Politecnico di Torino

Corso di Laurea in Ingegneria Energetica e Nucleare

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

A.A 2021-2022

STUDIO DI SOSTENIBILITA' TECNICO-ECONOMICA DI UN IMPIANTO A POMPE DI CALORE

Applicazione a caso studio: sostituzione del sistema di generazione di un edificio del settore terziario situato a Milano

CANDIDATO: STEFANO PIVI

RELATORE: Prof. Marco Carlo Masoero

Co-relatore: Ing. Retano Boffa

Sommario

1. Introduzione 2
2. Il fabbricato: dati di input e risultati 5
   2.1. Dati climatici e di input 9
   2.2. I componenti dell'edificio 11
   2.3. Zone, locali e apporti 13
   2.4. I carichi termici e i fabbisogni di energia dell'edificio 17
3. Il sistema impiantistico esistente 24
   3.1. Impianto idronico 26
      3.1.1. Sistema di generazione 26
      3.1.2. Sistema di distribuzione (e cenni su quello di regolazione) 31
      3.1.3. Sistema di emissione 35
   3.2. Impianto aeraulico 37
4. Attuazione delle modifiche all'impianto e fattibilità economica 42
   4.1. Presupposti teorici della pompa di calore 42
   4.2. Modifiche al sistema impiantistico 47
   4.3. Fattibilità economica 58

Conclusioni 66

Appendice A 67
   A.1 – Componenti dell'involucro edilizio 67
   A.2 – Planimetrie 91
   A.3 – Coefficienti di perdita dell'edificio 96

Opere citate 101

1. Introduzione

Il consumo di energia per il riscaldamento, raffrescamento e in generale per la climatizzazione degli edifici, rappresenta da sempre uno dei maggiori contributi del fabbisogno energetico nazionale, risultando quindi uno dei settori di maggiore interesse per quanto riguarda l'efficientamento dello stesso e la riduzione di consumi ed emissioni. Il riscaldamento degli edifici residenziali e del settore terziario in Italia risulta infatti coprire quasi un terzo (32%) del consumo finale totale di energia (vedi figura 1.1) (1), di cui quasi il 60 % derivante dalla combustione del gas metano (vedi figura 1.2) (2), al contempo contribuendo per quasi un quinto sulla produzione di CO_2 nazionale (3).

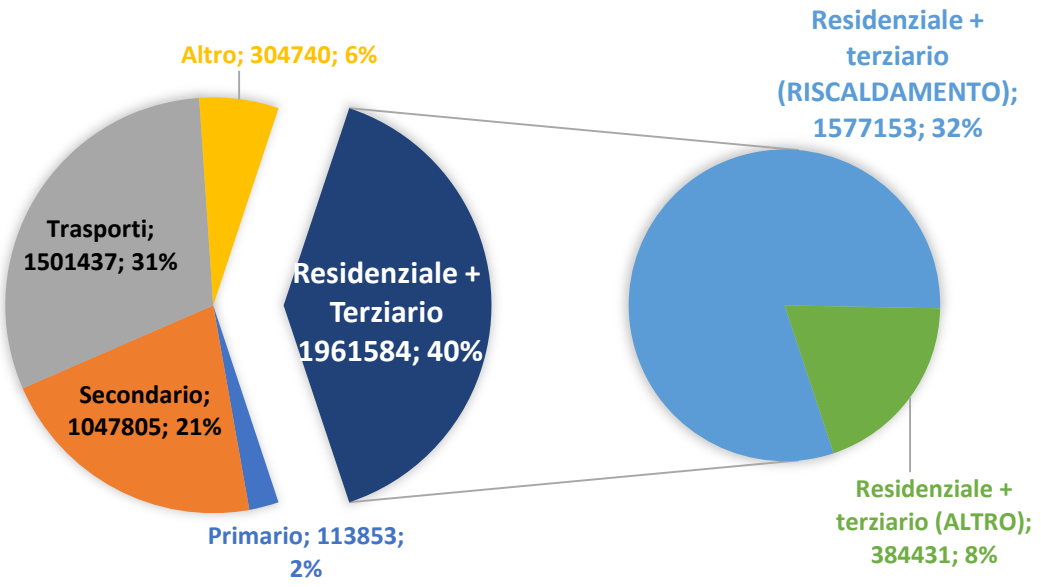


Figura 1.1: Consumi finali di energia suddivisi per settore (2019) [TJ]. Dati di (1).

Inoltre, negli ultimi anni l'Italia ha aumentato il proprio grado di dipendenza dagli altri paesi, essendosi ridotta la quota di gas estratto, sopperendo a tale riduzione con l'importazione. Infatti, se negli anni '90 quasi metà del fabbisogno era coperto dall'estrazione, tale quota si è ormai ridotta (al 2020) a poco più di un decimo (vedi figura 1.3), fattore che, in particolare nell'ultimo periodo, alimenta l'insicurezza sull'approvvigionamento e pericolose oscillazioni dei prezzi.

L'affidamento alla suddetta fonte nei prossimi anni suscita, dunque, non pochi quesiti riguardo la convenienza economica e ambientale, nonché la stabilità geopolitica rispetto a fonti energetiche e a tecnologie alternative per il riscaldamento degli edifici.

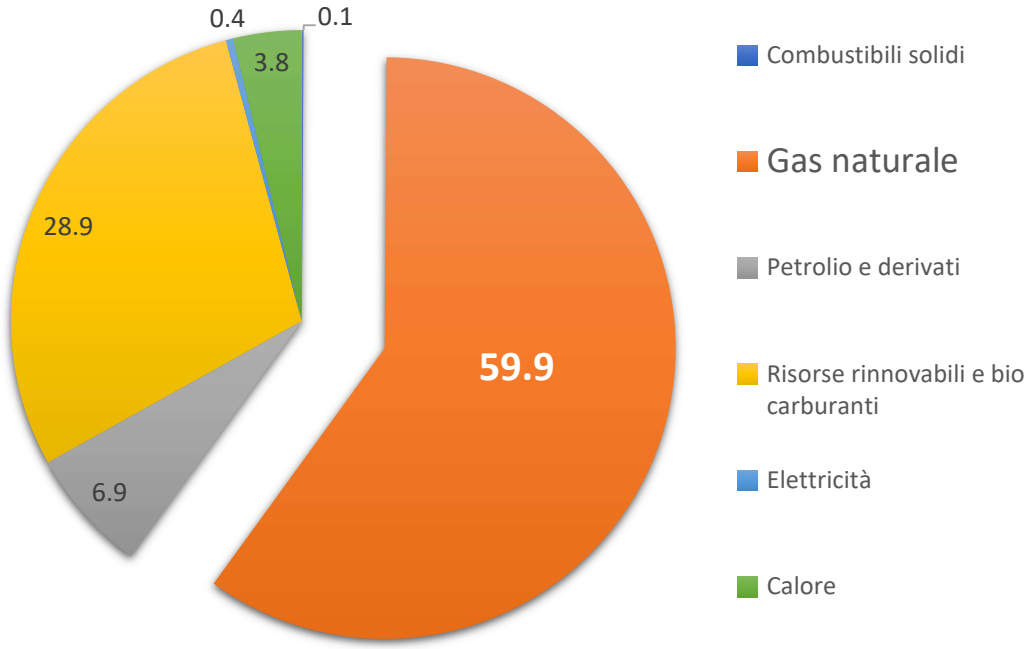


Figura 1.2: Quote percentuali delle fonti energetiche per il riscaldamento degli edifici in Italia. Dati di (2).

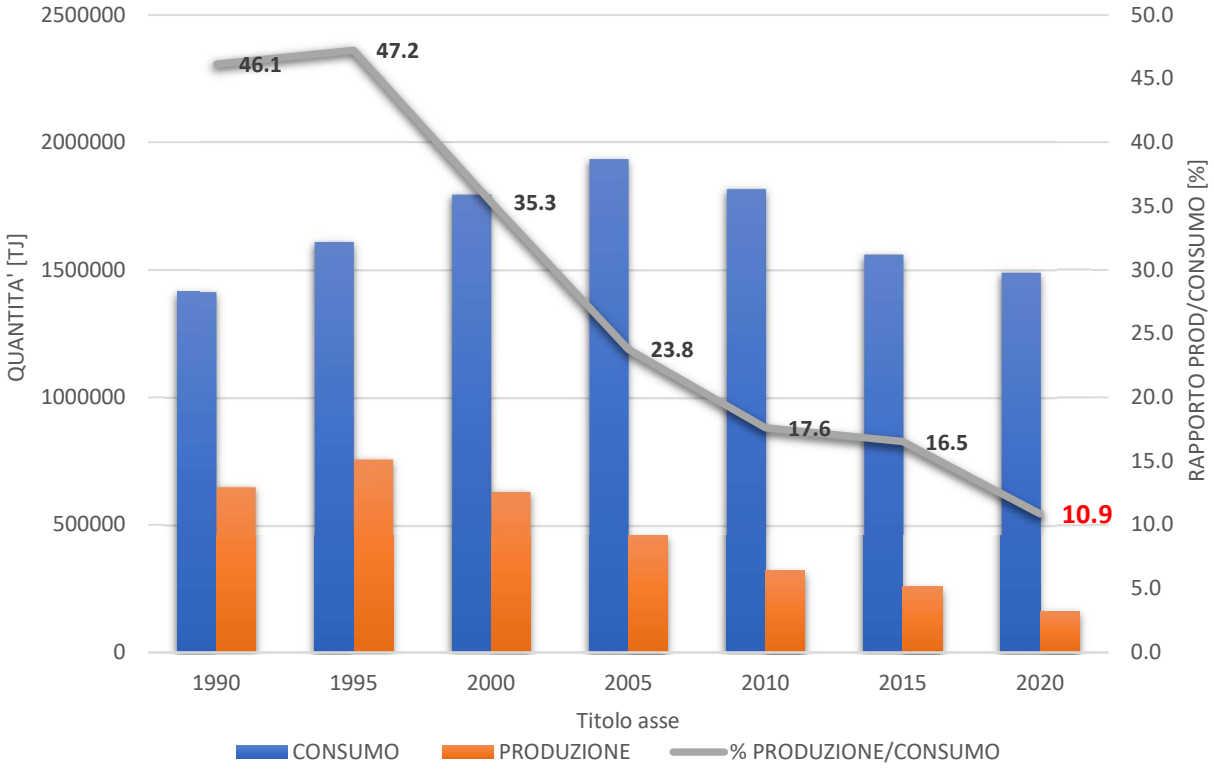


Figura 1.3: Produzione e consumo di gas naturale in Italia. Dati di (1).

In questo elaborato sarà oggetto di studio una palazzina uffici, sede di un istituto bancario, situata a Milano, in Via Fra Riccardo Pampuri, che fungerà da esempio di fattibilità tecnico-economica riguardo la sostituzione del sottosistema di generazione dell'impianto di climatizzazione.

A tal fine, si è primariamente costruito un modello energetico del fabbricato tramite il software Edilclima, grazie al quale è stato possibile individuare i carichi termici invernali ed estivi, nonché i fabbisogni di energia per la climatizzazione.

Nel capitolo successivo è stata posta l'attenzione al sistema impiantistico esistente, delineandone sinteticamente i sottosistemi e i componenti.

Nell'ultimo capitolo è valutata l'alternativa tecnologica per la generazione di potenza termica e frigorifera rispetto a quella attuale, concludendo con una sintesi di fattibilità economica.

2. Il fabbricato: dati di input e risultati

Il caso studio è un edificio situato in Via Fra Riccardo Pampuri, nella periferia sud di Milano. Si tratta di una palazzina uffici sede di un istituto bancario. L'edificio è classificato, secondo il DPR 412/93, come E.2 (edifici adibiti ad uffici e assimilabili).

Come illustrato in fig. 2.1, fig. 2.2, fig. 2.3, fig. 2.4 e fig. 2.5 l'edificio si sviluppa a torre per cinque piani, di cui l'ultimo, il quarto, presenta una superficie ridotta rispetto ai sottostanti per la presenza di un terrazzo.

Gli spazi presenti all'interno dell'involucro sono tutti riscaldati ad eccezione dei due vani scala vetrati posti sui lati est ed ovest.

Figura 2.1: Vista ovest dell'edificio oggetto di studio.

Figura 2.2: Vista est dell'edificio.

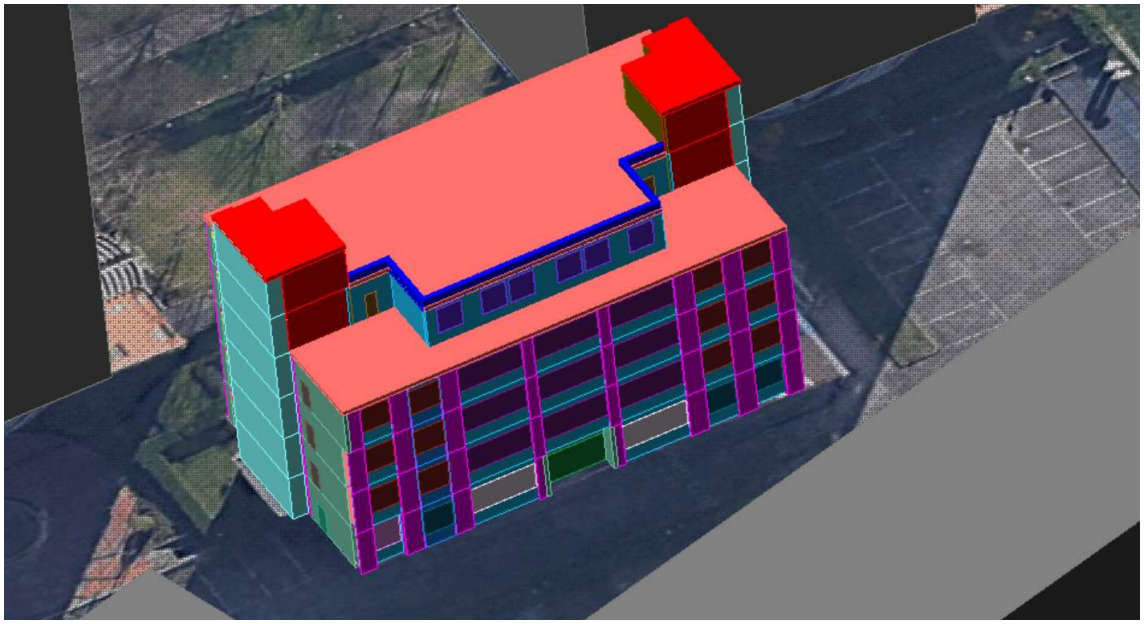


Figura 2.3: Ricostruzione 3D dell’edificio realizzata con Edilclima. Vista dall’alto.

Figura 2.4: Vista dall'alto dell'edificio. Istantanea Google Earth.

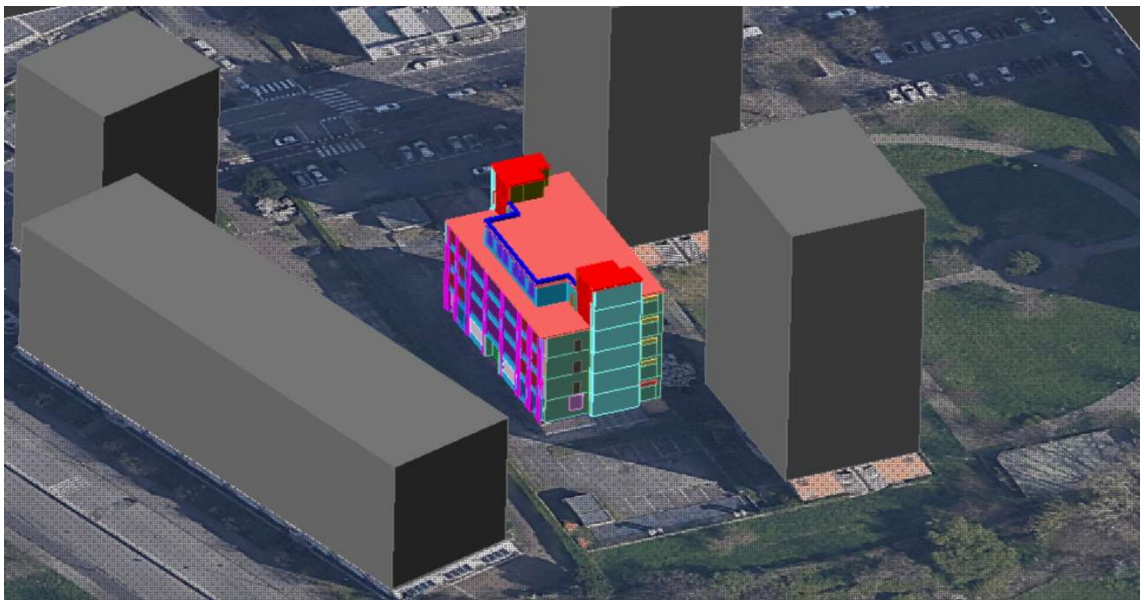


Figura 2.5: Un'altra immagine della ricostruzione 3D realizzata con Edilclima dell'edificio.

L'edificio in pianta presenta una superficie netta di circa 500 m^2 per piano e un'altezza di 15 metri, come riassunto in Tab.1.

Descrizione	**Sup. netta [m^2]**	**Altezza [m]**
Piano terra	493.51	3
Piano 1	502.5	3
Piano 2	502.93	3
Piano 3	502.67	3
Piano 4	355.66	3
Totale	2357.27	-

Tabella 2.1: Caratteristiche geometriche dei piani dell'edificio

Al fine di generare un modello energetico dell'edificio, è stato utilizzato il software Edilclima, che permette di calcolare i seguenti contributi di potenza ed energia (4):

- potenza invernale, per il dimensionamento dell'impianto di riscaldamento ed il corretto calcolo dei rendimenti, secondo la norma UNI EN 12831;
- energia utile invernale ed estiva, per la valutazione delle prestazioni termiche del fabbricato, secondo la specifica tecnica UNI/TS 11300-1;
- energia primaria per i servizi di riscaldamento, produzione di acqua calda sanitaria, ventilazione ed illuminazione, secondo le specifiche tecniche UNI/TS 11300-2 ed UNI/TS 11300-4;
- energia primaria per il servizio di raffrescamento, secondo la specifica tecnica UNI/TS 11300-3;
- potenza estiva, secondo il metodo di calcolo Carrier-Pizzetti, per il dimensionamento dell'impianto di raffrescamento.

2.1. Dati climatici e di input

Per la determinazione di tutti i dati climatici necessari al calcolo delle prestazioni energetiche dell'edificio, ci si appoggia alle norme UNI 10349 e UNI 12831 e al DPR 412/93[1], che forniscono per ogni località le principali grandezze di interesse, quali ad esempio la zona climatica di appartenenza, la temperatura esterna di progetto e le caratteristiche del vento.

Località			***Milano***		
Provincia			***Milano***		
Altitudine s.l.m.			***122***		m
Latitudine nord	***45° 27'***		Longitudine est	***9° 11'***	
Gradi giorno DPR 412/93			***2404***		
Zona climatica			***E***		

Tabella 2.2: Caratteristiche geografiche

Regione di vento:	***A***	
Direzione prevalente	***Sud-Ovest***	
Distanza dal mare	***> 40***	km
Velocità media del vento	***1,7***	m/s
Velocità massima del vento	***3,4***	m/s

Tabella 2.3: Caratteristiche del vento

Temperatura esterna di progetto	***-5,0***	°C
Stagione di riscaldamento convenzionale	dal ***15 ottobre*** al ***15 aprile***	

Tabella 2.4: Dati per il calcolo invernale

Temperatura esterna bulbo asciutto	***31,9***	°C
Temperatura esterna bulbo umido	***23,1***	°C
Umidità relativa	***48,0***	%
Escursione termica giornaliera	***12***	°C

Tabella 2.5: Dati per il calcolo estivo

[1] È doveroso specificare che alcune delle grandezze presenti sono state utilizzate direttamente dal software, in quanto presenti nel database.

Esposizione	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
						[MJ/m^2]						
Nord	*1,6*	*2,3*	*3,7*	*5,3*	*7,6*	*10,0*	*9,4*	*6,7*	*4,5*	*2,6*	*1,5*	*1,3*
Nord-Est	*1,8*	*3,0*	*5,3*	*8,0*	*10,2*	*12,7*	*12,6*	*9,8*	*7,1*	*3,4*	*1,7*	*1,4*
Est	*4,1*	*5,8*	*8,6*	*11,0*	*12,5*	*14,7*	*15,2*	*12,9*	*10,9*	*6,0*	*3,4*	*3,0*
Sud-Est	*7,4*	*8,7*	*10,8*	*11,7*	*11,7*	*13,0*	*13,6*	*12,8*	*12,7*	*8,3*	*5,7*	*5,4*
Sud	*9,6*	*10,4*	*11,4*	*10,5*	*9,7*	*10,4*	*10,8*	*11,0*	*12,4*	*9,4*	*7,1*	*6,9*
Sud-Ovest	*7,4*	*8,7*	*10,8*	*11,7*	*11,7*	*13,0*	*13,6*	*12,8*	*12,7*	*8,3*	*5,7*	*5,4*
Ovest	*4,1*	*5,8*	*8,6*	*11,0*	*12,5*	*14,7*	*15,2*	*12,9*	*10,9*	*6,0*	*3,4*	*3,0*
Nord-Ovest	*1,8*	*3,0*	*5,3*	*8,0*	*10,2*	*12,7*	*12,6*	*9,8*	*7,1*	*3,4*	*1,7*	*1,4*
Orizz. Diff.	*2,2*	*3,2*	*5,0*	*6,5*	*8,3*	*9,8*	*8,8*	*7,5*	*5,8*	*3,6*	*2,1*	*1,9*
Orizz. Dir.	*2,7*	*4,2*	*6,8*	*9,5*	*10,7*	*13,1*	*14,5*	*11,6*	*9,4*	*4,4*	*2,2*	*1,7*

Tabella 2.6: Irradiazione solare media mensile.

Il dato probabilmente più importante per la fattibilità economica di questo elaborato sono però le condizioni termoigrometriche dell'aria esterna; di seguito, in tabella 2.7, sono tabulati i valori utilizzati nell'analisi. Per quanto riguarda il periodo di riscaldamento, sono state usate le temperature medie indicate nella UNI 10349-1, mentre per il caso estivo è stata calcolata, per ogni mese, la media aritmetica tra la temperatura media e la temperatura massima, fornite da Arpa Lombardia. Questa scelta è giustificata dal fatto che le temperature medie per il periodo estivo non risultano coerenti (e.g. temperatura media di luglio pari a 24.5 °C) per il calcolo di raffrescamento; inoltre, l'escursione termica tra giorno e notte è molto maggiore che nel caso invernale. Le umidità relative sono state consultate presso il sito internet del comune di Milano.

	$T_{e,m}$	UR
	[°C]	[%]
GENNAIO	4	78
FEBBRAIO	7.1	69
MARZO	10.6	60
APRILE	19.4 (13.4)[2]	61
MAGGIO	23.3	55
GIUGNO	28.2	58
LUGLIO	29.6	55
AGOSTO	29	55
SETTEMBRE	24.6	61
OTTOBRE	18.9 (14.1)[2]	70
NOVEMBRE	7.5	81
DICEMBRE	3.5	78

Tabella 2.7: Temperature e umidità relative medie mensili per il computo dei fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento. Dati di (5) e (6).

[2] Dato che, per i mesi di aprile ed ottobre, si ha la compresenza di stagione di riscaldamento e di raffrescamento, sono state considerate due diverse temperature, una per la metà interfacciata sulla stagione fredda e l'altra sulla stagione calda.

2.2. I componenti dell'edificio

Dopo aver fissato le condizioni climatiche, si procede nella definizione di tutti i componenti costitutivi l'involucro edilizio, e ad una panoramica delle grandezze termofisiche utili al calcolo dei carichi termici: per la consultazione dettagliata si rimanda il lettore all'appendice A.1.Vale la pena sottolineare che in questa sezione sono stati conteggiati come "componenti" anche i ponti termici lineari che danno un contributo positivo al carico termico, mentre quelli con valore negativo sono stati esclusi dal calcolo per un risultato maggiormente cautelativo.Tutte le grandezze termofisiche sono state calcolate con l'ausilio del software Edilclima, che come anticipato, segue le normative vigenti.In tabella 2.8B sono elencati tutti i componenti opachi che all'interno del software vengono classificati come muri. Si nota che, sebbene alcuni presentino uno strato isolante interno, nessuno dei componenti di tipo[3] U e T rispetta i valori di trasmittanza definiti all'interno del DM 26/06/2015.

Codice	Tipo	Descrizione	Sp	ϑ	U
			[mm]	[°C]	[W/m²K]
P1	G	Pavimento controterra	450,0	-5,0	0,428
P2	D	Soletta interpiano	460,0	-	0,853
S2	T	Copertura	355,0	-5,0	0,474

Tabella 2.8A: Componenti opachi orizzontali

Codice	Tipo	Descrizione	Spessore	ϑ[4]	U
			[mm]	[°C]	[W/m²K]
M1	U	Parete Ascensori	229,0	10,0	2,574
M2	U	Parete tramezza vs non riscaldati	104,0	10,0	2,023
M3	D	Parete cartongesso	75,0	-	0,614
M4	D	Parete tramezza	104,0	-	2,023
M5	D	Vetrata interna[5]	20,0	-	2,381
M6	D	Parete cartongesso doppia lastra	99,0	-	0,574
M7	T	Parete perimetrale	291,0	-5,0	0,613
M8	T	Parete perimetrale con camera	336,0	-5,0	0,472
M9	T	Parete perimetrale con camera 2	536,0	-5,0	0,435
M10	T	Parete perimetrale bagni	274,0	-5,0	1,235
M11	T	Pilastro	801,0	-5,0	0,547
M12	T	Porta su terrazzo	55,0	-5,0	1,547

Tabella 2.8B: Componenti opachi verticali

[3] Si intendono le condizioni al contorno: U per i componenti posti tra locali riscaldati e non riscaldati, D per i divisori interni alla zona climatizzata, T per i componenti tra zona riscaldata ed esterno, G tra zona riscaldata e terreno, E tra zona non riscaldata ed esterno.

[4] Temperatura esterna per il calcolo, nel caso dei muri di tipo U è valutata utilizzando il fattore di riduzione della temperatura, secondo la norma UNI 12831.

[5] Anche se non è un componente opaco, la vetrata interna in Edilclima è caratterizzata all'interno della sezione muri.

Come anticipato, sono stati elaborati tutti i ponti termici lineari, ma sono stati conteggiati solamente quelli che restituiscono un valore positivo di trasmittanza termica lineare, ovvero i due elencati in Tabella 2.9.

Codice	Descrizione	Ψ [W/mK]
Z1	*Soletta interpiano – Parete perimetrale*	*0,465*
Z2	*Parete perimetrale – Telaio finestre*	*0,134*

Tabella 2.9: Ponti termici

Per quanto riguarda i serramenti, sono tutti composti da doppi vetri non trattati dello spessore di 4 mm e intercapedine d'aria da 12 mm. I telai di tutti gli infissi sono in metallo (alluminio) con taglio termico. In tabella 2.10 è presentata una panoramica delle principali grandezze di interesse dei componenti finestrati.

Cod	Tipo	Descrizione[6]	vetro	ϑ	H	L	Ug	Uw
				[°C]	[cm]	[cm]	[W/m²K]	[W/m²K]
W1	*E*	*Facciata vetrata*	*Doppio*	*-5,0*	*400,0*	*700,0*	*2,617*	*2,664*
W2	*T*	*PT_1*	*Doppio*	*-5,0*	*200,0*	*180,0*	*2,659*	*2,846*
W3	*T*	*PT_2*	*Doppio*	*-5,0*	*200,0*	*480,0*	*2,659*	*2,870*
W4	*T*	*PT_3*	*Doppio*	*-5,0*	*80,0*	*240,0*	*2,659*	*2,916*
W5	*T*	*PT_4*	*Doppio*	*-5,0*	*200,0*	*220,0*	*2,659*	*2,823*
W6	*T*	*PT_5*	*Doppio*	*-5,0*	*200,0*	*120,0*	*2,659*	*2,907*
W7	*T*	*PT_6*	*Doppio*	*-5,0*	*230,0*	*200,0*	*2,659*	*2,828*
W8	*T*	*PT_7*	*Doppio*	*-5,0*	*230,0*	*480,0*	*2,659*	*2,814*
W9	*T*	*P1-4_1*	*Doppio*	*-5,0*	*200,0*	*180,0*	*2,659*	*2,846*
W10	*T*	*P1-4_2*	*Doppio*	*-5,0*	*200,0*	*480,0*	*2,659*	*2,870*
W11	*T*	*P1-4_3*	*Doppio*	*-5,0*	*80,0*	*240,0*	*2,659*	*2,916*
W12	*T*	*P1-4_4*	*Doppio*	*-5,0*	*200,0*	*220,0*	*2,659*	*2,823*
W13	*T*	*P1-4_5*	*Doppio*	*-5,0*	*200,0*	*120,0*	*2,659*	*2,907*

Tabella 2.10: Componenti trasparenti

[6] PT sta per piano terra, nel quale gli infissi sono differenti geometricamente da tutti gli altri piani (P1-4).

2.3. Zone, locali e apporti

L'edificio, composto di cinque piani, è stato suddiviso in un medesimo numero di zone climatizzate, ovvero una per piano. Questa scelta è stata considerata come valida sia per motivi di semplicità, sia dal momento che tutti i piani presentano un grande locale adibito ad ufficio openspace che occupa la maggior parte della superficie calpestabile, senza tramezze interposte, consentendo il rimescolamento dell'aria e quindi rendendo maggiormente omogeneo il carico. In figura 2.6 è presentato un esempio, il primo piano, in cui è visibile l'openspace centrale. Ogni piano ha un'altezza netta di 3 metri.

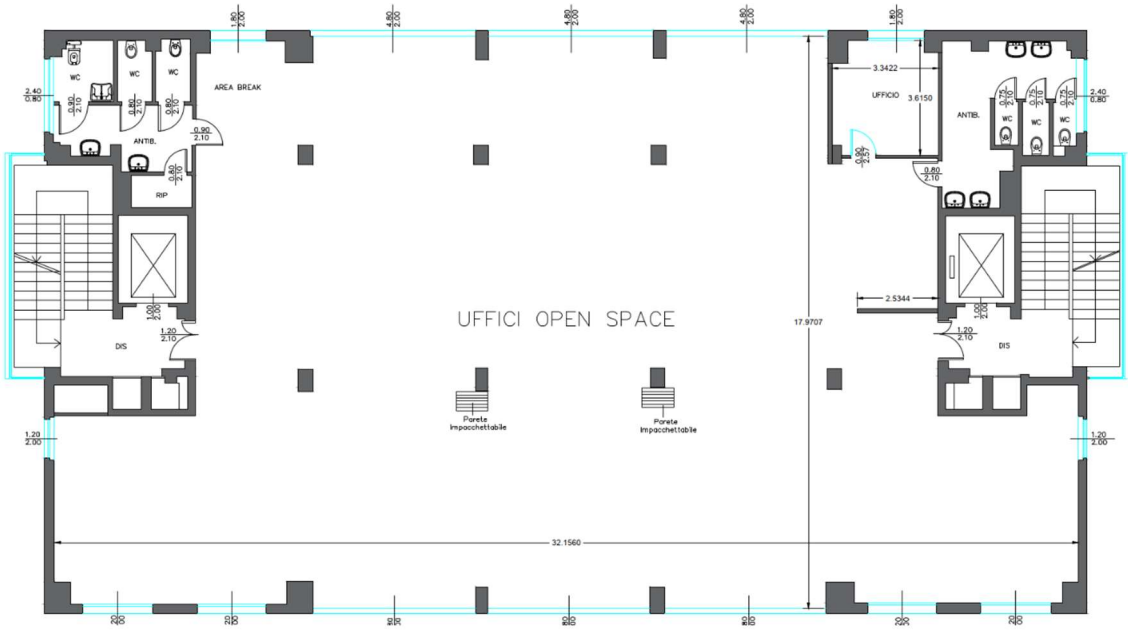


Figura 2.6: Planimetria piano primo

In appendice A.2 sono visionabili tutte le planimetrie dell'edificio.

Ogni zona climatizzata è formata da locali, in cui la destinazione d'uso è nella maggior parte dei casi quella di ufficio, e nei rimanenti casi quella di servizio igienico o di locali riunione/ristoro. Per la valutazione degli apporti termici da occupazione è stata utilizzata la UNI 10339. In particolare, la norma è stata utilizzata per la valutazione degli indici di affollamento dei locali n_s[7], e successivamente imponendo un flusso (sensibile più latente) per persona di 116 W (attività leggera di ufficio: cui 62 W sensibili e 56 W latenti).

La potenza Q_{pers}, di picco, è stata calcolata come in equazione 1:

$$Q_{pers} = 116 * n_s * S \quad (1)$$

[7] L'indice di affollamento è una grandezza, espressa in persone/m^2, che descrive la massima quantità di persone tipicamente presenti in un locale, in funzione della destinazione d'uso.

In tabella 2.11 sono riassunti gli apporti interni calcolati per tutti i locali, ad eccezione dei locali di transito (disimpegni e servizi).

Zona	Locale	S	n_s	Persone	Q_{pers}	Fattore di simultaneità
		[m^2]	[pers /m^2]		[W]	
1	Open Space	264.7	0.12	32	3685	0.27
	Ingresso Principale	48.4	0.06	3	337	0.42
	Sala Riunioni 1	19.1	0.6	11	1329	0.15
	Sala Riunioni 2	18.7	0.6	11	1302	0.15
	Sala Riunioni 3	18.1	0.6	11	1260	0.15
	Magazzino	34.3	0.06	2	239	0.42
	Ingresso Sud	12.2	0.06	1	85	0.42
	Infermeria	13.6	0.06	1	95	0.42
	Ristoro	16.4	0.6	10	1141	0.15
	Disimpegno	10.1	0.06	1	70	0.42
2	Open Space	453.5	0.12	54	6313	0.27
	Ufficio	11.7	0.06	1	81	0.42
3	Open Space	454.8	0.12	55	6331	0.27
	Ufficio	10.7	0.06	1	74	0.42
4	Open Space	423.4	0.12	51	5894	0.27
	Sala Riunioni	29.7	0.6	18	2067	0.15
	Ufficio	12.2	0.06	1	85	0.42
5	Area break	102.7	0.12	12	1430	0.27
	Sala Riunioni 1	24.1	0.6	14	1677	0.15
	Sala Riunioni 2	11.3	0.6	7	786	0.15
	Sala Riunioni 3	11.4	0.6	7	793	0.15
	Ufficio 1	57.3	0.06	3	399	0.42
	Ufficio 2	10.8	0.06	1	75	0.42
	Ufficio 3	11.5	0.06	1	80	0.42
	Ufficio 4	11.4	0.06	1	79	0.42
	Ufficio 5	26	0.06	2	181	0.42
	Ufficio 6	26	0.06	2	181	0.42
	Ufficio 7	25.8	0.06	2	180	0.42
TOT	-	2169.9	-	312	36249	-

Tabella 2.11: Apporti interni per occupazione

Per quanto riguarda gli apporti per le apparecchiature elettriche, è stato considerato un valore di 20 W/m^2, come suggerito da (7).

Tipo di sorgente	Apporto termico delle apparecchiature [W/m^2]
Apparecchi elettrici per ufficio	20

Tabella 2.12: Apporti interni per apparecchiature. (7)

Gli apporti interni degli occupanti e delle apparecchiature sono stati contabilizzati, per quanto riguarda il fabbisogno invernale ed estivo di energia per la climatizzazione, attraverso il fattore di simultaneità, ovvero un indicatore, espresso come un numero compreso tra 0 ed 1, che esprime la contemporaneità dei carichi, riducendo il contributo rispetto al carico di picco; per quanto riguarda invece il carico di progetto estivo, tale fattore di contemporaneità è stato forzato sempre ad 1 (carico massimo).

È presente, inoltre, nel locale tecnico al pian terreno, un contributo non irrilevante (30 kW) dovuto alla presenza di server elaborazione dati; tale carico è bilanciato da un'unità frigorifera dedicata (di cui non si hanno informazioni).

Per concludere, anche se non dipendenti dalla destinazione d'uso dei locali, sono stati conteggiati gli apporti solari, sebbene non vengano riportati per brevità, in quanto funzione di molte variabili. Nella simulazione sono state modellate anche le ombreggiature derivanti dagli edifici vicini, come visibile in figura 2.7.

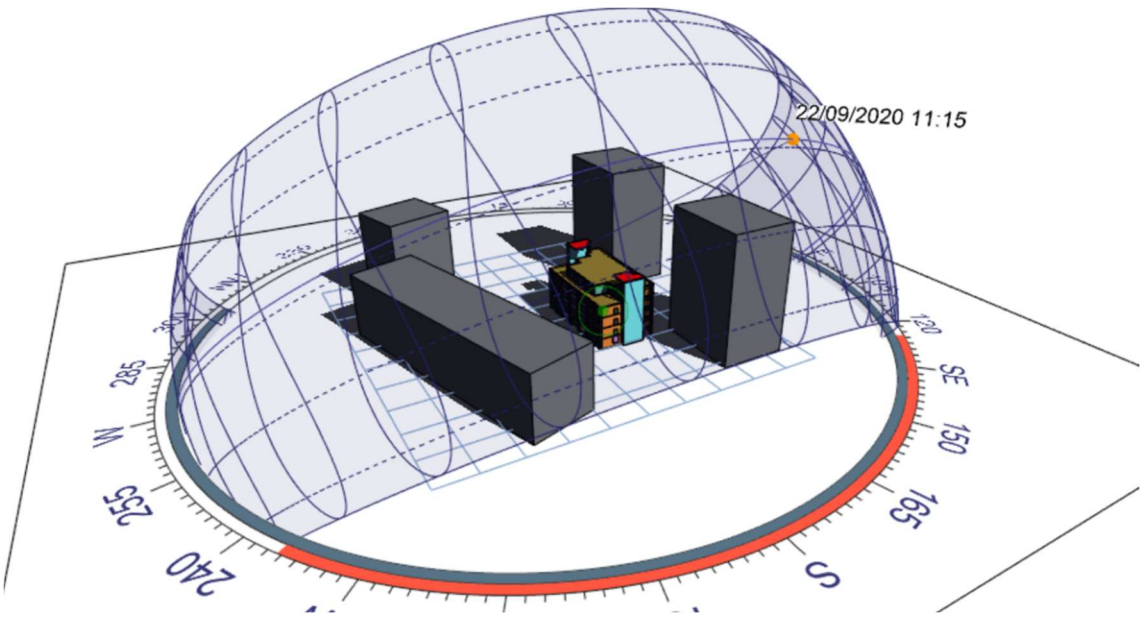


Figura 2.7: Ombreggiamenti per edifici vicini, giorno 22 settembre, ore 11:15. Rendering grafico realizzato con Edilclima.

Oltre alle cinque zone climatizzate, sono presenti due zone non climatizzate, ovvero i due vani scala, ognuno dei quali è considerato un'unica zona in tutto lo sviluppo

verticale dell'edificio. L'unico parametro di interesse per questi due spazi è il fattore di riduzione della temperatura, cioè quella grandezza adimensionale che tiene conto della diversa temperatura del locale non riscaldato, calcolato come in equazione 2:

$$b_u = \frac{\left(\widetilde{\theta}_\iota - \theta_{i,nr}\right)}{\left(\widetilde{\theta}_\iota - \theta_e^*\right)} \tag{2}$$

In questo caso ci si è affidati alla norma di riferimento UNI 12831, che fornisce dei valori in funzione dell'esposizione del locale non riscaldato. Nel caso in esame il valore assunto è quello di 0.4, a cui corrisponde una temperatura dei vani scala di 10° C in condizioni di progetto.

2.4. I carichi termici e i fabbisogni di energia dell'edificio

Completata la rassegna di tutti i parametri influenzanti il fabbisogno di potenza ed energia dell'edificio, non rimane che il calcolo dei carichi termici di progetto e dei fabbisogni di energia per la stagione di riscaldamento e per la stagione estiva.

Il carico termico di progetto invernale è la potenza che l'edificio richiede per poter mantenere ad una temperatura costante di setpoint, stabilita secondo criteri di comfort termoigrometrico (20 °C per tutti i locali tranne che per i bagni che sono a 24 °C), i locali riscaldati, ignorando ogni forma di apporto gratuito, ponendosi quindi nella condizione più critica possibile.

Il software implementa nell'algoritmo di calcolo del carico termico invernale la norma di riferimento, la UNI 12831.

In Tabella 2.13 sono riassunti i valori di carico termico di progetto invernale delle varie zone termiche, suddivisi per tipologia. In allegato A.3 sono riportati, per completezza, i coefficienti di perdita H, espressi in W/K, utili per il calcolo delle potenze perse. La norma infatti prevede il calcolo dei carichi termici per trasmissione attraverso l'involucro e per ventilazione secondo la eq.3 e la eq.4:

$$-\Phi_{tr} = (H_T + H_U + H_I + H_G) \times (T_i^* - T_e^*) \quad (3)$$

$$-\Phi_{ve} = (H_{ve}) \times (T_i^* - T_e^*) \quad (4)$$

Zona	Descrizione	Φ_{tr} [W]	Φ_{ve} [W]	Φ_{rh} [W]	Φ_{hl} [W]
1	*Piano terra*	*22763*	*30792*	*6427*	*59982*
2	*Piano 1*	*17623*	*27179*	*5377*	*50179*
3	*Piano 2*	*17623*	*27242*	*5383*	*50248*
4	*Piano 3*	*19963*	*31404*	*6164*	*57532*
5	*Piano 4*	*17878*	*25597*	*5217*	*48692*
Totale		***95850***	***142214***	***28567***	***266632***

Tabella 2.13: Dispersioni termiche delle zone climatizzate suddivisi per tipologia, da sinistra a destra: dispersione per trasmissione attraverso l'involucro, fabbisogno per ventilazione, fabbisogno per intermittenza, carico termico di progetto invernale.

E' possibile notare che le suddette equazioni siano composte dal prodotto di due termini principali: il primo fattore, rappresentato dai coefficienti di perdita H[8], che

[8] I coefficienti di perdita sono distinti in base alla tipologia di perdita, ovvero le condizioni al contorno del componente: H_T per le dispersioni dirette tra interno ed esterno, H_U per le dispersioni verso locali non climatizzati, H_I per le dispersioni verso locali riscaldati a temperatura differente e H_G per le dispersioni verso il terreno. Il coefficiente H_{ve} è invece funzione della portata d'aria ricambiata.

sintetizzano le dispersioni dell'edificio (sebbene nel caso della ventilazione in realtà sia una dispersione a carico del sistema di ventilazione meccanica e quindi non a carico dell'edificio) in forma di W/K, quindi una dispersione per differenza di temperatura unitaria tra interno ed esterno; il secondo fattore è la differenza tra la temperatura interna di setpoint e la temperatura esterna di progetto.

Per quanto riguarda il flusso di ventilazione, esso è dipendente dalla portata trattata dall'UTA. Essendo l'impianto di tipo misto (come verrà specificato nel prossimo capitolo), non viene ricircolata aria, ma ne viene prelevata solamente dall'esterno (vedi tabella 2.14), per mantenere, secondo la norma UNI 10339, una qualità dell'aria interna accettabile. Ovviamente, essendo l'aria esterna più fredda (o più calda nel caso estivo) di quella interna, questa produce un flusso termico (a carico dell'impianto), che è proprio quello di ventilazione.

	Portata immessa	**Portata estratta**
ZONA	[m3/h]	[m3/h]
1	3100	2800
2	3000	2700
3	3200	2850
4	2800	2500
5	2400	2150
TOTALE	14500	13000

Tabella 2.14: Portate di aria immesse ed estratte.

Il flusso per intermittenza, $\boldsymbol{\Phi_{rh}}$[9], è calcolato utilizzando il fattore di ripresa f_{RH}, espresso in W/m^2 e dipendente dalle caratteristiche di inerzia termica dell'edificio, dal tempo di ripresa della temperatura desiderato e dal calo di temperatura previsto o ipotizzato durante il periodo di spegnimento/attenuazione dell'impianto.

Per quanto riguarda i fabbisogni di energia per il riscaldamento e per il raffrescamento, la norma di riferimento è invece la UNI TS 11300-1, che viene utilizzata dal software per il calcolo di tali grandezze. Le equazioni 4 e 5[10] rappresentano le equazioni di bilancio energetico rispettivamente per la trasmissione attraverso l'involucro edilizio e per ventilazione.

[9] Il termine $\boldsymbol{\Phi_{rh}}$ rappresenta un carico termico aggiuntivo per la ripresa della temperatura di setpoint interna nel caso di impianti di riscaldamento a funzionamento intermittente (per esempio spegnimento/attenuazione notturno).

[10] In questo caso la temperatura esterna θ_e è la media del mese di riferimento, dunque, le suddette equazioni vanno iterate per ogni mese della stagione di riscaldamento.

$$Q_{H,tr} = \left[H_{tr} \times \left(\theta_{int,set} - \theta_e\right)\right] \times t + \left\{\sum_k F_{r,k}\Phi_{r,mn,k}\right\} \times t + \left\{\sum_l \left(1 - b_{tr,l}\right)F_{r,l}\Phi_{r,mn,u,l}\right\} \times t - Q_{sol,c} \quad (4)$$

$$Q_{H,ve} = H_{ve} \times \left(\theta_{int,set} - \theta_e\right) \times t \quad (5)$$

Il primo termine della eq.4 (in parentesi quadre) rappresenta la semplice dispersione attraverso l'involucro, calcolata in maniera analoga alla UNI 12831, il secondo e il terzo termine (le sommatorie in parentesi graffe moltiplicate per il tempo t) rappresentano invece le dispersioni per extraflusso verso la volta celeste rispettivamente dei k componenti appartenenti ai locali climatizzati e degli l componenti dei locali non climatizzati, il quarto e ultimo termine sono invece gli apporti solari attraverso i componenti opachi. In tabella 2.15 sono riassunti tutti gli apporti e tutte le dispersioni calcolate come indicate nelle equazioni.

Mese	Giorni	θe,m	Qh,tr	Qh,r	Qh,ve[11]	Qh,ht	Qgn	Qh,nd (NO VENT)	Qh,nd
		[°C]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]
ottobre	17	14.1	9796	693	7562	18051	-9828	1808	9370
novembre	30	7.5	29777	1700	21940	53416	-13903	17995	39935
dicembre	31	3.5	40980	1773	29926	72679	-13368	29586	59512
gennaio	31	4.0	39505	1678	29019	70203	-14761	26716	55735
febbraio	28	7.1	28225	1689	21132	51047	-15791	14792	35924
marzo	31	10.6	21664	2278	17049	40991	-21950	4488	21537
aprile	15	13.4	7519	947	6347	14813	-12313	-1094	5253
Totale	**183**	-	**177466**	**10758**	**132975**	**321200**	**-101914**	**94291**	**227266**

Tabella 2.15: Panoramica di apporti e dispersioni per il periodo invernale: da sinistra: Dispersione per trasmissione, extraflusso verso la volta celeste, dispersioni per ventilazione, dispersioni totali, apporti gratuiti, fabbisogno invernale.

Calcolati e sommati i fabbisogni per trasmissione e ventilazione mese per mese, si vanno a detrarre, secondo i fattori di utilizzazione degli apporti gratuiti[12], le quote relative agli apporti interni e solari[13], ottenendo quindi i fabbisogni effettivi

[11] Il fabbisogno di energia per la ventilazione invernale è considerato come puramente sensibile

[12] I fattori di utilizzazione degli apporti gratuiti sono funzione dell'inerzia termica dell'edificio e dal rapporto tra guadagni e perdite.

[13] Solamente gli apporti solari attraverso i componenti finestrati, in quanto quelli attraverso i componenti opachi sono già stati considerati all'interno dell'equazione 4.

dell'edificio, $Q_{H,nd}$, mese per mese e dunque per una data temperatura (temperatura media del mese). Andando a dividere tali fabbisogni per il numero di ore mensili di effettivo funzionamento dell'impianto, che per il DPR 74/2013 è di 14 ore giornaliere per la zona climatica E, si ottiene una potenza mediata nel tempo. Rappresentando tale potenza in funzione della temperatura media del mese di cui si è calcolata e facendone la regressione lineare, si ottiene un grafico, denominato firma energetica dell'edificio e rappresentata in figura 2.8, che rappresenta il fabbisogno di riscaldamento in funzione della temperatura esterna.

La retta di regressione è stata prolungata fino alla temperatura esterna di progetto, questo valore rappresenta quindi la potenza (circa 235 kW) che, con una temperatura esterna media di -5 °C e 14 ore di funzionamento giornaliero dell'impianto, l'edificio richiede per mantenere la temperatura interna di progetto. Tuttavia, è importante specificare che in questo modo si tiene conto del contributo degli apporti e non si tiene conto della potenza per funzionamento intermittente, e dunque questo valore, rispetto al carico termico di progetto invernale (267 kW), risulta ottimistico per il dimensionamento dell'impianto.

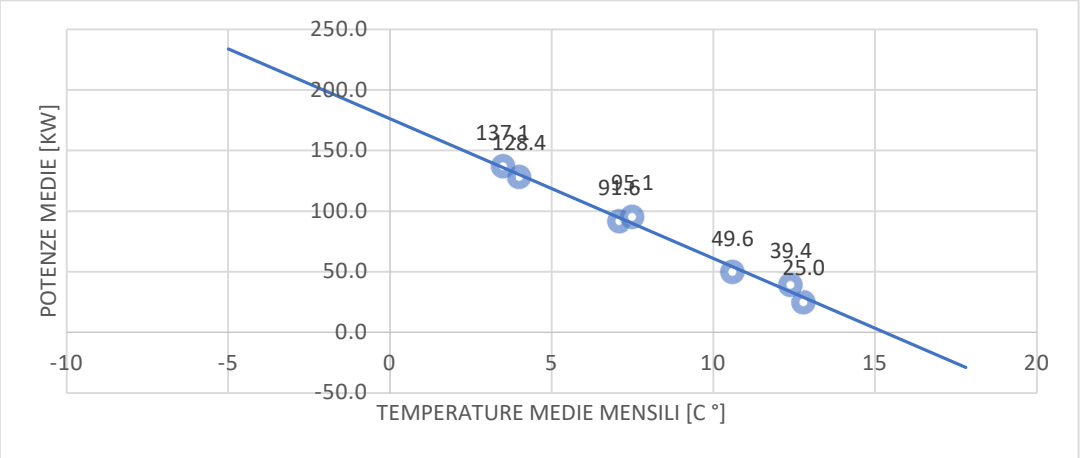


Figura 2.8: Firma energetica dell'edificio.

Per quanto riguarda il caso estivo, il carico di progetto è stato calcolato dal software utilizzando il metodo Carrier, un metodo di approssimazione del periodo estivo da transitorio a stazionario, grazie all'aiuto della differenza di temperatura equivalente, per la quantificazione dei flussi esogeni, e dei fattori di accumulo, per tenere conto dei carichi termici endogeni, compresi gli apporti solari attraverso i componenti finestrati. Il metodo Carrier semplifica enormemente il calcolo aggregando i dati relativi all'irraggiamento e alla temperatura esterna in base oraria, per la discretizzazione all'interno della giornata, e in base mensile, per la discretizzazione all'interno dell'anno. Il carico di raffrescamento dell'edificio risulta essere massimo nel mese di luglio; le varie componenti del carico termico di progetto estivo sono elencate in tabella 2.16, zona per zona (per convenzione è considerato negativo un flusso

entrante). Le condizioni interne di progetto sono in questo caso 25 °C e 50 % di umidità relativa.

Zona	Φ_{Irr}	Φ_{Tr}	$\Phi_{ve,s}$	$\Phi_{ve,l}$	$\Phi_{app,s}$	$\Phi_{app,l}$	$\Phi_{gl,sen}$	$\Phi_{gl,lat}$	Φ_{gl}
	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]
1	-11399	-4656	-7707	-14312	-13673	-3611	-37435	-17923	**-55358**
2	-13074	-4688	-6627	-12308	-14070	-3242	-38459	-15550	**-54009**
3	-14044	-4688	-6642	-12335	-14082	-3253	-39456	-15588	**-55044**
4	-14674	-5653	-7821	-14525	-14074	-3251	-42222	-17776	**-59998**
5	-7996	-5930	-6293	-11687	-9958	-2295	-30177	-13982	**-44159**
TOTALE	**-61187**	**-25615**	**-35090**	**-65167**	**-65857**	**-15652**	**-187749**	**-80819**	**-268568**

Tabella 2.16: Carico di progetto estivo, da sinistra: componente di irraggiamento, trasmissione, ventilazione (sensibile e latente), carichi interni (sensibile e latente), carico sensibile globale, carico latente globale[14], carico globale.

Infine, per quanto riguarda i fabbisogni di energia per il raffrescamento, le equazioni per il calcolo dei fabbisogni di raffrescamento per la climatizzazione estiva sono le medesime presentate per il caso invernale, ovvero le equazioni 4 e 5. Di seguito, in tabella 2.17, sono riassunti, per mese e per tipologia, le quantità di energia "acquisite" dall'edificio e gli apporti. Essendo i flussi di calore per trasmissione entranti nell'edificio (negativi secondo questa convenzione), il fabbisogno di energia dell'edificio sarà dunque maggiorato dalla presenza degli apporti (Q_{gn}), che tra l'altro rappresentano i tre quarti del fabbisogno di energia per il raffrescamento a carico dell'edificio (vedi figura 2.9).

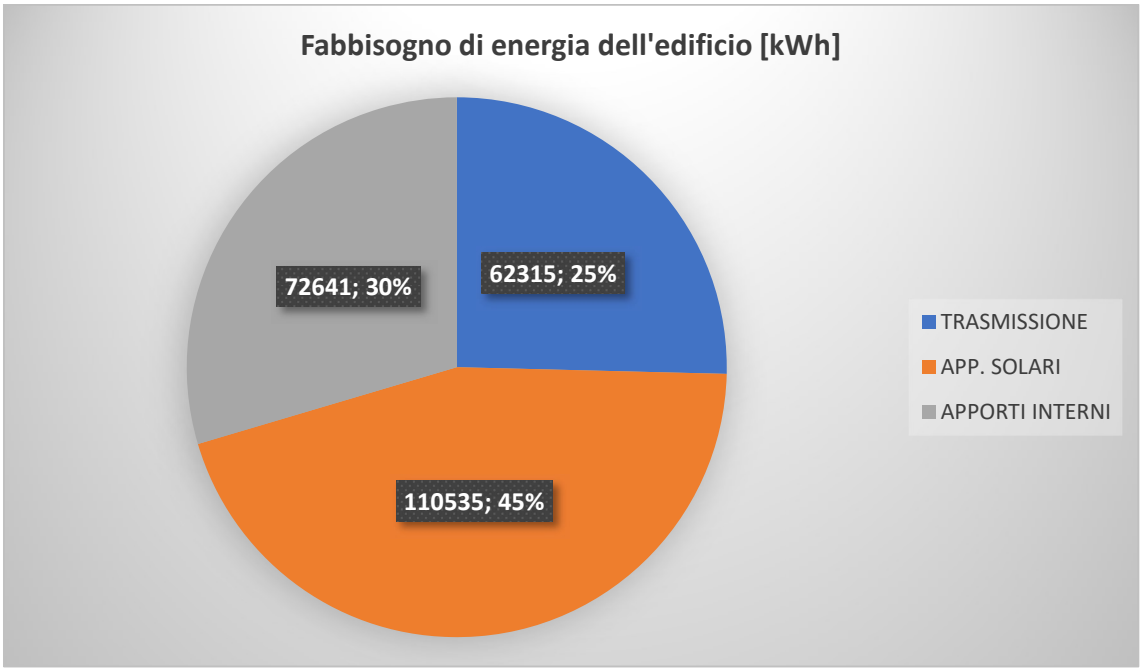


Figura 2.9: Ripartizione del fabbisogno di raffrescamento a carico dell'edificio.

[14] Questo carico latente è pari alla somma del carico latente endogeno (occupanti) e del carico latente esogeno (deumidificazione dell'aria umida esterna).

Come visibile nella seguente tabella, la ventilazione è stata separata dalle altre componenti. Questo serve a sottolineare che non è un fabbisogno di energia di raffrescamento dell'edificio, ma è una (costosa) "spesa"[15] necessaria al fine di garantire la qualità dell'aria interna, e tale dispendio energetico è a carico dell'UTA che raffredda, deumidifica e post-riscalda l'aria in ingresso al fabbricato. La temperatura di immissione dell'aria è pari a 23 °C durante tutto l'arco temporale.

Le temperature interne considerate non sono pari a quelle di progetto (25 °C) per tutti i mesi, ma soltanto per i mesi di giugno luglio e agosto: tale ipotesi è stata fatta per rispettare una continuità con la stagione invernale.

[15] Il fabbisogno di ventilazione è presente, ovviamente, anche durante l'inverno; tuttavia, rappresenta un contributo meno rilevante per via del fatto che le batterie si occupano del solo calore sensibile, a differenza del caso estivo.

	FABBISOGNO A CARICO DELL'EDIFICIO									FABBISOGNO A CARICO DELL'UTA	
Mese	**Te,m**	**Tint**	**Giorni**	**Qc,tr**	**Qc,r**	**Qsol,w**	**Qint**	**Qgn**	**Qc,nd (NO VENT)**	**Qve (batteria fredda)**	**Qve (batteria calda)**
	[°C]	**[°C]**		**[kWh]**	**[kWh]**	**[kWh]**	**[kWh]**	**[kWh]**	**[kWh]**	**[kWh]**	**[kWh]**
aprile	19.4	20	15	0	996	-7221	-5090	-12311	**-11315**	16965	11745
maggio	23.3	23	31	-7320	2067	-16676	-10523	-27199	**-32452**	44051	21576
giugno	28.2	25	30	-12950	2543	-19800	-10183	-29983	**-40390**	49590	20880
luglio	29.6	25	31	-17311	2592	-20872	-10523	-31395	**-46114**	54839	21576
agosto	29	25	31	-14767	2438	-17876	-10523	-28399	**-40728**	53041	21576
settembre	24.6	23	30	-9968	2549	-13470	-10183	-23653	**-31072**	49590	20880
ottobre	18.9	20	14	0	771	-6398	-4910	-11308	**-10537**	20416	12528
TOTALE	-	-	182	-62315	13956	-102313	-61935	164248	**-212607**	**288492**	**130761**

Tabella 2.17: Panoramica di guadagni termici e apporti per la stagione di raffrescamento. Da sinistra i contributi sono i seguenti: trasmissione, extraflusso verso la volta celeste, apporti solari, apporti interni, apporti totali, fabbisogno totale di raffrescamento del fabbricato (no ventilazione), fabbisogno della batteria di raffreddamento e deumidificazione, fabbisogno della batteria di post riscaldamento.

3. Il sistema impiantistico esistente

Per completare la panoramica edificio-impianto, in questa sezione si descriverà il sistema impiantistico esistente, delineandone i macro-componenti.

L'impianto in questione è del tipo misto aria-acqua, ovvero viene fornito condizionamento agli ambienti utilizzando entrambi i fluidi termovettori; inoltre, l'impianto è a quattro tubi, che consente la gestione del riscaldamento e del raffrescamento (parte idronica dell'impianto) simultaneamente (due tubazioni di mandata e due di ritorno).

Un impianto misto è composto, quindi, da una parte ad acqua, detta idronica, per l'equilibrazione del carico (mantenimento della condizione termodinamica A), e una parte ad aria, detta aeraulica, per il ricambio dell'aria. Come illustrato in fig. 3.1, un impianto misto presenta una Unità di Trattamento Aria, che provvede al ricambio dell'aria (prescritto dalla norma UNI 10339) prelevandone esclusivamente dall'esterno (negli impianti misti non vi è ricircolo per la minore portata di aria coinvolta) (condizione termodinamica E) e trattandola (condizione termodinamica I) affinché sia nelle condizioni termodinamiche per l'immissione in ambiente. A differenza dei sistemi a tutt'aria, oltre all'UTA sono presenti anche dei terminali di trattamento locale (ad esempio ventilconvettori) all'interno dell'ambiente, in cui scorre acqua calda o refrigerata (in base alla stagione), che rappresentano la parte idronica del sistema di climatizzazione.

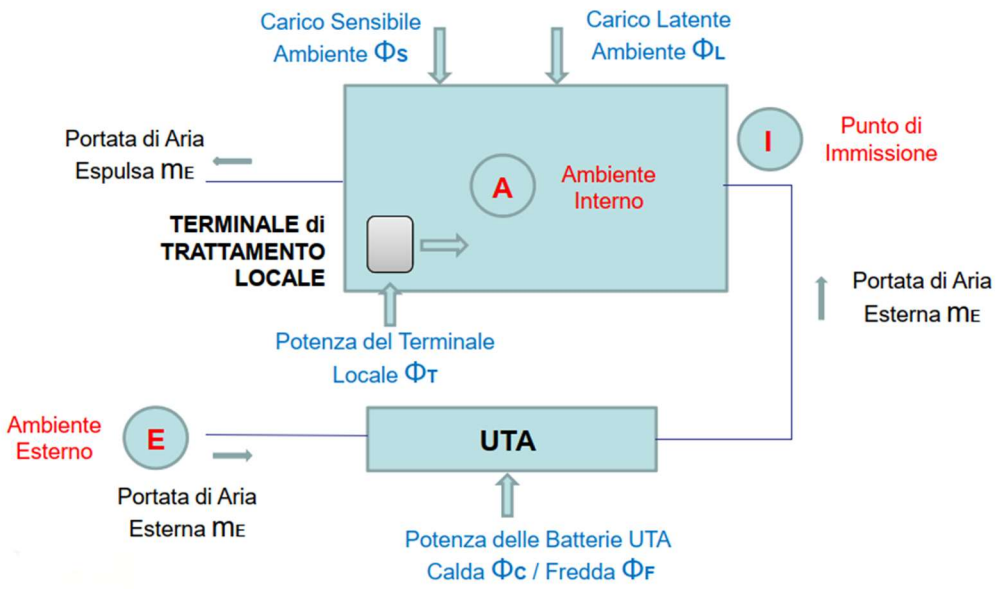


Figura 3.1: Schema di principio di un impianto di climatizzazione misto aria-acqua. Immagine tratta da (8)

Come anticipato, le due sezioni dell'impianto si suddividono il lavoro: mentre la parte idronica provvede principalmente all'equilibrio termico sensibile dell'ambiente interno (riscaldamento invernale e raffrescamento estivo), la sezione aeraulica provvede invece al servizio di ventilazione meccanica per il ricambio dell'aria, all'equilibrazione del carico latente, ma può agire anche come parte coadiuvante all'impianto idronico per il mantenimento della temperatura interna. Come illustrato in fig. 3.2, i sistemi di generazione di acqua calda e acqua refrigerata necessari per il trattamento dell'aria all'interno dell'UTA e per i terminali locali sono i medesimi; è inoltre visibile anche il recuperatore di calore posto all'interno dell'UTA.

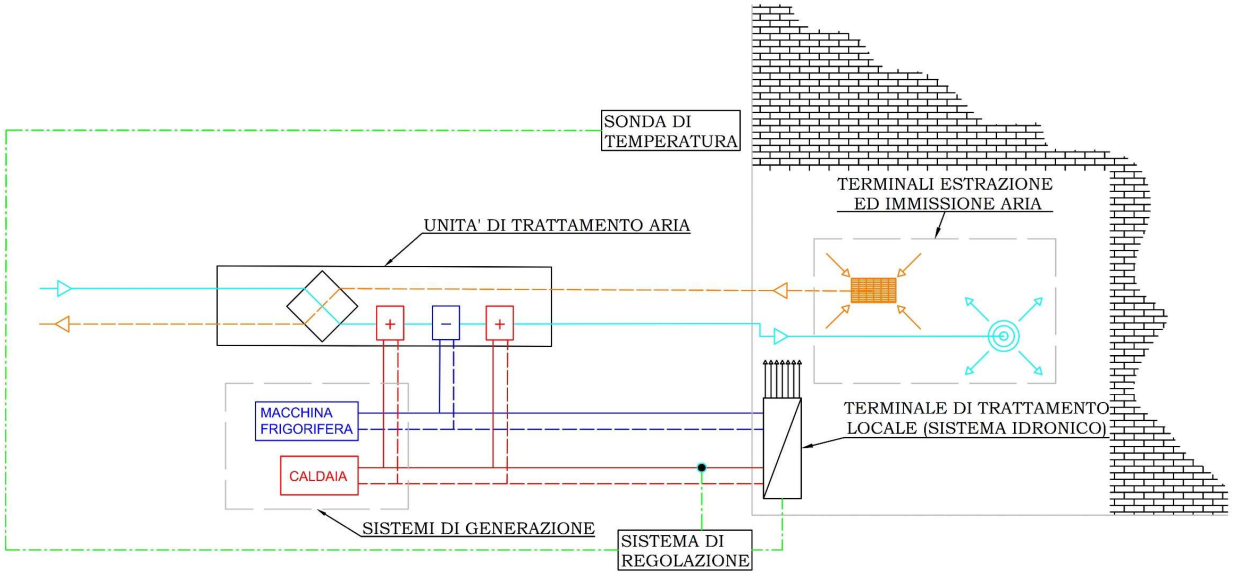


Figura 3.2: Schema semplificato di impianto di climatizzazione misto aria-acqua. In tratto continuo sono evidenziati i condotti e le tubazioni di mandata, mentre in tratteggio i ritorni/estrazioni.

Il sistema impiantistico è suddiviso in quattro fondamentali sottosistemi: sistema di generazione, sistema di emissione, sistema di distribuzione e sistema di regolazione. Di seguito verranno brevemente descritti.

3.1. Impianto idronico

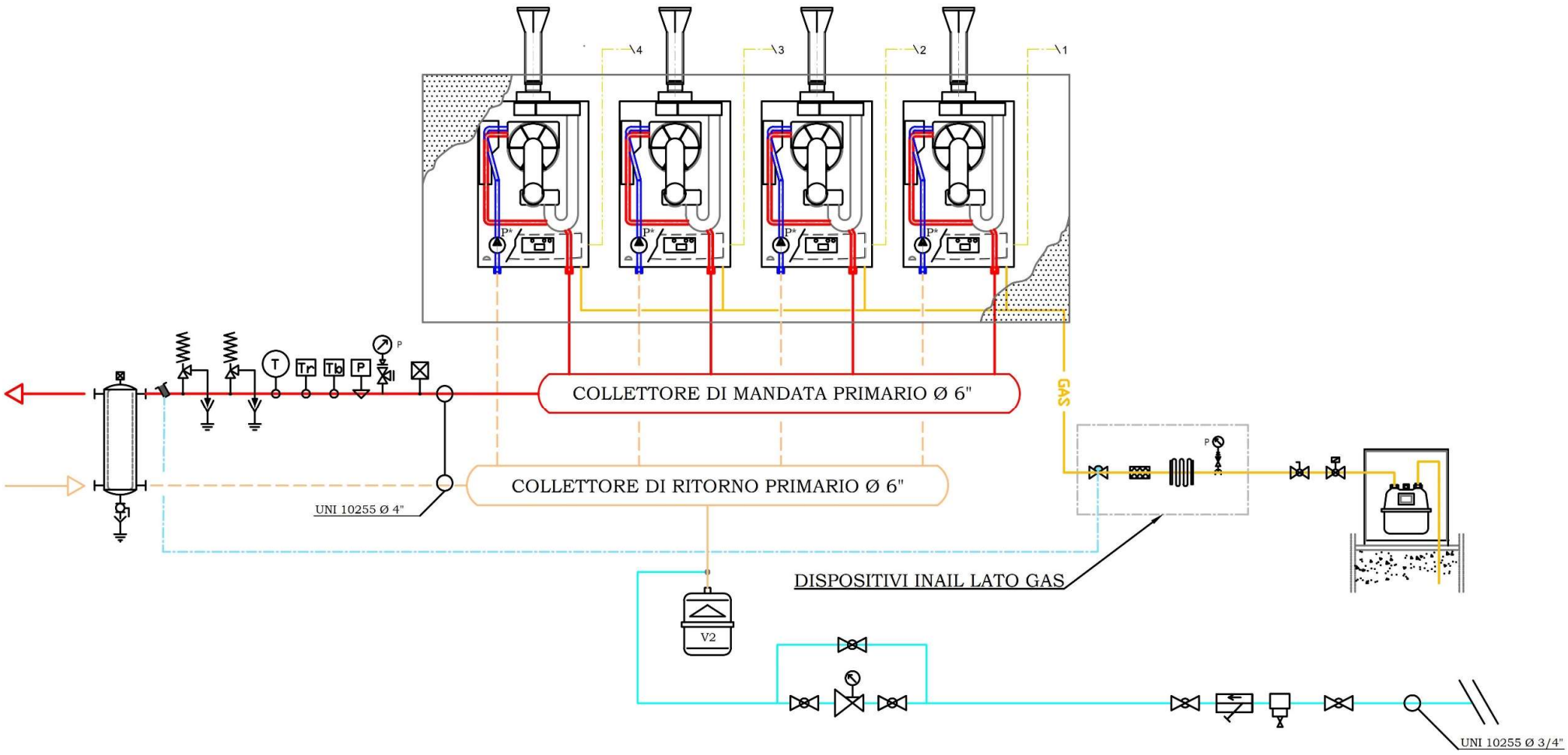
3.1.1. Sistema di generazione

Il sistema di generazione esistente consiste in un modulo caldaia a condensazione alimentata da gas metano, vedi figura 3.4 e 3.5, per la produzione di acqua calda e una macchina frigorifera, vedi figura 3.6 e 3.7, per la produzione di acqua refrigerata.

Entrambi i sistemi, come visibile in figura 3.3, sono collocati sulla copertura piana dell'edificio.

Figura 3.3: Fotografia dei sistemi di generazione. In verde la macchina frigorifera ed in rosso il modulo caldaia.

Come intuibile da figura 3.4 e 3.5, il sistema di generazione dell'acqua calda è composto da un'unità modulare a quattro caldaie ad aria soffiata, i cui dati di targa sono riassunti in tabella 3.1, connesse tra loro tramite un collettore di mandata e uno di ritorno, entrambi DN150. Il circuito primario (di caldaia) è indipendente da quello secondario (sistema di distribuzione) tramite l'installazione di un separatore idraulico, posto dopo tutti i dispositivi di sicurezza illustrati in figura 3.4. Sono infine presenti i dispositivi INAIL per la tubazione del gas e un sistema di reintegro dalla rete idrica connesso al collettore di ritorno primario in corrispondenza del vaso di espansione.



	Filtro a Y		Riduttore di pressione	Tb	Termostato di blocco		Valvola d'intercettazione combustibile
	Defangatore magnetico		Valvola a sfera		Valvola di sicurezza		Filtro a cestello
T	Termometro		Valvola d'intercettazione manuale gas		Pozzetto controllo temperatura		Giunto antivibrante
P	Pressostato		Elettrovalvola intercettazione gas		Valvola sfiato aria		Vaso di espansione a membrana (250 l)

Mandata acqua calda impianto — GAS — Tubazione gas metano — Tubo capillare

Ritorno acqua calda impianto — Reintegro da rete idrica

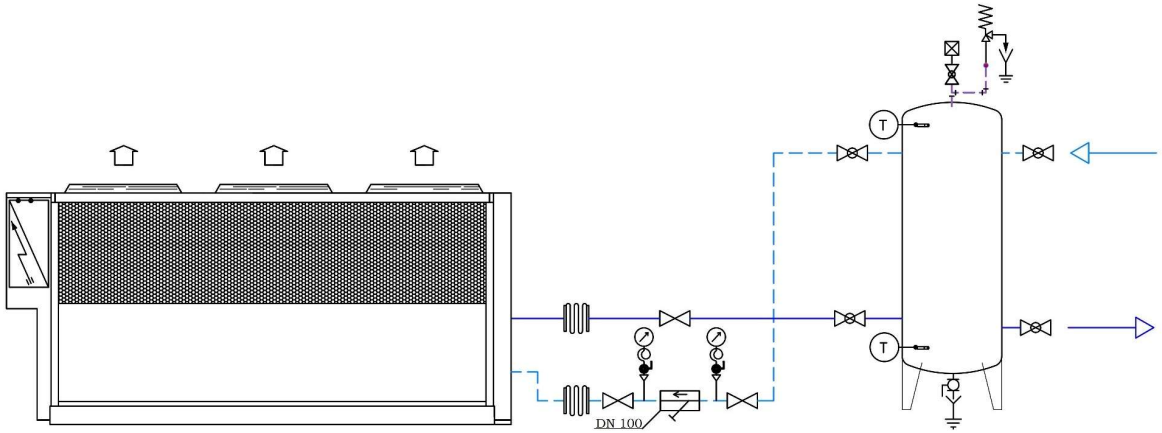
Figura 3.4: Schema funzionale del sistema di generazione (acqua calda) ATAG MAA 420R.

MODULO CALDAIA ATAG MAA 420R		
Pot. Focol. Nom.	**[kWt]**	378
Pot. Focol. Rid.	**[kWt]**	9.5
Pot. Utile Nom.	**[kWt]**	370.3
Pot. Utile rid.	**[kWt]**	9.3
ηgen	**[%]**	98
Perdite Bruciatore	**[%]**	1.3
Perdite Mantello	**[%]**	0.7
Perdite Camino (Bruciatore spento)	**[%]**	0.05
Pot. Elettrica Bruciatore	**[Wel]**	245
Pot. Elettrica Pompa	**[Wel]**	1085
Pot. Elettrica TOT	**[Wel]**	1330

Tabella 3.1: Dati di targa del modulo caldaia esistente.

Figura 3.5: Fotografia del modulo caldaia ATAG MAA 420R.

Per quanto riguarda invece la produzione di acqua refrigerata per la batteria fredda dell'UTA e per il raffrescamento degli ambienti, si dispone di una macchina frigorifera i cui principali dati di targa sono riassunti in tabella 3.2.



	Filtro a Y		Valvola di sicurezza		Valvola a sfera		Giunto antivibrante
T	Termometro		Valvola sfiato aria		Valvola generica		Manometro di controllo con flangia
	Rubinetto di scarico						

Mandata acqua refrigerata impianto

Ritorno acqua refrigerata impianto

Figura 3.6: Schema funzionale sistema di generazione (acqua refrigerata) AERMEC NRA 1350L.

Figura 3.7: Fotografia della macchina frigorifera esistente (AERMEC NRA 1350L).

AERMEC NRA 1350		
Potenzialità frigorifera	**[kW]**	319
Potenza assorbita totale	**[kW]**	146
EER*[16]	**[-]**	2.53
SEER[17]	**[-]**	4.6
Portata d'acqua	**[m^3/h]**	54.87
Potenza assorbita dai ventilatori	**[W]**	4500
Capacità accumulo	**[l]**	700

Tabella 3.2: Dati di targa della macchina frigorifera esistente

[16] Acronimo per Energy Efficiency Ratio, ovvero il coefficiente di efficienza energetica: i dati di targa riportati sono riferiti alle condizioni nominali, ovvero temperatura esterna 35° C e temperatura dell'acqua refrigerata pari a 7° C.

[17] Acronimo per Seasonal Energy Efficiency Ratio, ovvero l'efficienza della macchina durante l'arco temporale stagionale e quindi non in condizioni statiche nominali, vedi UNI EN 14825.

3.1.2. Sistema di distribuzione (e cenni su quello di regolazione)

Il sistema di generazione è connesso ai terminali di emissione tramite il sistema di distribuzione, che rappresenta quindi l'insieme di tubazioni di mandata e di ritorno, comprensivo di tutto il valvolame e degli strumenti di misurazione, interposto tra i due suddetti sottosistemi.

Nel caso in esame, si tratta di un impianto con distribuzione ad anello orizzontale a quattro tubi: dal sistema di generazione, i quattro tubi (due di mandata e due di ritorno) percorrono verticalmente l'edificio all'interno di un cavedio, dal quale, come illustrato in figura 3.8, partono le tubazioni orizzontali da cui si staccano le derivazioni necessarie per l'alimentazione dei terminali posti sui diversi piani dell'edificio. In figura 3.9 è raffigurata con maggiore dettaglio la distribuzione orizzontale ai terminali idronici del primo piano, il quale, essendo molto simile agli altri piani, costituisce il piano tipo.

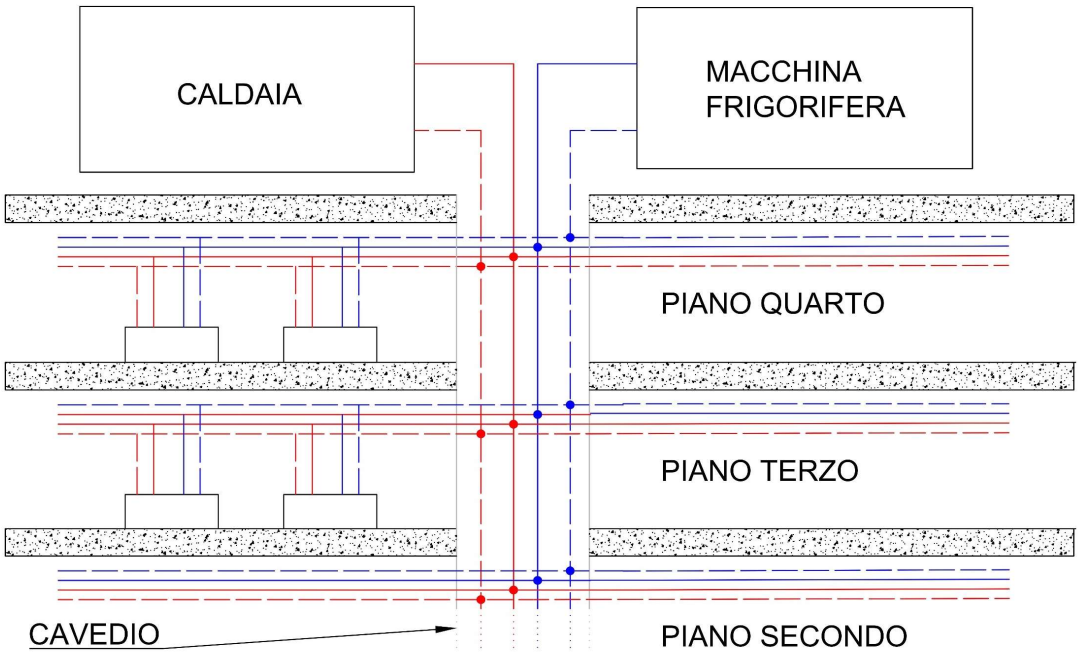


Figura 3.8: Illustrazione semplificata della distribuzione verticale a quattro tubi. In rosso le tubazioni di acqua calda, in blu quelle dell'acqua refrigerata, in linea continua le mandate e in tratteggio i ritorni.

In figura 3.10 è invece raffigurato lo stralcio di schema funzionale raffigurante, con maggiore dettaglio, tutti i componenti presenti nel sottosistema in esame.

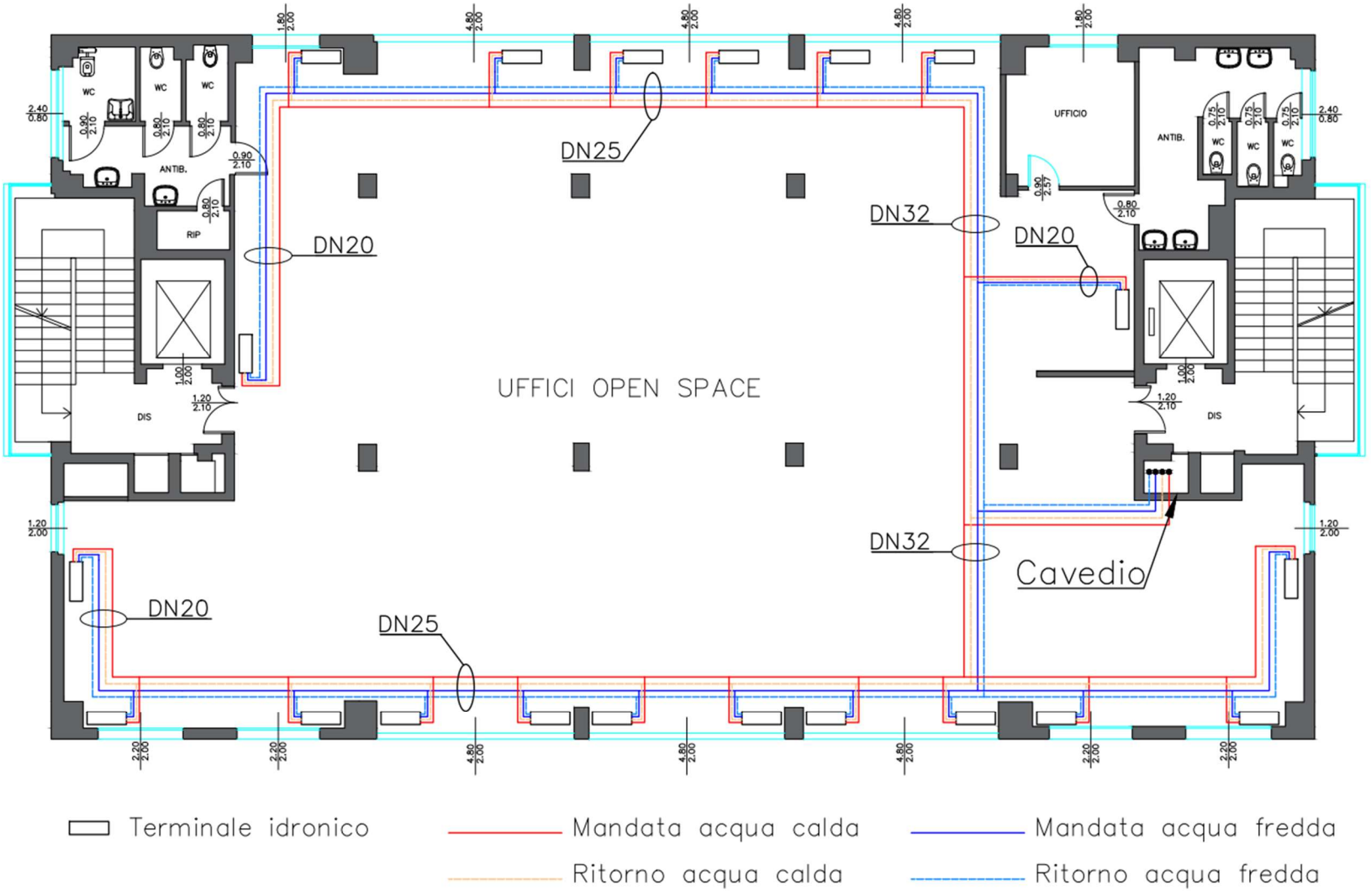
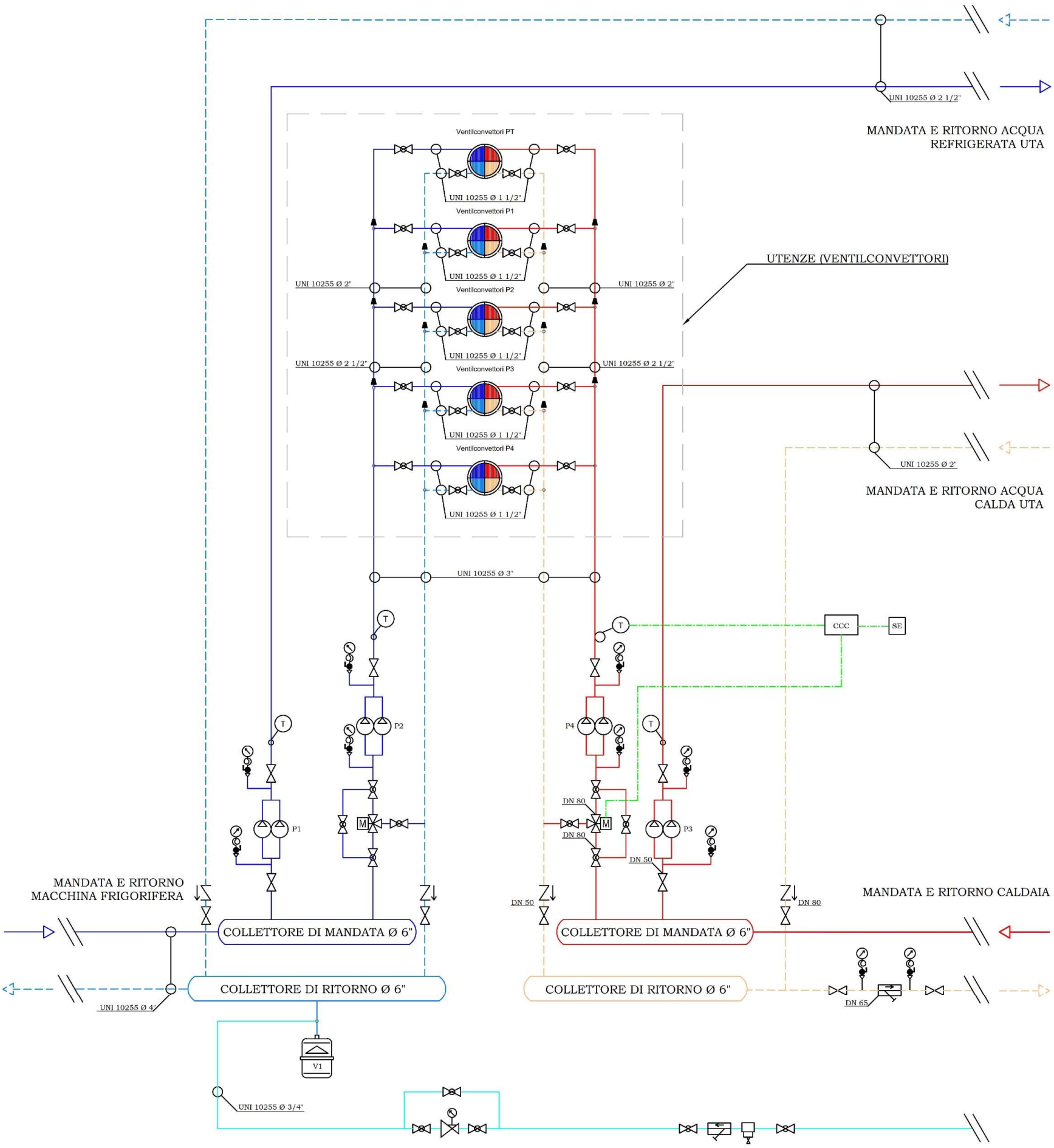


Figura 3.9: Schema di distribuzione idronica orizzontale del piano tipo.



T	Termometro	M	Valvola miscelatrice motorizzata		Valvola a sfera		Riduttore di sezione		Utenza (4 tubi)
M	Manometro		Riduttore di pressione		Valvola non ritorno		Manometro con rubinetto a flangia		
	Vaso di espansione		Filtro a Y		Defangatore magnetico		Valvola generica di intercettazione		
	Circolatore gemellare	T	Sonda termostatica	CCC	Centralina di compensazione climatica	SE	Sonda di temperatura esterna		

Mandata acqua calda
Mandata acqua refrigerata
Reintegro da rete idrica
Ritorno acqua calda
Ritorno acqua refrigerata

Figura 3.10: Schema funzionale del sottosistema di distribuzione

Come illustrato, il sistema di distribuzione è simmetrico: la distribuzione dell'acqua calda e dell'acqua refrigerata è gestita identicamente. Dai collettori di mandata, che sono allacciati ai sistemi di generazione descritti nel precedente paragrafo, partono due linee gestite separatamente, una verso l'unità di trattamento aria (UTA) e l'altra verso le utenze, che in figura rappresentano l'insieme dei ventilconvettori di un piano. Entrambe le linee di mandata (UTA e ventilconvettori), sia per l'acqua calda che per quella refrigerata, sono mosse da circolatori gemellari, le cui caratteristiche sono riportate in tabella 3.3.

Inoltre, per quanto riguarda il circuito dell'acqua refrigerata, è presente il reintegro di acqua dalla rete idrica, in corrispondenza del collettore di ritorno, dove è anche installato un vaso di espansione chiuso di volume pari a 50 litri, il cui omologo per l'acqua calda è installato a monte del separatore idraulico e quindi conteggiato all'interno del sistema di generazione.

	Portata	Prevalenza	Potenza
	[m^3/h]	[m]	[kW]
Elettropompa DAB mod. DPH 120/208.50T (P1 e P3)	13	8	0.9
Elettropompa DAB mod. DPH 150/340.65T (P2 e P4)	24	12	1.8

Tabella 3.3: Caratteristiche circolatori

Sono presenti, inoltre, a monte dei circolatori, delle valvole a tre vie miscelatrici, che nel caso dell'acqua calda è connessa al sistema di regolazione: tramite l'input della sonda termostatica esterna e di quella posta sulla mandata dell'acqua calda (verso i ventilconvettori) la centralina di compensazione climatica regola la miscelazione tra mandata e ritorno, riducendo quindi, quando necessario, la temperatura di mandata ai terminali di emissione in funzione della temperatura esterna. Il sistema di regolazione a compensazione climatica è affiancato da un sistema di termostati (uno per piano): la regolazione dunque risulta essere del tipo climatica e di zona.

Parametri fondamentali per il calcolo dell'energia primaria utile per il condizionamento sono i rendimenti (termici) dei due sottosistemi di distribuzione e di regolazione, che, calcolati secondo le UNI TS 11-300-2 e UNI TS 11-300-3, sono riportati in tabella 3.4 in funzione del regime di funzionamento.

	Stagione	
Sottosistema	Invernale	Estiva
Rendimento di distribuzione	0.95	0.99
Rendimento di regolazione	0.96	0.95

Tabella 3.4: Rendimenti di distribuzione e regolazione.

3.1.3. Sistema di emissione

Il sistema di emissione è l'insieme di tutti i terminali e/o bocchette tramite i quali l'impianto di climatizzazione interagisce con l'ambiente.

Nel caso in esame, per quanto concerne l'impianto idronico, i terminali installati sono ventilconvettori, ovvero delle unità composte da batterie di tubi alettati in cui passa acqua calda o acqua refrigerata, attraverso cui è forzata a passare l'aria tramite l'azione di un ventilatore, instaurando quindi uno scambio termico per convezione forzata (da cui il termine ventilconvettore). Nello specifico, essendo l'impianto a quattro tubi, i terminali esistenti sono corredati, come illustrato in figura 3.11, di due batterie, una per il riscaldamento e una per il raffrescamento, a differenza dei terminali a due tubi in cui esiste una sola batteria che commuta riscaldamento e raffrescamento in funzione del fabbisogno.

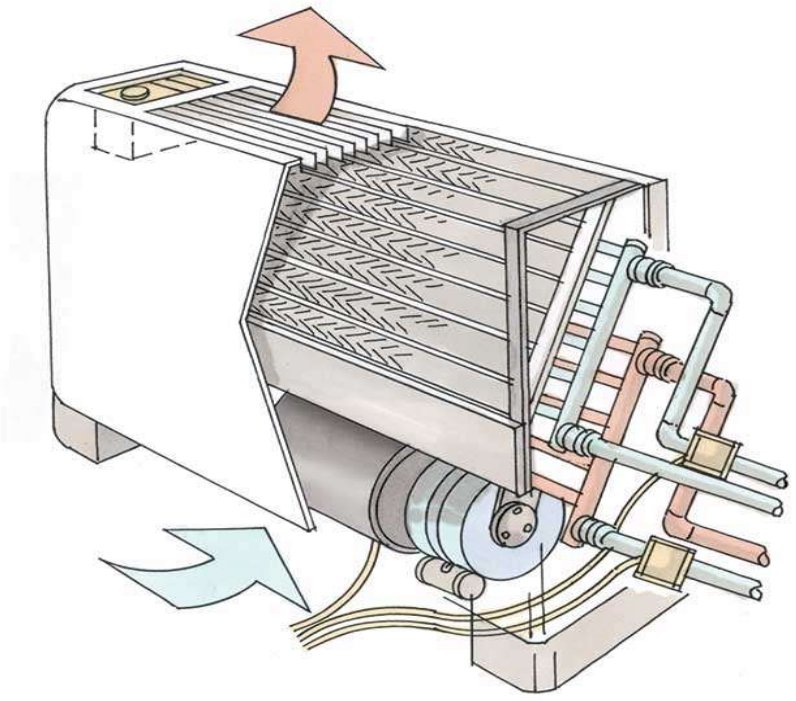


Figura 3.11: Illustrazione di un ventilconvettore a quattro tubi. Immagine tratta da (9)

Nel caso studio sono presenti cinque diversi modelli di ventilconvettore (AERMEC), di cui i modelli FCX-A-22, FCX-A-32, FCX-A-42 sono a pavimento mentre FCX-P-32 e FCX-P-42 sono pensili. Le principali caratteristiche e dati di targa sono riassunti in tabella 3.5.

			FCX-A			FCX-P	
			22	**32**	**42**	**32**	**42**
Inverno	Potenza termica max	[W]	3400	4975	7400	5354	6618
	Potenza termica med	[W]	2700	4085	6415	4065	5521
	Potenza termica min	[W]	1915	3380	5115	3165	4062
	Potenza termica (45°C)	[W]	2100	3160	4240	3160	3960
	Portata acqua	[l/h]	262	427	636	413	585
Estate	Potenza frigorifera max	[W]	1500	2210	3400	2400	3400
	Potenza frigorifera med	[W]	1330	2055	2800	1840	2780
	Potenza frigorifera min	[W]	1055	1570	2310	1550	2310
	Portata acqua	[l/h]	258	380	585	413	585
	Potenza ventilatore max	[W]	25	44	57	44	57

Tabella 3.5: Dati di targa dei ventilconvettori esistenti.

In tabella 3.6 sono invece stati conteggiati tutti i ventilconvettori dividendoli per tipologia e per zona servita.

Ventilconvettori					
Zona	Quantità per modello				
	FCX-A-22	**FCX-A-32**	**FCX-A-42**	**FCX-P-32**	**FCX-P-42**
1	0	0	0	3	16
2	0	15	6	0	0
3	0	12	10	0	0
4	1	18	6	0	0
5	0	0	4	10	5

Tabella 3.6: Quantità di terminali ventilconvettori installati per modello e per zona

Analogamente ai sottosistemi di distribuzione e regolazione, si è valutato il rendimento di emissione, seguendo le medesime normative, riportato in tabella 3.8.

	Stagione	
	Invernale	Estiva
Rendimento di emissione	0.95	0.98

Tabella 3.7: Rendimento di emissione.

3.2. Impianto aeraulico

Nel caso di impianti misti, la sezione aeraulica provvede alla ventilazione degli ambienti climatizzati, estraendo l'aria presente in ambiente e immettendo quella di rinnovo. Inoltre, l'aria immessa negli ambienti, detta aria primaria, è costituita da sola aria esterna, apportandone una portata sufficiente a garantire la qualità dell'aria ambiente secondo le prescrizioni della norma UNI 10339 o secondo altri metodi (prestazionali). L'aria prelevata dall'esterno è preventivamente trattata all'interno di un'unità di trattamento dell'aria (UTA), in modo che possa bilanciare il carico termico latente; tuttavia, tipicamente viene anche bilanciato parzialmente il carico sensibile. In figura 3.13 è illustrato lo schema funzionale dell'UTA, le cui portate nominali di immissione ed estrazione sono rispettivamente di 14500 m^3/h e 13000 m^3/h, mentre in tabella 3.9 sono elencate le portate di mandata e di estrazione per zona. L'aria estratta dagli ambienti, prima di essere espulsa viene fatta passare attraverso il recuperatore di calore sensibile (efficienza di recupero nominale pari al 65%), attraverso il quale passa anche l'aria prelevata dall'esterno, preriscaldandola (o raffrescandola) gratuitamente, ricordando che nel caso di impianti misti le due correnti non si miscelano (scambiatore a superficie). Dopodiché l'aria, attraversata la sezione filtrante, incontra le batterie di scambio termico (vedi figura 3.12), che sono scambiatori di calore a contatto indiretto in cui avviene il trasferimento di energia termica tra l'aria e l'acqua calda/refrigerata.

	Portata immessa	**Portata estratta**
ZONA	[m^3/h]	[m^3/h]
1	3100	2800
2	3000	2700
3	3200	2850
4	2800	2500
5	2400	2150
TOTALE	**14500**	**13000**

Tabella 3.8: Portate immesse ed estratte.

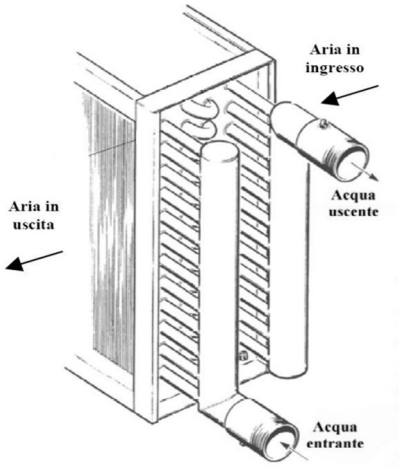
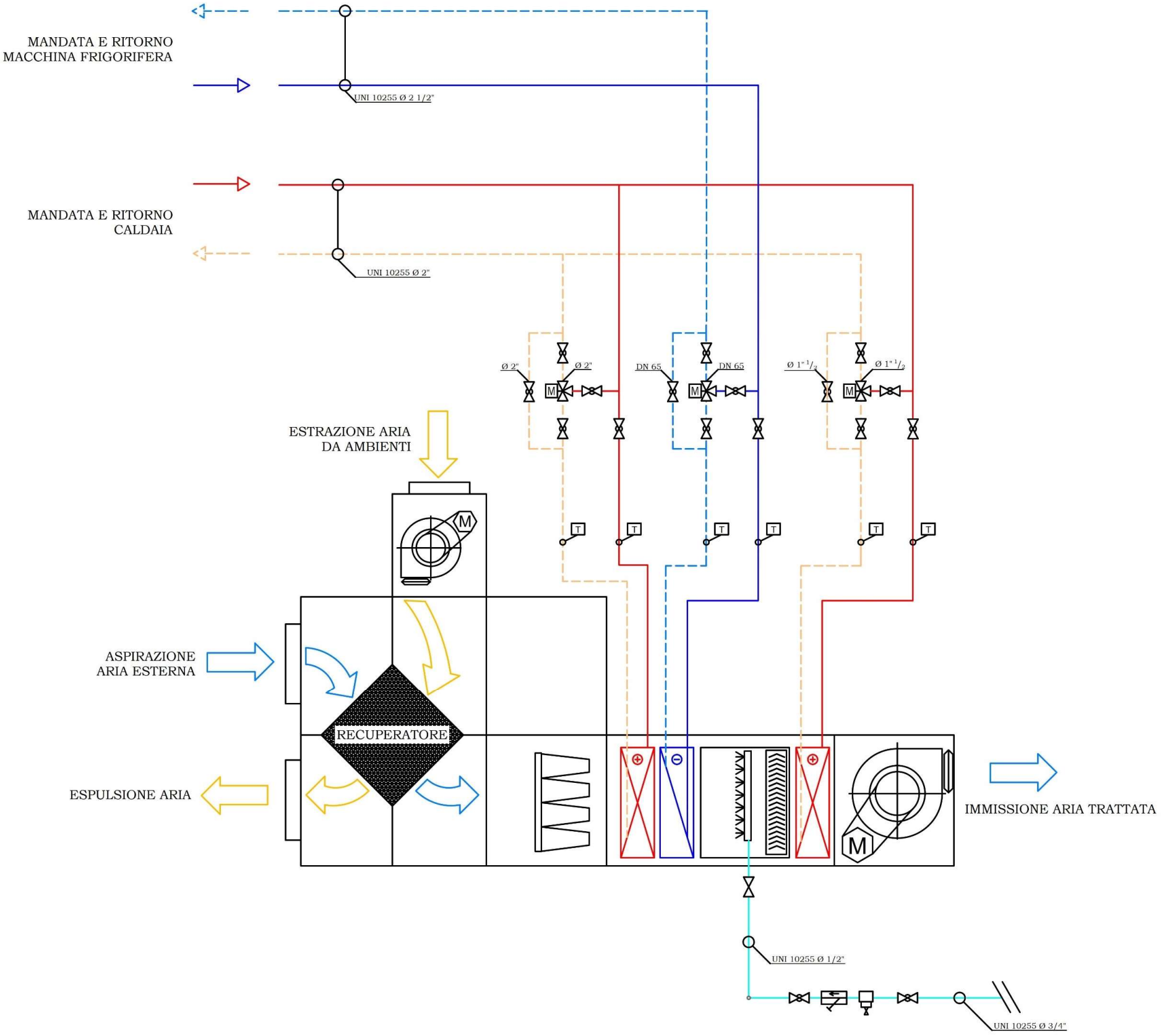


Figura 3.12: Illustrazione di batteria di scambio termico. Immagine tratta da (10)



	Valvola generica di intercettazione		Termostato		Separatore di gocce
	Valvola a sfera		Defangatore magnetico		Ugelli umidificanti
	Valvola miscelatrice motorizzata		Batteria di riscaldamento		Filtro a tasche rigide
	Filtro a Y		Batteria di raffreddamento		Ventilatore

Mandata acqua calda
Mandata acqua refrigerata
Reintegro da rete idrica
Ritorno acqua calda
Ritorno acqua refrigerata

Figura 3.13: Schema funzionale UTA

Le batterie incontrate dal flusso d'aria sono tre e sono ordinate nel modo seguente:

- Batteria di riscaldamento, attiva solamente nella stagione di riscaldamento per preriscaldare il flusso d'aria prima di umidificarlo;
- Batteria di raffreddamento e deumidificazione, attiva solamente nella stagione di raffrescamento, serve per raffreddare l'aria prelevata dall'esterno oltre al punto di rugiada per deumidificarla (oltre che raffrescarla);
- Batteria di post riscaldamento, attiva in entrambe le stagioni, serve innalzare la temperatura del flusso fino al valore deciso dal progettista, negli impianti misti è tipicamente 23 °C, a cui corrisponde un leggero raffrescamento estivo e riscaldamento invernale.

Interposto tra la batteria di raffreddamento e quella di post riscaldamento vi è la sezione umidificante, che ha il compito, esclusivamente durante la stagione invernale, di aumentare l'umidità del flusso immesso in ambiente (innalzando la temperatura dell'aria prelevata esternamente diminuisce in maniera rilevante l'umidità relativa, che dev'essere quindi corretta). Nel caso studio l'umidificazione è attuata tramite ugelli nebulizzanti ad acqua.

Per quanto riguarda la movimentazione dell'aria all'interno delle condotte di mandata e di ripresa, sono presenti due ventilatori centrifughi, le cui specifiche di interesse sono tabulate di seguito.

Pressione statica	**Portata**	**Potenza nominale**
[Pa]	[mc/h]	[kW]
600	20000	6

Tabella 3.9: Principali dati di targa dei ventilatori centrifughi installati nell'UTA.

Le condotte di distribuzione e di estrazione dell'aria che partono dall'UTA sono connesse ai vari piani tramite i montanti, a sezione rettangolare e realizzati in lamiera zincata ricoperta di lana di roccia, che, similarmente all'impianto idronico, sono inseriti all'interno di cavedi, come illustrato in figura 3.14. In modo analogo all'impianto idronico, è stato tracciato lo schema della rete di mandata e di ripresa dell'aria per il primo piano, illustrato in figura 3.15, che ancora una volta rappresenta il piano tipo.

Per quanto riguarda le bocchette, per la mandata sono stati utilizzati dei diffusori a getto elicoidale su pannello quadro (diametro 200 mm), mentre per la ripresa delle semplici griglie in alluminio (597x597 mm); entrambe sono connesse ai tronchi della rete aria tramite dei tubi flessibili fonoisolati.

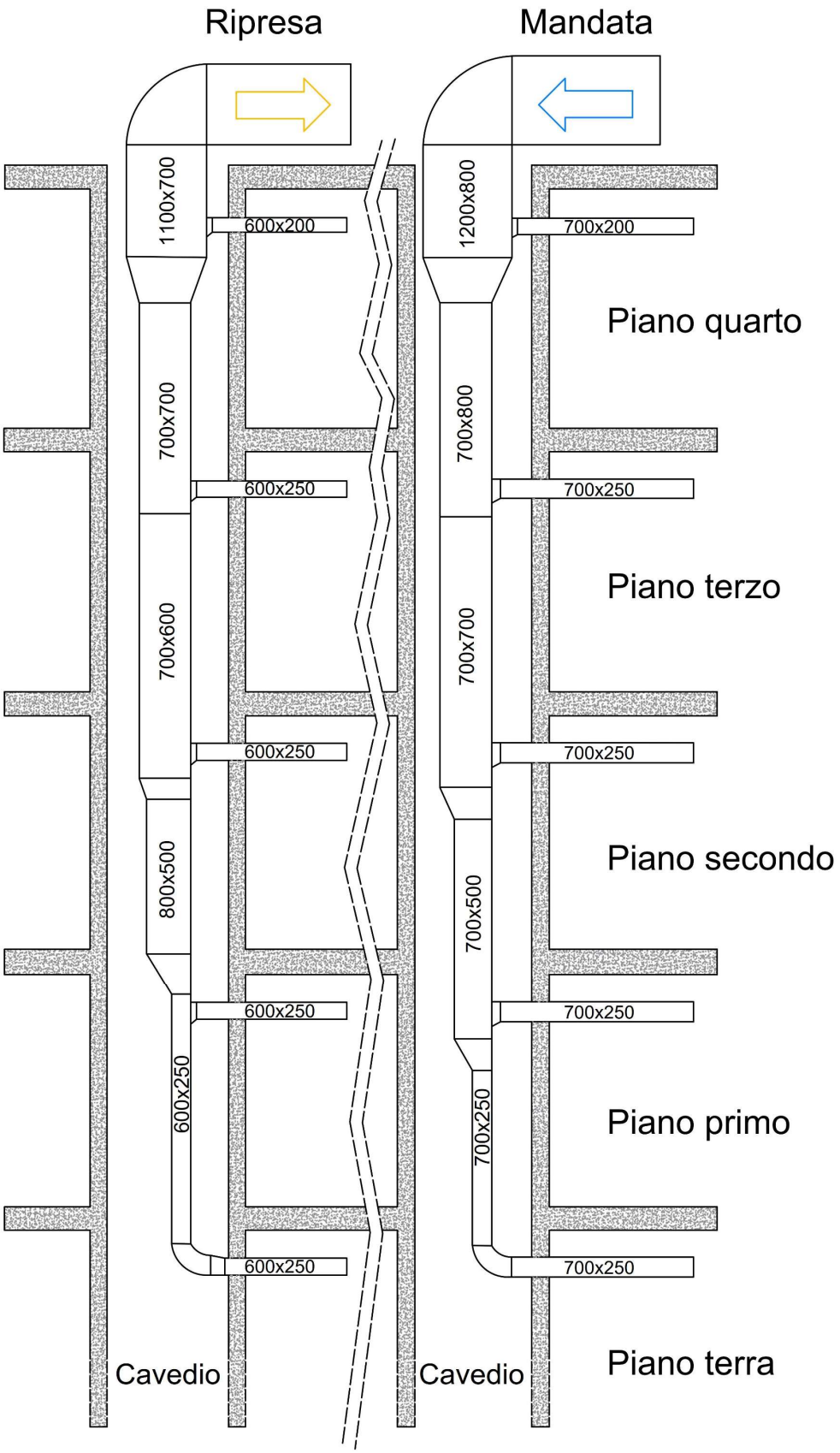


Figura 3.14: Schema dei montanti del sistema di canalizzazione aeraulico

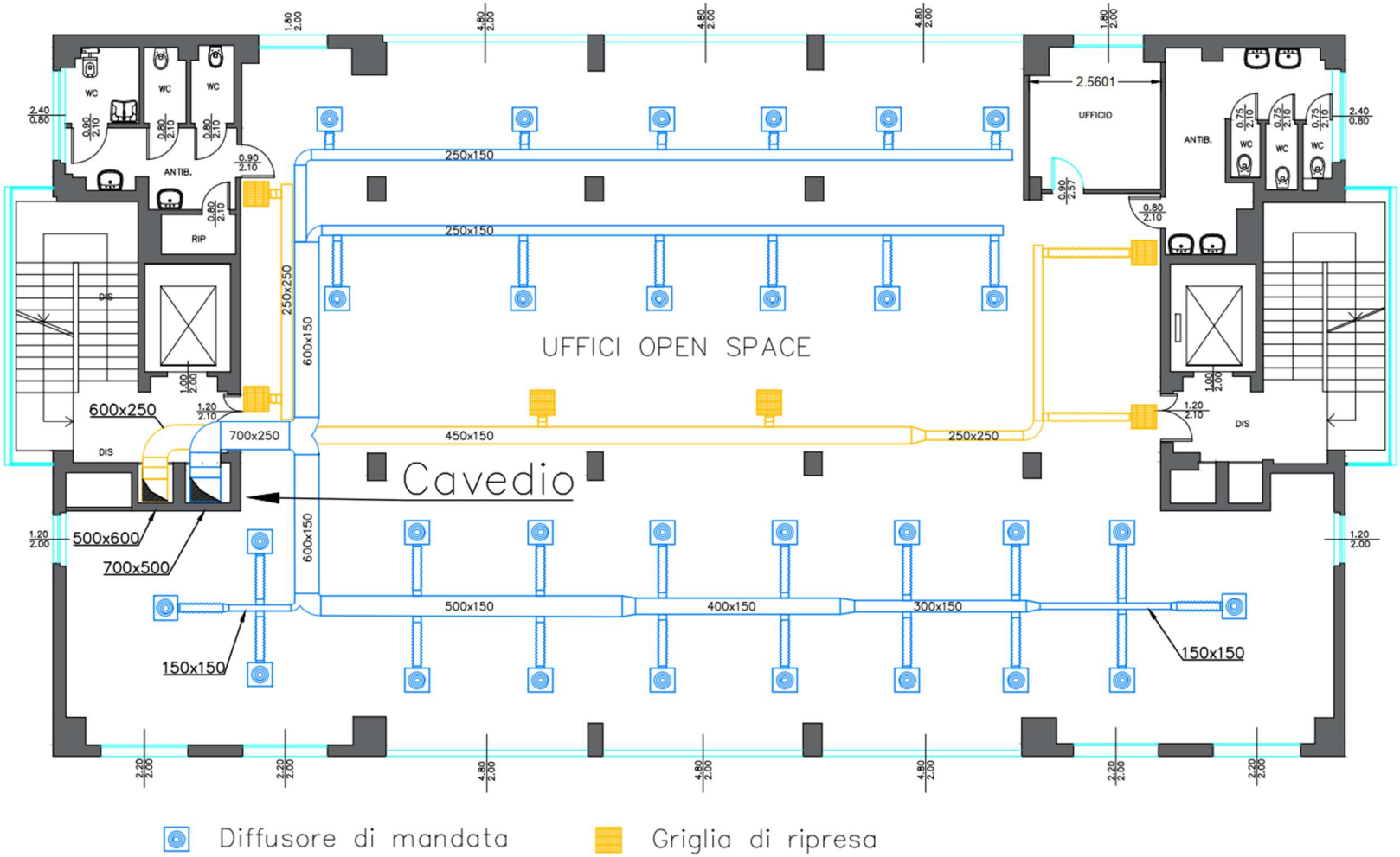


Figura 3.15: Schema delle canalizzazioni di mandata (in azzurro) e ripresa (in giallo) dell'aria per il piano tipo.

4. Attuazione delle modifiche all'impianto e fattibilità economica

Avendo compreso lo stato di fatto del sistema edificio-impianto, è ora possibile fare qualche considerazione riguardo il raggiungimento dell'obbiettivo prefissato, ovvero il distaccamento dai generatori di calore a fonte fossile per il riscaldamento del fabbricato. Questo comporta un'ovvia conseguenza: l'utilizzo di pompe di calore.

4.1. Presupposti teorici della pompa di calore

La pompa di calore è una macchina a ciclo inverso, che, a differenza delle macchine a ciclo diretto, non produce lavoro, ma lo assorbe. Nel caso delle pompe di calore (e delle macchine frigorifere) l'effetto utile è il trasferimento di calore da un ambiente ad un altro a temperatura più alta[18], come schematizzato in fig. 4.1.

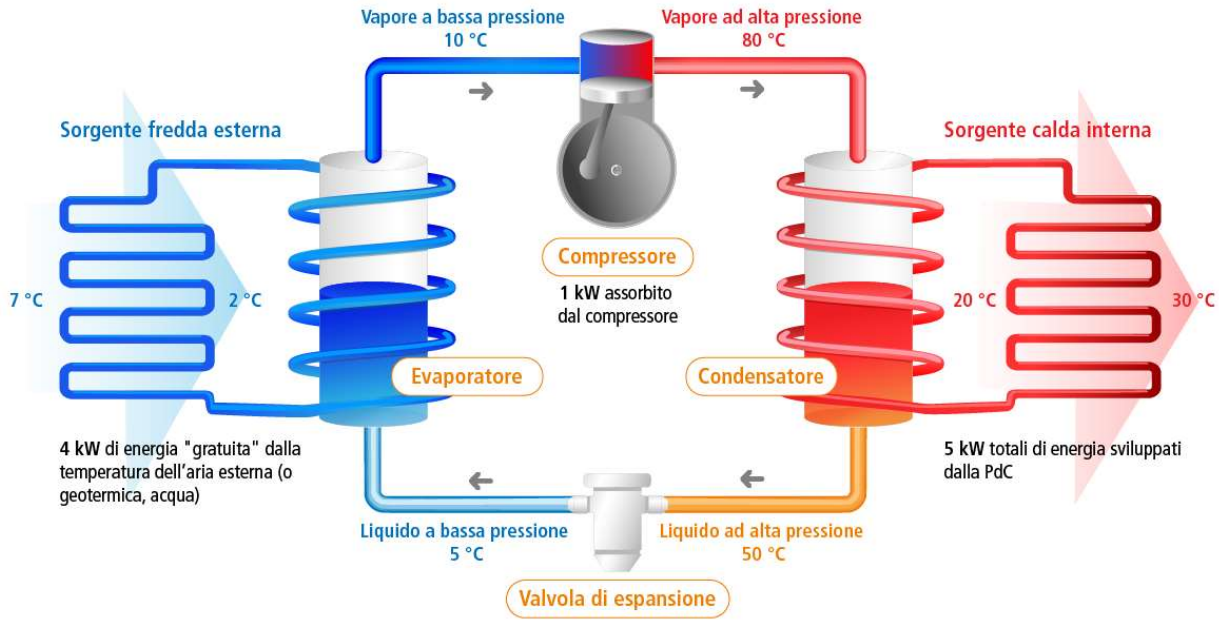


Figura 4.1: Principio di funzionamento di una pompa di calore. Immagine tratta da (11)

Come illustrato, la pompa di calore è composta da cinque componenti principali: un compressore, per l'innalzamento della pressione; la valvola di espansione (o laminazione), per la riduzione isoentalpica della pressione; il condensatore e l'evaporatore, ovvero gli scambiatori di calore lambiti dall'aria dei due termostati e ovviamente il fluido di lavoro.

[18] Nel caso di pompe di calore, l'effetto utile è l'immissione di calore nell'ambiente a temperatura più alta, per le macchine frigorifere invece è l'asportazione di quest'ultimo dall'ambiente a temperatura più bassa.

Il trasferimento di calore realizzato dalla pompa di calore, che non esiste in natura (il calore in natura passa spontaneamente da un termostato a temperatura alta ad un altro a temperatura minore), è reso possibile "giocando" con la pressione del liquido di lavoro, tramite l'uso del compressore e della valvola di laminazione. Modificando la pressione di un liquido (che è il lavoro che dobbiamo compiere dall'esterno per far funzionare la pompa di calore), infatti, si modificano anche le temperature in cui si manifestano i cambiamenti di fase (vedi figura 4.2), e dunque si possono sfruttare il calore latente[19] di evaporazione e condensazione a differenti temperature, in modo da adattarsi alle esigenze dell'ambiente interno ed esterno.

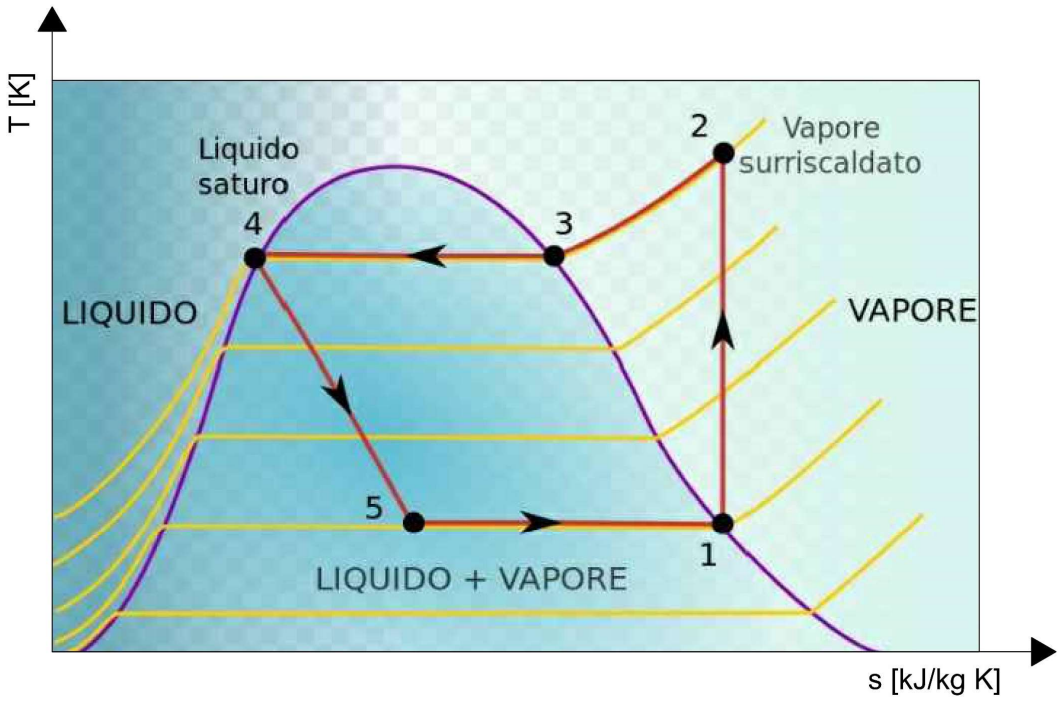


Figura 4.2: Raffigurazione del ciclo frigorifero sul diagramma T-s. 1-2: compressione (isoentropica), 2-3: desurriscaldamento (per recupero parziale), 3-4: condensazione, 4-5: laminazione. In giallo sono visibili le isobare, a cui corrispondono, all'interno della curva di saturazione (viola), le isoterme. Immagine tratta da (12)

In breve, la pompa di calore riesce ad assorbire calore "di basso valore", ovvero a bassa temperatura, facendo espandere il fluido di lavoro fino ad una pressione tale per cui la temperatura di evaporazione è inferiore alla temperatura del termostato meno caldo, e riemettendo tale calore nell'ambiente da riscaldare, facendo condensare il fluido ad una temperatura superiore di tale ambiente.

Il termine con cui si misura l'efficacia del trasferimento di calore della pompa di calore si chiama COP (Coefficient Of Performance), definito dall'equazione 6:

[19] Secondo la teoria cinetica dei gas, durante la transizione di fase di un sistema bifasico, l'energia scambiata con il sistema (assorbita o rilasciata) non ne incrementa (o decrementa) la temperatura, bensì agisce sulla forza dei legami intermolecolari, tale energia è detta calore latente (14).

$$COP = \frac{Q_1}{L} \tag{6}$$

Dove Q_1 è il calore ceduto al termostato ad alta temperatura e L è il lavoro di compressione; dunque, la suddetta equazione rappresenta proprio il rapporto tra l'effetto utile e il dispendio necessario per ottenerlo.

Il COP della macchina di Carnot inversa, ovvero il massimo ottenibile in condizioni di totale idealità, è dato dal rapporto indicato in equazione 7, dunque dipendente dalla temperatura dei due termostati ($T_1 > T_0$):

$$COP_{id} = \frac{T_1}{T_1 - T_0} \tag{7}$$

Sebbene questa sia l'espressione per la pompa di calore ideale, è intuibile che anche quelle reali siano soggette alle stesse limitazioni, in aggiunta alle irreversibilità.

In fig. 4.3 è rappresentato il COP in funzione della differenza di temperatura tra i due termostati, per una temperatura del termostato caldo di 60 °C, per una PdC ideale e per una reale di nuova concezione.

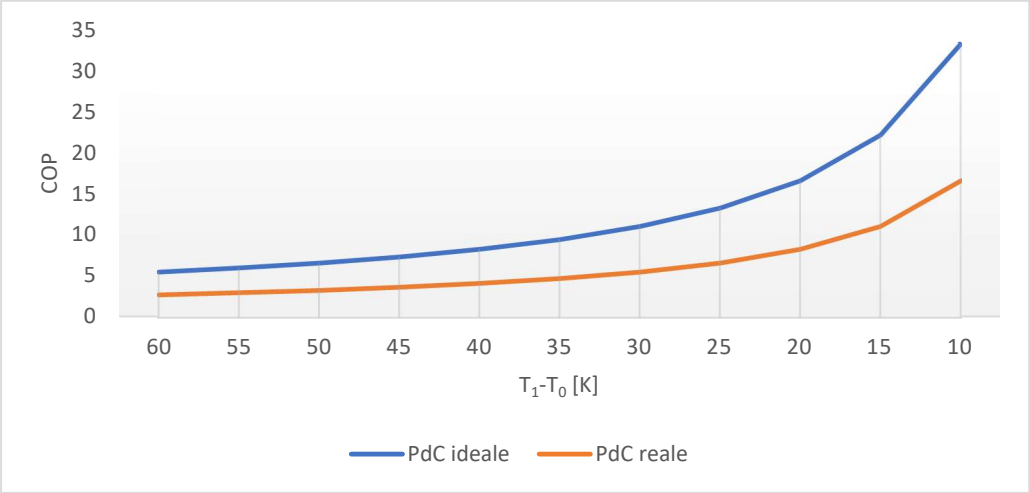


Figura 4.3: Dipendenza del COP di una PdC ideale ed una reale in funzione della differenza di temperatura tra termostati (T_1-T_0).

Risulta quindi inutile la definizione del COP per un solo punto di lavoro, come riportato solitamente nei dati di targa delle pompe di calore esistenti sul mercato, anche perché

tipicamente è irrealistico[20], andando a sopravvalutare il COP utilizzato nelle reali condizioni (temperatura dell'acqua calda di mandata 45-55 °C).

Per questo motivo, è stato introdotto il *Seasonal Coefficient Of Performance* (SCOP) con la norma UNI EN 14825, che tiene conto della dipendenza del COP dalla temperatura e dall'oscillazione del carico, fornendo un'informazione più vicina alla realtà riguardo i consumi della pompa di calore.

Tuttavia, lo SCOP ha utilità in termini di consumi energetici, e non per un dimensionamento, per il quale è necessaria l'informazione del COP in più punti di lavoro (ovvero in diverse condizioni di carico e temperatura esterna).

Di grande interesse per il caso studio è una variante alla pompa di calore classica, chiamata pompa di calore polivalente (o ibrida), che ha la capacità di funzionare contemporaneamente come pompa di calore e come macchina frigorifera. La pompa di calore polivalente è, infatti, una pompa di calore in cui sono installati tre scambiatori di calore, a differenza dei due delle pompe di calore tradizionali (evaporatore e condensatore) (13):

- Un evaporatore acqua-refrigerante, per la produzione di acqua refrigerata;
- Condensatore acqua-refrigerante, per la produzione di acqua calda;
- Un condensatore/evaporatore operante tra aria esterna e liquido refrigerante.

Grazie alla presenza dei tre scambiatori, è possibile adottare tre diverse modalità di funzionamento, illustrate in figura 4.4: solo raffrescamento, raffrescamento e riscaldamento simultanei (vedi figura 4.5), solo riscaldamento.

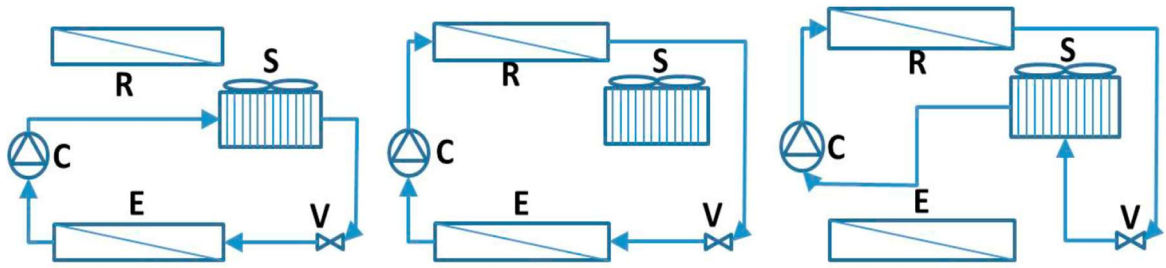


Figura 4.4: Principio di funzionamento di una pompa di calore polivalente. Da sinistra a destra: solo raffrescamento, raffrescamento e riscaldamento simultanei, solo riscaldamento. C=compressore, V=valvola di espansione, E=evaporatore "interno", R=condensatore interno, S=unità evaporante/condensante "esterna". Immagine tratta da (9).

La modalità di interesse, ovvero raffrescamento e riscaldamento simultanei, consiste nel trasferimento di calore dagli ambienti da raffrescare, dove è posto l'evaporatore E,

[20] Il COP è solitamente espresso per 7 °C di temperatura esterna e 35 °C di temperatura di mandata per l'acqua calda, nel caso di pompe di calore aria-acqua; tuttavia, 35 °C è una temperatura molto bassa per cui i terminali esistenti non riescono a soddisfare il carico termico dell'edificio

a quelli da riscaldare, dove è posto il condensatore R, realizzando dunque un trasferimento, o meglio un recupero, di calore interno allo stesso edificio (o comunque nello stesso impianto), utilizzando lo stesso fluido refrigerante.

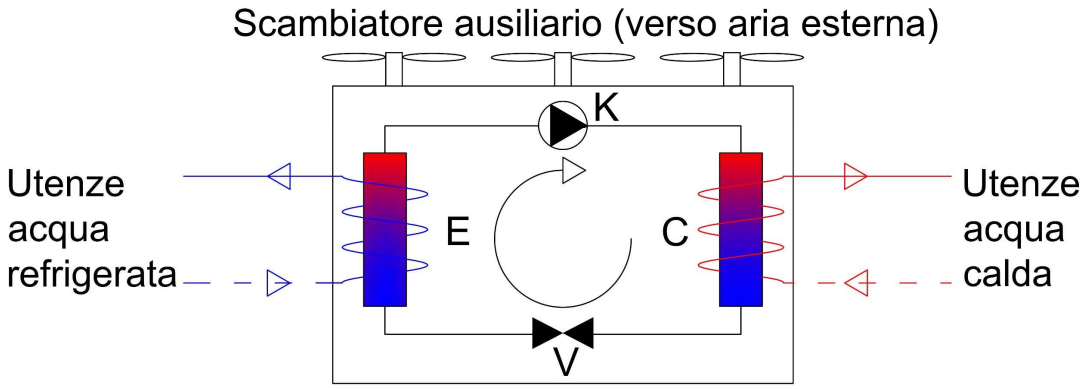


Figura 4.5: Illustrazione semplificata del funzionamento della pdc polivalente.

Quest'azione ovviamente permette di raggiungere livelli di efficienza molto alti, espresso con il termine *Total Energy Ratio* (TER):

$$TER = \frac{Q_1 + Q_0}{L} \tag{8}$$

Dove Q_1 e Q_2 sono rispettivamente il calore asportato ed emesso, mentre L è sempre il lavoro del compressore.

4.2. Modifiche al sistema impiantistico

Per l'accoppiamento della PdC al fabbricato, è ovviamente indispensabile riprendere in mano i carichi termici di riscaldamento e di raffrescamento dell'edificio, in modo da avere ben chiaro il comportamento, in termini di potenza, dell'edificio in funzione della temperatura esterna.

In fig. 2.8 era stata rappresentata la firma energetica dell'edificio per la sola stagione di riscaldamento, che però considera anche i contributi degli apporti gratuiti: in fig. 4.5 è riproposta sotto forma di grafico[21], sia per la stagione di riscaldamento che di raffrescamento, la caratteristica dell'edificio, calcolata secondo la norma UNI 12831[22].

Come è visibile, è presente durante tutto l'anno (anche durante la stagione di riscaldamento) un carico di raffrescamento considerato separatamente e pari a 30 kW, che è proprio quello dovuto alla presenza del centro elaborazione dati; infatti, tutti gli altri carichi endogeni considerati per la stagione estiva sono già inglobati nella curva arancio (curva del carico estivo). Oltre ai carichi di picco, il grafico evidenzia quindi la necessità del funzionamento contemporaneo, per larga porzione dell'anno di riferimento, del sistema di riscaldamento e di raffrescamento: in aggiunta al caso del locale server, durante le mezze stagioni (temperature comprese tra 15 e 24 °C) è necessario il raffrescamento combinato con il riscaldamento, in quanto l'esposizione all'irraggiamento solare può costituire il discriminante tra il dover riscaldare o raffrescare un ambiente; inoltre, è da ricordare che durante la stagione di raffrescamento è necessaria acqua calda per l'alimentazione della batteria di post-riscaldamento presente nella UTA. Questi fattori, congiuntamente alla presenza di un sistema di distribuzione (ed emissione) a quattro tubi, spingono verso la scelta di una pompa di calore polivalente, in modo da poter raffrescare e riscaldare acqua di impianto contemporaneamente con coefficienti di prestazione molto elevati.

Spostando l'attenzione dal sottosistema di generazione a quello di emissione ed unendo i dati delle tabelle 3.5 e 3.6 del precedente capitolo, si è calcolata la potenza teorica erogabile dai terminali, che come illustrato in tabella 4.1, sono largamente sovradimensionati sia rispetto la capacità termica della caldaia esistente, sia nei confronti del carico termico dell'edificio. Nella medesima tabella è possibile constatare come la potenza termica fornita con l'uso di acqua a bassa temperatura (generata da pompa di calore) sia comunque superiore al carico termico, rendendo quindi fattibile, da questo punto di vista, l'intervento di sostituzione del generatore di calore senza modificare il sistema di emissione.

[21] I valori delle caratteristiche di fig. 4.3 sono tabulati nelle tabelle 2.11 e 2.13.

[22] Solo per la stagione di riscaldamento, per il raffrescamento, come già detto, sono stati utilizzati i dati elaborati dal software, calcolati secondo il metodo Carrier-Pizzetti.

Zona	Carico riscaldamento (idronico)	Potenzialità caldo max	Potenzialità caldo (50 °C)	Carico raffrescamento (idronico)	Potenzialità raffrescamento max
	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]
1	**29190**	121950	72840	**29728**	70840
2	**23000**	119025	72840	**31832**	61580
3	**23006**	133700	80320	**32814**	69600
4	**26128**	137350	84420	**34401**	70930
5	**23095**	116230	68360	**23884**	62790
TOT	**124418**	628255	378780	**152659**	335740

Tabella 4.1: Fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento a carico dell'impianto idronico confrontati con le corrispettive capacità di emissione dei terminali

Ora, per quanto riguarda la scelta della macchina (dati di targa in tabella 4.2), non bisogna dimenticare la dipendenza del COP (e dell'EER) e della potenza termica (frigorifera) dalla temperatura esterna. In figura 4.6 è rappresentato l'accoppiamento tra carico di riscaldamento e caratteristica della macchina, entrambe in funzione della temperatura. Risulta ben visibile come il dato indicato sul dato di targa di 269 kW, riferito per 7 °C di temperatura esterna e 45 °C di mandata della temperatura dell'acqua calda, risulti fuorviante per il dimensionamento. Sono stati infatti tracciati i punti della caratteristica della pompa di calore (per una mandata a 50 °C) fino alla temperatura di progetto e risulta palese l'insufficienza di questa sola macchina per il mantenimento della temperatura di progetto interna. Tuttavia, è altresì visibile come il carico già al di sopra degli 0 °C possa essere soddisfatto, facendo apparire un sovradimensionamento della macchina come una mossa sia tecnicamente che economicamente poco convincente.

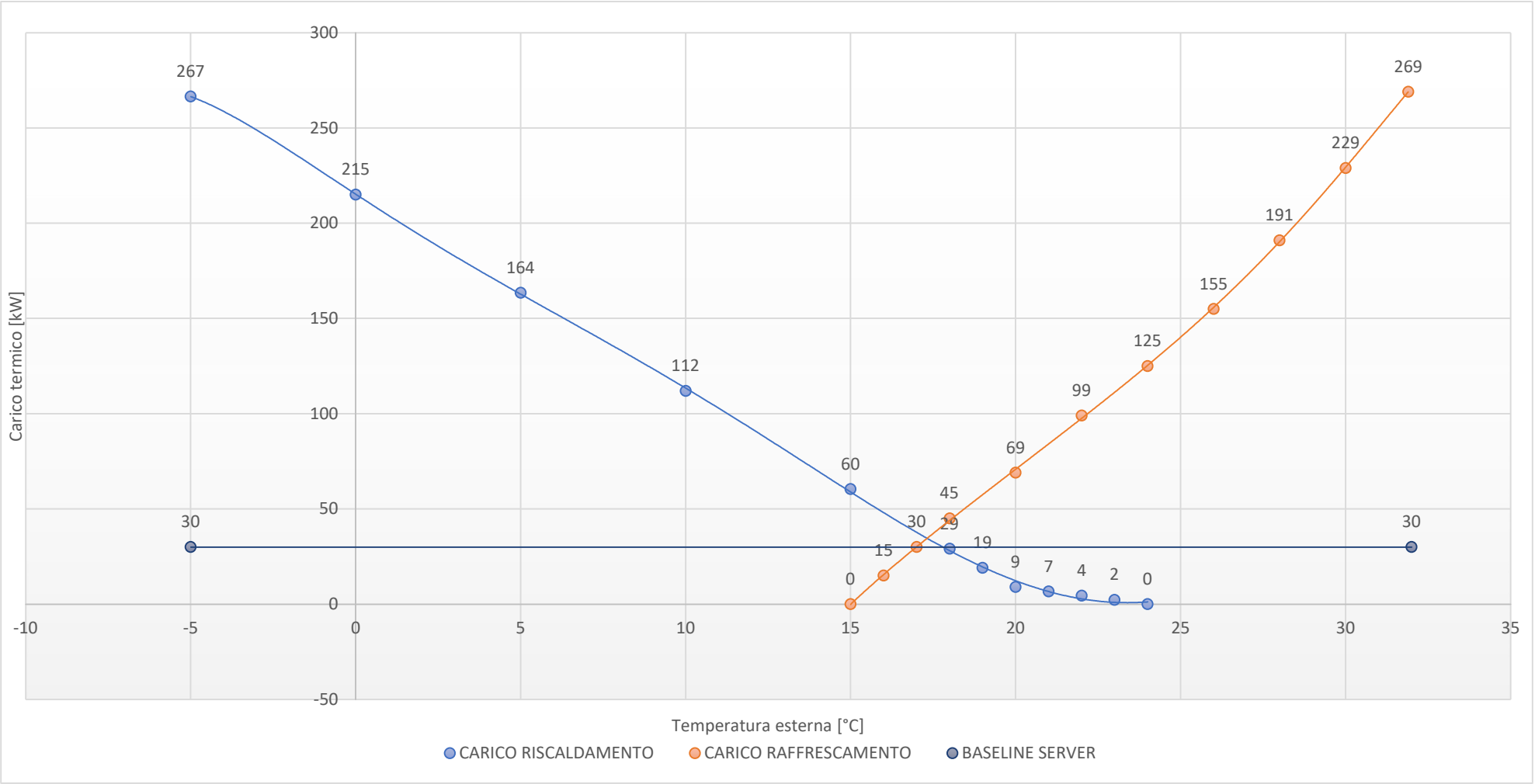


Figura 4.6: Caratteristiche del fabbricato per la stagione di riscaldamento e di raffrescamento.

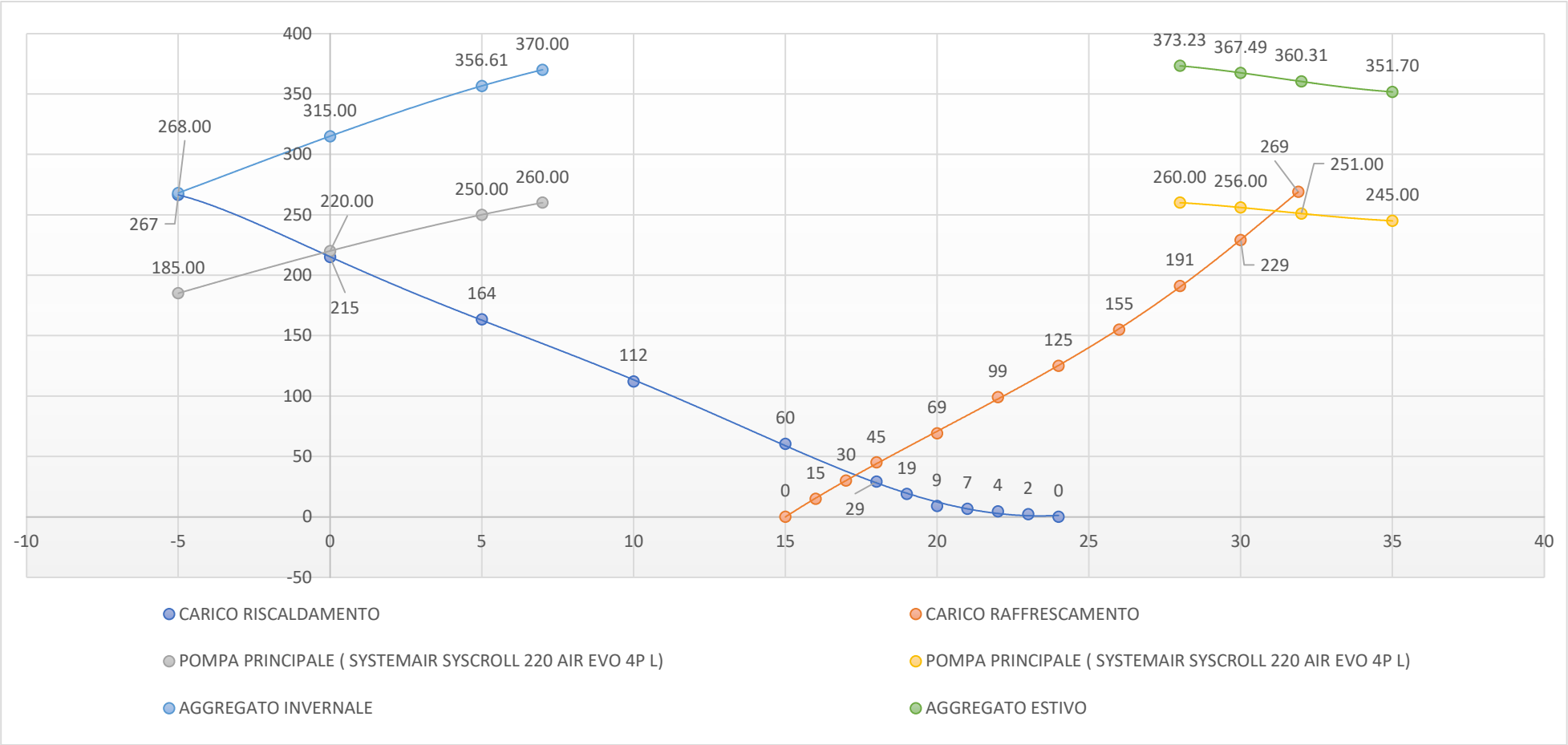


Figura 4.7: Caratteristica dell'edificio, della pdc polivalente e dell'aggregato pdc (polivalente + invertibile).

Osservando la caratteristica quindi ci si accorge che, per evitare un sovradimensionamento della pompa di calore polivalente, sia necessaria un'integrazione a cavallo dell'intervallo [-5, 0] °C, che tipicamente è data da un generatore di calore tradizionale (e.g. caldaia a condensazione). Tuttavia, osservando la caratteristica estiva, si nota come anche nel caso di temperature superiori ai 30 °C sia necessaria un'integrazione sul raffrescamento. Dal duplice bisogno di integrazione, durante i periodi più caldi e più freddi dell'anno, emerge la possibilità di utilizzare una seconda pompa di calore invertibile (dati di targa in tabella 4.3), di taglia ridotta rispetto alla prima, in modo che funzioni, quando necessario, come pompa di calore o come macchina frigorifera, per integrare la pompa polivalente primaria.

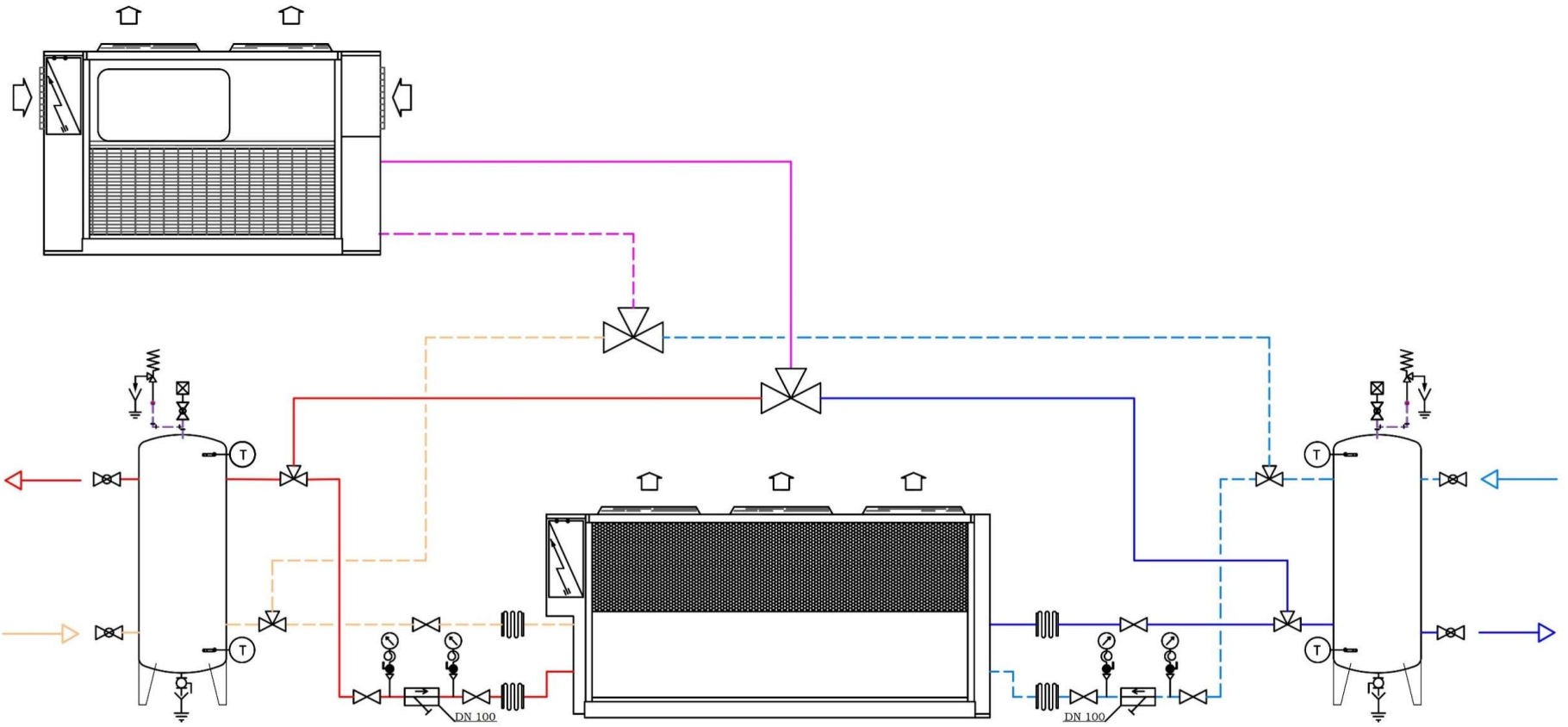
Systemair SyScroll 220 Air EVO 4P			
Solo raffr.	Potenza frigorifera	[kW]	245
	Potenza assorbita totale	[kW]	82.8
	Potenza ass. compressori	[kW]	72.5
	EER[23]	-	2.96
	Potenza ass. ventilatori	[kW]	9.26
Solo risc.	Potenza termica	[kW]	269
	Potenza assorbita totale	[kW]	80.3
	Potenza ass. compressori	[kW]	70.1
	COP[24]	-	3.35
	SCOP	-	3.63
	Potenza ass. ventilatori	[kW]	9
Raffr. e risc.	Potenza termica	[kW]	302
	Potenza frigorifera	[kW]	228
	Potenza assorbita totale	[kW]	74.9
	TER[25]	-	7.08

Tabella 4.2: dati di targa della PdC polivalente.

Systemair AQVH 115		
Potenza termica	[kW]	119
COP	-	3.38
Potenza frigorifera	[kW]	106.7
EER	-	2.9
Potenza assorbita totale	[kW]	35.2

Tabella 4.3: Dati di targa della PdC invertibile (integrazione)

[23] Valutato per una temperatura esterna di 35 °C, umidità relativa 50 % e temperature di mandata e ritorno dell'acqua rispettivamente di 7 e 12 °C.
[24] Valutato per una temperatura esterna di 7 °C, umidità relativa 50 % e temperature di mandata e ritorno dell'acqua rispettivamente di 45 e 40 °C.
[25] Mandata e ritorno dell'acqua calda e dell'acqua refrigerata uguali ai casi di solo riscaldamento e solo raffrescamento.



	Filtro a Y		Valvola di sicurezza		Valvola a sfera		Giunto antivibrante		Rubinetto di scarico
T	Termometro		Valvola sfiato aria		Valvola generica		Manometro di controllo con flangia		

Mandata acqua refrigerata impianto

Mandata acqua calda impianto

Mandata acqua calda/refrigerata impianto

Ritorno acqua refrigerata impianto

Ritorno acqua calda impianto

Ritorno acqua calda/refrigerata impianto

Figura 4.8: Nuovo sottosistema di generazione

Per concludere, si è ipotizzata l'installazione di un sistema fotovoltaico sullo spazio inutilizzato della copertura piana. A tal fine è stato utilizzato il software Solergo 2011, in collaborazione con lo studio di progettazione CS Impianti. Il generatore è composto da 94 moduli del tipo Silicio monocristallino con una vita utile stimata di oltre 20 anni e degradazione della produzione dovuta ad invecchiamento del 0,8 % annuo. In figura 4.7 è illustrata la vista dall'alto della copertura, mentre in figura 4.8 l'ipotesi di installazione.

Di seguito, in tabella 4.4, sono elencate le principali proprietà dei pannelli.

DATI COSTRUTTIVI DEI MODULI	
Costruttore:	MEGASOL
Sigla:	420-HC120-w BF GG U30b 420-HC120-w BF GG U30b
Tecnologia costruttiva:	Silicio monocristallino
Caratteristiche elettriche	
Potenza massima:	420 W
Rendimento:	21,5 %
Tensione nominale:	31,8 V
Tensione a vuoto:	38 V
Corrente nominale:	13 A
Corrente di corto circuito:	14 A
Dimensioni	
Dimensioni:	1134 mm x 1727 mm
Peso:	19 kg

Tabella 4.4: Dati di targa dei pannelli fotovoltaici

Il gruppo di conversione è composto da 2 convertitori statici (Inverter), le cui caratteristiche sono riassunte in tabella 4.5.

Dati costruttivi degli inverter	
Costruttore	FIMER
Sigla	PVS-20-TL 2MPPT PVS
Inseguitori	2
Ingressi per inseguitore	2
Caratteristiche elettriche	
Potenza nominale	20 kW
Potenza massima	20 kW
Potenza massima per inseguitore	15 kW
Tensione nominale	620 V
Tensione massima	1100 V
Tensione minima per inseguitore	200 V
Tensione massima per inseguitore	850 V
Tensione nominale di uscita	400 V
Corrente nominale	26 A
Corrente massima	40 A
Corrente massima per inseguitore	40 A
Rendimento	0,98

Tabella 4.5: Dati di targa degli inverter

Inverter 1	**MPPT 1**	**MPPT 2**
Moduli in serie	23	23
Stringhe in parallelo	1	1
Tensione di MPP (STC)	731,4 V	731,4 V
Numero di moduli	23	23
Inverter 2	**MPPT 1**	**MPPT 2**
Moduli in serie	24	24
Stringhe in parallelo	1	1
Tensione di MPP (STC)	763,2 V	763,2 V
Numero di moduli	24	24

Tabella 4.6: Configurazione dei moduli

Figura 4.9: Vista dall'alto della copertura piana. Immagine tratta da Google Earth.

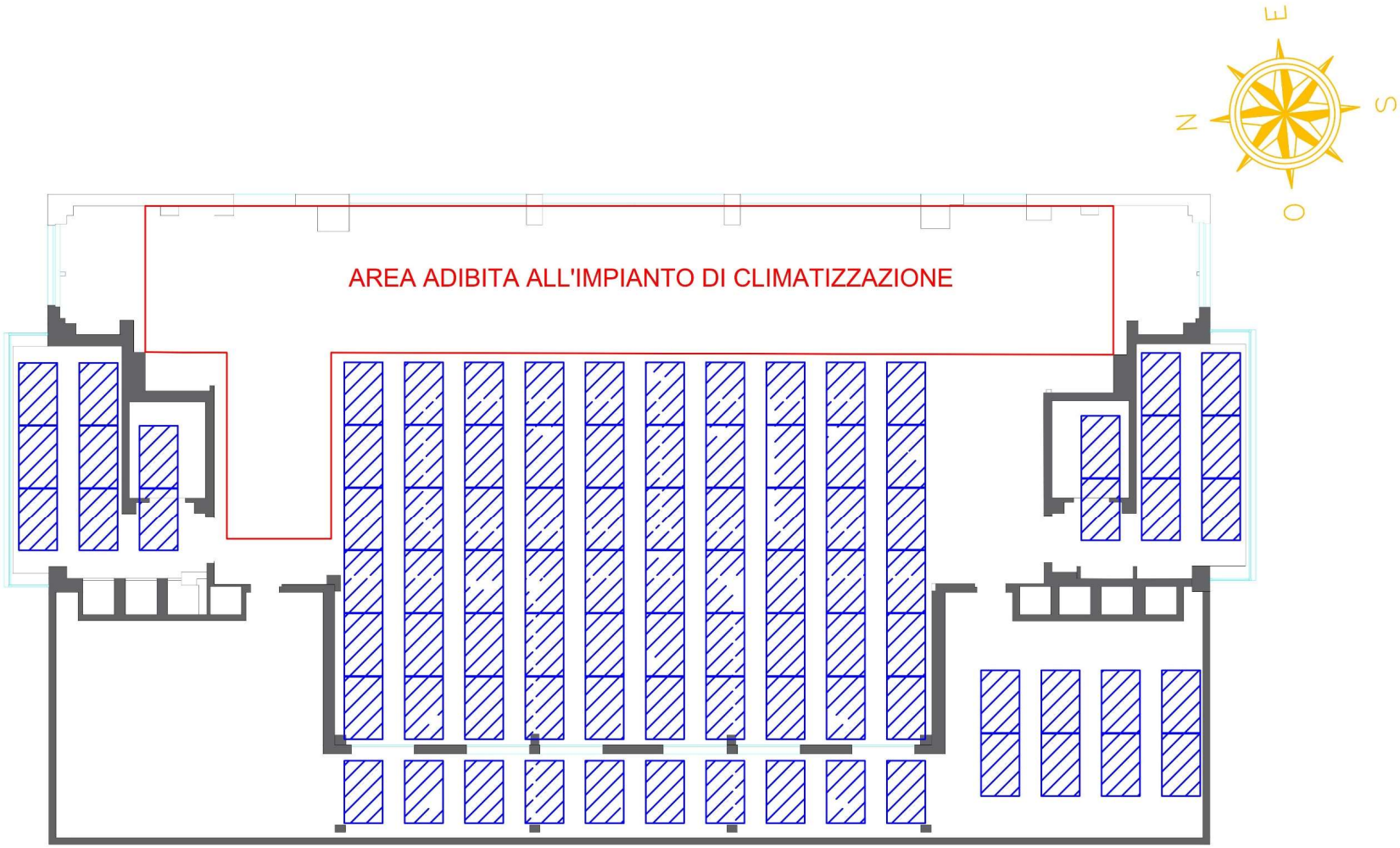


Figura 4.10: Posizionamento pannelli fotovoltaici sulla copertura.

La potenza nominale del generatore risulta pari a 39480 W, mentre la producibilità annua (all'anno 0) è riassunta in tabella 4.7.

Mese	**Produzione reale** (comprensiva di perdite) [kWh]
Gennaio	1083,6
Febbraio	1640,6
Marzo	3150,3
Aprile	4742,5
Maggio	5790,5
Giugno	6156,2
Luglio	6916,0
Agosto	5710,8
Settembre	3691,3
Ottobre	2260,8
Novembre	1185,2
Dicembre	960,9
Anno	**43288,8**

Tabella 4.7: Producibilità del sistema fotovoltaico.

Le perdite considerate per la valutazione della producibilità dell'impianto sono riassunte in tabella 4.8, ed in figura 4.11 è illustrato il diagramma di ombreggiamento.

Perdite per ombreggiamento	4,78 %
Perdite per aumento di temperatura	4,17 %
Perdite di mismatching	5,00 %
Perdite in corrente continua	1,50 %
Altre perdite (sporcizia, tolleranze...)	5,00 %
Perdite per conversione	2,00 %
Perdite totali	20,51 %

Tabella 4.8: Perdite percentuali dell'impianto fotovoltaico

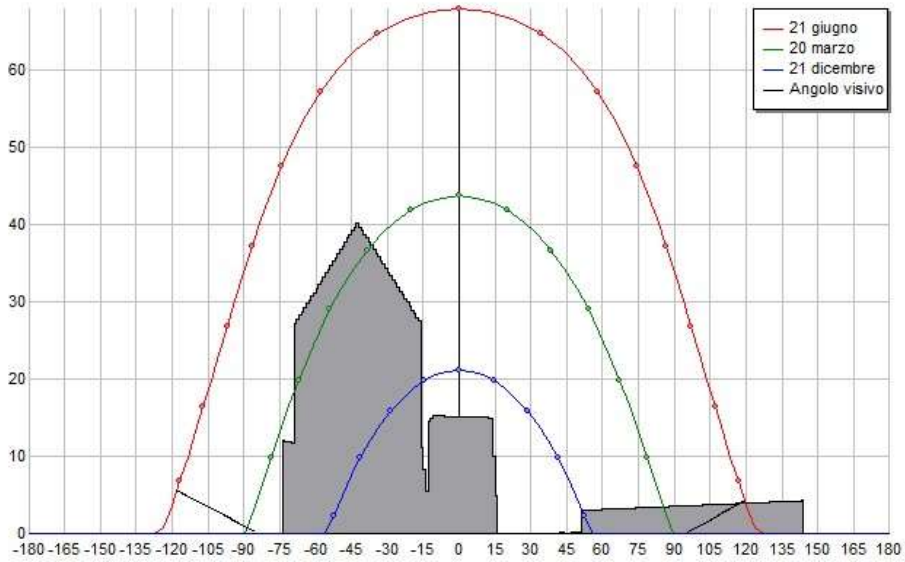


Figura 4.11: Diagramma di ombreggiamento, realizzato con Edilclima.

4.3. Fattibilità economica

Al fine di quantificare l'eventuale beneficio economico della modifica impiantistica in oggetto, si sono valutati i flussi di cassa annuali e il valore attuale netto (VAN), nonché il tempo di ritorno dell'investimento (PBT). L'equazione che esprime il VAN è la seguente (eq.9):

$$VAN_n = \sum_{t=0}^{n} \left\{ -I + \sum_k R_k * \frac{[(1+i'_k)^n - 1]}{[i'_k * (1+i'_k)^n]} \right\} \quad (9)$$

Dove:

- I è l'investimento iniziale [€];
- R_k è il risparmio annuo (n-esimo anno) [€/anno] della risorsa energetica k-esima (energia elettrica e gas naturale) rispetto all'impianto esistente;
- $i'_k = (i - e_k)/(1 + e_k)$ [%];
- i è il tasso di interesse, pari al 2.11 [%], dato ricavato da (2);
- e_k è il tasso di incremento medio del costo dell'energia, uno per il gas (e_g) ed uno per l'energia elettrica (e_E) [%];

Per quanto riguarda l'investimento iniziale, si considerano i 3 contributi (basati su preventivi reali) di tabella 4.9:

PdC polivalente + accessori	140000	[€]
PdC invertibile + accessori	60000	[€]
Impianto FV	50000	[€]
TOTALE (NO FV)	**200000**	[€]
TOTALE (FV)	**250000**	[€]

Tabella 4.9: Costi di investimento.

Per quanto riguarda il risparmio annuo R_k, bisogna prima di tutto valutare le quantità di energia coinvolte dal sistema impiantistico. Rifacendosi al capitolo 2, si erano già valutati i fabbisogni di energia necessari al fabbisogno dell'edificio (e delle batterie della UTA nel caso estivo). Vengono riassunte in Tabella 4.10.

ESTATE	Qidronico	**[kWh]**	-172388[26]
	Qaeraulico (batt fredda)	**[kWh]**	-288492
	Qaeraulico (batt calda)	**[kWh]**	130761
INVERNO	Qidronico	**[kWh]**	94291
	Qaeraulico (batt calde)	**[kWh]**	132975

Tabella 4.10: Fabbisogni di energia (netta) per il raffrescamento ed il riscaldamento.

[26] Il fabbisogno di energia per la climatizzazione idronica in estate è ridotto rispetto a quello di tabella 2.16 in quanto la quota latente è già associata alla parte aeraulica.

Tuttavia, le suddette energie (termiche e frigorifere) devono essere riferite all'energia primaria. A tale scopo si utilizzano i rendimenti[27] (vedi tabella 4.11 e 4.12) dei sottosistemi di generazione, distribuzione, emissione e regolazione, differenziando tra impianto esistente e impianto "nuovo", per formulare un rendimento complessivo del sistema impiantistico.

STAGIONE DI RISCALDAMENTO			
IMPIANTO ESISTENTE		**IMPIANTO NUOVO**	
ηgen	0.98	**ηgen (SCOP)**	3.63
ηdist	0.95	**ηdist**	0.95
ηreg	0.96	**ηreg**	0.96
ηem	0.95	**ηem**	0.95

Tabella 4.11: Rendimenti dei sottosistemi impiantistici per la stagione di riscaldamento.

STAGIONE DI RAFFRESCAMENTO			
IMPIANTO ESISTENTE		**IMPIANTO NUOVO**	
ηgen (frigorifera) (SEER)[28]	3.60	**ηgen (frigorifera) SEER[28]**	4.30
ηgen (calore)	0.98	-[29]	-
ηdist	0.99	**ηdist**	0.99
ηreg	0.95	**ηreg**	0.95
ηem	0.98	**ηem**	0.98

Tabella 4.12: Rendimenti dei sottosistemi impiantistici per la stagione di raffrescamento.

Le risultanti energie primarie per la climatizzazione sono riassunte dunque in tabella 4.13, avendole calcolate come in equazione 10:

$$Q_{primaria} = \frac{Q}{\eta_{gen} * \eta_{dist} * \eta_{reg} * \eta_{em}} \qquad (10)$$

	IMPIANTO ESISTENTE			IMPIANTO NUOVO		
INVERNO	Q_{prim} (gas nat.)	[kWh]	242618.1	Q_{prim} (en. el.)	[kWh]	65500.2
ESTATE	Q_{prim} (en. el.)	[kWh]	103375.4	Q_{prim} (en. el.)	[kWh]	89722.02
	Q_{prim} (gas nat.)	[kWh]	133429.6			

Tabella 4.13: Energie primarie per la climatizzazione.

[27] I rendimenti di distribuzione, emissione e regolazione sono stati valutati secondo la norma UNI TS-11300-2 E 11300-3.

[28] Tali valori sono stati stimati secondo la curva di carico e non sono dati di targa.

[29] La generazione di caldo durante la stagione di raffrescamento è, nel nuovo impianto a pompa di calore polivalente, "gratuita".

Individuate le quantità (in kWh), sono state condotte delle ricerche sull'andamento dei prezzi di queste due commodity, per poter estrapolare da tali valori una tendenza. In figura 4.12 sono illustrati i prezzi del gas naturale, comprensivi di tasse e imposte in Italia, tra il 2007 ed il 2021 (2). È stata tracciata una linea di tendenza per evidenziare il rialzo medio annuale dei prezzi, che risulta essere pari a circa il 2.3 %. Allo stesso modo è stato valutato l'andamento dei prezzi dell'energia elettrica, illustrati in figura 4.13, per i quali l'aumento medio del prezzo è invece circa l'1.8 % (2).

Le grandezze estrapolate da questi dati sono state riassunte in tabella 4.14.

	Simbolo	U.M	
Prezzo gas naturale (metano)	c_{Gv}	[Eur/smc]	0.891
Prezzo gas naturale (metano)	c_{Ge}[30]	[Eur/kWh]	0.083
Tasso di incremento medio del costo del gas	e_g	[%/anno]	2.29
Prezzo energia elettrica	C_E	[Eur/kWh]	0.187
Tasso di incremento medio del costo dell'energia elettrica	e_E	[%/anno]	1.81

Tabella 4.14: Dati di interesse per l'analisi economica relativi alle fonti energetiche. Dati di (2).

Ora sono presenti tutti i dati per calcolare R_k, ovvero il delta costo:

$$R_k = \Delta C_k = c_k\left(Q_{prim,k}^{pre} - Q_{prim,k}^{post}\right) \tag{11}$$

Dove con l'apice pre e post si indicano rispettivamente l'impianto esistente e quello a pompa di calore. Gli R_K, suddivisi stagionalità sono dunque riassunti in tabella 4.15 e in figura 4.14.

R gas ESTATE	[€]	11114.69
R en. el. ESTATE	[€]	2553.18
R gas INVERNO	[€]	20210.09
R en. el INVERNO	[€]	-12248.54
R ESTATE	[€]	13667.86
R INVERNO	[€]	7961.55
R en. el FV[31]	[€]	8095.04
R (NO FV)	[€]	**21629.41**
R (FV)	[€]	**29724.45**

Tabella 4.15: Risparmi monetari (Rk) correlati all'energia primaria.

[30] Per la conversione si è considerato il potere calorifico inferiore del gas pari a 10.69 [kWh/smc]
[31] L'energia elettrica prodotta dall'impianto FV è completamente utilizzata dall'impianto a pompa di calore e/o dal sistema di illuminazione, per cui si attua una semplice somma algebrica.

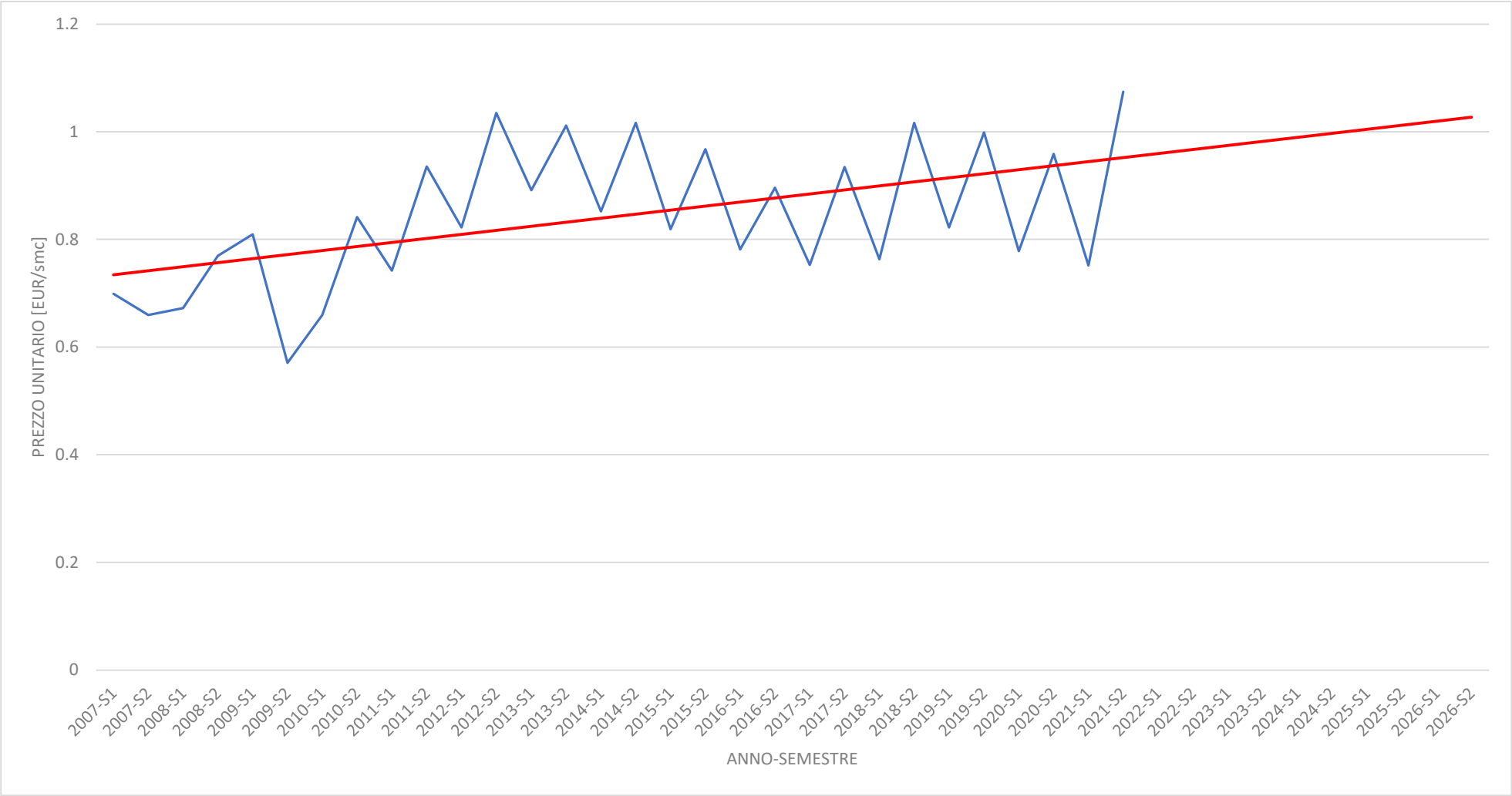


Figura 4.12: Andamento del costo del gas naturale in Italia [2007; 2021]. Dati di (2).

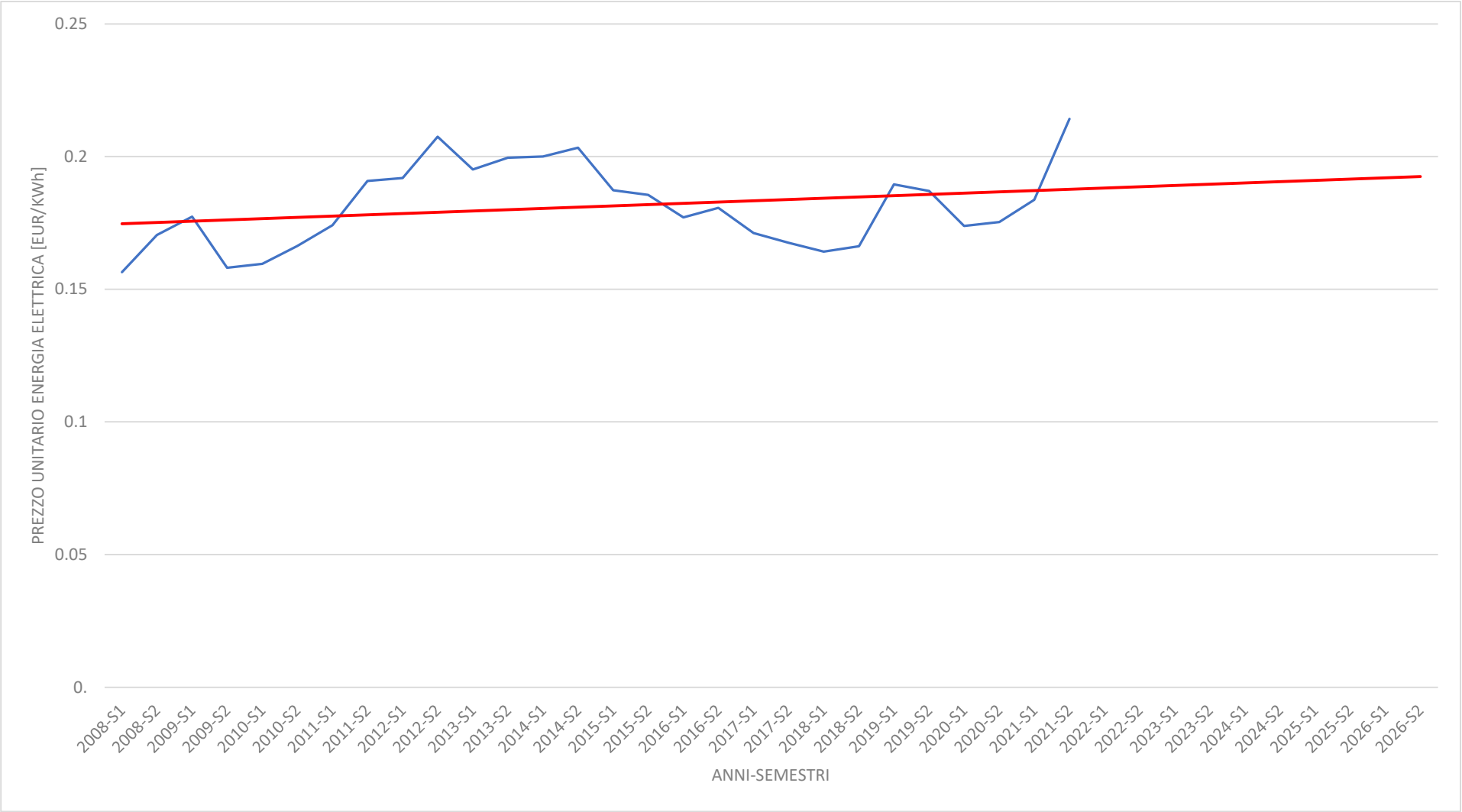


Figura 4.13: Andamento del costo dell'energia elettrica in Italia [2008-2021]. Dati di (2).

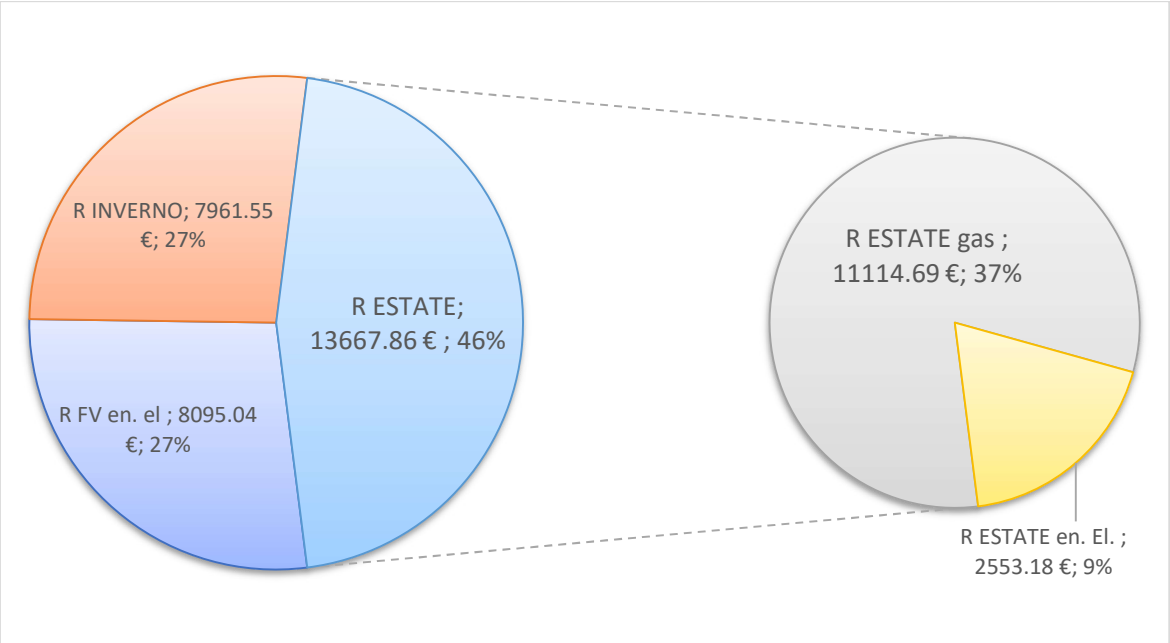


Figura 4.14: Quote di risparmio per lo scenario con impianto FV.

Come visibile nella figura soprastante, la quota maggioritaria di risparmio è durante la stagione di raffrescamento, in particolare per il gas. Questo accade perché, come già affermato, la macchina polivalente può fornire calore "gratuito" alla batteria di post-riscaldamento della UTA, che nell'impianto esistente è alimentata bruciando metano.

Ora sono presenti tutti gli ingredienti per il calcolo del VAN per gli n-anni (n=20) a seguire. In figura 4.15 è rappresentato l'andamento del VAN, mentre in tabella 4.16 sono tabulati tutti i valori.

All'interno del VAN non sono stati considerati incentivi per l'installazione del fotovoltaico o per le pompe di calore (ad esempio ci sarebbe l'incentivo della lg 296/06, oppure il superbonus 110), in modo da fornire una valutazione economica di tali tecnologie schietta e svincolata dalla aleatorietà di questi.

Anni	VAN (NO FV)	VAN (FV)
0	-200000.00	-250000.00
1	-178286.88	-220215.63
2	-156490.05	-190371.25
3	-134609.49	-160466.78
4	-112645.17	-130502.14
5	-90597.10	-100477.24
6	-68465.25	-70392.00
7	-46249.61	-40246.34
8	-23950.15	-10040.16
9	-1566.88	20226.60
10	20900.24	50554.05
11	43451.22	80942.27
12	66086.08	111391.34
13	88804.83	141901.34
14	111607.50	172472.37
15	134494.10	203104.51
16	157464.66	233797.85
17	180519.18	264552.46
18	203657.70	295368.45
19	226880.24	326245.90
20	250186.81	357184.89

Tabella 4.16: VAN per lo scenario con e senza FV.

Come visibile, il PBT risulta essere pari a 9 anni nel caso si installi il sistema FV, salendo di 1 anno nel caso si ometta. A parte la marginale differenza sul tempo di ritorno, si ha comunque un risparmio, dopo 20 anni, maggiore di 100000 euro, rendendo lo scenario con il FV chiaramente vincente rispetto a quello senza.

Figura 4.15: Raffigurazione grafica del VAN per i due scenari.

Conclusioni

La caldaia rappresenta da svariati decenni il punto di riferimento per il riscaldamento degli edifici; nonostante ciò, fattori quali la scarsa produzione di gas naturale in Italia unitamente all'instabilità geopolitica dei paesi esportatori e alla traiettoria di decarbonizzazione tracciata dall'Unione Europea, fanno sorgere un importante punto interrogativo riguardo la fattibilità di affidarsi a tecnologie alternative.

Dall'analisi del sistema edificio-impianto del caso studio emerge che da una, tutto sommato piccola, sostituzione del sottosistema di generazione esistente in favore di una pompa di calore polivalente accoppiata ad un'altra invertibile, sia possibile rendere indipendente il fabbisogno di climatizzazione dall'utilizzo di gas naturale.

La natura dell'impianto esistente, ovvero un impianto misto aria-acqua rende infatti particolarmente avvincente questa opzione: con la pompa di calore polivalente risulta possibile produrre gratuitamente calore durante la stagione estiva, utilizzato nella batteria di post-riscaldamento dell'UTA, che sarebbe altrimenti uno scarto dissipato in atmosfera. Al contempo, la presenza di un sistema di distribuzione idronico a quattro tubi rende il riscaldamento e il raffrescamento di locali distinti durante le mezze stagioni estremamente efficiente.

La presenza di una copertura piana, in larga parte non utilizzata, rende possibile l'installazione di un generatore fotovoltaico. Tale installazione non risulta essere solo possibile ma anche conveniente: si ha la riduzione del PBT di circa un anno e al contempo un VAN maggiorato di più di 100'000 euro nell'arco temporale di un ventennio.

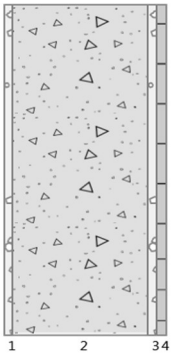
In generale, il PBT di nove anni non risulta essere breve. Tuttavia, va sottolineato che in questa sede non sono stati considerati gli incentivi economici e l'ingente rialzo del prezzo del gas naturale dell'ultimo semestre: tutti fattori che potrebbero realisticamente dimezzare il tempo di ritorno e maggiorare la convenienza economica di questo intervento.

Appendice A

A.1 – Componenti dell'involucro edilizio

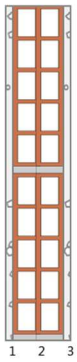
Descrizione della struttura: ***Parete Ascensori***	**Codice:** ***M1***

Trasmittanza termica	***2,574***	W/m^2K
Spessore	***229***	mm
Temperatura esterna (calcolo potenza invernale)	***10,0***	°C
Permeanza	***0,001***	$10^{-12}kg/sm^2Pa$
Massa superficiale	***505***	kg/m^2
Trasmittanza periodica	***0,801***	W/m^2K
Fattore attenuazione	***0,311***	-
Sfasamento onda termica	***-6,7***	h



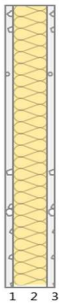
N.	**Descrizione strato**	**s**	**Cond.**	**R**	**M.V.**	**C.T.**	**R.V.**
-	Resistenza superficiale interna	-	-	*0,130*	-	-	-
1	Intonaco di calce e gesso	*12,00*	*0,7000*	*0,017*	*1400*	*1,00*	*10*
2	C.l.s. armato (1% acciaio)	*190,00*	*2,3000*	*0,083*	*2300*	*1,00*	*130*
3	Intonaco di calce e gesso	*12,00*	*0,7000*	*0,017*	*1400*	*1,00*	*10*
4	Piastrelle in ceramica (piastrelle)	*15,00*	*1,3000*	*0,012*	*2300*	*0,84*	*9999999*
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	*0,130*	-	-	-

Descrizione della struttura: ***Parete tramezza vs non riscaldati***			**Codice:** ***M2***
Trasmittanza termica	***2,023***	W/m^2K	
Spessore	***104***	mm	
Temperatura esterna (calcolo potenza invernale)	***10,0***	°C	
Permeanza	***208,333***	$10^{-12}kg/sm^2Pa$	
Massa superficiale	***96***	kg/m^2	
Trasmittanza periodica	***1,809***	W/m^2K	
Fattore attenuazione	***0,894***	-	
Sfasamento onda termica	***-2,5***	h	

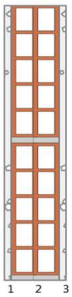


N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	*0,130*	-	-	-
1	Intonaco di calce e gesso	*12,00*	*0,7000*	*0,017*	*1400*	*1,00*	*10*
2	Mattone forato	*80,00*	*0,4000*	*0,200*	*775*	*0,84*	*9*
3	Intonaco di calce e gesso	*12,00*	*0,7000*	*0,017*	*1400*	*1,00*	*10*
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	*0,130*	-	-	-

Descrizione della struttura: ***Parete cartongesso***			**Codice:** ***M3***
Trasmittanza termica	***0,614***	W/m^2K	
Spessore	***75***	mm	
Permeanza	***666,667***	$10^{-12}kg/sm^2Pa$	
Massa superficiale	***19***	kg/m^2	
Trasmittanza periodica	***0,608***	W/m^2K	
Fattore attenuazione	***0,991***	-	
Sfasamento onda termica	***-0,8***	h	



N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	*0,130*	-	-	-
1	Cartongesso in lastre	*13,00*	*0,2100*	*0,062*	*700*	*1,00*	*10*
2	Fibra di vetro - Pannello semirigido	*50,00*	*0,0400*	*1,250*	*30*	*1,03*	*1*
3	Cartongesso in lastre	*12,00*	*0,2100*	*0,057*	*700*	*1,00*	*10*
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	*0,130*	-	-	-

Descrizione della struttura: ***Parete tramezza***			**Codice:** ***M4***
Trasmittanza termica	***2,023***	W/m^2K	
Spessore	***104***	mm	
Permeanza	***208,333***	$10^{-12}kg/sm^2Pa$	
Massa superficiale	***96***	kg/m^2	
Trasmittanza periodica	***1,809***	W/m^2K	
Fattore attenuazione	***0,894***	-	
Sfasamento onda termica	***-2,5***	h	

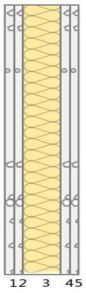
N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	*0,130*	-	-	-
1	Intonaco di calce e gesso	*12,00*	*0,7000*	*0,017*	*1400*	*1,00*	*10*
2	Mattone forato	*80,00*	*0,4000*	*0,200*	*775*	*0,84*	*9*
3	Intonaco di calce e gesso	*12,00*	*0,7000*	*0,017*	*1400*	*1,00*	*10*
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	*0,130*	-	-	-

Descrizione della struttura: ***Vetrata interna***			**Codice:** ***M5***
Trasmittanza termica	***2,381***	W/m^2K	
Spessore	***20***	mm	
Permeanza	***0,002***	$10^{-12}kg/sm^2Pa$	
Massa superficiale	***25***	kg/m^2	
Trasmittanza periodica	***2,362***	W/m^2K	
Fattore attenuazione	***0,992***	-	
Sfasamento onda termica	***-0,6***	h	

N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	*0,130*	-	-	-
1	Vetro per finestre	*5,00*	*1,0000*	*0,005*	*2500*	*1,00*	*9999999*
2	Intercapedine non ventilata	*10,00*	*0,0667*	*0,150*	-	-	-
3	Vetro per finestre	*5,00*	*1,0000*	*0,005*	*2500*	*1,00*	*9999999*
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	*0,130*	-	-	-

Descrizione della struttura: ***Parete cartongesso doppia lastra***	**Codice:** ***M6***

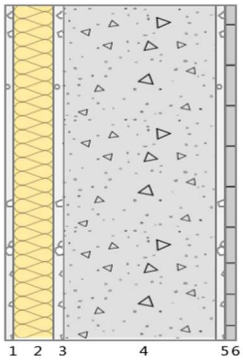
Trasmittanza termica	***0,574***	W/m^{2}K
Spessore	***99***	mm
Permeanza	***370,370***	10^{-12}kg/sm^{2}Pa
Massa superficiale	***36***	kg/m^2
Trasmittanza periodica	***0,552***	W/m^{2}K
Fattore attenuazione	***0,962***	-
Sfasamento onda termica	***-1,7***	h



N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	*0,130*	-	-	-
1	Cartongesso in lastre	*13,00*	*0,2100*	*0,062*	*700*	*1,00*	*10*
2	Cartongesso in lastre	*12,00*	*0,2100*	*0,057*	*700*	*1,00*	*10*
3	Fibra di vetro - Pannello semirigido	*50,00*	*0,0400*	*1,250*	*30*	*1,03*	*1*
4	Cartongesso in lastre	*12,00*	*0,2100*	*0,057*	*700*	*1,00*	*10*
5	Cartongesso in lastre	*12,00*	*0,2100*	*0,057*	*700*	*1,00*	*10*
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	*0,130*	-	-	-

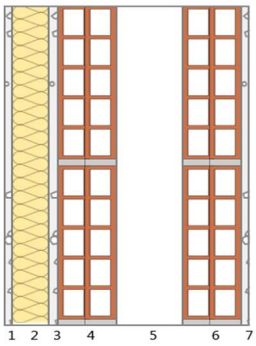
Descrizione della struttura: ***Parete perimetrale***	**Codice:** ***M7***

Trasmittanza termica	***0,613***	W/m^{2}K
Spessore	***291***	mm
Temperatura esterna (calcolo potenza invernale)	***-5,0***	°C
Permeanza	***0,001***	10^{-12}kg/sm^{2}Pa
Massa superficiale	***515***	kg/m^2
Trasmittanza periodica	***0,147***	W/m^{2}K
Fattore attenuazione	***0,240***	-
Sfasamento onda termica	***-7,5***	h



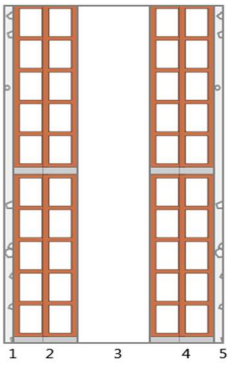
N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	*0,130*	-	-	-
1	Cartongesso in lastre	*12,00*	*0,2100*	*0,057*	*700*	*1,00*	*10*
2	Fibra di vetro - Pannello semirigido	*50,00*	*0,0400*	*1,250*	*30*	*1,03*	*1*
3	Intonaco di calce e gesso	*12,00*	*0,7000*	*0,017*	*1400*	*1,00*	*10*
4	C.l.s. armato (1% acciaio)	*190,00*	*2,3000*	*0,083*	*2300*	*1,00*	*130*
5	Intonaco di calce e gesso	*12,00*	*0,7000*	*0,017*	*1400*	*1,00*	*10*
6	Piastrelle in ceramica (piastrelle)	*15,00*	*1,3000*	*0,012*	*2300*	*0,84*	*9999999*
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	*0,065*	-	-	-

Descrizione della struttura: ***Parete perimetrale con camera***			**Codice:** ***M8***
Trasmittanza termica	***0,472***	W/m^2K	
Spessore	***336***	mm	
Temperatura esterna (calcolo potenza invernale)	***-5,0***	°C	
Permeanza	***107,527***	$10^{-12}kg/sm^2Pa$	
Massa superficiale	***168***	kg/m^2	
Trasmittanza periodica	***0,183***	W/m^2K	
Fattore attenuazione	***0,386***	-	
Sfasamento onda termica	***-7,3***	h	



N.	**Descrizione strato**	**s**	**Cond.**	**R**	**M.V.**	**C.T.**	**R.V.**
-	Resistenza superficiale interna	-	-	*0,130*	-	-	-
1	Cartongesso in lastre	*12,00*	*0,2100*	*0,057*	*700*	*1,00*	*10*
2	Fibra di vetro - Pannello semirigido	*50,00*	*0,0400*	*1,250*	*30*	*1,03*	*1*
3	Intonaco di calce e gesso	*12,00*	*0,7000*	*0,017*	*1400*	*1,00*	*10*
4	Mattone forato	*80,00*	*0,4000*	*0,200*	*775*	*0,84*	*9*
5	Intercapedine non ventilata	*90,00*	*0,5000*	*0,180*	-	-	-
6	Mattone forato	*80,00*	*0,4000*	*0,200*	*775*	*0,84*	*9*
7	Intonaco di calce e gesso	*12,00*	*0,7000*	*0,017*	*1400*	*1,00*	*10*
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	*0,065*	-	-	-

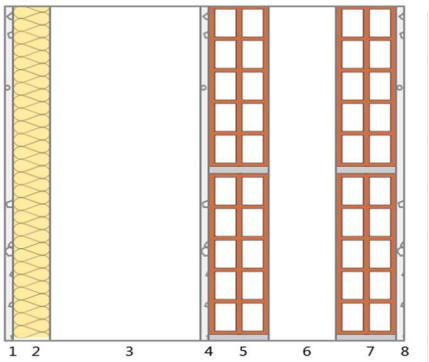
Descrizione della struttura: ***Parete perimetrale bagni***			**Codice:** ***M10***
Trasmittanza termica	***1,235***	W/m^2K	
Spessore	***274***	mm	
Temperatura esterna (calcolo potenza invernale)	***-5,0***	°C	
Permeanza	***118,343***	$10^{-12}kg/sm^2Pa$	
Massa superficiale	***158***	kg/m^2	
Trasmittanza periodica	***0,923***	W/m^2K	
Fattore attenuazione	***0,747***	-	
Sfasamento onda termica	***-4,8***	h	



N.	**Descrizione strato**	**s**	**Cond.**	**R**	**M.V.**	**C.T.**	**R.V.**
-	Resistenza superficiale interna	-	-	*0,130*	-	-	-
1	Intonaco di calce e gesso	*12,00*	*0,7000*	*0,017*	*1400*	*1,00*	*10*
2	Mattone forato	*80,00*	*0,4000*	*0,200*	*775*	*0,84*	*9*
3	Intercapedine non ventilata	*90,00*	*0,5000*	*0,180*	-	-	-
4	Mattone forato	*80,00*	*0,4000*	*0,200*	*775*	*0,84*	*9*
5	Intonaco di calce e gesso	*12,00*	*0,7000*	*0,017*	*1400*	*1,00*	*10*
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	*0,065*	-	-	-

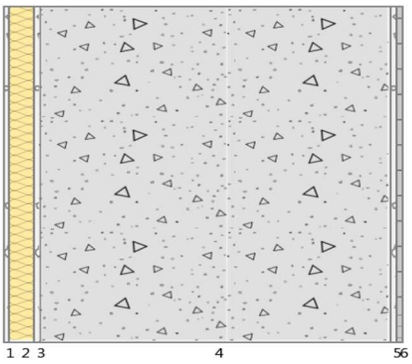
Descrizione della struttura: ***Parete perimetrale con camera 2***	**Codice:** ***M9***

Trasmittanza termica	***0,435***	W/m^2K
Spessore	***536***	mm
Temperatura esterna (calcolo potenza invernale)	***-5,0***	°C
Permeanza	***106,952***	$10^{-12}kg/sm^2Pa$
Massa superficiale	***168***	kg/m^2
Trasmittanza periodica	***0,164***	W/m^2K
Fattore attenuazione	***0,377***	-
Sfasamento onda termica	***-7,4***	h



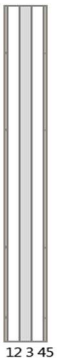
N.	Descrizione strato (M9)	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	*0,130*	-	-	-
1	Cartongesso in lastre	*12,00*	*0,2100*	*0,057*	*700*	*1,00*	*10*
2	Fibra di vetro - Pannello semirigido	*50,00*	*0,0400*	*1,250*	*30*	*1,03*	*1*
3	Intercapedine non ventilata	*200,00*	*1,1111*	*0,180*	-	-	-
4	Intonaco di calce e gesso	*12,00*	*0,7000*	*0,017*	*1400*	*1,00*	*10*
5	Mattone forato	*80,00*	*0,4000*	*0,200*	*775*	*0,84*	*9*
6	Intercapedine non ventilata	*90,00*	*0,5000*	*0,180*	-	-	-
7	Mattone forato	*80,00*	*0,4000*	*0,200*	*775*	*0,84*	*9*
8	Intonaco di calce e gesso	*12,00*	*0,7000*	*0,017*	*1400*	*1,00*	*10*
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	*0,065*	-	-	-

Descrizione della struttura: ***Pilastro***			**Codice:** ***M11***
Trasmittanza termica	***0,547***	W/m²K	
Spessore	***801***	mm	
Temperatura esterna (calcolo potenza invernale)	***-5,0***	°C	
Permeanza	***0,001***	10^{-12}kg/sm²Pa	
Massa superficiale	***1758***	kg/m²	
Trasmittanza periodica	***0,007***	W/m²K	
Fattore attenuazione	***0,013***	-	
Sfasamento onda termica	***-18,8***	h	



N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	*0,130*	-	-	-
1	Cartongesso in lastre	*12,00*	*0,2100*	*0,057*	*700*	*1,00*	*10*
2	Fibra di vetro - Pannello semirigido	*50,00*	*0,0400*	*1,250*	*30*	*1,03*	*1*
3	Intonaco di calce e gesso	*12,00*	*0,7000*	*0,017*	*1400*	*1,00*	*10*
4	C.l.s. armato (2% acciaio)	*700,00*	*2,5000*	*0,280*	*2400*	*1,00*	*130*
5	Intonaco di calce e gesso	*12,00*	*0,7000*	*0,017*	*1400*	*1,00*	*10*
6	Piastrelle in ceramica (piastrelle)	*15,00*	*1,3000*	*0,012*	*2300*	*0,84*	*9999999*
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	*0,065*	-	-	-

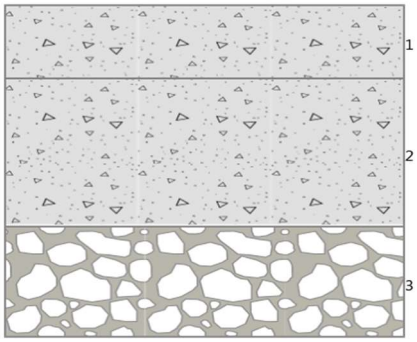
Descrizione della struttura: ***Porta su terrazzo***			**Codice:** ***M12***
Trasmittanza termica	***1,547***	W/m²K	
Spessore	***55***	mm	
Temperatura esterna (calcolo potenza invernale)	***-5,0***	°C	
Permeanza	***0,001***	10^{-12}kg/sm²Pa	
Massa superficiale	***120***	kg/m²	
Trasmittanza periodica	***1,314***	W/m²K	
Fattore attenuazione	***0,849***	-	
Sfasamento onda termica	***-2,2***	h	



N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	*0,130*	-	-	-
1	Pannello in legno compensato	*5,00*	*0,0900*	*0,056*	*300*	*1,60*	*150*
2	Intercapedine non ventilata Av<500 mm²/m	*15,00*	*0,0882*	*0,170*	-	-	-
3	Acciaio	*15,00*	*52,0000*	*0,000*	*7800*	*0,45*	*9999999*
4	Intercapedine non ventilata Av<500 mm²/m	*15,00*	*0,0882*	*0,170*	-	-	-
5	Pannello in legno compensato	*5,00*	*0,0900*	*0,056*	*300*	*1,60*	*150*
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	*0,065*	-	-	-

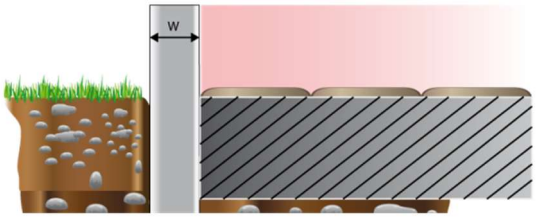
Descrizione della struttura: ***Pavimento controterra***	**Codice:** ***P1***

Trasmittanza termica	***1,901***	W/m^2K
Trasmittanza controterra	***0,428***	W/m^2K
Spessore	***450***	mm
Temperatura esterna (calcolo potenza invernale)	***-5,0***	°C
Permeanza	***6,723***	$10^{-12}kg/sm^2Pa$
Massa superficiale	***915***	kg/m^2
Trasmittanza periodica	***0,256***	W/m^2K
Fattore attenuazione	***0,598***	-
Sfasamento onda termica	***-11,5***	h



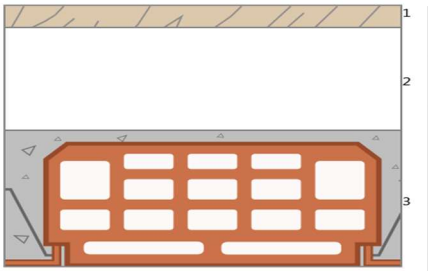
N.	Descrizione strato	s	Cond.	R	M.V.	C.T.	R.V.
-	Resistenza superficiale interna	-	-	*0,170*	-	-	-
1	Sottofondo di cemento magro	*100,00*	*0,9000*	*0,111*	*1800*	*0,88*	*30*
2	C.l.s. armato (2% acciaio)	*200,00*	*2,5000*	*0,080*	*2400*	*1,00*	*130*
3	Ghiaia grossa senza argilla (um. 5%)	*150,00*	*1,2000*	*0,125*	*1700*	*1,00*	*5*
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	*0,040*	-	-	-

Area del pavimento	***511,00***	m^2
Perimetro disperdente del pavimento	***120,00***	m
Spessore pareti perimetrali esterne	***336***	mm
Conduttività termica del terreno	***2,00***	W/mK



Descrizione della struttura: ***Soletta interpiano***	**Codice:** ***P2/S1***

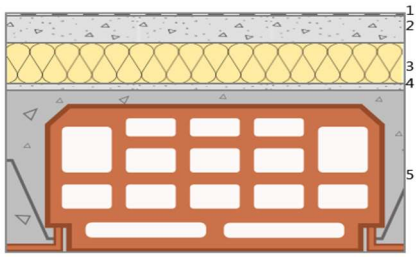
Trasmittanza termica	***0,853***	W/m^{2}K
Spessore	***460***	mm
Permeanza	***19,666***	10^{-12}kg/sm^{2}Pa
Massa superficiale	***375***	kg/m^2
Trasmittanza periodica	***0,168***	W/m^{2}K
Fattore attenuazione	***0,197***	-
Sfasamento onda termica	***-9,8***	h



N.	**Descrizione strato**	**s**	**Cond.**	**R**	**M.V.**	**C.T.**	**R.V.**
-	Resistenza superficiale interna	-	-	*0,170*	-	-	-
1	Pannello in legno compensato	*40,00*	*0,1300*	*0,308*	*500*	*1,60*	*200*
2	Intercapedine non ventilata	*180,00*	*0,8036*	*0,224*	-	-	-
3	Pavimento tipo predalles	*240,00*	*0,8000*	*0,300*	*1479*	*0,84*	*9*
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	*0,170*	-	-	-

Descrizione della struttura: ***Copertura***	**Codice:** ***S2***

Trasmittanza termica	***0,474***	W/m^{2}K
Spessore	***355***	mm
Temperatura esterna (calcolo potenza invernale)	***-5,0***	°C
Permeanza	***0,211***	10^{-12}kg/sm^{2}Pa
Massa superficiale	***471***	kg/m^2
Trasmittanza periodica	***0,079***	W/m^{2}K
Fattore attenuazione	***0,166***	-
Sfasamento onda termica	***-11,3***	h



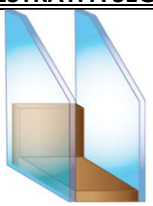
N.	**Descrizione strato**	**s**	**Cond.**	**R**	**M.V.**	**C.T.**	**R.V.**
-	Resistenza superficiale esterna	-	-	*0,065*	-	-	-
1	Impermeabilizzazione con bitume	*5,00*	*0,1700*	*0,029*	*1200*	*1,00*	*188000*
2	C.l.s. con massa volumica media	*40,00*	*1,3500*	*0,030*	*2000*	*1,00*	*100*
3	Fibra di vetro - Pannello rigido	*60,00*	*0,0380*	*1,579*	*100*	*1,03*	*1*
4	C.l.s. con massa volumica alta	*10,00*	*2,0000*	*0,005*	*2400*	*1,00*	*130*
5	Pavimento tipo predalles	*240,00*	*0,8000*	*0,300*	*1479*	*0,84*	*9*
-	Resistenza superficiale interna	-	-	*0,100*	-	-	-

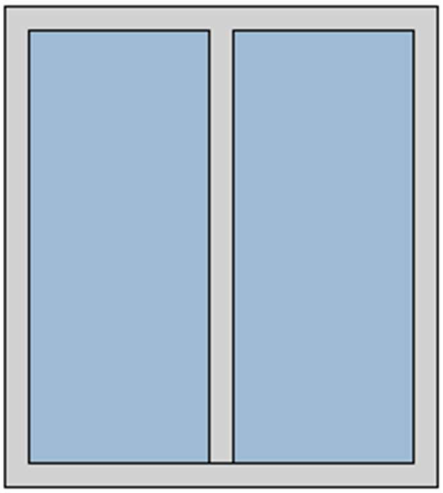
Descrizione della finestra: ***Facciata vetrata vano scala***				**Codice:** ***W1***
Caratteristiche del serramento				
Tipologia di serramento	***Singolo***			
Trasmittanza termica	U_{cw}	***2,664***	W/m^2K	
Trasmittanza solo vetro	U_g	***2,617***	W/m^2K	
Dati per il calcolo degli apporti solari				
Emissività	ε	***0,837***	-	
Fattore tendaggi (invernale)	$f_{c\ inv}$	***1,00***	-	
Fattore tendaggi (estivo)	$f_{c\ est}$	***1,00***	-	
Fattore di trasmittanza solare	$g_{gl,n}$	***0,850***	-	
Caratteristiche delle chiusure oscuranti				
Resistenza termica chiusure		***0,00***	m^2K/W	
f shut		***0,6***	-	

Dimensioni del serramento			
Larghezza		***700,0***	cm
Altezza		***400,0***	cm

Stratigrafia del pacchetto vetrato (VALIDA PER TUTTI I COMPONENTI FINESTRATI A SEGUIRE)

Descrizione strato	**s**	**λ**	**R**
Resistenza superficiale interna	-	-	***0,130***
Primo vetro	***4,0***	***1,00***	***0,004***
Intercapedine	-	-	***0,179***
Secondo vetro	***4,0***	***1,00***	***0,004***
Resistenza superficiale esterna	-	-	***0,065***



Descrizione della finestra: ***PT_1***				**Codice:** ***W2***
Caratteristiche del serramento				
Tipologia di serramento	***Singolo***			
Trasmittanza termica	U_w	***2,846***	W/m^2K	
Trasmittanza solo vetro	U_g	***2,659***	W/m^2K	
Dati per il calcolo degli apporti solari				
Emissività	ε	***0,837***	-	
Fattore tendaggi (invernale)	$f_{c\ inv}$	***1,00***	-	
Fattore tendaggi (estivo)	$f_{c\ est}$	***1,00***	-	
Fattore di trasmittanza solare	$g_{gl,n}$	***0,850***	-	
Fattore trasmissione solare totale	g_{gl+sh}	***0,835***	-	
Caratteristiche delle chiusure oscuranti				
Resistenza termica chiusure		***0,00***	m^2K/W	
f shut		***0,6***	-	

Dimensioni del serramento			
Larghezza		***180,0***	cm
Altezza		***200,0***	cm

Caratteristiche del telaio

Trasmittanza termica del telaio	U_f	***2,50***	W/m^2K
K distanziale	K_d	***0,08***	W/mK
Area totale	A_w	***3,600***	m^2
Area vetro	A_g	***2,700***	m^2
Area telaio	A_f	***0,900***	m^2
Fattore di forma	F_f	***0,75***	-
Perimetro vetro	L_g	***10,200***	m
Perimetro telaio	L_f	***7,600***	m

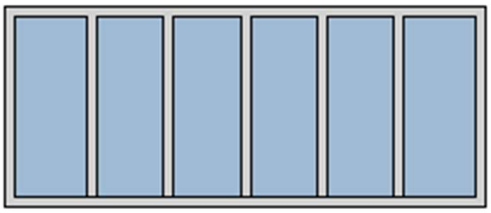
Caratteristiche del modulo

Trasmittanza termica del modulo	U	***3,129***	W/m^2K

Ponte termico del serramento

Ponte termico associato	***Z2***	***W - Parete - Telaio***	
Trasmittanza termica lineica	Ψ	***0,134***	W/mK
Lunghezza perimetrale		***7,60***	m

Descrizione della finestra: ***PT_2***				**Codice:** ***W3***
Caratteristiche del serramento				
Tipologia di serramento	***Singolo***			
Trasmittanza termica	U_w	***2,870***	W/m^{2}K	
Trasmittanza solo vetro	U_g	***2,659***	W/m^{2}K	
Dati per il calcolo degli apporti solari				
Emissività	ε	***0,837***	-	
Fattore tendaggi (invernale)	$f_{c\ inv}$	***1,00***	-	
Fattore tendaggi (estivo)	$f_{c\ est}$	***1,00***	-	
Fattore di trasmittanza solare	$g_{gl,n}$	***0,850***	-	
Fattore trasmissione solare totale	g_{gl+sh}	***0,835***	-	
Caratteristiche delle chiusure oscuranti				
Resistenza termica chiusure		***0,00***	m^{2}K/W	
f shut		***0,6***	-	



Dimensioni del serramento			
Larghezza		***480,0***	cm
Altezza		***200,0***	cm

Caratteristiche del telaio

Trasmittanza termica del telaio	U_f	***2,50***	W/m^{2}K
K distanziale	K_d	***0,08***	W/mK
Area totale	A_w	***9,600***	m^2
Area vetro	A_g	***7,380***	m^2
Area telaio	A_f	***2,220***	m^2
Fattore di forma	F_f	***0,77***	-
Perimetro vetro	L_g	***29,800***	m
Perimetro telaio	L_f	***13,600***	m

Caratteristiche del modulo

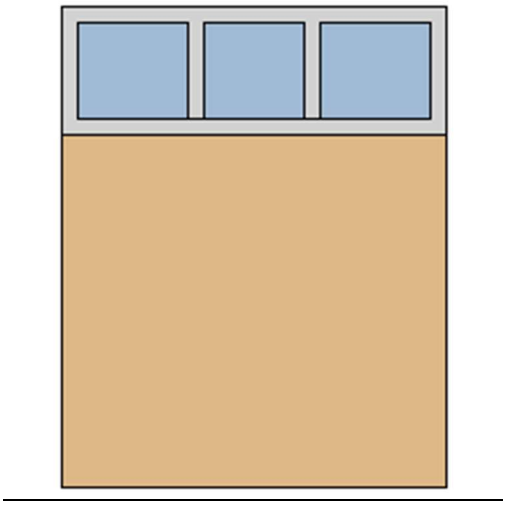
Trasmittanza termica del modulo	U	***3,061***	W/m^{2}K

Ponte termico del serramento

Ponte termico associato	***Z2***	***W - Parete - Telaio***	
Trasmittanza termica lineica	Ψ	***0,134***	W/mK
Lunghezza perimetrale		***13,60***	m

Descrizione della finestra: ***PT_3***	**Codice:** ***W4***

Caratteristiche del serramento			
Tipologia di serramento	***Singolo***		
Trasmittanza termica	U_w	***2,916***	W/m^2K
Trasmittanza solo vetro	U_g	***2,659***	W/m^2K
Dati per il calcolo degli apporti solari			
Emissività	ε	***0,837***	-
Fattore tendaggi (invernale)	$f_{c\ inv}$	***1,00***	-
Fattore tendaggi (estivo)	$f_{c\ est}$	***1,00***	-
Fattore di trasmittanza solare	$g_{gl,n}$	***0,850***	-
Fattore trasmissione solare totale	g_{gl+sh}	***0,835***	-
Caratteristiche delle chiusure oscuranti			
Resistenza termica chiusure		***0,00***	m^2K/W
f shut		***0,6***	-



Dimensioni del serramento			
Larghezza		***240,0***	cm
Altezza		***80,0***	cm

Caratteristiche del telaio

Trasmittanza termica del telaio	U_f	***2,50***	W/m^2K
K distanziale	K_d	***0,08***	W/mK
Area totale	A_w	***1,920***	m^2
Area vetro	A_g	***1,200***	m^2
Area telaio	A_f	***0,720***	m^2
Fattore di forma	F_f	***0,63***	-
Perimetro vetro	L_g	***7,600***	m
Perimetro telaio	L_f	***6,400***	m

Caratteristiche del modulo

Trasmittanza termica del modulo	U	***1,347***	W/m^2K

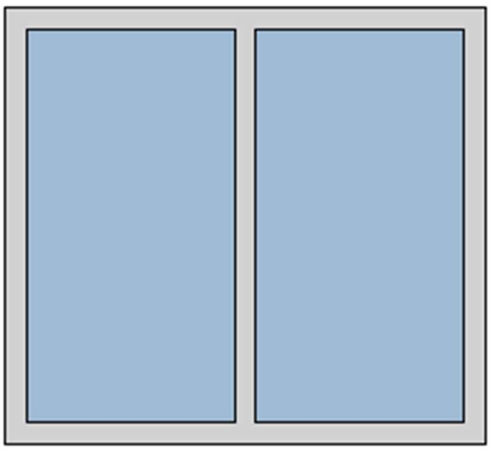
Muro sottofinestra

Struttura opaca associata	***M7***	***Parete perimetrale***	
Altezza	H_{sott}	***220,0***	cm
Area		***5,28***	m^2

Ponte termico del serramento

Ponte termico associato	***Z2***	***W - Parete - Telaio***	
Trasmittanza termica lineica	Ψ	***0,134***	W/mK
Lunghezza perimetrale		***6,40***	m

Descrizione della finestra: ***PT_4***				**Codice:** ***W5***
Caratteristiche del serramento				
Tipologia di serramento	***Singolo***			
Trasmittanza termica	U_w	***2,823***	W/m^{2}K	
Trasmittanza solo vetro	U_g	***2,659***	W/m^{2}K	
Dati per il calcolo degli apporti solari				
Emissività	ε	***0,837***	-	
Fattore tendaggi (invernale)	$f_{c\ inv}$	***1,00***	-	
Fattore tendaggi (estivo)	$f_{c\ est}$	***1,00***	-	
Fattore di trasmittanza solare	$g_{gl,n}$	***0,850***	-	
Fattore trasmissione solare totale	g_{gl+sh}	***0,835***	-	
Caratteristiche delle chiusure oscuranti				
Resistenza termica chiusure		***0,00***	m^{2}K/W	
f shut		***0,6***	-	



Dimensioni del serramento			
Larghezza		***220,0***	cm
Altezza		***200,0***	cm

Caratteristiche del telaio

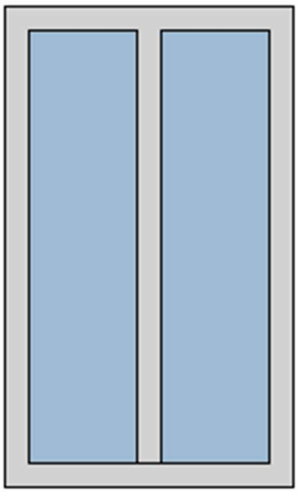
Trasmittanza termica del telaio	U_f	***2,50***	W/m^{2}K
K distanziale	K_d	***0,08***	W/mK
Area totale	A_w	***4,400***	m^2
Area vetro	A_g	***3,420***	m^2
Area telaio	A_f	***0,980***	m^2
Fattore di forma	F_f	***0,78***	-
Perimetro vetro	L_g	***11,000***	m
Perimetro telaio	L_f	***8,400***	m

Caratteristiche del modulo

Trasmittanza termica del modulo	U	***3,080***	W/m^{2}K

Ponte termico del serramento

Ponte termico associato	***Z2***	***W - Parete - Telaio***	
Trasmittanza termica lineica	Ψ	***0,134***	W/mK
Lunghezza perimetrale		***8,40***	m

Descrizione della finestra: ***PT_5***				**Codice:** ***W6***
Caratteristiche del serramento				
Tipologia di serramento	***Singolo***			
Trasmittanza termica	U_w	***2,907***	W/m^{2}K	
Trasmittanza solo vetro	U_g	***2,659***	W/m^{2}K	
Dati per il calcolo degli apporti solari				
Emissività	ε	***0,837***	-	
Fattore tendaggi (invernale)	$f_{c\ inv}$	***1,00***	-	
Fattore tendaggi (estivo)	$f_{c\ est}$	***1,00***	-	
Fattore di trasmittanza solare	$g_{gl,n}$	***0,850***	-	
Fattore trasmissione solare totale	g_{gl+sh}	***0,835***	-	
Caratteristiche delle chiusure oscuranti				
Resistenza termica chiusure		***0,00***	m^{2}K/W	
f shut		***0,6***	-	

Dimensioni del serramento			
Larghezza		***120,0***	cm
Altezza		***200,0***	cm

Caratteristiche del telaio

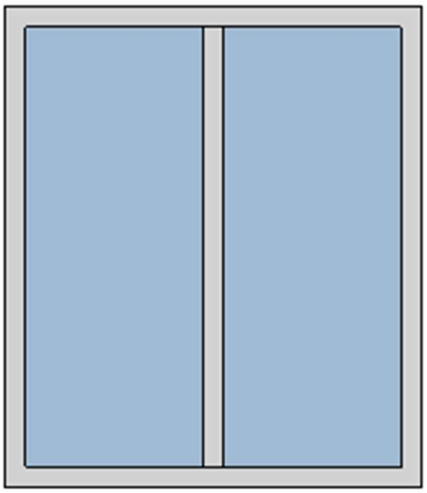
Trasmittanza termica del telaio	U_f	***2,50***	W/m^{2}K
K distanziale	K_d	***0,08***	W/mK
Area totale	A_w	***2,400***	m^2
Area vetro	A_g	***1,620***	m^2
Area telaio	A_f	***0,780***	m^2
Fattore di forma	F_f	***0,68***	-
Perimetro vetro	L_g	***9,000***	m
Perimetro telaio	L_f	***6,400***	m

Caratteristiche del modulo

Trasmittanza termica del modulo	U	***3,265***	W/m^{2}K

Ponte termico del serramento

Ponte termico associato	***Z2***	***W - Parete - Telaio***	
Trasmittanza termica lineica	Ψ	***0,134***	W/mK
Lunghezza perimetrale		***6,40***	m

Descrizione della finestra: ***PT_6***				**Codice:** ***W7***
Caratteristiche del serramento				
Tipologia di serramento	***Singolo***			
Trasmittanza termica	U_w	***2,828***	W/m^{2}K	
Trasmittanza solo vetro	U_g	***2,659***	W/m^{2}K	
Dati per il calcolo degli apporti solari				
Emissività	ε	***0,837***	-	
Fattore tendaggi (invernale)	$f_{c\ inv}$	***1,00***	-	
Fattore tendaggi (estivo)	$f_{c\ est}$	***1,00***	-	
Fattore di trasmittanza solare	$g_{gl,n}$	***0,850***	-	
Fattore trasmissione solare totale	g_{gl+sh}	***0,835***	-	
Caratteristiche delle chiusure oscuranti				
Resistenza termica chiusure		***0,00***	m^{2}K/W	
f shut		***0,6***	-	

Dimensioni del serramento			
Larghezza		***200,0***	cm
Altezza		***230,0***	cm

Caratteristiche del telaio

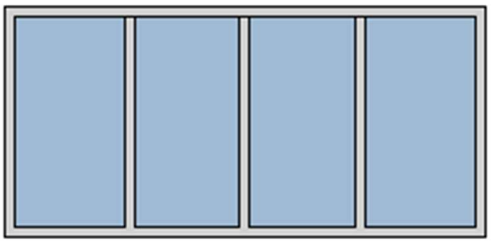
Trasmittanza termica del telaio	U_f	***2,50***	W/m^{2}K
K distanziale	K_d	***0,08***	W/mK
Area totale	A_w	***4,600***	m^2
Area vetro	A_g	***3,570***	m^2
Area telaio	A_f	***1,030***	m^2
Fattore di forma	F_f	***0,78***	-
Perimetro vetro	L_g	***11,800***	m
Perimetro telaio	L_f	***8,600***	m

Caratteristiche del modulo

Trasmittanza termica del modulo	U	***3,079***	W/m^{2}K

Ponte termico del serramento

Ponte termico associato	***Z2***	***W - Parete - Telaio***	
Trasmittanza termica lineica	Ψ	***0,134***	W/mK
Lunghezza perimetrale		***8,60***	m

Descrizione della finestra: ***PT_7***				**Codice:** ***W8***
Caratteristiche del serramento				
Tipologia di serramento	***Singolo***			
Trasmittanza termica	U_w	***2,814***	W/m²K	
Trasmittanza solo vetro	U_g	***2,659***	W/m²K	
Dati per il calcolo degli apporti solari				
Emissività	ε	***0,837***	-	
Fattore tendaggi (invernale)	$f_{c\ inv}$	***1,00***	-	
Fattore tendaggi (estivo)	$f_{c\ est}$	***1,00***	-	
Fattore di trasmittanza solare	$g_{gl,n}$	***0,850***	-	
Fattore trasmissione solare totale	g_{gl+sh}	***0,835***	-	
Caratteristiche delle chiusure oscuranti				
Resistenza termica chiusure		***0,00***	m²K/W	
f shut		***0,6***	-	

Dimensioni del serramento			
Larghezza		***480,0***	cm
Altezza		***230,0***	cm

Caratteristiche del telaio

Trasmittanza termica del telaio	U_f	***2,50***	W/m²K
K distanziale	K_d	***0,08***	W/mK
Area totale	A_w	***11,040***	m²
Area vetro	A_g	***9,030***	m²
Area telaio	A_f	***2,010***	m²
Fattore di forma	F_f	***0,82***	-
Perimetro vetro	L_g	***25,400***	m
Perimetro telaio	L_f	***14,200***	m

Caratteristiche del modulo

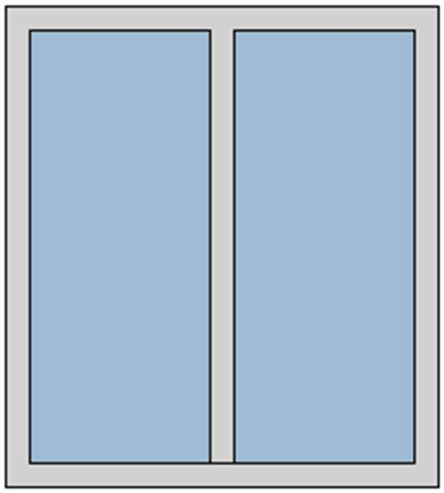
Trasmittanza termica del modulo	U	***2,987***	W/m²K

Ponte termico del serramento

Ponte termico associato	***Z2***	***W - Parete - Telaio***	
Trasmittanza termica lineica	Ψ	***0,134***	W/mK
Lunghezza perimetrale		***14,20***	m

Descrizione della finestra: ***P1-4_1***	**Codice:** ***W9***

Caratteristiche del serramento			
Tipologia di serramento	***Singolo***		
Trasmittanza termica	U_w	***2,846***	W/m^2K
Trasmittanza solo vetro	U_g	***2,659***	W/m^2K
Dati per il calcolo degli apporti solari			
Emissività	ε	***0,837***	-
Fattore tendaggi (invernale)	$f_{c\ inv}$	***1,00***	-
Fattore tendaggi (estivo)	$f_{c\ est}$	***1,00***	-
Fattore di trasmittanza solare	$g_{gl,n}$	***0,850***	-
Fattore trasmissione solare totale	g_{gl+sh}	***0,835***	-
Caratteristiche delle chiusure oscuranti			
Resistenza termica chiusure		***0,00***	m^2K/W
f shut		***0,6***	-



Dimensioni del serramento			
Larghezza		***180,0***	cm
Altezza		***200,0***	cm

Caratteristiche del telaio

Trasmittanza termica del telaio	U_f	***2,50***	W/m^2K
K distanziale	K_d	***0,08***	W/mK
Area totale	A_w	***3,600***	m^2
Area vetro	A_g	***2,700***	m^2
Area telaio	A_f	***0,900***	m^2
Fattore di forma	F_f	***0,75***	-
Perimetro vetro	L_g	***10,200***	m
Perimetro telaio	L_f	***7,600***	m

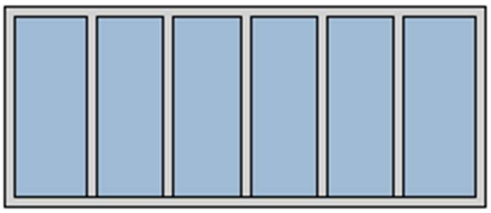
Caratteristiche del modulo

Trasmittanza termica del modulo	U	***3,129***	W/m^2K

Ponte termico del serramento

Ponte termico associato	***Z2***	***W - Parete - Telaio***	
Trasmittanza termica lineica	Ψ	***0,134***	W/mK
Lunghezza perimetrale		***7,60***	m

Descrizione della finestra: ***P1-4_2***				**Codice:** ***W10***
Caratteristiche del serramento				
Tipologia di serramento	***Singolo***			
Trasmittanza termica	U_w	***2,870***	W/m^2K	
Trasmittanza solo vetro	U_g	***2,659***	W/m^2K	
Dati per il calcolo degli apporti solari				
Emissività	ε	***0,837***	-	
Fattore tendaggi (invernale)	$f_{c\ inv}$	***1,00***	-	
Fattore tendaggi (estivo)	$f_{c\ est}$	***1,00***	-	
Fattore di trasmittanza solare	$g_{gl,n}$	***0,850***	-	
Fattore trasmissione solare totale	g_{gl+sh}	***0,835***	-	
Caratteristiche delle chiusure oscuranti				
Resistenza termica chiusure		***0,00***	m^2K/W	
f shut		***0,6***	-	



Dimensioni del serramento			
Larghezza		***480,0***	cm
Altezza		***200,0***	cm

Caratteristiche del telaio

Trasmittanza termica del telaio	U_f	***2,50***	W/m^2K
K distanziale	K_d	***0,08***	W/mK
Area totale	A_w	***9,600***	m^2
Area vetro	A_g	***7,380***	m^2
Area telaio	A_f	***2,220***	m^2
Fattore di forma	F_f	***0,77***	-
Perimetro vetro	L_g	***29,800***	m
Perimetro telaio	L_f	***13,600***	m

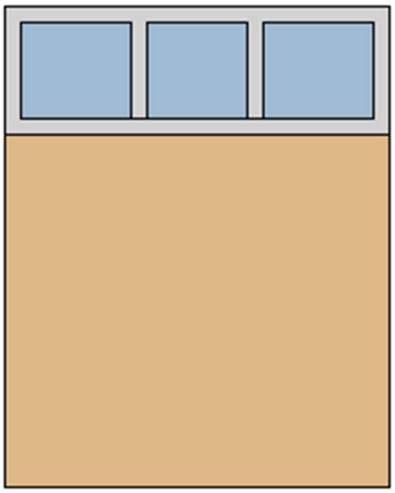
Caratteristiche del modulo

Trasmittanza termica del modulo	U	***3,061***	W/m^2K

Ponte termico del serramento

Ponte termico associato	***Z2***	***W - Parete - Telaio***	
Trasmittanza termica lineica	Ψ	***0,134***	W/mK
Lunghezza perimetrale		***13,60***	m

Descrizione della finestra: ***P1-4_3***				**Codice:** ***W11***
Caratteristiche del serramento				
Tipologia di serramento	***Singolo***			
Trasmittanza termica	U_w	***2,916***	W/m^2K	
Trasmittanza solo vetro	U_g	***2,659***	W/m^2K	
Dati per il calcolo degli apporti solari				
Emissività	ε	***0,837***	-	
Fattore tendaggi (invernale)	$f_{c\ inv}$	***1,00***	-	
Fattore tendaggi (estivo)	$f_{c\ est}$	***1,00***	-	
Fattore di trasmittanza solare	$g_{gl,n}$	***0,850***	-	
Fattore trasmissione solare totale	g_{gl+sh}	***0,835***	-	
Caratteristiche delle chiusure oscuranti				
Resistenza termica chiusure		***0,00***	m^2K/W	
f shut		***0,6***	-	



Dimensioni del serramento			
Larghezza		***240,0***	cm
Altezza		***80,0***	cm

Caratteristiche del telaio

Trasmittanza termica del telaio	U_f	***2,50***	W/m^2K
K distanziale	K_d	***0,08***	W/mK
Area totale	A_w	***1,920***	m^2
Area vetro	A_g	***1,200***	m^2
Area telaio	A_f	***0,720***	m^2
Fattore di forma	F_f	***0,63***	-
Perimetro vetro	L_g	***7,600***	m
Perimetro telaio	L_f	***6,400***	m

Caratteristiche del modulo

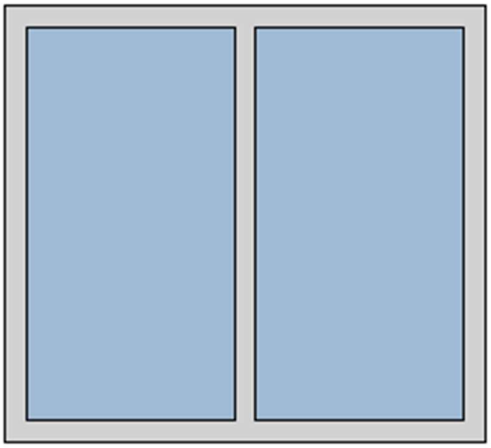
Trasmittanza termica del modulo	U	***1,347***	W/m^2K

Muro sottofinestra

Struttura opaca associata	***M7***	***Parete perimetrale***	
Altezza	H_{sott}	***220,0***	cm
Area		***5,28***	m^2

Ponte termico del serramento

Ponte termico associato	***Z2***	***W - Parete - Telaio***	
Trasmittanza termica lineica	Ψ	***0,134***	W/mK
Lunghezza perimetrale		***6,40***	m

Descrizione della finestra: ***P1-4_4***				**Codice:** ***W12***
Caratteristiche del serramento				
Tipologia di serramento	***Singolo***			
Trasmittanza termica	U_w	***2,823***	W/m^2K	
Trasmittanza solo vetro	U_g	***2,659***	W/m^2K	
Dati per il calcolo degli apporti solari				
Emissività	ε	***0,837***	-	
Fattore tendaggi (invernale)	$f_{c\ inv}$	***1,00***	-	
Fattore tendaggi (estivo)	$f_{c\ est}$	***1,00***	-	
Fattore di trasmittanza solare	$g_{gl,n}$	***0,850***	-	
Fattore trasmissione solare totale	g_{gl+sh}	***0,835***	-	
Caratteristiche delle chiusure oscuranti				
Resistenza termica chiusure		***0,00***	m^2K/W	
f shut		***0,6***	-	

Dimensioni del serramento			
Larghezza		***220,0***	cm
Altezza		***200,0***	cm

Caratteristiche del telaio

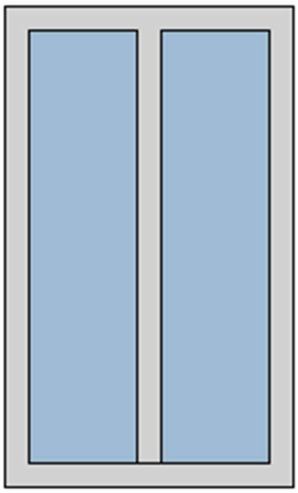
Trasmittanza termica del telaio	U_f	***2,50***	W/m^2K
K distanziale	K_d	***0,08***	W/mK
Area totale	A_w	***4,400***	m^2
Area vetro	A_g	***3,420***	m^2
Area telaio	A_f	***0,980***	m^2
Fattore di forma	F_f	***0,78***	-
Perimetro vetro	L_g	***11,000***	m
Perimetro telaio	L_f	***8,400***	m

Caratteristiche del modulo

Trasmittanza termica del modulo	U	***3,080***	W/m^2K

Ponte termico del serramento

Ponte termico associato	***Z2***	***W - Parete - Telaio***	
Trasmittanza termica lineica	Ψ	***0,134***	W/mK
Lunghezza perimetrale		***8,40***	m

Descrizione della finestra: ***P1-4_5***				**Codice:** ***W13***
Caratteristiche del serramento				
Tipologia di serramento	***Singolo***			
Trasmittanza termica	U_w	***2,907***	W/m^{2}K	
Trasmittanza solo vetro	U_g	***2,659***	W/m^{2}K	
Dati per il calcolo degli apporti solari				
Emissività	ε	***0,837***	-	
Fattore tendaggi (invernale)	$f_{c\ inv}$	***1,00***	-	
Fattore tendaggi (estivo)	$f_{c\ est}$	***1,00***	-	
Fattore di trasmittanza solare	$g_{gl,n}$	***0,850***	-	
Fattore trasmissione solare totale	g_{gl+sh}	***0,835***	-	
Caratteristiche delle chiusure oscuranti				
Resistenza termica chiusure		***0,00***	m^{2}K/W	
f shut		***0,6***	-	

Dimensioni del serramento			
Larghezza		***120,0***	cm
Altezza		***200,0***	cm

Caratteristiche del telaio

Trasmittanza termica del telaio	U_f	***2,50***	W/m^{2}K
K distanziale	K_d	***0,08***	W/mK
Area totale	A_w	***2,400***	m^2
Area vetro	A_g	***1,620***	m^2
Area telaio	A_f	***0,780***	m^2
Fattore di forma	F_f	***0,68***	-
Perimetro vetro	L_g	***9,000***	m
Perimetro telaio	L_f	***6,400***	m

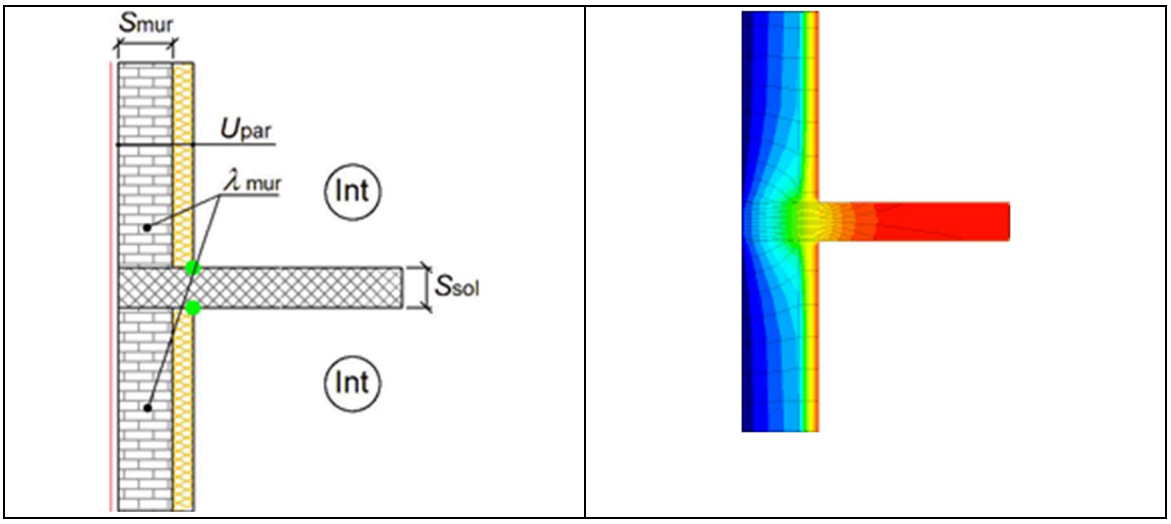
Caratteristiche del modulo

Trasmittanza termica del modulo	U	***3,265***	W/m^{2}K

Ponte termico del serramento

Ponte termico associato	***Z2***	***W - Parete - Telaio***	
Trasmittanza termica lineica	Ψ	***0,134***	W/mK
Lunghezza perimetrale		***6,40***	m

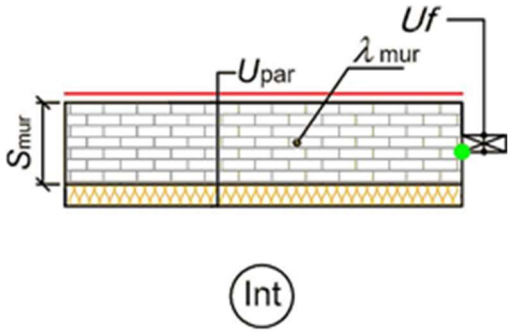
Descrizione del ponte termico: ***IF - Parete ext2 - Solaio interpiano***			**Codice:** ***Z1***
Tipologia	***IF - Parete - Solaio interpiano***		
Trasmittanza termica lineica di calcolo	***0,465***	W/mK	
Trasmittanza termica lineica di riferimento	***0,931***	W/mK	
Fattore di temperature f_{rsi}	***0,549***	-	
Riferimento	***UNI EN ISO 14683 e UNI EN ISO 10211***		
Note	***IF3 - Giunto parete con isolamento interno – solaio interpiano senza correzione Trasmittanza termica lineica di riferimento (φe) = 0,931 W/mK.***		

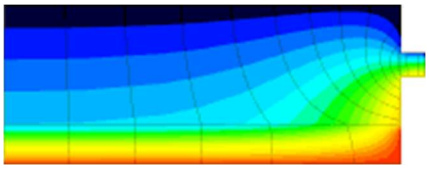


Caratteristiche			
Spessore solaio	Ssol	***240,0***	mm
Spessore muro	Smur	***160,0***	mm
Trasmittanza termica parete	Upar	***0,472***	W/m^2K
Conduttività termica muro	λmur	***0,400***	W/mK

Verifica temperatura critica					
Condizioni interne:			Condizioni esterne:		
Classe concentrazione del vapore	***0,006***	kg/m^3	Temperature medie mensili	-	°C
Temperatura interna periodo di riscaldamento	***20,0***	°C			
Umidità relativa superficiale ammissibile	***80***	%			

Descrizione del ponte termico: ***W - Parete - Telaio***			**Codice:** ***Z2***
Tipologia	***W - Parete - Telaio***		
Trasmittanza termica lineica di calcolo	***0,134***	W/mK	
Trasmittanza termica lineica di riferimento	***0,134***	W/mK	
Fattore di temperature f_{rsi}	***0,543***	-	
Riferimento	***UNI EN ISO 14683 e UNI EN ISO 10211***		
Note	***W9 - Giunto parete con isolamento interno interrotto in corrispondenza dello stipite – telaio posto in mezzeria*** ***Trasmittanza termica lineica di riferimento (φe) = 0,134 W/mK.***		

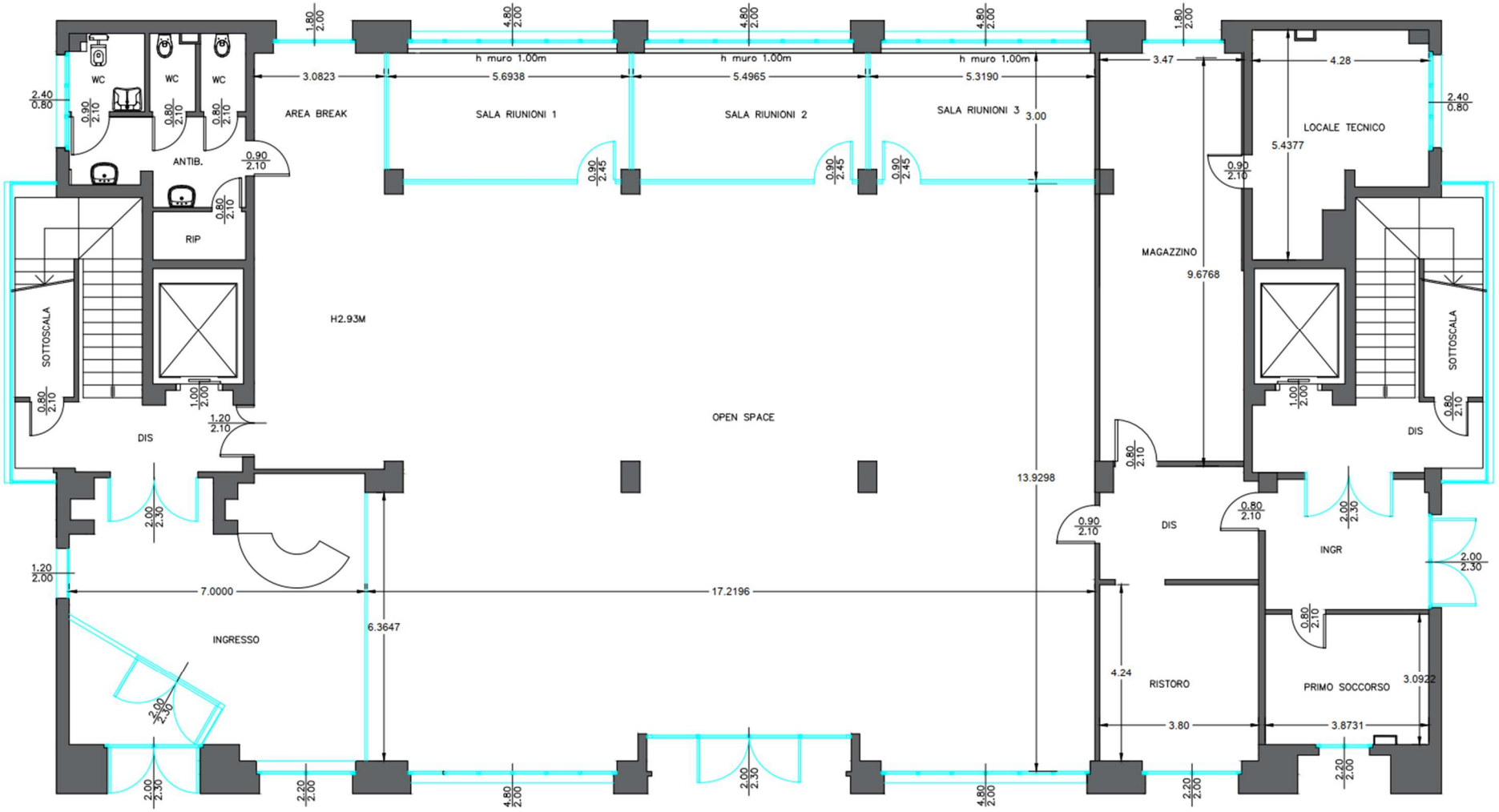




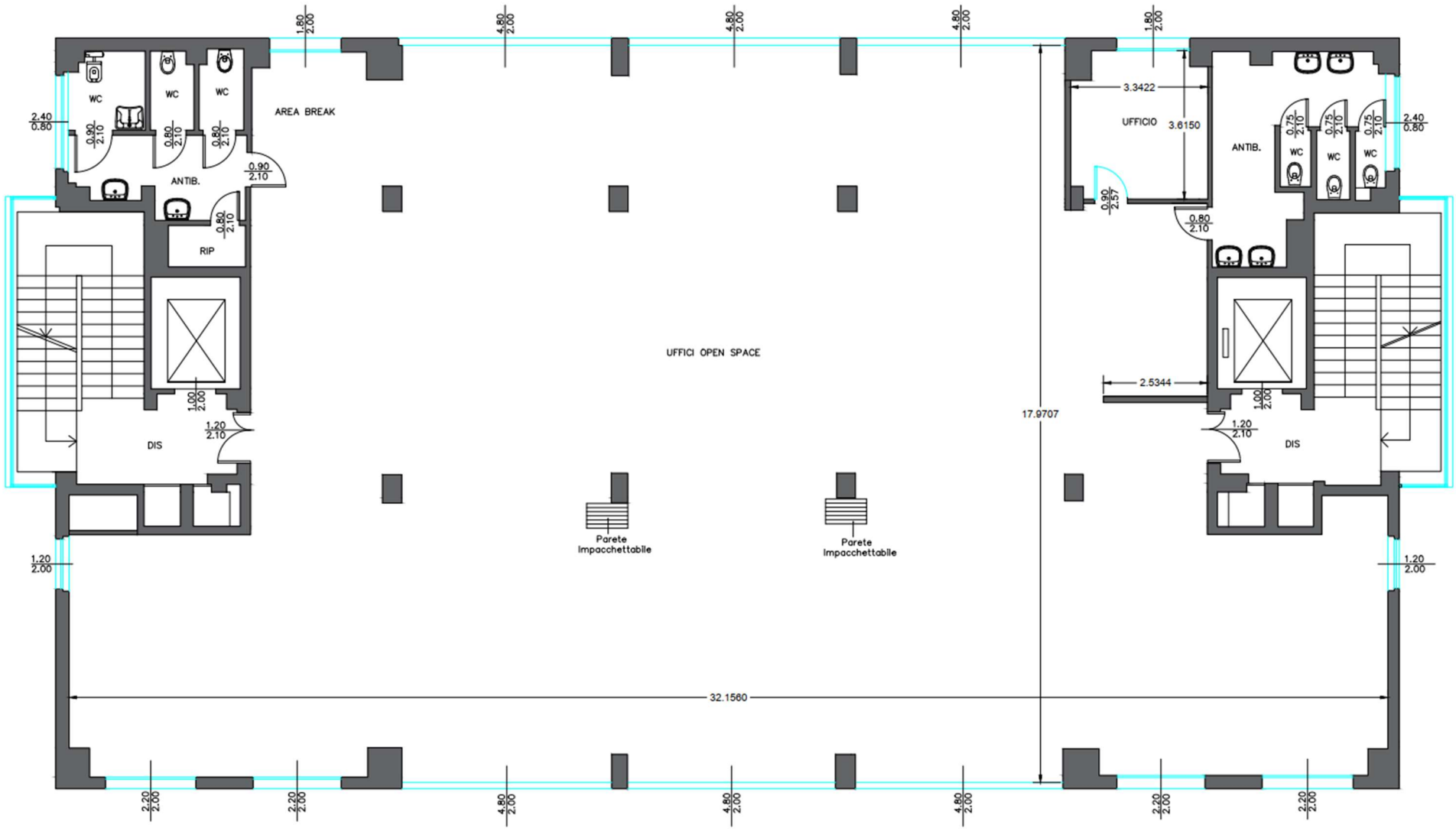
Caratteristiche			
Trasmittanza termica telaio	Uf	***1,000***	W/m²K
Spessore muro	Smur	***160,0***	mm
Trasmittanza termica parete	Upar	***0,472***	W/m²K
Conduttività termica muro	λmur	***0,400***	W/mK

Verifica temperatura critica					
Condizioni interne:			Condizioni esterne:		
Classe concentrazione del vapore	***0,006***	kg/m³	Temperature medie mensili	-	°C
Temperatura interna periodo di riscaldamento	***20,0***	°C			
Umidità relativa superficiale ammissibile	***80***	%			

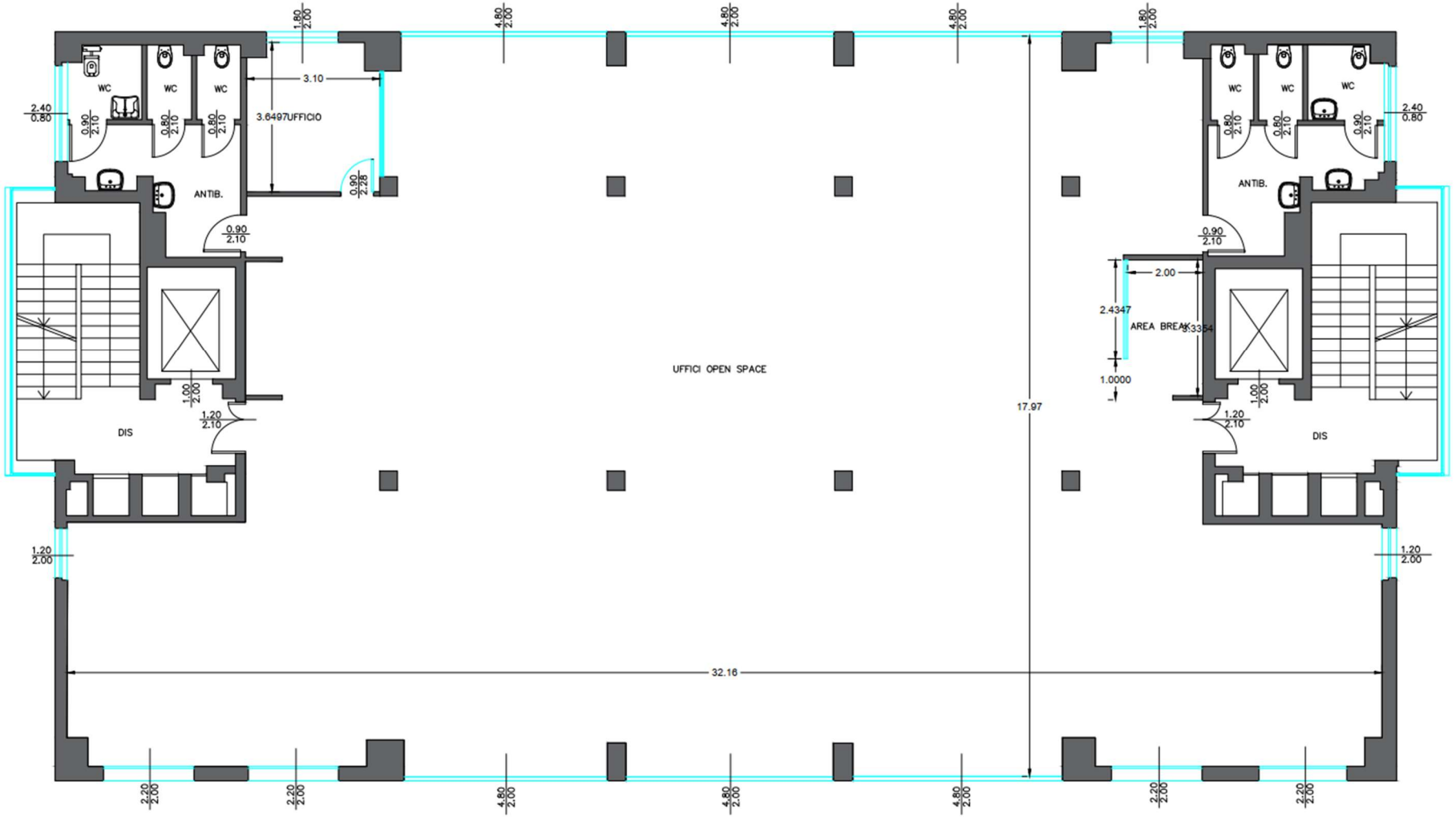
A.2 – Planimetrie



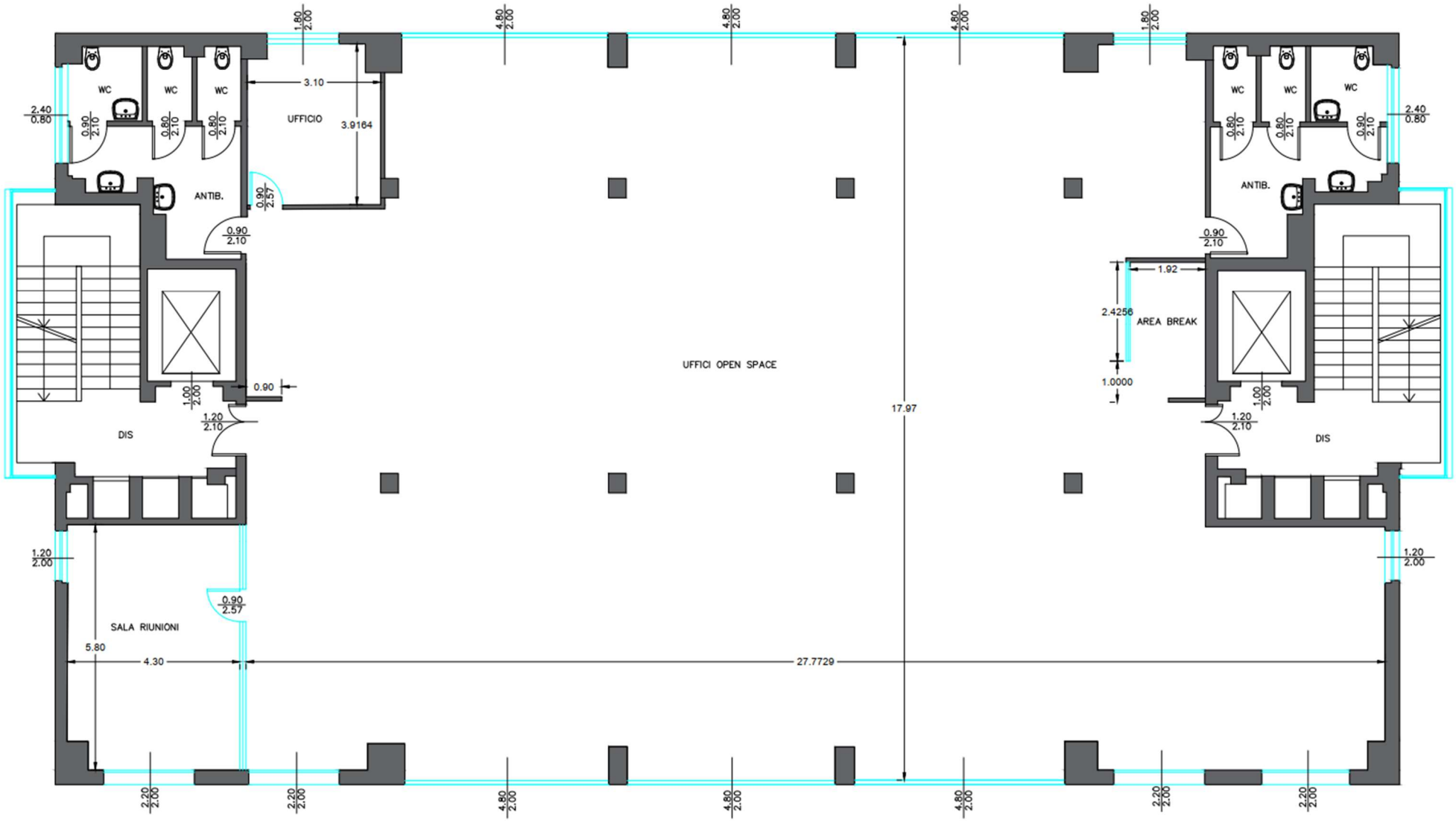
PIANO TERRA – STATO DI PROGETTO



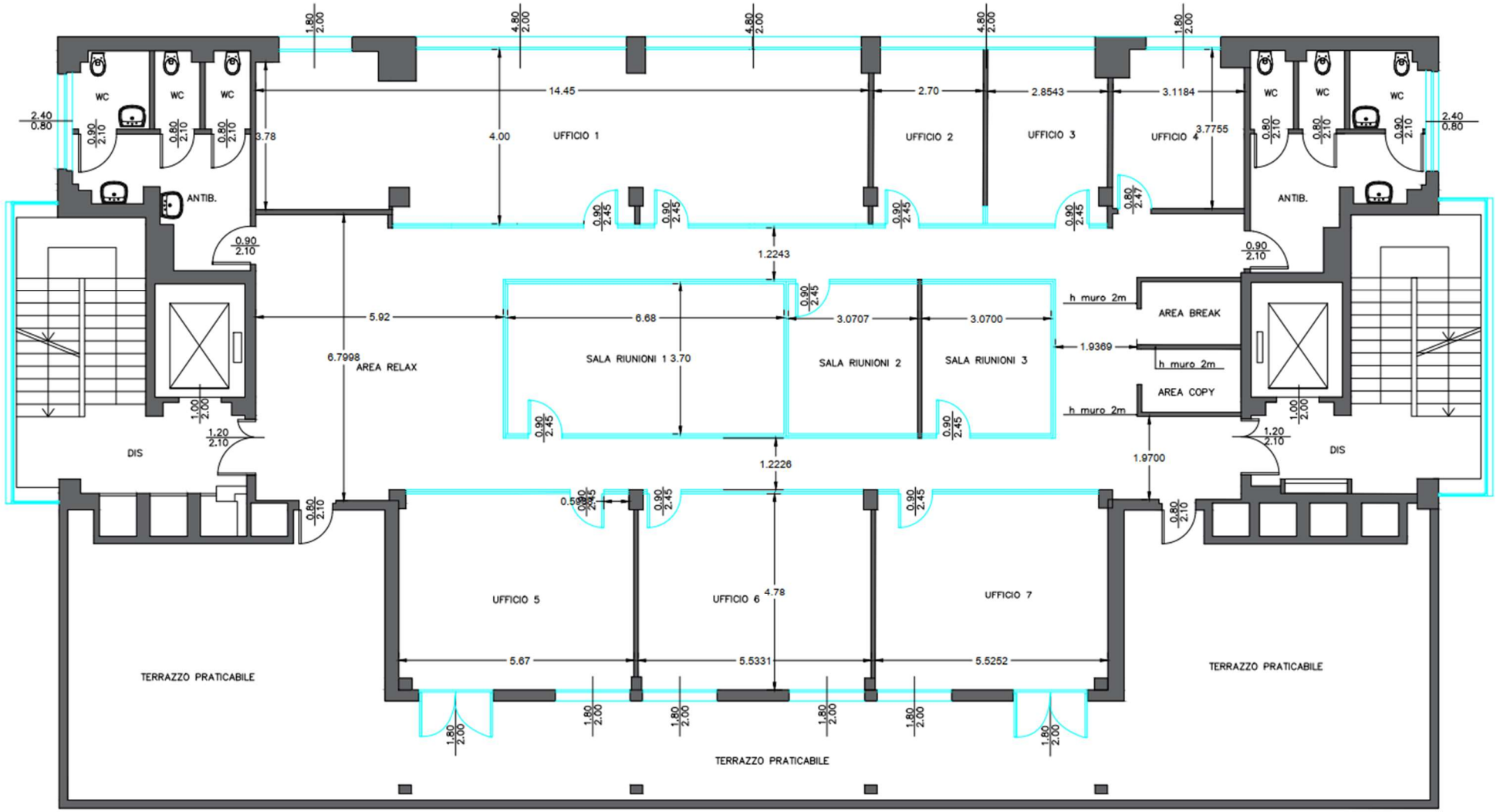
PIANO PRIMO – STATO DI PROGETTO



PIANO SECONDO – STATO DI PROGETTO



PIANO TERZO – STATO DI PROGETTO



PIANO QUARTO – STATO DI PROGETTO

A.3 – Coefficienti di perdita dell'edificio

Zona 1 : Piano terra

H_T: Coefficiente di scambio termico per trasmissione da locale climatizzato verso esterno:

Cod	Descrizione elemento	U [W/m²K] Ψ [W/mK]	Sup.[m²] Lungh [m]	H_T [W/K]
M7	*Parete perimetrale*	*0.613*	*85.21*	*52.3*
M8	*Parete perimetrale con camera*	*0.472*	*76.13*	*36.0*
M9	*Parete perimetrale con camera 2*	*0.435*	*3.71*	*1.6*
M10	*Parete perimetrale bagni*	*1.235*	*16.69*	*20.6*
M11	*Pilastro*	*0.547*	*57.59*	*31.5*
Z1	*IF - Parete ext2 - Solaio interpiano*	*0.465*	*90.68*	*42.2*
Z2	*W - Parete - Telaio*	*0.134*	*159.00*	*21.3*
W2	*PT_1*	*2.846*	*7.20*	*20.5*
W3	*PT_2*	*2.870*	*48.00*	*137.8*
W4	*PT_3*	*2.916*	*3.84*	*11.2*
W5	*PT_4*	*2.823*	*13.20*	*37.3*
W6	*PT_5*	*2.907*	*2.40*	*7.0*
W7	*PT_6*	*2.828*	*9.20*	*26.0*
W8	*PT_7*	*2.814*	*11.04*	*31.1*
			Totale	***476.3***

HG: Coefficiente di scambio termico per trasmissione da locale climatizzato verso terreno:

Cod	Descrizione elemento	U [W/m²K] Ψ [W/mK]	Sup.[m²] Lungh [m]	H_G [W/K]
P1	*Pavimento controterra*	*0.428*	*540.93*	*231.4*
			Totale	***231.4***

HU: Coefficiente di scambio termico per trasmissione da locale climatizzato verso locali non climatizzati:

Cod	Descrizione elemento	U [W/m²K] Ψ [W/mK]	Sup.[m²] Lungh [m]	$b_{tr,u}$ [-]	H_U [W/K]
M1	*Ascensori*	*2.574*	*82.99*	*0.40*	*85.5*
M2	*Parete tramezza vs non riscaldati*	*2.023*	*32.77*	*0.40*	*26.5*
Z1	*IF - Parete ext2 - Solaio interpiano*	*0.465*	*31.43*	*-*	*5.9*
				Totale	***117.8***

Zona 2 : Piano 1

HT: Coefficiente di scambio termico per trasmissione da locale climatizzato verso esterno:

Cod	Descrizione elemento	U [W/m²K] Ψ [W/mK]	Sup.[m²] Lungh [m]	H_T [W/K]
M7	*Parete perimetrale*	*0.613*	*68.22*	*41.8*
M8	*Parete perimetrale con camera*	*0.472*	*75.83*	*35.8*
M9	*Parete perimetrale con camera 2*	*0.435*	*3.23*	*1.4*
M10	*Parete perimetrale bagni*	*1.235*	*15.69*	*19.4*
M11	*Pilastro*	*0.547*	*52.59*	*28.8*
Z1	*IF - Parete ext2 - Solaio interpiano*	*0.465*	*176.88*	*82.3*
Z2	*W - Parete - Telaio*	*0.134*	*156.00*	*20.9*
W9	*P1-4_1*	*2.846*	*7.20*	*20.5*
W10	*P1-4_2*	*2.870*	*57.60*	*165.3*
W11	*P1-4_3*	*2.916*	*3.84*	*11.2*
W12	*P1-4_4*	*2.823*	*17.60*	*49.7*
W13	*P1-4_5*	*2.907*	*4.80*	*14.0*
			Totale	***491.2***

HU: Coefficiente di scambio termico per trasmissione da locale climatizzato verso locali non climatizzati:

Cod	Descrizione elemento	U [W/m²K] Ψ [W/mK]	Sup.[m²] Lungh [m]	$b_{tr,\,U}$ [-]	H_U [W/K]
M1	*Ascensori*	*2.574*	*78.03*	*0.40*	*80.4*
M2	*Parete tramezza vs non riscaldati*	*2.023*	*30.82*	*0.40*	*24.9*
Z1	*IF - Parete ext2 - Solaio interpiano*	*0.465*	*62.84*	-	*11.7*
				Totale	***117.0***

Zona 3 : Piano 2

HT: Coefficiente di scambio termico per trasmissione da locale climatizzato verso esterno:

Cod	Descrizione elemento	U [W/m²K] Ψ [W/mK]	Sup.[m²] Lungh [m]	H_T [W/K]
M7	*Parete perimetrale*	*0.613*	*68.22*	*41.8*
M8	*Parete perimetrale con camera*	*0.472*	*75.83*	*35.8*
M9	*Parete perimetrale con camera 2*	*0.435*	*3.23*	*1.4*
M10	*Parete perimetrale bagni*	*1.235*	*15.69*	*19.4*
M11	*Pilastro*	*0.547*	*52.59*	*28.8*
Z1	*IF - Parete ext2 - Solaio interpiano*	*0.465*	*176.86*	*82.3*
Z2	*W - Parete - Telaio*	*0.134*	*156.00*	*20.9*
W9	*P1-4_1*	*2.846*	*7.20*	*20.5*
W10	*P1-4_2*	*2.870*	*57.60*	*165.3*
W11	*P1-4_3*	*2.916*	*3.84*	*11.2*
W12	*P1-4_4*	*2.823*	*17.60*	*49.7*
W13	*P1-4_5*	*2.907*	*4.80*	*14.0*
			Totale	***491.2***

HU: Coefficiente di scambio termico per trasmissione da locale climatizzato verso locali non climatizzati:

Cod	Descrizione elemento	U [W/m²K] Ψ [W/mK]	Sup.[m²] Lungh [m]	$b_{tr,U}$ [-]	H_U [W/K]
M1	*Ascensori*	*2.574*	*78.03*	*0.40*	*80.4*
M2	*Parete tramezza vs non riscaldati*	*2.023*	*30.82*	*0.40*	*24.9*
Z1	*IF - Parete ext2 - Solaio interpiano*	*0.465*	*62.84*	-	*11.7*
				Totale	***117.0***

Zona 4 : Piano 3

HT: Coefficiente di scambio termico per trasmissione da locale climatizzato verso esterno:

Cod	Descrizione elemento	U [W/m²K] Ψ [W/mK]	Sup.[m²] Lungh [m]	H_T [W/K]
M7	*Parete perimetrale*	*0.613*	*74.33*	*45.6*
M8	*Parete perimetrale con camera*	*0.472*	*84.99*	*40.2*
M9	*Parete perimetrale con camera 2*	*0.435*	*4.16*	*1.8*
M10	*Parete perimetrale bagni*	*1.235*	*15.69*	*19.4*
M11	*Pilastro*	*0.547*	*56.59*	*31.0*
S2	*Copertura*	*0.474*	*162.95*	*77.3*
Z1	*IF - Parete ext2 - Solaio interpiano*	*0.465*	*176.86*	*82.3*
Z2	*W - Parete - Telaio*	*0.134*	*156.00*	*20.9*
W9	*P1-4_1*	*2.846*	*7.20*	*20.5*
W10	*P1-4_2*	*2.870*	*57.60*	*165.3*
W11	*P1-4_3*	*2.916*	*3.84*	*11.2*
W12	*P1-4_4*	*2.823*	*17.60*	*49.7*
W13	*P1-4_5*	*2.907*	*4.80*	*14.0*
			Totale	***579.1***

HU: Coefficiente di scambio termico per trasmissione da locale climatizzato verso locali non climatizzati:

Cod	Descrizione elemento	U [W/m²K] Ψ [W/mK]	Sup.[m²] Lungh [m]	$b_{tr,U}$ [-]	H_U [W/K]
M1	*Ascensori*	*2.574*	*78.03*	*0.40*	*80.4*
M2	*Parete tramezza vs non riscaldati*	*2.023*	*35.08*	*0.40*	*28.4*
Z1	*IF - Parete ext2 - Solaio interpiano*	*0.465*	*63.11*	-	*11.8*
				Totale	***120.5***

Zona 5 : Piano 4

HT: Coefficiente di scambio termico per trasmissione da locale climatizzato verso esterno:

Cod	Descrizione elemento	U [W/m²K] Ψ [W/mK]	Sup.[m²] Lungh [m]	H_T [W/K]
M7	*Parete perimetrale*	*0.613*	*25.80*	*15.8*
M8	*Parete perimetrale con camera*	*0.472*	*156.43*	*73.9*
M10	*Parete perimetrale bagni*	*1.235*	*17.60*	*21.7*
M11	*Pilastro*	*0.547*	*21.95*	*12.0*
M12	*Porta su terrazzo*	*1.547*	*3.36*	*5.2*
S2	*Copertura*	*0.474*	*393.76*	*186.8*
Z1	*IF - Parete ext2 - Solaio interpiano*	*0.465*	*73.80*	*34.4*
Z2	*W - Parete - Telaio*	*0.134*	*114.40*	*15.4*
W9	*P1-4_1*	*2.846*	*28.80*	*82.0*
W10	*P1-4_2*	*2.870*	*28.80*	*82.7*
W11	*P1-4_3*	*2.916*	*3.84*	*11.2*
			Totale	***541.0***

HU: Coefficiente di scambio termico per trasmissione da locale climatizzato verso locali non climatizzati:

Cod	Descrizione elemento	U [W/m²K] Ψ [W/mK]	Sup.[m²] Lungh [m]	$b_{tr,U}$ [-]	H_U [W/K]
M1	*Ascensori*	*2.574*	*83.94*	*0.40*	*86.4*
Z1	*IF - Parete ext2 - Solaio interpiano*	*0.465*	*23.40*	-	*4.4*
				Totale	***90.8***

Opere citate

1. **International energy agency.** Data and statistics. [Online] [Riportato: 14 Dicembre 2021.] https://www.iea.org/.

2. **Eurostat.** Data Browser. *Eurostat.* [Online] [Riportato: 14 Dicembre 2021.] https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Share_of_fuels_in_the_final_energy_consumption_in_the_residential_sector_for_space_heating,_2020_(%25).png.

3. **Istituto Superiore per la Protezione e Ricerca Ambientale.** Stima trimestrale delle emissioni in atmosfera di gas serra. [Online] [Riportato: 14 Dicembre 2021.] https://www.isprambiente.gov.it/it.

4. **Edlilclima s.r.l.** Scheda informativa. [Online] [Riportato: 4 Gennaio 2022.] https://www.edilclima.it/assets/repository/software/informazioni/700-scheda.pdf.

5. **Temperatura minima, media e massima mensili. *Arpa Lombardia.*** [Online] [Riportato: 12 Giugno 2022.] https://www.arpalombardia.it/Pages/Indicatori/2020/Temperatura-minima,-media-e-massima-mensili-2020.aspx?tipodati=0&tema=Idrometeorologia&sottotema=Sottotema%20ambientale&ordine=1.

6. Meteo: umidità relativa per mese. *Comune di Milano.* [Online] [Riportato: 12 Gigno 2022.] https://dati.comune.milano.it/it/dataset/ds307-ambientemeteo-umidita-mese-2008-2014/resource/7b38e168-ee95-4e91-abdb-3e4bd2f3bef8.

7. BSRIA. *Tech. note 5/88.1.* 1991.

8. Masoero, Marco Carlo. *Progettazione di impianti termotecnici: Aspetti progettuali degli impianti di climatizzazione.* Torino : s.n., 2020.

9. RISCALDAMENTO CON FAN COIL | COME FUNZIONA, VANTAGGI E PREZZI. *RIFARE CASA.* [Online] [Riportato: 9 Maggio 2022.] https://www.rifarecasa.com/dossier/riscaldamento-e-climatizzazione/riscaldamento/fan-coil.

10. De Rossi, Filippo. *Introduzione alle Unità di Trattamento dell'Aria.* Napoli : s.n., 2016.

11. Pompe di calore: come funzionano e cosa comporta la loro manutenzione? *sauermanngroup.com.* [Online] 23 Febbraio 2021. [Riportato: 29 Maggio 2022.] https://sauermanngroup.com/it-IT/insights/pompe-di-calore-come-funzionano-e-cosa-comporta-la-loro-manutenzione.

12. Ciclo inverso. *Wikipedia.* [Online] [Riportato: 7 Giugno 2022.] https://it.wikipedia.org/wiki/Ciclo_inverso.

13. Michele Vio, Cristina Becchio, Stefano Paolo Corgnati, Giulia Crespi, Michele Babuin, Silvia Morassutti. The Polyvalent heat pumps technology in retrofit of existing HVAC . *Energy Procedia.* Matera : s.n., 2017, Vol. 133, p. 158-170.

14. Calore latente. *Wikipedia.* [Online] [Riportato: 29 Maggio 2022.] https://it.wikipedia.org/wiki/Calore_latente.

Dediche e ringraziamenti

É impressionante dover scrivere queste parole, un misto di emozioni positive ma anche negative, per il traguardo raggiunto ma anche per la fine della vita universitaria e da "ragazzo".

Il primo ringraziamento lo voglio dedicare a mio padre, che non è più qui, che mi ha iniziato al percorso di ingegneria e mi ha sempre dato sostegno psicologico di fronte agli esami difficili e alle prove non superate, ma che mi ha anche sempre premiato per i successi che ho avuto. Mi manchi.

Il secondo ringraziamento va a mia madre e mia sorella, che come supporto (e sopportazione anche) sono state le prime: se sono diventato Ingegnere metà del merito è vostro: vi voglio tanto bene!

Ringrazio anche tutto il resto della mia famiglia, per avermi sorretto nel momento del bisogno e per aver condiviso momenti di gioia e dolore.

Un ringraziamento va anche a tutti gli amici che mi hanno sorretto negli ultimi mesi e che rendono la mia vita speciale e ai colleghi del Politecnico di Torino Stefano B., Manuel C., Ivan G. ed Enrico M. che hanno reso più facile e divertente questo percorso.

Ad Alessia che sta diventando una parte importante della mia vita.

A Retano B. che ha reso possibile questa tesi, fornendomi consigli utili al completamento della stessa, relativi alla professione e gli immancabili insegnamenti di vita.