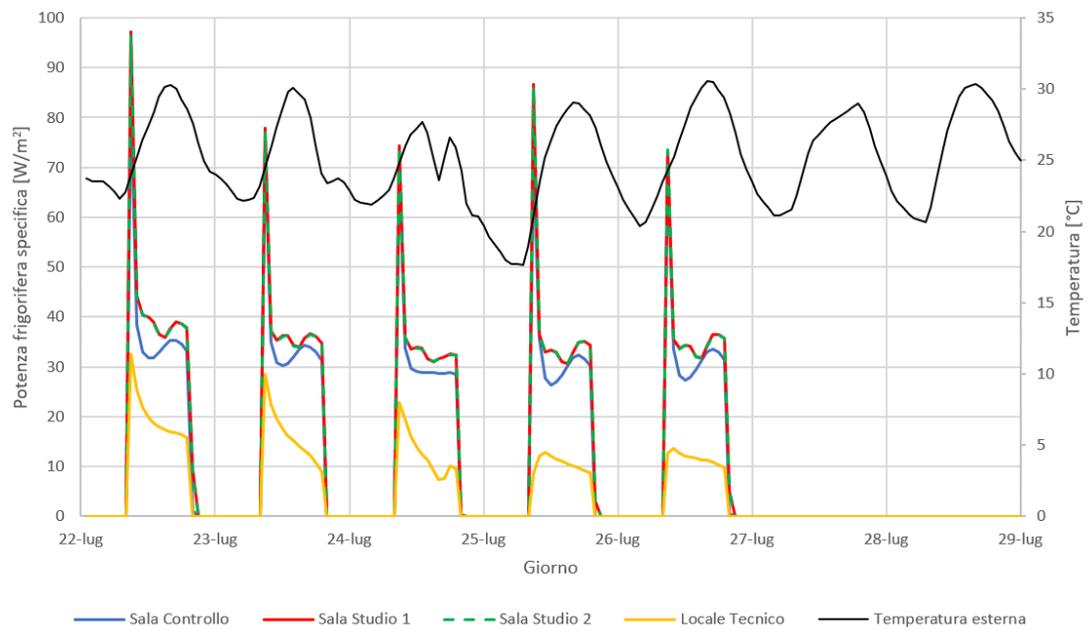


Figura 6.13: Andamento della potenza frigorifera specifica nella settimana dal 22 al 28 luglio

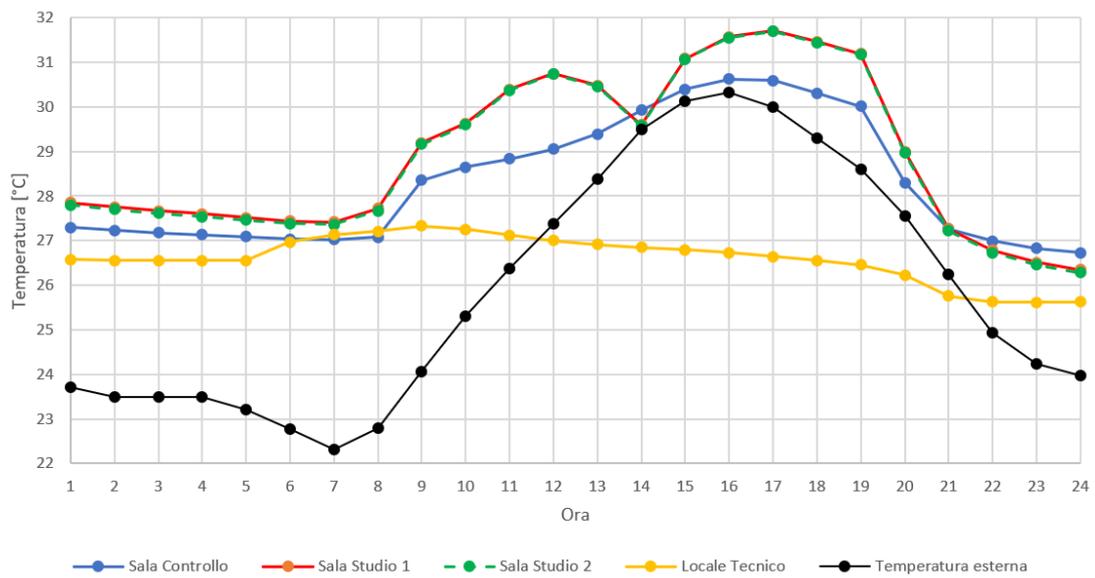


Figura 6.14: Andamento della temperatura il giorno 22 luglio

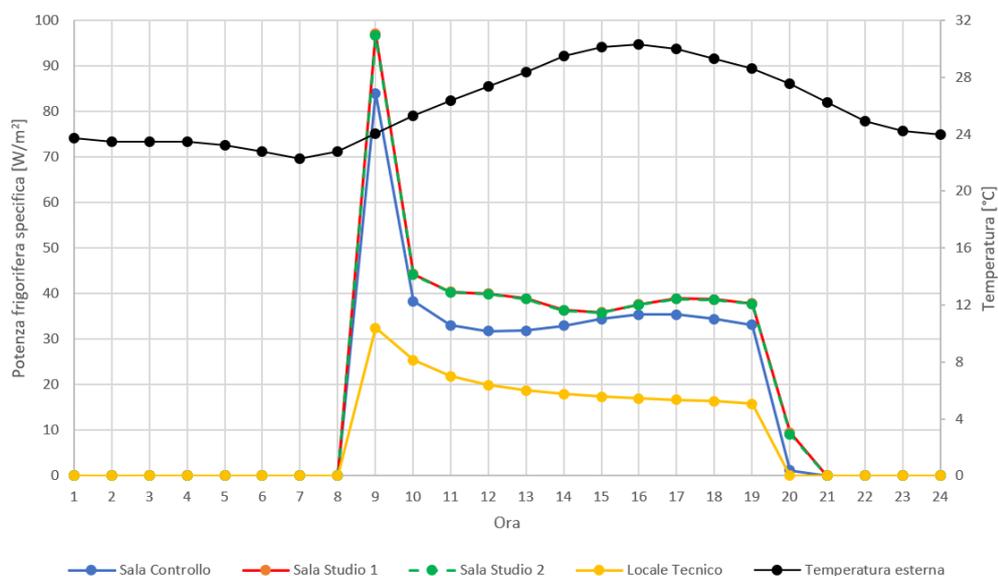


Figura 6.15: Andamento della potenza frigorifera specifica il giorno 22 luglio

Infine sono stati riportati i consumi mensili per ogni locale. I mesi invernali in cui la richiesta di energia è maggiore sono gennaio e dicembre. La Sala Controllo consuma in termini assoluti una quantità di energia per il riscaldamento pari a circa la metà di quella consumata da ogni sala studio. In raffrescamento sicuramente luglio è il mese che richiede più energia, anche a causa del fatto che nel mese di agosto l'edificio è chiuso ed i consumi sono nulli. In questo caso la Sala Controllo ha un consumo di circa un terzo rispetto alla Sala Studio. Il Locale Tecnico necessita di raffrescamento solamente nei mesi di giugno e luglio. Ad ottobre l'edificio non ha consumi elevati sia in caso di raffrescamento nella prima metà che in caso di riscaldamento nella seconda metà. Le temperature infatti si mantengono su valori tali da non richiedere la climatizzazione dei locali. In assoluto il mese con il maggior fabbisogno di energia termica è gennaio con 873 kWh, il secondo è luglio con 811 kWh, anche se è importante sottolineare che in raffrescamento non vengono raggiunte le condizioni desiderate in ambiente, per cui il valore dovrebbe essere molto più elevato. Inoltre, la leggera differenza di energia richiesta dalle due sale studio in riscaldamento è dovuta al fatto che una confina con la Sala Controllo, climatizzata alla stessa temperatura mentre l'altra con il Locale Tecnico, climatizzato ad una temperatura inferiore.

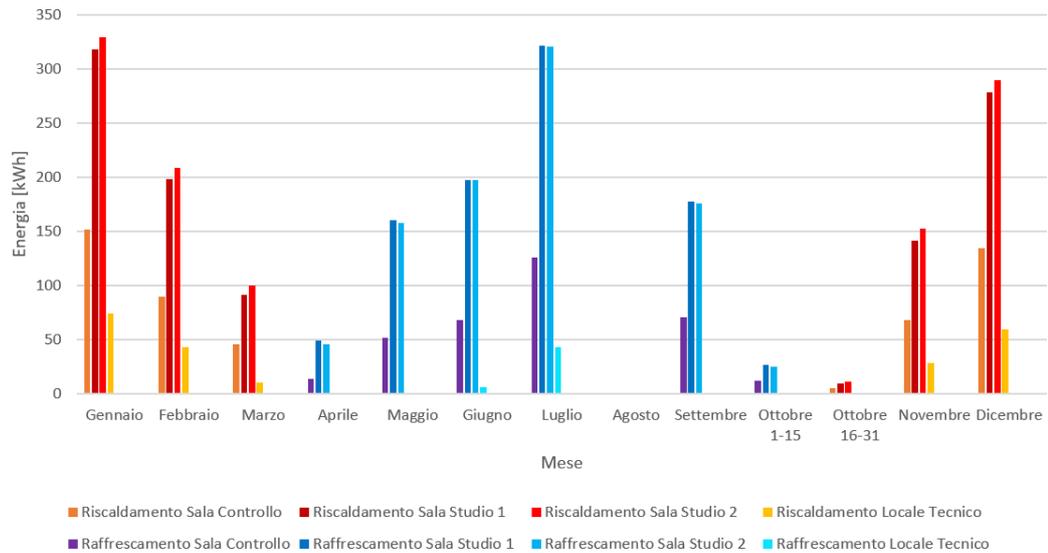


Figura 6.16: Consumi mensili del sistema radiante a pavimento

Tabella 6.3: Fabbisogno di energia per il caso con ventilazione naturale

	Sala Controllo	Sala Studio 1	Sala Studio 2	Locale Tecnico	Totale
Fabbisogno per riscaldamento [kWh]	493	1036	1091	215	2835
Fabbisogno per riscaldamento specifico [kWh/m²]	28,4	26,3	27,7	12,4	25
Fabbisogno per raffrescamento [kWh]	340	932	923	49	2244
Fabbisogno per raffrescamento specifico [kWh/m²]	19,6	23,6	23,4	2,8	19,8

L'energia richiesta annualmente per il riscaldamento dell'intero edificio è pari a 2835 kWh, che considerando il fabbisogno specifico diventano 25 kWh/m², un valore quasi doppio rispetto al limite di 15 kWh/m² stabilito dallo standard Passivhaus. In raffrescamento, l'energia richiesta dall'intero edificio è pari a 2244 kWh, un valore simile a quello per il riscaldamento. Per il raffrescamento non esistono valori limite con cui confrontare il fabbisogno specifico, che in questo caso è pari a 19.8 kWh/m², inferiore rispetto ai 25 kWh/m² del riscaldamento anche grazie al fabbisogno quasi

nullo del Locale Tecnico e ricordando sempre che le condizioni termiche in ambiente non sono soddisfacenti.

6.2 Caso con ventilazione meccanica

6.2.1 Calcolo di progetto invernale ed estivo

I risultati ottenuti nel giorno di progetto invernale sono gli stessi in quanto l'occupazione è nulla e la ventilazione non è presa in considerazione. È utile analizzare il valore della temperatura superficiale del pavimento per verificare che non superi i limiti indicati nella UNI EN 1264. Nel giorno di progetto invernale e quindi considerando le condizioni peggiori, la temperatura superficiale si attesta sui 24 °C, ben al di sotto del limite massimo di 29 °C imposto dalla normativa.

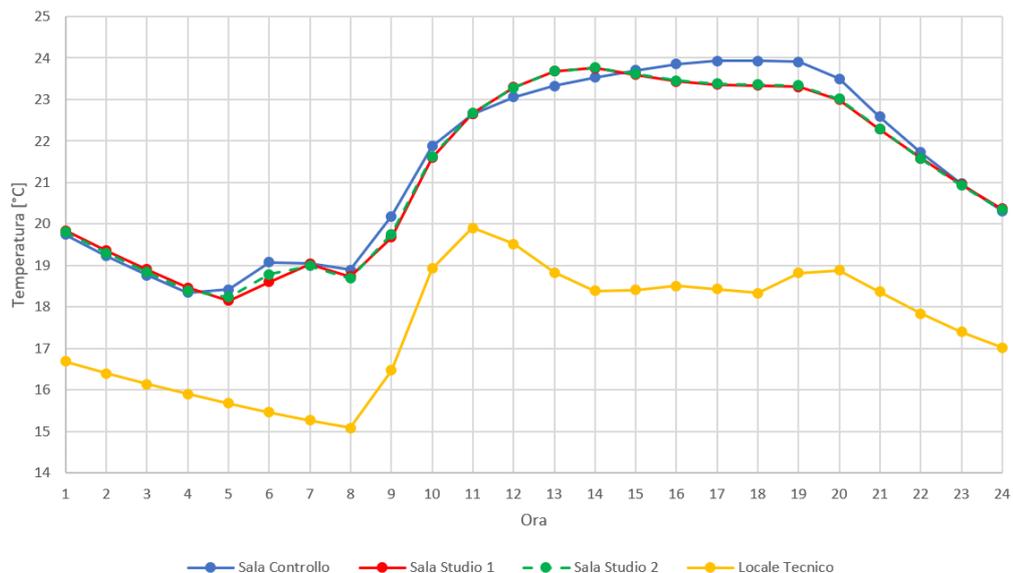


Figura 6.17: Andamento della temperatura superficiale del pavimento nel giorno di progetto invernale

Molto diversa è la situazione nel giorno di progetto estivo rispetto al caso con ventilazione naturale. Come risulta evidente dalla figura 6.18, il sistema di ventilazione meccanica, che immette aria ad una temperatura di 18°C, è fondamentale per permettere il mantenimento della temperatura di setpoint in ambiente.

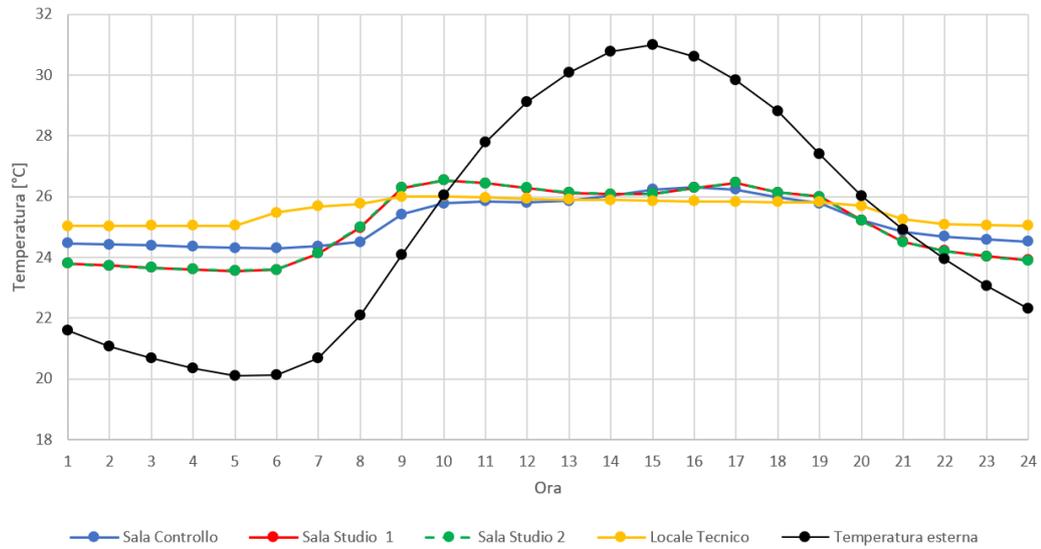


Figura 6.18: Andamento della temperatura nel giorno di progetto estivo

Nella Sala Controllo il sistema radiante a pavimento non presenta più il picco iniziale, che invece rimane nelle Sale Studio, soggette al carico più gravoso. Nelle ore successive la potenza si stabilisce su valori compresi tra 30 e 40 W/m^2 .

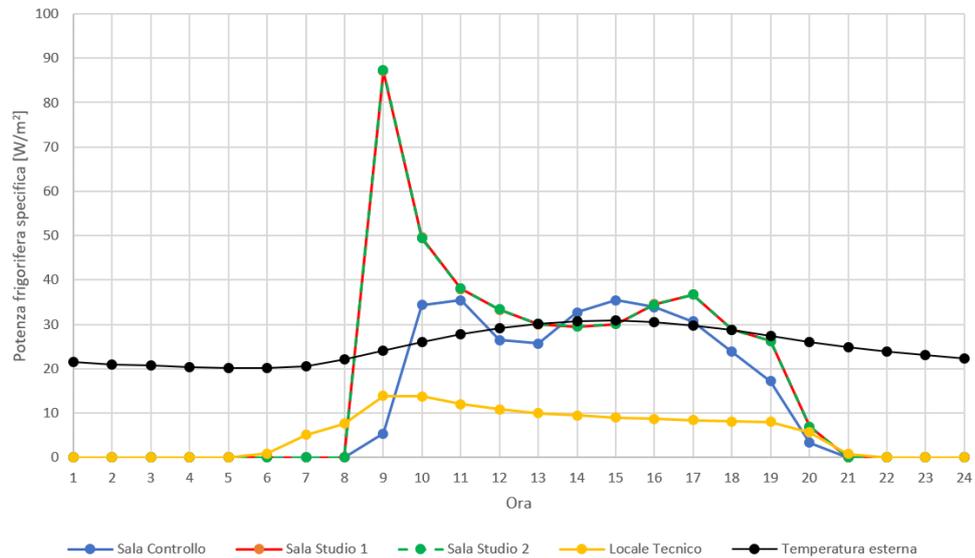


Figura 6.19: Andamento della potenza frigorifera specifica nel giorno di progetto estivo

Avendo impostato la temperatura di mandata al minimo possibile, in modo da evitare problemi di condensazione, l'unica modifica per poter sfruttare meglio il pavimento radiante, raggiungendo potenze maggiori, è ridurre la resistenza superficiale del pavimento.

Anche nel giorno di progetto estivo l'andamento della temperatura superficiale del pavimento rispetta i valori stabiliti dalle normative, con valori significativamente superiori al limite di 19 °C.

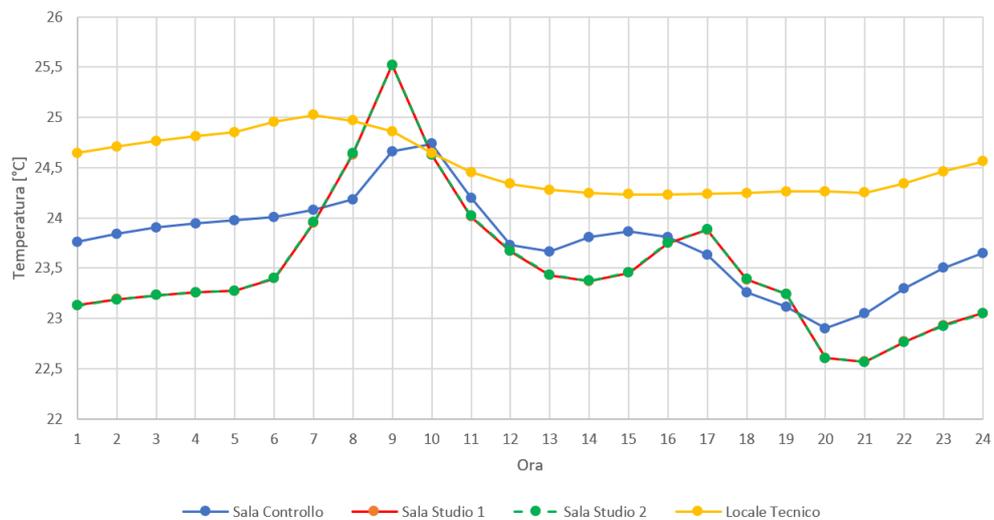


Figura 6.20: Andamento della temperatura superficiale del pavimento nel giorno di progetto estivo

Infine, nella figura 6.21 è rappresentata la potenza dell'impianto di ventilazione con relativo recupero di calore che serve entrambe le Sale Studio, ma l'andamento è del tutto analogo per la Sala Controllo. Si nota la differenza tra una componente costante, con un valore di 5 kW, che caratterizza la potenza termica scambiata dalle batterie di raffreddamento e deumidificazione e post-riscaldamento, ed una componente variabile nel tempo, che caratterizza la potenza termica del recuperatore di calore, e che segue l'andamento della differenza di temperatura tra i due flussi d'aria, uno alla temperatura esterna ed uno alla temperatura in ambiente. Infatti il recuperatore di calore si attiva quando la temperatura esterna è maggiore di quella interna, e cresce fino a raggiungere il picco di 2 kW alle 15:00 in corrispondenza della massima differenza di temperatura.

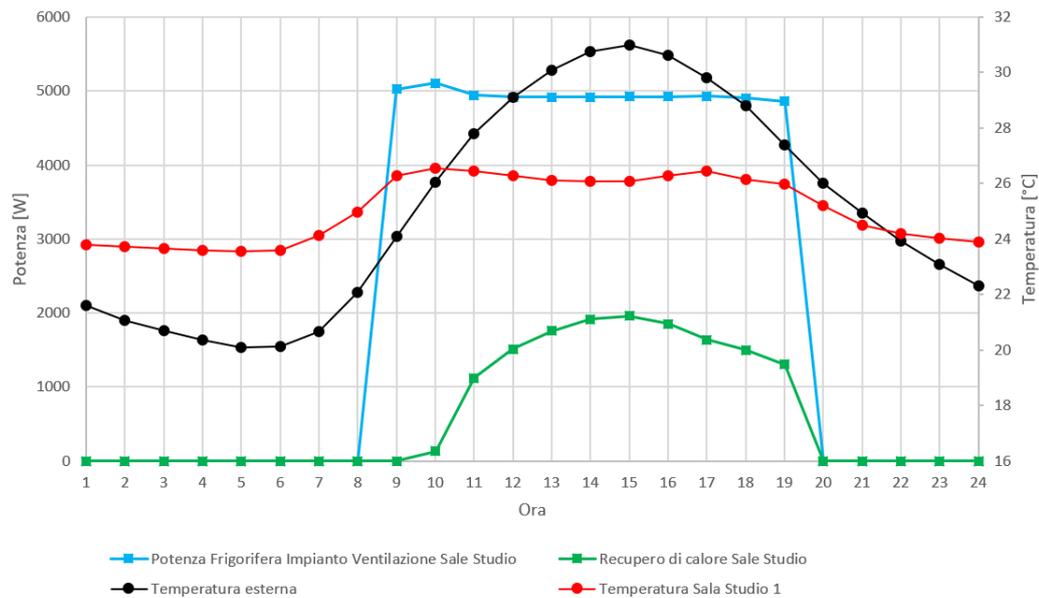


Figura 6.21: Andamento della potenza frigorifera dell’impianto di ventilazione e della temperatura interna della Sala Studio 1 nel giorno di progetto estivo

6.2.2 Andamento annuale

L’azione congiunta del sistema di ventilazione meccanica e del sistema radiante a pavimento permette di garantire adeguate condizioni termoigrometriche negli ambienti.

In riscaldamento, all’apertura, entrambi gli impianti entrano in funzione, per raggiungere il più rapidamente possibile la temperatura di setpoint di 20 °C. Come mostrato nei grafici 6.23 e 6.24, una volta raggiunta la temperatura, il pavimento radiante si spegne, mentre il sistema di ventilazione continua ad immettere aria, per il rinnovo, a 16 °C. Tuttavia gli elevati apporti interni fanno sì che la temperatura superi quella di setpoint fino ad arrivare a circa 24 °C. L’andamento giornaliero della temperatura è mostrato nel grafico 6.26. Non è possibile ridurre ulteriormente la temperatura di immissione dell’aria perchè causerebbe un discomfort locale. Oltre alla temperatura, il sistema di ventilazione controlla anche l’umidità relativa. Come si vede dal grafico 6.25, l’umidità relativa nelle ore di occupazione si mantiene vicino al valore desiderato del 50%.

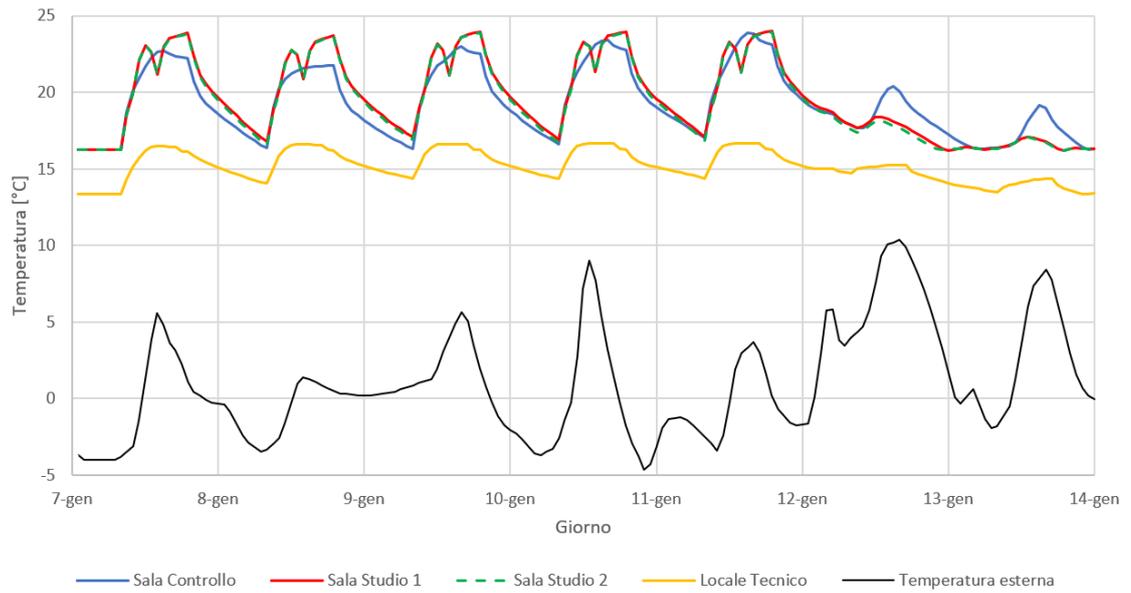


Figura 6.22: Andamento della temperatura nella settimana dal 07/01 al 13/01

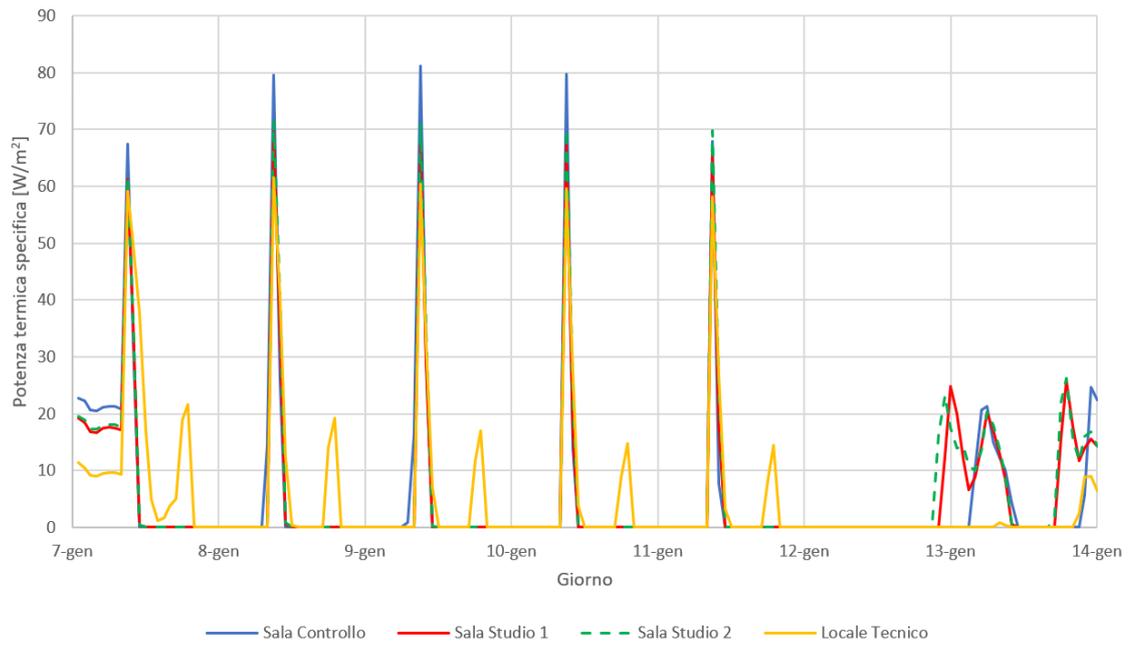


Figura 6.23: Andamento della potenza termica specifica nella settimana dal 07/01 al 13/01

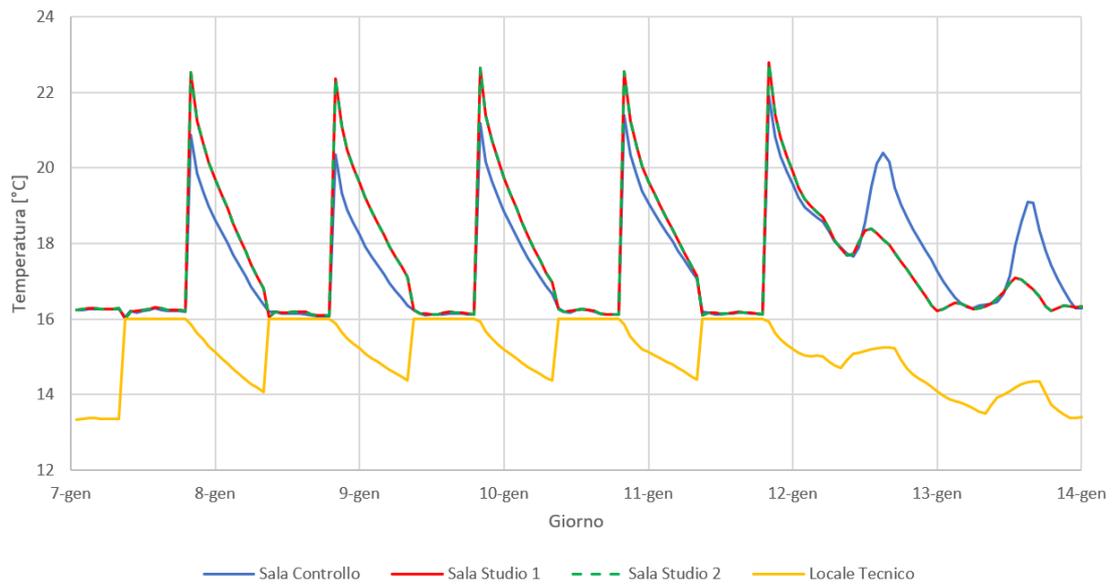


Figura 6.24: Andamento della temperatura di immissione dell'aria nella settimana dal 07/01 al 13/01

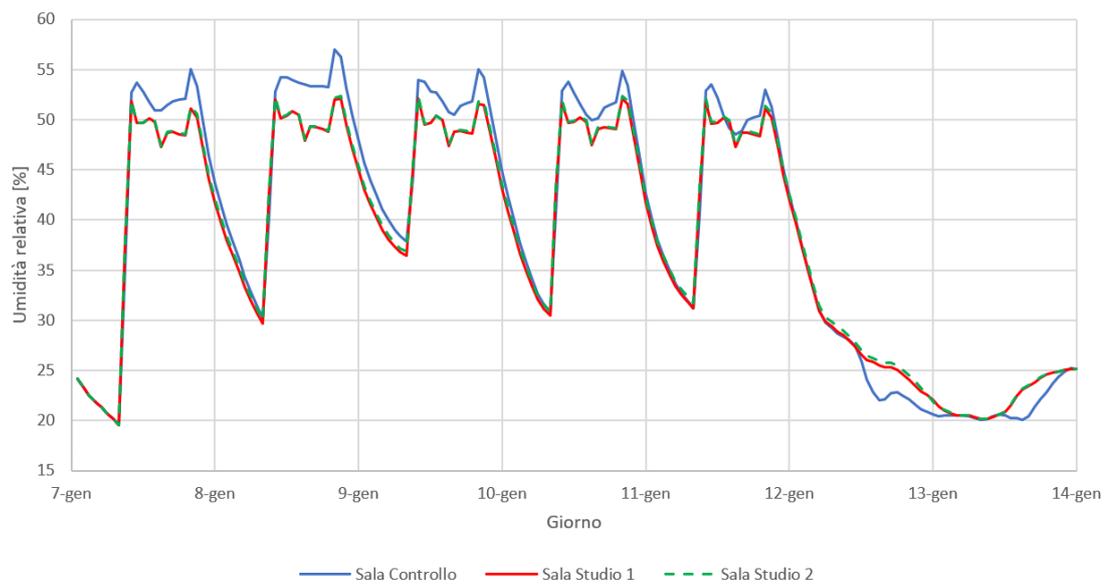


Figura 6.25: Andamento dell'umidità relativa nella settimana dal 07/01 al 13/01

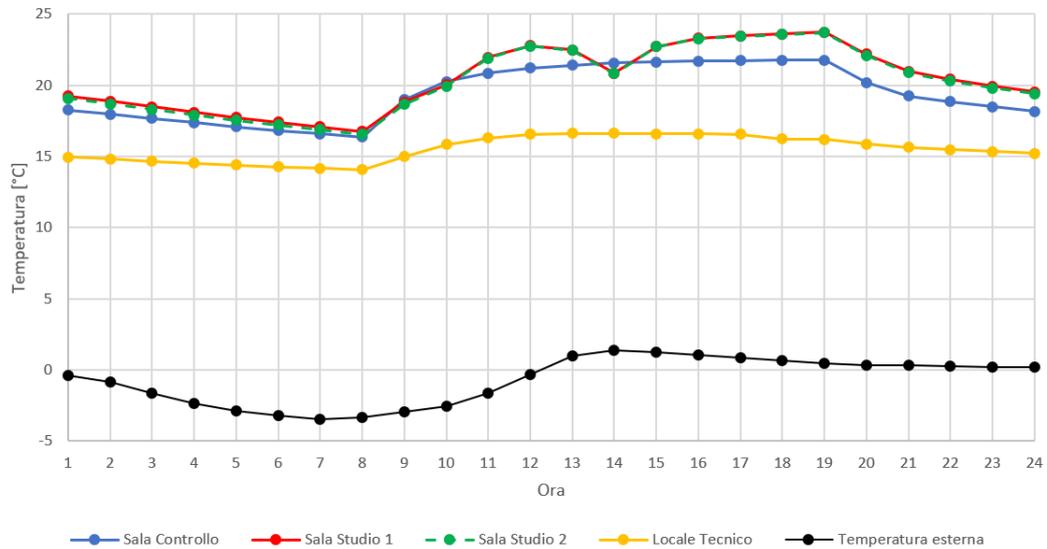


Figura 6.26: Andamento della temperatura il giorno 8 gennaio

In raffrescamento, il funzionamento degli impianti di climatizzazione e ventilazione è mostrato nei grafici 6.28 e 6.29. Sia l'impianto di ventilazione che il pavimento radiante sono attivi durante tutta la giornata per neutralizzare i carichi sensibile e latente.

Come si vede più in dettaglio nel grafico 6.31, la temperatura è mantenuta stabile intorno ai 26 °C nella Sala Controllo, mentre presenta delle oscillazioni nelle Sale Studio a causa dell'andamento variabile dell'occupazione. In particolare durante la pausa pranzo, quando l'occupazione è ridotta a tre persone, la temperatura raggiunge i 24 °C. Questo perchè l'impianto di ventilazione simulato è a portata costante e continua ad immettere aria a 18 °C come se l'occupazione fosse massima. Il controllo dell'umidità relativa è meno efficiente del caso invernale ma comunque valido. Dal grafico 6.30 si può osservare come l'umidità relativa, durante le ore di occupazione, si attesti su valori poco superiori al setpoint prefissato del 50%, senza mai superare il 60%.

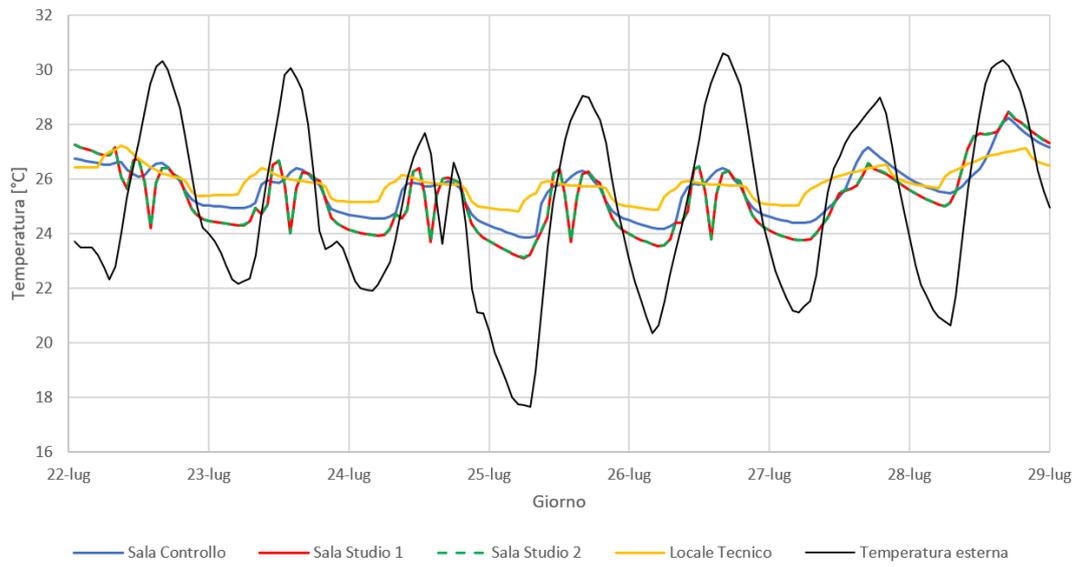


Figura 6.27: Andamento della temperatura nella settimana dal 22/07 al 28/07

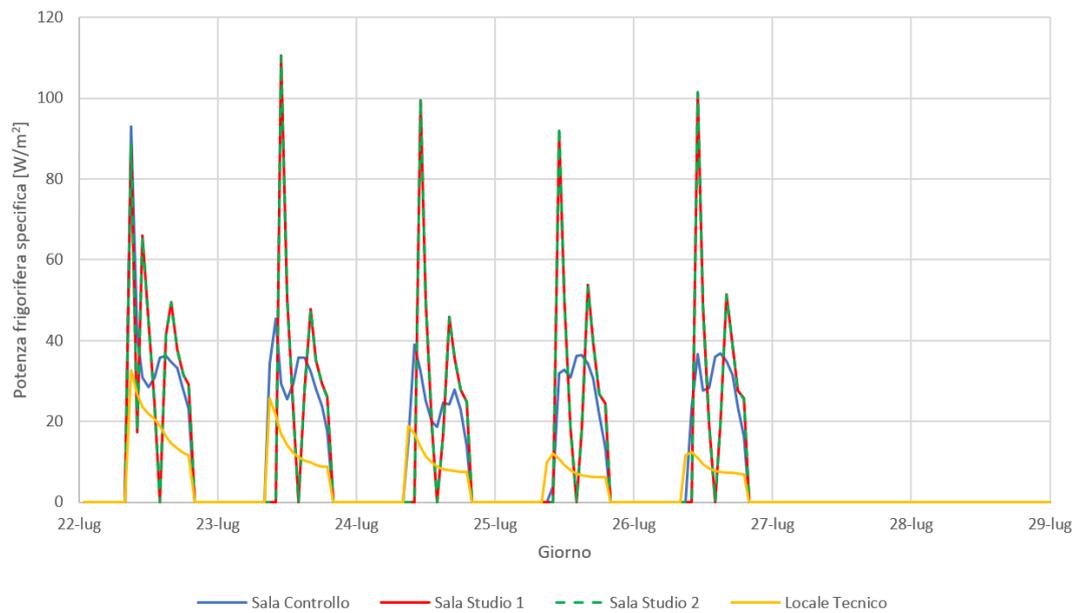


Figura 6.28: Andamento della potenza frigorifera specifica nella settimana dal 22/07 al 28/07

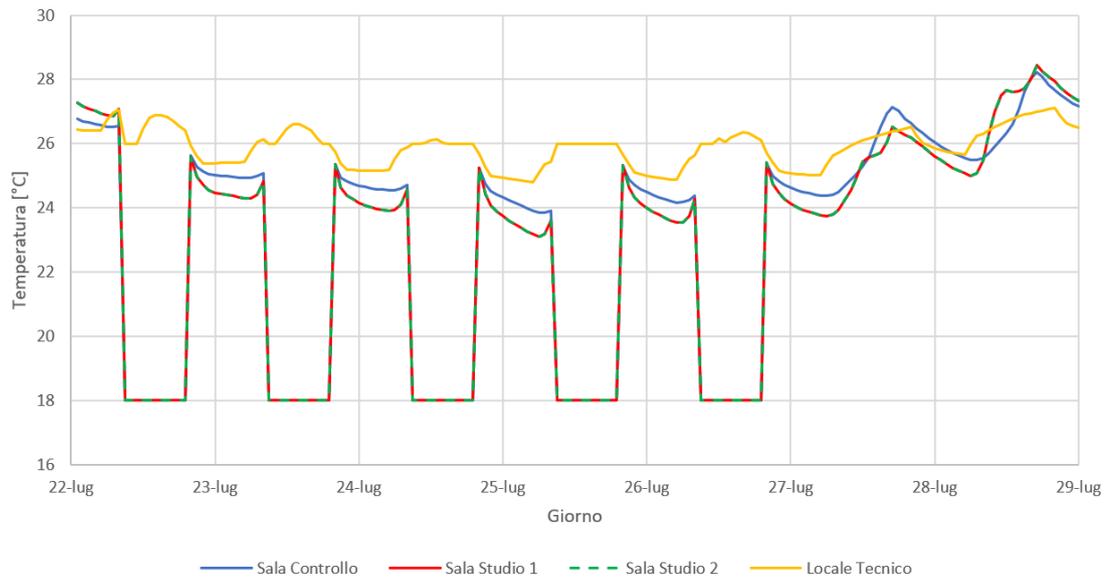


Figura 6.29: Andamento della temperatura di immissione dell'aria nella settimana dal 22/07 al 28/07

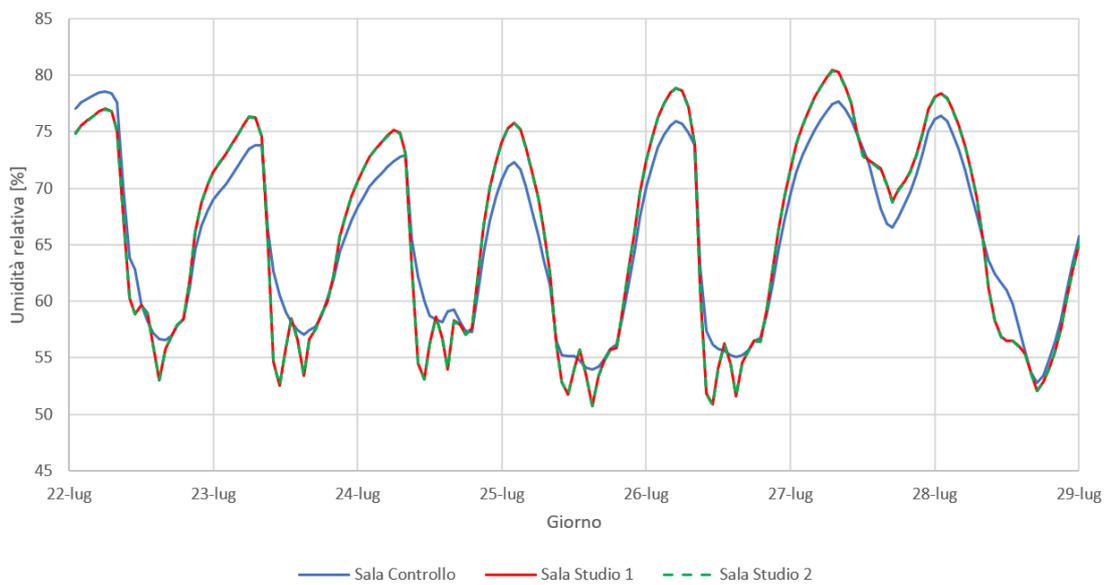


Figura 6.30: Andamento dell'umidità relativa nella settimana dal 22/07 al 28/07

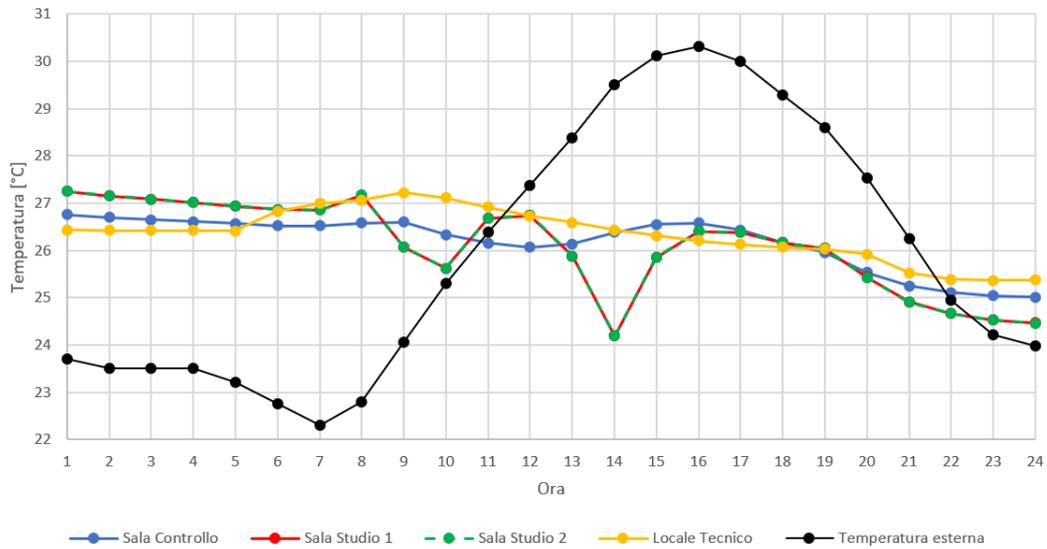


Figura 6.31: Andamento della temperatura il giorno 22 luglio

Con l'integrazione di un sistema di ventilazione meccanica, i consumi dell'impianto radiante a pavimento nella stagione di riscaldamento si sono dimezzati rispetto al caso con ventilazione naturale. Mentre prima infatti, il pavimento radiante era in funzione per tutta la giornata e doveva far fronte all'ulteriore carico causato dalla ventilazione, adesso il sistema radiante è attivato solamente nelle prime ore della giornata e contribuisce al raggiungimento della temperatura di setpoint.

Anche in raffrescamento l'energia spesa dal sistema radiante ha registrato una riduzione di circa il 20% rispetto al caso analizzato in precedenza. Tuttavia, non può essere fatto un reale confronto in quanto le condizioni termoigrometriche garantite in ambiente sono molto diverse.

Luglio è il mese con la maggior richiesta di energia, pari a 653 kWh, seguito da dicembre con 470 kWh.

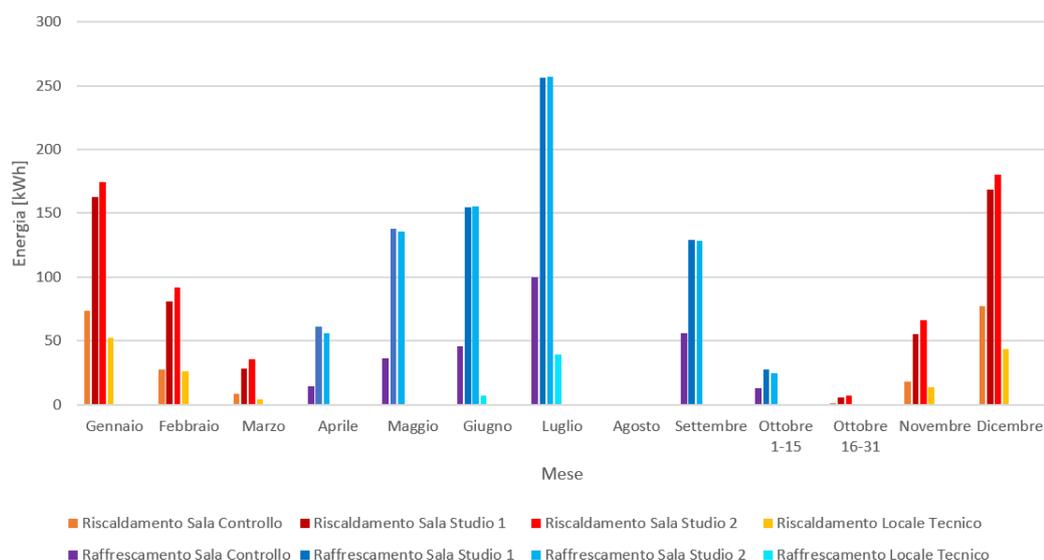


Figura 6.32: Consumi mensili del sistema radiante a pavimento

I due grafici successivi possono essere considerati complementari e mostrano i consumi relativi all'impianto di ventilazione e la quantità di energia termica recuperata dal recuperatore di calore.

Durante il funzionamento in riscaldamento, il recuperatore di calore è in grado da solo di soddisfare il fabbisogno di energia, per mantenere la temperatura di immissione dell'aria a 16 °C. La quantità di energia termica recuperata durante il periodo di riscaldamento è pari a 3831 kWh, mentre quella spesa è di 37 kWh, pari all'1% del totale. Questo dimostra quanto sia utile e vantaggioso l'impiego del recuperatore di calore nell'impianto di ventilazione meccanica.

In raffrescamento il risparmio è minore ma comunque significativo. Questo è dovuto al fatto che le condizioni necessarie per il funzionamento del recuperatore di calore si verificano meno frequentemente. Infatti, le ore in cui la temperatura esterna supera quella interna sono limitate, solo 123 su 1320, circa il 9%, e quando questo accade, la ridotta differenza di temperatura non permette un grande scambio di energia termica, necessaria invece per mantenere la temperatura di immissione a 18 °C. L'energia consumata dall'impianto di ventilazione nel periodo di raffrescamento è pari a 3134 kWh, mentre quella recuperata è pari a 697 kWh, circa il 18% del totale.

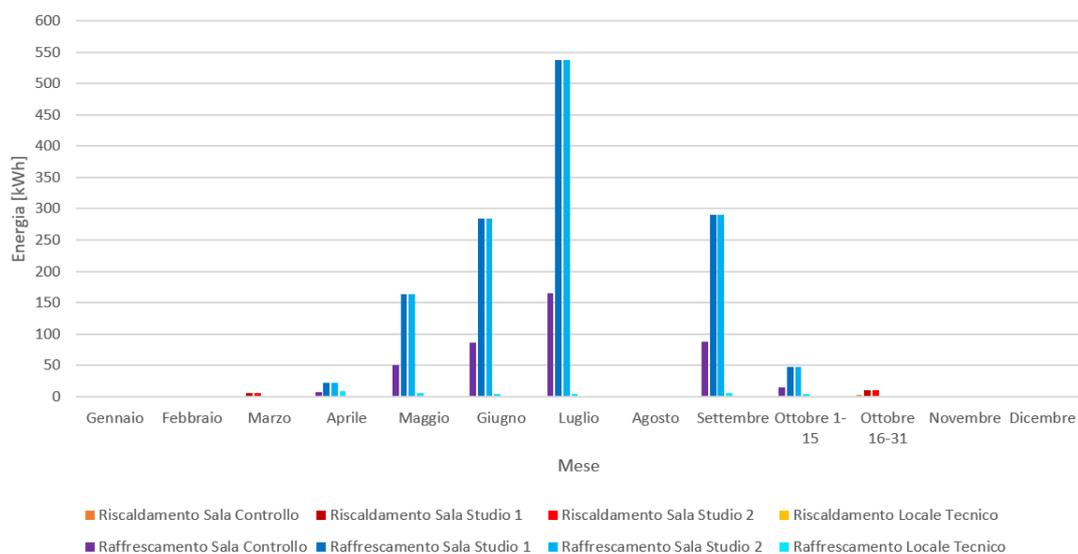


Figura 6.33: Consumi mensili del sistema di ventilazione meccanica

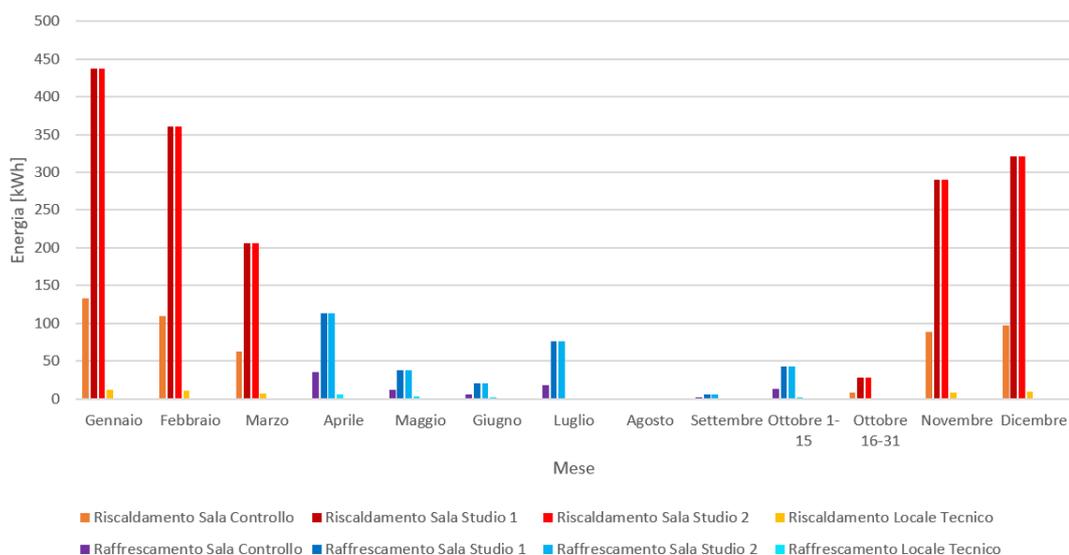


Figura 6.34: Andamento mensile dell'energia recuperata dal recuperatore di calore

Infine, è interessante notare durante il funzionamento in raffrescamento, come varia la quota delle componenti sensibile e latente, con quest'ultima che, dall'essere nulla ad aprile, cresce fino a raggiungere valori massimi prossimi al 40% nei mesi più caldi.

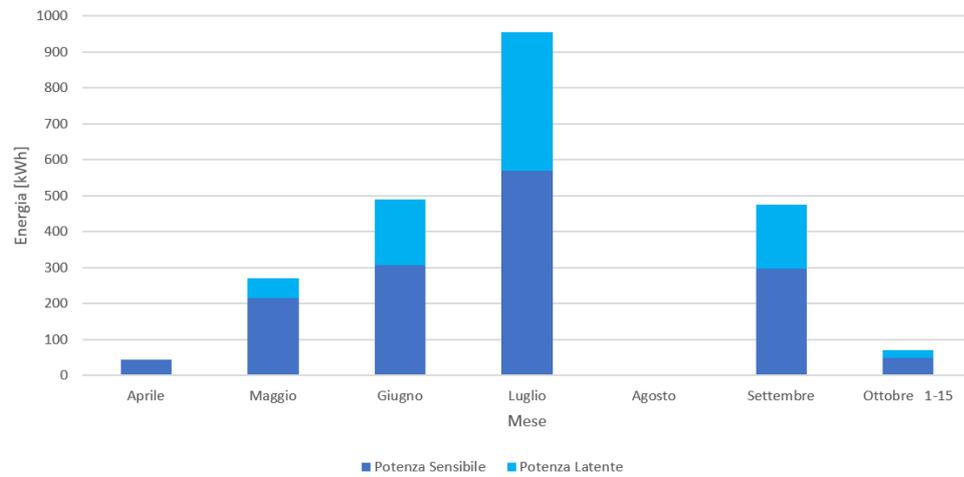


Figura 6.35: Contributo sensibile e latente dell'impianto di ventilazione in raffrescamento nelle Sale Studio

Tabella 6.4: Fabbisogno di energia per il caso con ventilazione meccanica

	Sala Controllo	Sala Studio 1	Sala Studio 2	Locale Tecnico	Totale
Fabbisogno per riscaldamento pavimento radiante [kWh]	206	502	555	140	1403
Fabbisogno per riscaldamento ventilazione meccanica [kWh]	4.6	15.5	15.5	1.3	37
Fabbisogno totale per riscaldamento specifico [kWh/m²]	12.1	13.1	14.5	8.1	12.7
Fabbisogno per raffrescamento pavimento radiante [kWh]	266	767	757	46	1838
Fabbisogno per raffrescamento ventilazione meccanica [kWh]	409	1347	1347	30	3134
Fabbisogno totale per raffrescamento specifico [kWh/m²]	38.9	53.6	53.4	4.4	43.8

Osservando i consumi finali totali degli impianti di ventilazione e climatizzazione, si nota come per il riscaldamento, il fabbisogno specifico si è dimezzato, ed è pari a $12.7 \text{ kWh}/m^2$, inferiore rispetto al limite di $15 \text{ kWh}/m^2$ imposto dal Passivhaus Institute. La quasi totalità del fabbisogno è dovuta al pavimento radiante, in quanto l'energia richiesta dall'impianto di ventilazione è fornita dal recuperatore di calore. Il fabbisogno di raffrescamento è invece notevolmente aumentato per permettere il mantenimento delle condizioni termoigrometriche desiderate. Nonostante l'utilizzo del recuperatore di calore, il fabbisogno dell'impianto di ventilazione è quasi doppio rispetto a quello del pavimento radiante. Il fabbisogno specifico è di $43.8 \text{ kWh}/m^2$, di cui la quota principale è costituita dalle Sale Studio.

Capitolo 7

Conclusioni

La prima parte di questa tesi ha evidenziato la necessità sempre maggiore di realizzare edifici ad alta efficienza energetica alimentati con energie rinnovabili. I concetti teorici sono stati poi applicati all'edificio in esame. L'obiettivo iniziale di progettare una soluzione impiantistica in grado di garantire condizioni termoi-grometriche e di qualità dell'aria adeguate per gli occupanti ed ottenere al tempo stesso un risparmio energetico è stato raggiunto.

Un aspetto importante è l'integrazione tra gli impianti di climatizzazione e ventilazione. I due impianti infatti funzionano in modo complementare. Il sistema di ventilazione con recupero del calore opera in maniera continua per garantire il ricambio d'aria e contribuisce a ridurre i carichi termici, mentre il pavimento radiante a tubi capillari viene attivato per neutralizzare i carichi di picco, che in inverno corrispondono alle prime ore della giornata ed in estate alle ore con la massima occupazione.

Fondamentale è l'utilizzo del recuperatore di calore ai fini del risparmio energetico. L'energia termica richiesta dall'impianto di ventilazione durante il funzionamento in riscaldamento è fornita grazie esclusivamente al recupero del calore. Questo ha permesso di portare il fabbisogno annuo specifico per riscaldamento a $12.7 \text{ kWh}/m^2$, inferiore al limite di $15 \text{ kWh}/m^2$ imposto dal Passivhaus Institute.

Seppur minore, il recuperatore di calore garantisce un risparmio energetico anche durante il funzionamento in raffrescamento. Tuttavia gli elevati apporti interni fanno sì che la richiesta di energia sia molto maggiore rispetto al riscaldamento e

pari a 43.8 kWh/m^2 . È necessario valutare se la pompa di calore che si ha intenzione di installare, alimentata dall'impianto fotovoltaico, è in grado di soddisfare il fabbisogno di energia, considerando che nei mesi estivi la radiazione solare e quindi l'energia elettrica prodotta dai pannelli fotovoltaici è maggiore.

In ogni caso si può pensare di introdurre delle piccole modifiche all'edificio. Per prima cosa si potrebbe cambiare lo strato superficiale del pavimento per ridurre la resistenza termica. Così facendo si può decidere di aumentare la temperatura di mandata dell'acqua nel pavimento radiante o la temperatura di immissione dell'aria in ambiente per aumentare il risparmio energetico. Inoltre, per ridurre la radiazione solare possono essere utilizzate delle schermature. Infine, attraverso un'analisi più approfondita sull'impianto di illuminazione, si può verificare quando è davvero necessario tenerlo acceso ed ottenere così sia una riduzione del carico di raffrescamento che un risparmio di energia elettrica.

Appendice A

Recuperatori di calore

A.1 Zehnder

	Type
Air volume m ³ /s	m ³ /s
Air volume m ³ /h	m ³ /h
External static pressure (combined with cooler, preheater and post-heater)	Pa
Max. power capacity (excl. cooler, preheater and post-heater)	kW
Voltage	VAC
Max. power consumption (excl. cooler, preheater and post-heater)	A
Frequency	Hz
Cos π	-
Protection	Fuses
HEAT RECOVERY	
- Supply air	°C/RH
- Exhaust air	°C/RH
- Total heat-recovery efficiency	%
- Total heat-recovery efficiency according to NEN 5138:2004	%

COLD RECOVERY

- Supply air	°C/RH
- Exhaust air	°C/RH
- Thermal efficiency (sensible output)	%

PREHEATER

Air volume	m ³ /s
Air volume	m ³ /h
- Water/glycol temperature	°C/°C
- Air temperature	°C/°C
- Heating capacity	kW
- Water-side pressure loss	kPa
- Water-side connection	DN

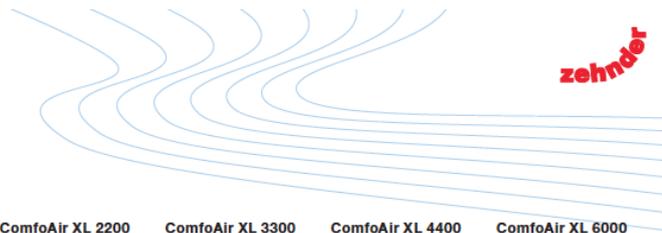
POST-HEATER

Air volume	m ³ /s
Air volume	m ³ /h
- Water temperature	°C/°C
- Blow-in temperature	°C/°C
- Heating capacity	kW
- Water-side pressure loss	kPa
- Water-side connection	DN

COOLER

Air volume	m ³ /s
Air volume	m ³ /h
- Water temperature	°C/°C
- Blow-in temperature	°C
- Heating capacity	kW
- Water-side pressure loss	kPa
- Water-side connection	DN

A – Recuperatori di calore



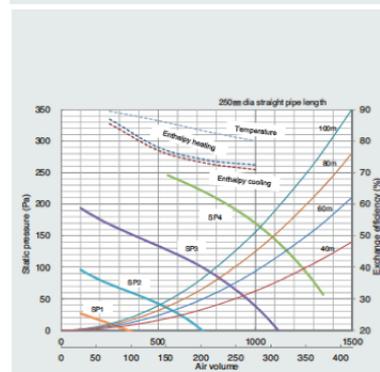
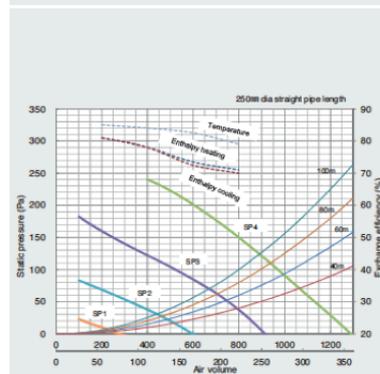
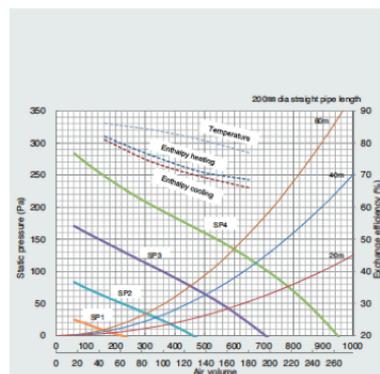
ComfoAir XL 800	ComfoAir XL 1500	ComfoAir XL 2200	ComfoAir XL 3300	ComfoAir XL 4400	ComfoAir XL 6000
0.22	0.42	0.56	0.92	1.22	1.67
800	1500	2000	3300	4400	6000
430	650	340	450	350	230
0.9	1.7	1.6	2.7	2.8	4.1
1~ 230	1~ 230	1~ 230	1~ 230	1~ 230	3~ 400
5.4	6.9	6.8	11.5	12.2	6.4
50/60	50/60	50/60	50/60	50/60	50/60
0.67	0.98	0.99	1.00	1.00	1.00
C (10A)	C (10A)	C (10A)	C (16A)	C (16A)	C (10A)
-10° / 90%	-10° / 90%	-10° / 90%	-10° / 90%	-10° / 90%	-10° / 90%
21° / 55%	21° / 55%	21° / 55%	21° / 55%	21° / 55%	21° / 55%
90,0	90,2	89,9	89,8	89,9	89,8
79,8	80,1	79,8	79,6	79,8	79,6
28° / 60%	28° / 60%	28° / 60%	28° / 60%	28° / 60%	28° / 60%
24° / 55%	24° / 55%	24° / 55%	24° / 55%	24° / 55%	24° / 55%
79,3	79,6	79,2	79,2	78,9	79,2
0,22	0,42	0,56	0,92	1,22	1,67
800	1500	2000	3300	4400	6000
60 / 40	60 / 40	60 / 40	60 / 40	60 / 40	60 / 40
-20 / 0	-20 / 0	-20 / 0	-20 / 0	-20 / 0	-20 / 0
5,39	10,1	13,46	22,22	29,62	40,39
4,7	10,4	19,3	14,7	16,2	18,4
25	25	25	25	25	25
0,22	0,42	0,56	0,92	1,22	1,67
800	1500	2000	3300	4400	6000
60 / 40	60 / 40	60 / 40	60 / 40	60 / 40	60 / 40
22	22	22	22	22	22
1,4	2,57	3,5	5,78	7,7	10,5
2,0	9,2	15,9	8,1	6,2	6,1
15	15	15	25	25	25
0,22	0,42	0,56	0,92	1,22	1,67
800	1500	2000	3300	4400	6000
6 / 12	6 / 12	6 / 12	6 / 12	6 / 12	6 / 12
16	16	16	16	16	16
4,8	9,1	12,1	20,5	26,6	36,3
13,8	13,2	19	23,8	23,3	23
25	25	25	25	32	40

A.2 Mitsubishi

MODELLO		LGH-65RVX-E			
Alimentazione	V/Fase/Hz	220-240 / MONOFASE /50			
Velocità della ventola		SP4	SP3	SP2	SP1
Intensità corrente	A	1,65-1,72	0,90-0,86	0,39-0,38	0,15-0,16
Potenza assorbita	W	252-262	131	49-47	15-17
Volume d'aria trattato	m³/h	650	488	325	163
	L/s	180,6	135,4	90,3	45,1
Pressione statica esterna	mmH ₂ O	12,24	6,93	3,06	0,82
	Pa	120	68	30	8
Efficienza di scambio termico sensibile	%	77,0	81,0	84,0	86,0
	Raffred. %	66,0	69,5	74,0	81,0
Efficienza di scambio entalpico	%	68,5	71,0	76,0	82,0
	Riscald. %				
Livello pressione sonora	dB(A)	34,5-35,5	29	22	18
Nr. e diametro canali	mm	4 x 200			
Peso	kg	38			
Dimensioni	AxLxP	404x954x908			
	mm				
Campo di funzionamento garantito (funzionamento continuo)*	T. ext	°C	-10 ~ +40		
	UR ext max	%	80		
	T. int max	°C	40		
	UR int max	%	80		

MODELLO		LGH-80RVX-E			
Alimentazione	V/Fase/Hz	220-240 / MONOFASE /50			
Velocità della ventola		SP4	SP3	SP2	SP1
Intensità corrente	A	1,82-1,97	0,83-0,86	0,36-0,40	0,15-0,16
Potenza assorbita	W	335-340	151	60-64	18-20
Volume d'aria trattato	m³/h	800	600	400	200
	L/s	222,2	166,7	111,1	55,6
Pressione statica esterna	mmH ₂ O	15,30	8,67	3,82	1,02
	Pa	150	85	37,5	10
Efficienza di scambio termico sensibile	%	79,0	82,5	84,0	85,0
	Raffred. %	70,0	72,5	78,0	81,0
Efficienza di scambio entalpico	%	71,0	73,5	78,0	81,0
	Riscald. %				
Livello pressione sonora	dB(A)	34,5-36,0	30,0	23	18
Nr. e diametro canali	mm	4 x 250			
Peso	kg	48			
Dimensioni	AxLxP	404x1004x1144			
	mm				
Campo di funzionamento garantito (funzionamento continuo)*	T. ext	°C	-10 ~ +40		
	UR ext max	%	80		
	T. int max	°C	40		
	UR int max	%	80		

MODELLO		LGH-100RVX-E			
Alimentazione	V/Fase/Hz	220-240 / MONOFASE /50			
Velocità della ventola		SP4	SP3	SP2	SP1
Intensità corrente	A	2,50	1,20	0,50-0,51	0,17-0,19
Potenza assorbita	W	420	200	75	21
Volume d'aria trattato	m³/h	1000	750	500	250
	L/s	277,8	208,3	138,9	69,4
Pressione statica esterna	mmH ₂ O	17,34	9,75	4,33	1,08
	Pa	170	95,6	42,5	10,6
Efficienza di scambio termico sensibile	%	80,0	83,0	86,5	89,5
	Raffred. %	71,0	73,0	77,0	85,5
Efficienza di scambio entalpico	%	72,5	74,0	78,0	87,0
	Riscald. %				
Livello pressione sonora	dB(A)	37-38	31-32	23-24	18
Nr. e diametro canali	mm	4 x 250			
Peso	kg	54			
Dimensioni	AxLxP	404x1231x1144			
	mm				
Campo di funzionamento garantito (funzionamento continuo)*	T. ext	°C	-10 ~ +40		
	UR ext max	%	80		
	T. int max	°C	40		
	UR int max	%	80		



A.3 Vortice

Scheda Tecnica

CODICE 45400

VORT NRG 800 ECR

Recuperatori di calore rotativi ad alta efficienza equipaggiati di scambiatori rotativi



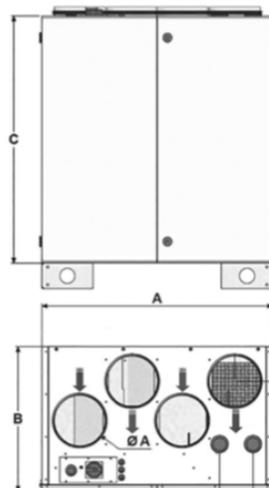
Certificazioni



DATI TECNICI E PRESTAZIONALI

Classe filtri aria di rinnovo	F7	Numero Fasi (Ph)	1
Classe filtri aria di ripresa	G4	Peso (Kg)	170
Classe Motore	B	Potenza Motore (W)	220K2
Corrente di protezione	4,1	Temp. ambiente max funzionamento continuativo (°C)	60
Diametro Nominale Condotto (mm)	315	Temperatura ambiente min funzionamento continuativo (°C)	-5
Frequenza (Hz)	50	Tensione (V)	230
Grado protezione motore IP	44	Portata max (m ³ /h)	1000
		Potenza sonora IRRADIATA Lw [dB(A)]	59

DIMENSIONI



Diametro bocchette $\varnothing A$ (mm)	250
Dimensione A (mm)	1020
Dimensione B (mm)	700
Dimensione C (mm)	1050

PER INFORMAZIONI:
 Servizio al Cliente: tel +39 02 90699395 premendo 1 dopo messaggio registrato (consulenza su prodotti e impianti)
 Pre & Post Vendita: fax +39 02 90699302
 Email prevendita: prevendita@vortice-italy.com

Scheda Tecnica

CODICE 45400

VORT NRG 800 ECR

Recuperatori di calore rotativi ad alta efficienza equipaggiati di scambiatori rotativi



DESCRIZIONE

- Struttura in profilati di alluminio arrotondati; distanziali integrati stampati in poliammide per tagliare i ponti termici; angolari in poliammide rinforzata; doppia pannellatura (sandwich), lamiera 10/10 (interne in acciaio zincato, esterne in acciaio pre-verniciato RAL 7035 rivestite con pellicole protettive); isolamento interno in lana minerale ad alta densità (M0) di spessore 25 mm.
- 2 Motori EC indipendentemente regolabili del tipo a rotore esterno, termicamente protetti, con alberi montati su cuscinetti a sfere, direttamente accoppiati a giranti centrifughe a pale rovesce; 2 velocità impostabili in fase di installazione.
- Scambiatore di calore aria-aria in alluminio del tipo rotativo la cui efficienza, certificata Eurovent, supera l' 80% secondo lo standard normativo EN 308.
- Bocche circolari con guarnizioni a labbro per garantire la tenuta dell'aria.
- 2 filtri, G4 in corrispondenza del condotto di estrazione e F7 posto nel flusso dell'aria di ricambio esterna entrambi montati a monte dei componenti interni, su guide per facilitarne l'estrazione.
- Pannelli dedicati, bloccabili mediante chiave di sicurezza, per l'accesso diretto ai filtri ed ai componenti interni.
- Pannello fisso, accessibile dalla parte superiore del prodotto, integra il sensore di prossimità con serratura, i potenziometri per la regolazione dei ventilatori, ed i passacavi.
- Staffe, integrate nella struttura, per il fissaggio a pavimento.
- Un pressostato dedicato monitora costantemente il flusso d'aria attraverso ciascun ventilatore, che segnala la presenza di eventuali guasti su un qualsiasi dispositivo esterno collegabile sul contatto pulito presente a bordo macchina.
- Un interruttore locale, montato sul pannello frontale, permette l'arresto dell'unità in caso di guasto.
- Potenziometri per la regolazione indipendente dei due ventilatori.

Appendice B

Pompe di calore

B.1 Mitsubishi



SPECIFICHE TECNICHE

MODELLO		PUHZ-SHW80VHA	PUHZ-SHW112VHA PUHZ-SHW112YHA	PUHZ-SHW140YHA	PUHZ-SHW230YKA2
Moduli idronici compatibili	Taglia	MEDIUM			LARGE
	Hydrobox modello "solo caldo" modello "reversibile"	EHSC-VM2C ERSC-VM2C	EHSC-VM2C ERSC-VM2C	EHSC-VM2C ERSC-VM2C	ERSE-MEC
	Hydotank modello "solo caldo" modello "reversibile"	EHST20C-VM2C ERST20C-VM2C	EHST20C-VM2C ERST20C-VM2C	EHST20C-VM2C ERST20C-VM2C	-
Alimentazione	Tensione/Freq./Fasi	230 / 50 / 1	230 / 50 / 1 400 / 50 / 3+N	400 / 50 / 3+N	400 / 50 / 3+N
Riscaldamento Stagione media					
Aria 7° / Acqua 35° Delta 5° C	Capacità Nom./Max.	8,00 / 12,36	11,20 / 14,82	14,00 / 16,42	23,00 / 27,95
	Potenza assorbita Nom./Max.	1,72 / 2,85	2,51 / 3,67	3,32 / 4,33	6,30 / 8,52
	COP Nom./Max.	4,65 / 4,34	4,46 / 3,79	4,22 / 3,79	3,65 / 3,28
Aria -7° / Acqua 35°	Capacità Nom./Max.	8,00 / 11,35	11,2 / 14,91	14,00 / 15,66	23,00 / 27,13
	Potenza assorbita Nom./Max.	2,56 / 4,00	3,94 / 5,87	5,43 / 6,42	8,07 / 11,16
	COP Nom./Max.	3,13 / 2,84	2,84 / 2,54	2,58 / 2,44	2,85 / 2,43
Temperatura acqua	Max	60	60	60	60
Bassa Temperatura acqua 35°C¹	RANK	A++	A++	A++	A++
	SCOP	4,44	4,29	4,21	4,21
	ηs	174	169	165	165
Media Temperatura acqua 55°C¹	RANK	A++	A++	A++	A++
	SCOP	3,4	3,31	3,27	3,28
	ηs	133	130	128	128
Produzione di ACS²	RANK (Profilo di carico ACS)	A (L)	A (L)	A (L)	-
	ηwh	103	103	103	-
Raffreddamento					
Aria 35° / Acqua 18° Delta 5° C	Capacità Nom./Max.	7,10 / 10,00	10,00 / 14,00	12,50 / 16,00	20,00 / 24,00
	Potenza assorbita Nom./Max.	1,57 / 2,11	2,11 / 3,70	2,93 / 4,95	5,63 / 9,06
	EER Nom./Max.	4,52 / 4,74	4,74 / 3,78	4,26 / 3,23	3,55 / 2,65
Temperatura acqua	Min	5	5	5	5
Unità esterna	Massima corrente assorbita	29,5	35 / 13	13	26
	Dimensioni A x L x P		1350x950x330(+30)		1338x1050x330(+30)
	Peso	120	120 / 134	134	148
	Pressione sonora	51	52	52	59
	Potenza sonora	69	70	70	75
Linee frigorifere	Diametri (gas/liquido)	15,88 / 9,52	15,88 / 9,52	15,88 / 9,52	25,4 / 12,7
	Lunghezza max (min)	75 (2)	75 (2)	75 (2)	80 (2)
	Dislivello max	30	30	30	30
Refrigerante	Tipo	R410A	R410A	R410A	R410A
Campo di funz. garantito	Riscaldamento	min/max	-28 / +21	-28 / +21	-28 / +21
	ACS	min/max	-28 / +35	-28 / +35	-28 / +35
	Raffreddamento	min/max	-10 / +46	-10 / +46	-10 / +46

Per le installazioni di Hydotank reversibile in ambienti in cui lo scarico libero della condensa può causare problemi di qualsiasi natura è necessario ordinare anche l'apposita base di raccolta e scarico condensa: PAC-DP01-E.

¹ In abbinamento a Moduli idronici reversibili

² In abbinamento a Ecodan Hydotank 200 I

B.2 Clivet

DATI TECNICI

ELFOEnergy Edge

(WSAN-XMi 21-81)



DATI TECNICI

Grandezze - WSAN-XMi		21	31	41	51	61	71	81	61	71	81
Unità per pannelli radianti											
A7/W35											
▶ Potenzialità termica	kW	4,64	6,55	8,64	10,4	12,1	14,8	16,4	12,3	14,1	16,3
Potenza assorbita totale	kW	0,97	1,45	2,01	2,23	2,63	3,42	4,01	2,72	3,24	3,89
COP (EN 14511:2013)	-	4,79	4,52	4,30	4,66	4,61	4,31	4,08	4,54	4,35	4,19
A2/W35											
▶ Potenzialità termica	kW	3,88	5,52	7,55	8,38	10,4	11,6	13,2	9,86	11,6	13,2
Potenza assorbita totale	kW	1,14	1,6	2,10	2,43	3,08	3,56	4,15	2,94	3,53	4,18
COP (EN 14511:2013)	-	3,39	3,45	3,60	3,45	3,36	3,26	3,19	3,35	3,28	3,16
A-7/W35											
▶ Potenzialità termica	kW	2,99	4,25	5,82	6,45	7,97	8,92	10,2	7,59	8,92	10,2
Potenza assorbita totale	kW	1,06	1,48	1,95	2,25	2,86	3,30	3,85	2,73	3,28	3,88
COP (EN 14511:2013)	-	2,82	2,87	2,99	2,87	2,79	2,71	2,65	2,78	2,72	2,63
A35/W18											
▶ Potenzialità frigorifera	kW	4,77	6,63	8,35	10,4	12,2	14,2	14,9	12,7	14,1	15,1
Potenza assorbita totale	kW	1,01	1,46	2,10	2,08	2,60	3,18	3,64	2,72	3,24	3,75
EER (EN 14511:2013)	-	4,72	4,53	3,97	5,00	4,70	4,46	4,10	4,67	4,34	4,03
Unità terminali											
A7/W45											
▶ Potenzialità termica	kW	4,72	6,72	9,19	10,2	12,6	14,1	16,1	12,0	14,1	16,1
Potenza assorbita totale	kW	1,43	2,01	2,63	3,04	3,86	4,45	5,22	3,68	4,43	5,24
COP (EN 14511:2013)	-	3,29	3,35	3,49	3,35	3,26	3,16	3,09	3,25	3,18	3,07
A2/W45											
▶ Potenzialità termica	kW	3,73	5,32	7,27	8,07	9,97	11,2	12,7	9,49	11,2	12,7
Potenza assorbita totale	kW	1,39	1,95	2,56	2,96	3,75	4,33	5,06	3,58	4,3	5,09
COP (EN 14511:2013)	-	2,68	2,73	2,85	2,73	2,66	2,58	2,52	2,65	2,59	2,50
A-7/W45											
▶ Potenzialità termica	kW	2,90	4,13	5,65	6,27	7,74	8,66	9,89	7,37	8,66	9,89
Potenza assorbita totale	kW	1,29	1,80	2,36	2,73	3,46	4,00	4,67	3,31	3,97	4,7
COP (EN 14511:2013)	-	2,25	2,30	2,39	2,30	2,23	2,17	2,12	2,23	2,18	2,10
A35/W7											
▶ Potenzialità frigorifera	kW	4,65	6,69	8,06	9,90	12,2	13,0	13,8	12,3	13,8	15,3
Potenza assorbita totale	kW	1,56	2,48	3,50	3,09	4,14	4,49	5,13	4,22	5,12	6,42
EER (EN 14511:2013)	-	2,98	2,70	2,30	3,20	2,95	2,89	2,68	2,91	2,70	2,38
ESEER	-	4,90	4,69	5,29	5,01	5,03	4,74	4,61	4,82	4,66	4,68
Radiatori											
A7/W55											
▶ Potenzialità termica	kW	4,61	6,57	8,98	9,97	12,3	13,8	15,7	11,7	13,8	15,7
Potenza assorbita totale	kW	1,73	2,42	3,18	3,68	4,67	5,39	6,29	4,46	5,35	6,33
COP (EN 14511:2013)	-	2,66	2,71	2,83	2,71	2,64	2,56	2,50	2,63	2,57	2,49
A2/W55											
▶ Potenzialità termica	kW	3,64	5,18	7,09	7,86	9,71	10,9	12,4	9,25	10,9	12,4
Potenza assorbita totale	kW	1,66	2,32	3,04	3,52	4,46	5,15	6,02	4,26	5,12	6,06
COP (EN 14511:2013)	-	2,20	2,24	2,33	2,24	2,18	2,11	2,06	2,17	2,12	2,05
Portata acqua (lato utilizzo)	(1) l/s	0,22	0,31	0,39	0,50	0,58	0,70	0,78	0,59	0,67	0,78
Prevalenza utile pompa	(1) kPa	61,5	48,8	36,9	53,1	41,5	25,5	15,5	40,3	29,5	16,0
Alimentazione standard	V	230/1/50					400/3/50+N				
Livello di Pressione Sonora (1m) unità esterna	dB(A)	49	51	53	52	55	58	58	55	58	58
Min temperatura aria in ingresso (W.B.)	°C	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20
Max temperatura acqua in uscita	°C	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60

Note

(1) A7/W35 acqua allo scambiatore interno 30/35°C; temperatura aria esterna 7°C DB/ 6°C WB.

Performances according to EN 14511:2013

A7/W35 acqua allo scambiatore interno 30/35°C; temperatura aria esterna 7°C DB/ 6°C WB.

A2/W35 acqua allo scambiatore interno 30/35°C; temperatura aria esterna 2°C DB/ 1,1°C WB.

A-7/W35 acqua allo scambiatore interno 30/35°C; temperatura aria esterna -7°C DB/ -8°C WB.

A7/W45 acqua allo scambiatore interno 40/45°C; temperatura aria esterna 7°C DB/ 6°C WB.

A2/W45 acqua allo scambiatore interno 40/45°C; temperatura aria esterna 2°C DB/ 1,1°C WB.

A-7/W45 acqua allo scambiatore interno 40/45°C; temperatura aria esterna -7°C DB/ -8°C WB.

A7/W55 acqua allo scambiatore interno 50/55°C; temperatura aria esterna 7°C DB/ 6°C WB.

A2/W55 acqua allo scambiatore interno 50/55°C; temperatura aria esterna 2°C DB/ 1,1°C WB.

A35/W18 acqua allo scambiatore interno 23/18°C; temperatura aria esterna 35°C.

A35/W7 acqua allo scambiatore interno 12/7°C; temperatura aria esterna 35°C.

B.3 EXRG

• AIRTRANSYS: dati tecnici

Modello		EASR-DC 8M	EASR-DC 12M	EASR-DC 22T	EASR-DC 33T				
1) Funzione Raffreddamento 35°C aria e 12/7°C acqua									
Potenza Frigorifera	kW	3,0	7,7	3,1	11,3	9,1	22,8	6,1	32,2
Potenza Assorbita Compressore	kW	0,6	2,0	0,6	3,1	2,1	7,2	1,4	10,9
Corrente Assorbita Compressore	A	3,1	9,9	3,0	14,9	3,4	11,5	2,2	17,5
Potenza Assorbita Ventilatori	kW	0,08	0,08	0,16	0,16	0,24	0,24	0,32	0,32
Corrente Assorbita Ventilatori	A	0,50	0,50	1,00	1,00	1,50	1,50	2,00	2,00
Potenza Assorbita Pompe	kW	0,07	0,07	0,07	0,07	0,31	0,31	0,31	0,31
EER	-	4,00	3,62	3,78	3,49	3,62	3,10	3,22	2,91
Portata d'Acqua UTENZA	kg/h	515	1322	525	1946	1564	3926	1056	5545
Prevalenza utile Acqua UTENZA	kPa	67,0	56,0	67,0	40,0	117,0	98,0	118,0	91,0
1a) Funzione Raffreddamento 35°C aria e 23/18°C acqua - UNI EN 14511									
Potenza Frigorifera	kW	4,0	10,4	4,0	15,8	12,4	31,9	12,8	44,5
Potenza Assorbita Compressore	kW	0,6	2,2	0,6	3,2	2,2	7,7	2,1	11,6
Corrente Assorbita Compressore	A	3,0	10,4	2,8	15,4	3,5	12,3	3,3	18,7
Potenza Assorbita Ventilatori	kW	0,08	0,08	0,16	0,16	0,24	0,24	0,32	0,32
Corrente Assorbita Ventilatori	A	0,50	0,50	1,00	1,00	1,50	1,50	2,00	2,00
Potenza Assorbita Pompe	kW	0,07	0,07	0,07	0,07	0,31	0,31	0,31	0,31
EER	-	5,43	4,70	5,20	4,65	5,02	4,07	5,23	3,76
Portata d'Acqua UTENZA	kg/h	680	1791	696	2721	2135	5493	2204	7663
Prevalenza utile Acqua UTENZA	kPa	67,0	53,0	67,0	14,0	117,0	74,0	115,0	57,0
2) Funzione ACS 50/55°C acqua e 30°C aria									
Potenza Termica	kW	4,0	11,3	4,0	16,8	13,0	36,7	13,0	51,6
Potenza Assorbita Compressore	kW	1,0	2,8	1,0	4,5	3,2	9,9	3,1	15,0
Corrente Assorbita Compressore	A	4,7	13,6	4,7	21,8	5,1	15,9	5,0	24,1
Potenza Assorbita Ventilatori	kW	0,08	0,08	0,16	0,16	0,24	0,24	0,32	0,32
Corrente Assorbita Ventilatori	A	0,50	0,50	1,00	1,00	1,50	1,50	2,00	2,00
Potenza Assorbita Pompe	kW	0,07	0,07	0,07	0,07	0,31	0,31	0,31	0,31
COP	-	3,73	3,91	3,44	3,56	3,73	3,62	3,73	3,35
Portata d'Acqua ACS	kg/h	687	1946	687	2893	2239	6320	2239	8886
Prevalenza utile Acqua ACS	kPa	65,0	38,0	65,0	10,0	112,0	60,0	115,0	27,0
4) Funzione Riscaldamento 40/45°C acqua e 7°C aria									
Potenza Termica	kW	2,9	7,8	3,0	11,9	9,6	25,8	9,6	35,9
Potenza Assorbita Compressore	kW	0,8	2,2	0,8	3,6	2,5	7,9	2,5	11,9
Corrente Assorbita Compressore	A	3,7	10,6	3,7	17,2	4,1	12,6	4,0	19,1
Potenza Assorbita Ventilatori	kW	0,08	0,08	0,16	0,16	0,24	0,24	0,32	0,32
Corrente Assorbita Ventilatori	A	0,50	0,50	1,00	1,00	1,50	1,50	2,00	2,00
Potenza Assorbita Pompe	kW	0,07	0,07	0,07	0,07	0,31	0,31	0,31	0,31
COP	-	3,30	3,42	3,04	3,20	3,32	3,20	3,29	2,98
Portata d'Acqua UTENZA	kg/h	499	1338	508	2049	1658	4443	1653	6182
Prevalenza utile Acqua UTENZA	kPa	67,0	55,0	66,0	35,0	115,0	92,0	115,0	81,0
4a) Funzione Riscaldamento 30/35°C acqua e 7°C aria - UNI EN 14511									
Potenza Termica	kW	3,1	8,1	3,1	12,4	10,0	26,2	10,0	36,3
Potenza Assorbita Compressore	kW	0,6	1,8	0,6	2,9	2,1	6,5	2,0	9,9
Corrente Assorbita Compressore	A	3,0	8,7	3,0	14,1	3,3	10,5	3,2	15,8
Potenza Assorbita Ventilatori	kW	0,08	0,08	0,16	0,16	0,24	0,24	0,32	0,32
Corrente Assorbita Ventilatori	A	0,50	0,50	1,00	1,00	1,50	1,50	2,00	2,00
Potenza Assorbita Pompe	kW	0,07	0,07	0,07	0,07	0,31	0,31	0,31	0,31
COP	-	4,22	4,32	3,83	4,02	4,09	3,91	4,05	3,62
Portata d'Acqua UTENZA	kg/h	529	1398	539	2135	1722	4512	1722	6251
Prevalenza utile Acqua UTENZA	kPa	67,0	54,0	66,0	32,0	115,0	92,0	115,0	80,0
5) Assorbimenti elettrici									
Alimentazione elettrica	V/Hz	230/1/50		230/1/50	400/3/50		400/3/50		
Potenza nominale (ventilatori a taglio di fase)	kW	3,2		4,7	10,1		15,1		
Potenza nominale (ventilatori EC)	kW	3,3		4,9	10,4		15,6		
FLA tot (ventilatori a taglio di fase)	A	18,1		20,6	20,9		30,7		
FLA tot (ventilatori EC)	A	18,4		21,2	21,9		32,0		
6) Emissioni sonore									
Lw potenza sonora unità interna	dBA	53		54	55		57		
Lp press. sonora (2m Q=2) int.	dBA	39		40	41		43		
Lw potenza sonora unità esterna	dBA	62		65	66		69		
Lp press. sonora (10m Q=2) est.	dBA	34		37	38		41		
7) Compressore									
Tipologia compressore		TWIN Rotary		TWIN Rotary	Scroll		Scroll		
Tecnologia motore elettrico		BLDC		BLDC	BLDC		BLDC		
Regime compressore min/max	Hz	30/80		30/110	20/80		20/120		

NB.: Dati soggetti a possibili modifiche.

NOTA: Le caratteristiche prestazionali sono indicate in relazione a condizioni climatiche esterne di +7°C invernali e +35°C estive. Per ogni ulteriore informazione rivolgersi all'Ufficio Tecnico EXRG.

Bibliografia

- [1] ASHRAE. *Heating, Ventilating, and Air-conditioning Systems and Equipment*. 2000.
- [2] BEKA. *K.S15 Type capillary tube mat*. 2018. URL: <https://www.beka-klima.de/en/product/ks15-type-capillary-tube-mat/>.
- [3] Clivet. *Elfo Energy Edge*. 2018. URL: <https://www.clivet.com>.
- [4] Domus. *Casa GG*. 2014. URL: https://www.domusweb.it/it/architettura/2014/06/06/casa_gg.html.
- [5] eco>Home. *eco>Home*. 2018. URL: <http://www.eco-home.it>.
- [6] Mitsubishi Electric. *LOSSNAY – I ventilatori a recupero di calore*. 2018. URL: <https://climatizzazione.mitsubishielectric.it/it/>.
- [7] Mitsubishi Electric. *Unità esterne splittate Ecodan e Zubadan*. 2018. URL: <https://climatizzazione.mitsubishielectric.it/it/>.
- [8] Dipartimento Unità per l'Efficienza Energetica. *Rapporto Annuale Efficienza Energetica*. Rapporto tecnico. ENEA, 2018.
- [9] Alter Energia. *Impianto radiante a tubi capillari*. 2018. URL: http://www.alterenergia.it/Radiante_capillari.htm.
- [10] U.S. Department of Energy. *Solar Decathlon*. 2018. URL: <https://www.solardecathlon.gov>.
- [11] espazium.ch. *Il nuovo rifugio di Tracuit, Zinal*. 2015. URL: <https://www.espazium.ch/il-nuovo-rifugio-di-tracuit-zinal-vs>.
- [12] EXRG. *Linea Aerotermica AIRTRANSYS*. 2018. URL: <http://www.exrg.it>.

- [13] Marco Filippi; Enrico Fabrizio. *Introduzione alla Simulazione Termoenergetica Dinamica degli Edifici*. 2012.
- [14] Stefano Faganello. *L'aggregato compatto: un nico elemento impiantistico per gli NZEB*. 2015. URL: <https://www.edicomeventi.com/DEM/EXRG-2/DEM.php?download=EXRG-Case-history.pdf>.
- [15] Chiara Galleri. «Analisi della generazione fotovoltaica e dei carichi termici ed elettrici di un modulo abitativo ad alta efficienza energetica». Tesi di laurea mag. Politecnico di Torino, 2018.
- [16] Tommaso Gasco. «Analisi della Generazione fotovoltaica e termo-energetica di un edificio ad alta efficienza energetica». Tesi di laurea mag. Politecnico di Torino, 2018.
- [17] InfoBuildEnergia. *zeroHouse*. 2008. URL: <https://www.infobuildenergia.it/progetti/zerohouse-91.html>.
- [18] ITHOUSE. *IT HOUSE*. 2012. URL: <http://tkithouse.com/ithouse/>.
- [19] Kodasema. *KODA Light Standard Equipment*. 2018. URL: http://www.kodasema.com/wp-content/uploads/2018/10/181115_KODA-Light-standard-equipment.pdf.
- [20] Marco Masoero. *Design of HVAC systems - Refrigeration units and heat pumps*. 2017.
- [21] Rinnovabili.it. *Casa Capriata, ecorifugio doc*. 2017. URL: <http://www.rinnovabili.it/greenbuilding/casa-capriata-ecorifugio-doc/>.
- [22] Rinnovabili.it. *Ecorifugi: il Monte Rosa-Hütte è un esperimento riuscito*. 2015. URL: <http://www.rinnovabili.it/greenbuilding/eco-rifugio-neue-monte-rosa-hutte-876/>.
- [23] Rinnovabili.it. *Ecorifugi: Kezmarske Hut, il cubo di ghiaccio che produce energia*. 2015. URL: <http://www.rinnovabili.it/greenbuilding/eco-rifugio-kezmarske-hut-cubo-ghiaccio-produce-energia-876/>.
- [24] Rinnovabili.it. *Il green building sul tetto del mondo*. 2013. URL: <http://www.rinnovabili.it/greenbuilding/green-building-refuge-du-gouter-589/>.

BIBLIOGRAFIA

- [25] Luca Stefanutti. *Impianti per gli edifici sostenibili: guida ASHRAE alla progettazione, costruzione e gestione*. 2009.
- [26] Luca Stefanutti. *Manuale degli impianti di climatizzazione*. 2008.
- [27] Vortice. *VORT NRG ECR*. 2018. URL: <http://www.vortice.it/it/>.
- [28] Zehnder. *Zehnder ComfoAir XL*. 2018. URL: <https://www.zehnder.it>.