

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica e Nucleare



Tesi di Laurea magistrale

Ricerca del comfort: Analisi CFD e confronto tra terminali di climatizzazione per un edificio multifamiliare a Milano

Relatore

Prof. Marco Carlo Masoero

Correlatori

Prof. Enrico Fabrizio

Ing. Luca Ocelli

Candidata

Valeria Patriarca

A.A. 2019/2020

Abstract

Partendo dalla prima rivoluzione industriale in avanti, la domanda di energia globale è andata costantemente crescendo, ma lo sviluppo industriale e tecnologico in ragione di quello energetico va inserito in un contesto più ampio in cui è l'ambiente a pagare le conseguenze dell'innalzamento della qualità di vita del genere umano. È quindi quanto mai necessario impiegare tecnologie e risorse in favore di uno sviluppo della società che implichi un minor impatto ambientale ed un utilizzo più razionale dell'energia. A questo scopo nel 2015 l'Assemblea Generale delle Nazioni Unite ha adottato l'Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile, documento corredato da 17 obiettivi (SDGs) che dovranno essere raggiunti dai paesi membri entro il 2030.

In particolare, l'obiettivo numero 11 riguarda le città, luogo in cui attualmente risiede più del 50% della popolazione mondiale e dove si concentra oltre l'80% delle attività economiche globali: pur occupando solamente il 3% della superficie terrestre, esse sono responsabili del 75% del consumo di risorse e di emissioni globali. A questo proposito, lo studio si occupa di discutere il dispendio energetico per la climatizzazione di edifici residenziali multifamiliari in funzione dell'impiego di diversi terminali, ponendo però comunque particolare attenzione al benessere e al comfort termico degli occupanti.

L'intero lavoro è stato svolto sul Software IES VE nel quale si è modellato il caso studio a partire dalla struttura 3D dell'edificio fino a caratterizzarlo dal punto di vista termico, si sono effettuate simulazioni per scenari diversi da cui sono stati ricavati i dati caratteristici degli impianti, ed infine si sono realizzate simulazioni CFD degli ambienti dei singoli alloggi.

Due differenti strategie sono state utilizzate per la trattazione dei sistemi di raffrescamento e riscaldamento, e per ognuna delle due stagioni su ciascun terminale è stato eseguito uno studio preliminare volto ad ottenere una modellazione nell'ambiente virtuale tale da massimizzare l'aderenza dei modelli con la realtà fisica dei processi di scambio termico.

La comparazione dei risultati finali tra i diversi terminali nelle due configurazioni di lavoro invernale ed estiva tiene conto di diversi aspetti, quali: profili di temperatura, campi di velocità dell'aria ambientale, parametri di comfort e fabbisogno energetico complessivo dell'edificio.

Indice

Abstract	3
Indice delle figure	8
Indice delle tabelle	15
Introduzione	16
• Overview.....	21
Capitolo 1: Il concetto di comfort e la situazione negli edifici multifamiliari del nord d'Italia ..	24
1.1. Teoria del comfort.....	24
1.1.1. Comfort termoigrometrico e neutralità termica.....	26
1.1.2. Bilancio energetico corpo umano	28
1.1.3. PMV e PPD.....	30
1.1.4. Discomfort localizzato	35
1.2. Indagine statistica sulla situazione degli edifici multifamiliari nel nord d'Italia.....	37
Capitolo 2: Descrizione del Caso Studio e degli Strumenti del Software IES VE	42
2.1. Edificio A.....	42
2.2. Alloggi tipo.....	44
2.2.1. Alloggio tipo #1: Bilocale 4.A2.....	46
2.2.2. Alloggio tipo #2: Trilocale 9.A3.....	47
2.2.3. Alloggio tipo #3: Ampio trilocale 12.A1.....	48
2.3. Strumento di modellazione 3D: ModelIT e Building Template Manager.....	51
2.4. Simulazione termica dinamica: ApacheSim, SunCast e VistaPro	52
2.5. Strumento di modellazione CFD: MicroFlo	56
2.5.1. Caso invernale	57
2.5.2. Caso estivo.....	60
Capitolo 3: Descrizione e modellazione di terminali in IESVE	62
3.1. Pannelli radianti.....	62
3.1.1. Descrizione e stato dell'arte	62
3.1.2. Limiti del software e accorgimenti necessari	67
3.1.3. Modellazione	72
3.2. Ventilconvettori.....	73
3.2.1. Descrizione e stato dell'arte	73
3.2.2. Considerazioni preliminari.....	75

3.2.3.	Modellazione.....	75
3.3.	Radiatori.....	77
3.3.1.	Descrizione e stato dell'arte	77
3.3.2.	Modellazione.....	78
3.4.	Terminali ibridi.....	80
3.4.1.	Descrizione e stato dell'arte	80
3.4.2.	Modellazione.....	82
Capitolo 4: Comparazione risultati dell'analisi CFD– Profili di temperatura		84
4.1.	Introduzione.....	84
4.2.	Caso invernale.....	86
4.2.1.	Radiatori.....	86
4.2.2.	Pannelli radianti	92
4.2.3.	Terminali ibridi	103
4.2.4.	Ventilconvettori	107
4.3.	Caso estivo	121
4.3.1.	Pannelli radianti	121
4.3.2.	Terminali ibridi	132
4.3.3.	Ventilconvettori	136
Capitolo 5: Comparazione risultati dell'analisi CFD– Campi di velocità dell'aria.....		148
5.1.	Caso invernale.....	148
5.1.1.	Radiatori.....	148
5.1.2.	Pannelli radianti	151
5.1.3.	Terminali ibridi	157
5.1.4.	Ventilconvettori	160
5.2.	Caso estivo	168
5.2.1.	Pannelli radianti	168
5.2.2.	Terminali ibridi	174
5.2.3.	Ventilconvettori	177
Capitolo 6: Comparazione risultati dell'analisi CFD– Parametri di comfort		183
6.1.	Introduzione e definizione delle variabili.....	183
6.2.	Caso Invernale.....	184
6.2.1.	Radiatori.....	184
6.2.2.	Pannelli radianti	188
6.2.3.	Terminali ibridi	195
6.2.4.	Ventilconvettori	199
6.3.	Caso Estivo	207

6.3.1. Pannelli radianti.....	208
6.3.2. Terminali ibridi.....	215
6.3.3. Ventilconvettori.....	219
Capitolo 7: Valutazioni finali e conclusioni.....	226
Bibliografia.....	229

Indice delle figure

FIGURA 1- CONSUMO GLOBALE DI ENERGIA PRIMARIA [1] [3].....	16
FIGURA 2- CONSUMI FINALI DI ENERGIA IN ITALIA (1197-2018) [7].....	17
FIGURA 3- CONFRONTO CONSUMI DI ENERGIA PER USI FINALI IN ITALIA PER GLI ANNI 2017 E 2018 [7].....	18
FIGURA 4- CONSUMO DI ENERGIA PRIMARIA EUROPEA PER USO FINALE [5]	19
FIGURA 5- CONSUMO FINALE DI ENERGIA NEGLI EDIFICI RESIDENZIALI EUROPEI PER PAESE E PER USO FINALE [8].	20
FIGURA 6-CONSUMO FINALE DI ENERGIA NEL RESIDENZIALE IN ITALIA [8].....	20
FIGURA 7- SCHEMA A BLOCCHI RAFFIGURANTE LE MODALITÀ E LE STRATEGIE DI TERMOREGOLAZIONE UMANA CHE, IN RIPOSTA A STIMOLI ESTERNI, AGISCE PER GARANTIRE L'OMEOTERMIA.....	26
FIGURA 8- BILANCIO ENERGETICO CORPO UMANO, EDI.ERMES SRL MILANO	27
FIGURA 9- RELAZIONE ANALITICA E GRAFICA TRA PMV E PPD	30
FIGURA 10- DIAGRAMMA DI FANGER IN CUI SONO EVIDENZIATE LE LINEE DI BENESSERE AL VARIARE DELLA VELOCITÀ RELATIVA DELL'ARIA, RELATIVE AD UN'UMIDITÀ RELATIVA CHE VARIA TRA LO 0% AL 100%	32
FIGURA 11- DIAGRAMMA DI FANGER IN CUI SONO EVIDENZIATE LE LINEE DI BENESSERE AL VARIARE DELLA VELOCITÀ RELATIVA DELL'ARIA, RELATIVAMENTE AD UN'UMIDITÀ RELATIVA DEL 50%.....	33
FIGURA 12- DIAGRAMMA SEMPLIFICATO PER LA VALUTAZIONE DELLA TEMPERATURA OPERATIVA, E LA RELATIVA TOLLERANZA, RICHIESTE IN UN AMBIENTE DI CATEGORIA B AL FINE DI AVERE CONDIZIONI TI COMFORT TERMICO	34
FIGURA 13- INDICI DI DISCOMFORT LOCALIZZATO, DALL'ALTO VERSO IL BASSO: PDP, PDA, PDR.....	36
FIGURA 14- LIMITI DI ACCETTABILITÀ PER IL COMFORT TERMICO-IGROMETRICO (UNI EN ISO 7730 TABELLA A.1)	36
FIGURA 15- INDAGINE STATISTICA: CARATTERIZZAZIONE DELLA CENTRALE TERMICA PER ACS E IMPIANTO DI CLIMATIZZAZIONE	37
FIGURA 16- INDAGINE STATISTICA: IMPIANTI RINNOVABILI A FONTE SOLARE	38
FIGURA 17- INDAGINE STATISTICA: FREQUENZA DI INSTALLAZIONE DIVERSE TIPOLOGIE DI POMPA DI CALORE	38
FIGURA 18- INDAGINE STATISTICA: TERMINALI DELL'IMPIANTO DI CLIMATIZZAZIONE	39
FIGURA 19- INDAGINE STATISTICA: DIVERSI TIPI DI INSTALLAZIONE DEI PANNELLI RADIANTI.....	40
FIGURA 20- INDAGINE STATISTICA: FREQUENZA DI UTILIZZO DELLA VENTILAZIONE MECCANICA CONTROLLATA E SUE CARATTERISTICHE.....	40
FIGURA 21- VISTE 3D DELL'EDIFICIO A – IN ALTO : VISTA SUD-EST (SINISTRA) E NORD-OVEST (DESTRA); IN BASSO: LA VISTA DA SUD DELL'INTERO EDIFICIO (SINISTRA) E DELL'INVOLUCRO AL NETTO DEI BALCONI ESTERNI CHE AFFACCIANO VERSO SUD (DESTRA);.....	42
FIGURA 22-SOPRA VISTA 3D DELL'EDIFICIO A CON ENFASI SUGLI ALLOGGI TIPO, SOTTO VISTA DALL'ALTO DEI SOLI ALLOGGI TIPO IN PROSPETTIVA	44
FIGURA 23- PIANTA PIANO 4 EDIFICIO A; L'ALLOGGIO 4.A2 È QUELLO SITUATO FRONTALMENTE AL VANO SCALE CON SINGOLA ESPOSIZIONE A SUD.	46

FIGURA 24- PIANTA PIANO 4 EDIFICIO A: PARTICOLARE ALLOGGIO 4.A2	46
FIGURA 25- PIANTA PIANO 9 EDIFICIO A; L'ALLOGGIO 9.A3 È QUELLO SITUATO A DESTRA DEL VANO SCALE.	47
FIGURA 26- PIANTA PIANO 9 EDIFICIO A: PARTICOLARE ALLOGGIO 9.A3	48
FIGURA 27- PIANTA PIANO 12 EDIFICIO A; L'ALLOGGIO 12.A1 È QUELLO SITUATO A SINISTRA DEL VANO SCALE..	49
FIGURA 28- PIANTA PIANO 12 EDIFICIO A: PARTICOLARE ALLOGGIO 12.A1	50
FIGURA 29- VISTA SUD-EST (SINISTRA) E NORD-OVEST (DESTRA) DELL'EDIFICIO A ATTRAVERSO STRUMENTO DI VISUALIZZAZIONE DI SUNCAST: DETTAGLIO DELL'INVOLUCRO TRASPARENTE	53
FIGURA 30- POSIZIONE DEL SOLE NEL CIELO NEI GIORNI DI PROGETTO PER LA MODELLAZIONE DEL SISTEMA DI RISCALDAMENTO (7 GENNAIO ORE 1830) E RAFFRESCAMENTO (24 LUGLIO, ORE 11:30 E ORE 15:30) IN MICROFLO.....	55
FIGURA 31- ATTENDIBILITÀ DEL PROCESSO DI INSERIMENTO DEL CARICO DI RISCALDAMENTO IN AMBIENTE FOTTO FORMA DI INTERNAL GAIN: CONFRONTO GRAFICO TRA VALORI DELLA TEMPERATURA MEDIA RADIANTE (T _{MR}) E MEDIA (T _{AIR}) DELL'ARIA REALI E REGISTRATI A VALLE DEL PROCESSO	58
FIGURA 32- INSTALLAZIONE A PAVIMENTO - STRUTTURA DI SOLETTA RADIANTE TIPO [18];	63
FIGURA 33- INSTALLAZIONE A PARETE - SINISTRA: STRUTTURA DI PARETE VERTICALE CON PANNELLO RADIANTE PREFABBRICATO TIPO; DESTRA: - POSA IN LOCO DI UN SISTEMA A PANNELLI RADIANTI A PARETE FISSATI ATTRAVERSO L'USO DI GUIDE.....	63
FIGURA 34- INSTALLAZIONE A SOFFITTO DI PANNELLO RADIANTE PREFABBRICATO; SI POSSONO VEDERE NEL DETTAGLIO A DESTRA LE VALVOLE DI INTERCETTAZIONE PER L'ALLACCIO ALLA RETE IDRICA RISPETTIVAMENTE PER IL CIRCUITO DI MANDATA E RITORNO.....	63
FIGURA 35- PANNELLI RADIANTI: GEOMETRIE DI POSA DEI TUBI CONTENENTI FLUIDO TERMOVETTORE [18]	64
FIGURA 36- PANNELLI RADIANTI: GEOMETRIE DI POSA A SERPENTINA CON INTERASSE VARIABILE DEI TUBI CONTENENTI FLUIDO TERMOVETTORE [18].....	64
FIGURA 37- CURVA DI TEMPERATURA PER VARIE TIPOLOGIE IMPIANTISTICHE [18]	65
FIGURA 38- PANNELLI RADIANTI A PAVIMENTO "A BASSO SPESSORE"	66
FIGURA 39-CONFRONTO PANNELLI RADIANTI A PAVIMENTO TRADIZIONALI (SINISTRA) E "A BASSO SPESSORE" (DESTRA)	66
FIGURA 40-RAFFIGURAZIONE DELL'ASPETTO DEI PANNELLI RADIANTI A PAVIMENTO NELL'AMBIENTE VIRTUALE: SOVRAPPOSIZIONE DEL CAMPO DI TEMPERATURA (RIEMPIMENTO CON COLORE RELATIVE LINEE ISO- TEMPERATURA) E DEL CAMPO VETTORIALE DI MOTO DELLA VELOCITÀ DELL'ARIA (VETTORI).....	72
FIGURA 41- STRUTTURE DEI VENTILCONVETTORI 228[18].....	73
FIGURA 42- VENTILCONVETTORI A SOFFITTO E PARETE: DETTAGLI INTERNI [18].....	74
FIGURA 43- VENTILCONVETTORI A PAVIMENTO: IN ALTO SCHEMATIZZAZIONE E RAPPRESENTAZIONE DEI FLUSSI DI ARIA ED ACQUA ALL'INTERNO DEL TERMINALE, IN BASSO TRE ESEMPI DI INSTALLAZIONE A PAVIMENTO CON GRIGLIA CONTINUA, ANGOLARE E DISCONTINUA	74
FIGURA 44- RAFFIGURAZIONE DELL'ASPETTO DEI VCS A PAVIMENTO NELL'AMBIENTE VIRTUALE	76
FIGURA 45- MOTI CONVETTIVI INDOTTI DA UN RADIATORE A PARETE [18].....	77
FIGURA 46- DA SINISTRA VERSO DESTRA, TIPOLOGIE DI RADIATORI IN 1) ACCIAIO, 2) ALLUMINIO, 3) GHISA	77

FIGURA 47- RAFFIGURAZIONE DELL'ASPETTO DEI RADIATORI POSTI A PARETE NELL'AMBIENTE VIRTUALE	79
FIGURA 48- QUATTRO MODALITÀ DI FUNZIONAMENTO DEL TERMINALE IBRIDO AERMEC OMNIA RADIANT - DA SINISTRA VERSO DESTRA E DALL'ALTO VERSO IL BASSO: RADIANTE, RADIANTE + CONVEZIONE NATURALE, RADIANTE + CONVEZIONE FORZATA, CONVEZIONE FORZATA (RAFFRESCAMENTO) [21].....	80
FIGURA 49-TERMINALE IBRIDO DI OLIMPIA SPLENDID: BI2 AIRNSLR AIR INVERTER [22].....	81
FIGURA 50- RAFFIGURAZIONE DELL'ASPETTO DEI TERMINALI IBRIDI POSTI A PARETE NELL'AMBIENTE VIRTUALE ...	83
FIGURA 51- RADIATORI: CAMPO DI TEMPERATURA IN AMBIENTI DI RIDOTTE DIMENSIONI; 4A2 SOPRA, 12A1 SOTTO	87
FIGURA 52- RADIATORI: CAMPO DI TEMPERATURA IN AMBIENTI DI GRANDI DIMENSIONI; 12A1	88
FIGURA 53- RADIATORI: CAMPO DI TEMPERATURA IN AMBIENTI DI GRANDI DIMENSIONI; 9A3	90
FIGURA 54- PANNELLI RADIANTI PAVIMENTO: CAMPO DI TEMPERATURA IN AMBIENTI DI RIDOTTE DIMENSIONI; 4A2	93
FIGURA 55- PANNELLI RADIANTI PAVIMENTO: CAMPO DI TEMPERATURA IN AMBIENTI DI RIDOTTE DIMENSIONI; 12A1	94
FIGURA 56- PANNELLI RADIANTI PAVIMENTO: CAMPO DI TEMPERATURA IN ALLOGGIO 9A3	96
FIGURA 57- PANNELLI RADIANTI PAVIMENTO: CAMPO DI TEMPERATURA IN AMBIENTI DI GRANDI DIMENSIONI; 12A1 SOPRA 9A3 SOTTO.....	96
FIGURA 58- PANNELLI RADIANTI SOFFITTO: CAMPO DI TEMPERATURA IN AMBIENTI DI RIDOTTE DIMENSIONI; 4A2	98
FIGURA 59- PANNELLI RADIANTI SOFFITTO: CAMPO DI TEMPERATURA IN AMBIENTI DI RIDOTTE DIMENSIONI; 12A1	99
FIGURA 60- PANNELLI RADIANTI SOFFITTO: CAMPO DI TEMPERATURA IN AMBIENTI DI RIDOTTE DIMENSIONI; 9A3	100
FIGURA 61- PANNELLI RADIANTI SOFFITTO: CAMPO DI TEMPERATURA IN AMBIENTI DI GRANDI DIMENSIONI; 12A1 SOPRA 9A3 SOTTO.....	101
FIGURA 62- TERMINALI IBRIDI: CAMPO DI TEMPERATURA IN AMBIENTI DI RIDOTTE DIMENSIONI; 4A2 SOPRA, 12A1 SOTTO	103
FIGURA 63- TERMINALI IBRIDI: CAMPO DI TEMPERATURA IN AMBIENTI DI GRANDI DIMENSIONI; 12A1 SOPRA 9A3 SOTTO	105
FIGURA 64- VENTILCONVETTORI SOFFITTO: CAMPO DI TEMPERATURA IN AMBIENTI DI RIDOTTE DIMENSIONI; 4A2	107
FIGURA 65- VENTILCONVETTORI SOFFITTO: CAMPO DI TEMPERATURA IN AMBIENTI DI RIDOTTE DIMENSIONI; 9A3	109
FIGURA 66- VENTILCONVETTORI SOFFITTO: CAMPO DI TEMPERATURA IN AMBIENTI DI GRANDI DIMENSIONI; 12A1	111
FIGURA 67- VENTILCONVETTORI SOFFITTO: CAMPO DI TEMPERATURA IN AMBIENTI DI GRANDI DIMENSIONI; 9A3	113
FIGURA 68- VENTILCONVETTORI PAVIMENTO: CAMPO DI TEMPERATURA IN AMBIENTI DI RIDOTTE DIMENSIONI; 4A2	115

FIGURA 69- VENTILCONVETTORI PAVIMENTO: CAMPO DI TEMPERATURA IN AMBIENTI DI RIDOTTE DIMENSIONI; 9A3	116
FIGURA 70- VENTILCONVETTORI PAVIMENTO: CAMPO DI TEMPERATURA IN AMBIENTI DI GRANDI DIMENSIONI; 12A1	118
FIGURA 71- VENTILCONVETTORI PAVIMENTO: CAMPO DI TEMPERATURA IN AMBIENTI DI GRANDI DIMENSIONI; 9A3	119
FIGURA 72- PANNELLI RADIANTI SOFFITTO: CAMPO DI TEMPERATURA IN AMBIENTI DI RIDOTTE DIMENSIONI; 4A2	122
FIGURA 73- PANNELLI RADIANTI SOFFITTO: CAMPO DI TEMPERATURA IN AMBIENTI DI RIDOTTE DIMENSIONI; 9A3	123
FIGURA 74- PANNELLI RADIANTI SOFFITTO: CAMPO DI TEMPERATURA IN AMBIENTI DI GRANDI DIMENSIONI; 12A1 SOPRA 9A3 SOTTO	125
FIGURA 75- PANNELLI RADIANTI PAVIMENTO: CAMPO DI TEMPERATURA IN AMBIENTI DI RIDOTTE DIMENSIONI; 4A2	126
FIGURA 76- PANNELLI RADIANTI PAVIMENTO: CAMPO DI TEMPERATURA IN AMBIENTI DI RIDOTTE DIMENSIONI; 12A1	127
FIGURA 77- PANNELLI RADIANTI PAVIMENTO: CAMPO DI TEMPERATURA IN AMBIENTI DI RIDOTTE DIMENSIONI; 9A3	129
FIGURA 78- PANNELLI RADIANTI PAVIMENTO: CAMPO DI TEMPERATURA IN AMBIENTI DI GRANDI DIMENSIONI; 12A1 SOPRA 9A3 SOTTO	130
FIGURA 79- TERMINALI IBRIDI: CAMPO DI TEMPERATURA IN AMBIENTI DI RIDOTTE DIMENSIONI; 4A2	132
FIGURA 80- TERMINALI IBRIDI: CAMPO DI TEMPERATURA IN AMBIENTI DI GRANDI DIMENSIONI; 12A1	133
FIGURA 81- TERMINALI IBRIDI: CAMPO DI TEMPERATURA IN AMBIENTI DI GRANDI DIMENSIONI; 9A3	134
FIGURA 82- VENTILCONVETTORI SOFFITTO: CAMPO DI TEMPERATURA IN AMBIENTI DI RIDOTTE DIMENSIONI; 4A2	136
FIGURA 83- VENTILCONVETTORI SOFFITTO: CAMPO DI TEMPERATURA IN AMBIENTI DI RIDOTTE DIMENSIONI; 9A3	138
FIGURA 84- VENTILCONVETTORI SOFFITTO: CAMPO DI TEMPERATURA IN AMBIENTI DI GRANDI DIMENSIONI; 12A1	139
FIGURA 85- VENTILCONVETTORI SOFFITTO: CAMPO DI TEMPERATURA IN AMBIENTI DI GRANDI DIMENSIONI; 9A3	141
FIGURA 86- VENTILCONVETTORI PAVIMENTO: CAMPO DI TEMPERATURA IN AMBIENTI DI RIDOTTE DIMENSIONI; 4A2	143
FIGURA 87- VENTILCONVETTORI PAVIMENTO: CAMPO DI TEMPERATURA IN AMBIENTI DI RIDOTTE DIMENSIONI; 9A3	144
FIGURA 88- VENTILCONVETTORI PAVIMENTO: CAMPO DI TEMPERATURA IN AMBIENTI DI GRANDI DIMENSIONI; 12A1	145
FIGURA 89- VENTILCONVETTORI PAVIMENTO: CAMPO DI TEMPERATURA IN AMBIENTI DI GRANDI DIMENSIONI; 9A3	146

FIGURA 90- RADIATORI: CAMPO DI VELOCITÀ IN AMBIENTI DI GRANDI DIMENSIONI; 9A3 SOPRA, 12A1 SOTTO	148
FIGURA 91- RADIATORI: CAMPO DI VELOCITÀ IN AMBIENTI DI GRANDI DIMENSIONI; 4A2	149
FIGURA 92- RADIATORI: CAMPO DI VELOCITÀ IN AMBIENTI DI DIMENSIONI RIDOTTE; DA SOPRA A SOTTO: 9A3.	150
FIGURA 93- PANNELLI RADIANTI A SOFFITTO: CAMPO DI VELOCITÀ IN AMBIENTI DI GRANDI DIMENSIONI; 9A3 SOPRA, 12A1 SOTTO	151
FIGURA 94-PANNELLI RADIANTI A SOFFITTO: CAMPO DI VELOCITÀ IN AMBIENTI DI RIDOTTE DIMENSIONI; 4A2 .	152
FIGURA 95- PANNELLI RADIANTI A SOFFITTO: CAMPO DI VELOCITÀ IN AMBIENTI DI DIMENSIONI RIDOTTE; DA SOPRA A SOTTO: 12A1, 9A3.....	153
FIGURA 96- PANNELLI RADIANTI A PAVIMENTO: CAMPO DI VELOCITÀ IN AMBIENTI DI GRANDI DIMENSIONI; 9A3 SOPRA, 12A1 SOTTO.....	154
FIGURA 97-PANNELLI RADIANTI A PAVIMENTO: CAMPO DI VELOCITÀ IN AMBIENTI DI GRANDI DIMENSIONI; 4A2	155
FIGURA 98- PANNELLI RADIANTI A PAVIMENTO: CAMPO DI VELOCITÀ IN AMBIENTI DI DIMENSIONI RIDOTTE; DA SOPRA A SOTTO: 12A1, 9A3.....	156
FIGURA 99- TERMINALI IBRIDI: CAMPO DI VELOCITÀ IN AMBIENTI DI GRANDI DIMENSIONI; 9A3 SOPRA, 12A1 SOTTO	157
FIGURA 100- TERMINALI IBRIDI: CAMPO DI VELOCITÀ IN AMBIENTI DI GRANDI DIMENSIONI; 4A2.....	158
FIGURA 101- TERMINALI IBRIDI: CAMPO DI VELOCITÀ IN AMBIENTI DI DIMENSIONI RIDOTTE; DA SOPRA A SOTTO: 9A3	159
FIGURA 102- VENTILCONVETTORI A SOFFITTO: CAMPO DI VELOCITÀ IN AMBIENTI DI GRANDI DIMENSIONI; 9A3 SOPRA, 12A1 SOTTO.....	160
FIGURA 103-VENTILCONVETTORI A SOFFITTO: CAMPO DI VELOCITÀ IN AMBIENTI DI GRANDI DIMENSIONI; 4A2	161
FIGURA 104- VENTILCONVETTORI A SOFFITTO: CAMPO DI VELOCITÀ IN AMBIENTI DI DIMENSIONI RIDOTTE; DA SOPRA A SOTTO: 9A3.....	162
FIGURA 105- VENTILCONVETTORI A PAVIMENTO: CAMPO DI VELOCITÀ IN AMBIENTI DI GRANDI DIMENSIONI; 9A3 SOPRA, 12A1 SOTTO.....	163
FIGURA 106-VENTILCONVETTORI A PAVIMENTO: CAMPO DI VELOCITÀ IN AMBIENTI DI GRANDI DIMENSIONI; 4A2	165
FIGURA 107- VENTILCONVETTORI A PAVIMENTO: CAMPO DI VELOCITÀ IN AMBIENTI DI DIMENSIONI RIDOTTE; DA SOPRA A SOTTO: 12A1, 9A3	166
FIGURA 108- PANNELLI RADIANTI A SOFFITTO: CAMPO DI VELOCITÀ IN AMBIENTI DI GRANDI DIMENSIONI; 9A3 SOPRA, 12A1 SOTTO.....	168
FIGURA 109-PANNELLI RADIANTI A SOFFITTO: CAMPO DI VELOCITÀ IN AMBIENTI DI GRANDI DIMENSIONI; 4A2	169
FIGURA 110- PANNELLI RADIANTI A SOFFITTO: CAMPO DI VELOCITÀ IN AMBIENTI DI DIMENSIONI RIDOTTE; DA SOPRA A SOTTO: 12A1, 9A3.....	170
FIGURA 111- PANNELLI RADIANTI A PAVIMENTO: CAMPO DI VELOCITÀ IN AMBIENTI DI GRANDI DIMENSIONI; 9A3 SOPRA, 12A1 SOTTO.....	171
FIGURA 112-PANNELLI RADIANTI A PAVIMENTO: CAMPO DI VELOCITÀ IN AMBIENTI DI GRANDI DIMENSIONI; 4A2	172

FIGURA 113- PANNELLI RADIANTI A PAVIMENTO: CAMPO DI VELOCITÀ IN AMBIENTI DI DIMENSIONI RIDOTTE; DA SOPRA A SOTTO: 12A1, 9A3	173
FIGURA 114- TERMINALI IBRIDI: CAMPO DI VELOCITÀ IN AMBIENTI DI GRANDI DIMENSIONI; 9A3	174
FIGURA 115- TERMINALI IBRIDI: CAMPO DI VELOCITÀ IN AMBIENTI DI GRANDI DIMENSIONI; 4A2	175
FIGURA 116- TERMINALI IBRIDI: CAMPO DI VELOCITÀ IN AMBIENTI DI DIMENSIONI RIDOTTE; 9A3	175
FIGURA 117- VENTILCONVETTORI A SOFFITTO: CAMPO DI VELOCITÀ IN AMBIENTI DI GRANDI DIMENSIONI; 9A3 SOPRA, 12A1 SOTTO	177
FIGURA 118-VENTILCONVETTORI A SOFFITTO: CAMPO DI VELOCITÀ IN AMBIENTI DI GRANDI DIMENSIONI; 4A2 .	178
FIGURA 119- VENTILCONVETTORI A SOFFITTO: CAMPO DI VELOCITÀ IN AMBIENTI DI DIMENSIONI RIDOTTE; DA SOPRA A SOTTO: 12A1, 9A3	179
FIGURA 120- VENTILCONVETTORI A PAVIMENTO: CAMPO DI VELOCITÀ IN AMBIENTI DI GRANDI DIMENSIONI; 9A3 SOPRA, 12A1 SOTTO	180
FIGURA 121-VENTILCONVETTORI A PAVIMENTO: CAMPO DI VELOCITÀ IN AMBIENTI DI GRANDI DIMENSIONI; 4A2	181
FIGURA 122- VENTILCONVETTORI A PAVIMENTO: CAMPO DI VELOCITÀ IN AMBIENTI DI DIMENSIONI RIDOTTE; 9A3	182
FIGURA 123- RADIATORI: INDICI DI COMFORT NELL'ALLOGGIO 4A2.....	185
FIGURA 124- RADIATORI: INDICI DI COMFORT NELL'ALLOGGIO 9A3.....	186
FIGURA 125- RADIATORI: INDICI DI COMFORT NELL'ALLOGGIO 12A1.....	187
FIGURA 126- PANNELLI RADIANTI PAVIMENTO: INDICI DI COMFORT NELL'ALLOGGIO 4A2.....	189
FIGURA 127- PANNELLI RADIANTI PAVIMENTO: INDICI DI COMFORT NELL'ALLOGGIO 9A3.....	190
FIGURA 128- PANNELLI RADIANTI PAVIMENTO: INDICI DI COMFORT NELL'ALLOGGIO 12A1	191
FIGURA 129- PANNELLI RADIANTI SOFFITTO: INDICI DI COMFORT NELL'ALLOGGIO 4A2	192
FIGURA 130- PANNELLI RADIANTI SOFFITTO: INDICI DI COMFORT NELL'ALLOGGIO 9A3	193
FIGURA 131- PANNELLI RADIANTI SOFFITTO: INDICI DI COMFORT NELL'ALLOGGIO 12A1	194
FIGURA 132- TERMINALI IBRIDI: INDICI DI COMFORT NELL'ALLOGGIO 4A2.....	196
FIGURA 133- TERMINALI IBRIDI: INDICI DI COMFORT NELL'ALLOGGIO 9A3.....	197
FIGURA 134- TERMINALI IBRIDI: INDICI DI COMFORT NELL'ALLOGGIO 12A1.....	198
FIGURA 135- VENTILCONVETTORI PAVIMENTO: INDICI DI COMFORT NELL'ALLOGGIO 4A2	200
FIGURA 136- VENTILCONVETTORI PAVIMENTO: INDICI DI COMFORT NELL'ALLOGGIO 9A3	201
FIGURA 137- VENTILCONVETTORI PAVIMENTO: INDICI DI COMFORT NELL'ALLOGGIO 12A1	202
FIGURA 138- VENTILCONVETTORI PAVIMENTO: INDICI DI COMFORT NELL'ALLOGGIO 12A1 - CASO CON VELOCITÀ DELL'ARIA PIÙ ELEVATA (2 M/s).....	203
FIGURA 139- VENTILCONVETTORI SOFFITTO: INDICI DI COMFORT NELL'ALLOGGIO 4A2	204
FIGURA 140- VENTILCONVETTORI SOFFITTO: INDICI DI COMFORT NELL'ALLOGGIO 9A3	205
FIGURA 141- VENTILCONVETTORI SOFFITTO: INDICI DI COMFORT NELL'ALLOGGIO 12A1	206

FIGURA 142- PANNELLI RADIANTI PAVIMENTO: INDICI DI COMFORT NELL'ALLOGGIO 4A2	209
FIGURA 143- PANNELLI RADIANTI PAVIMENTO: INDICI DI COMFORT NELL'ALLOGGIO 9A3	210
FIGURA 144- PANNELLI RADIANTI PAVIMENTO: INDICI DI COMFORT NELL'ALLOGGIO 12A1	211
FIGURA 145- PANNELLI RADIANTI SOFFITTO: INDICI DI COMFORT NELL'ALLOGGIO 4A2.....	212
FIGURA 146- PANNELLI RADIANTI SOFFITTO: INDICI DI COMFORT NELL'ALLOGGIO 9A3.....	213
FIGURA 147- PANNELLI RADIANTI SOFFITTO: INDICI DI COMFORT NELL'ALLOGGIO 12A1.....	214
FIGURA 148- TERMINALI IBRIDI: INDICI DI COMFORT NELL'ALLOGGIO 4A2	216
FIGURA 149- TERMINALI IBRIDI: INDICI DI COMFORT NELL'ALLOGGIO 9A3	217
FIGURA 150- TERMINALI IBRIDI: INDICI DI COMFORT NELL'ALLOGGIO 12A1	218
FIGURA 151- VENTILCONVETTORI PAVIMENTO: INDICI DI COMFORT NELL'ALLOGGIO 4A2.....	220
FIGURA 152- VENTILCONVETTORI PAVIMENTO: INDICI DI COMFORT NELL'ALLOGGIO 9A3.....	221
FIGURA 153- VENTILCONVETTORI PAVIMENTO: INDICI DI COMFORT NELL'ALLOGGIO 12A1.....	222
FIGURA 154- VENTILCONVETTORI SOFFITTO: INDICI DI COMFORT NELL'ALLOGGIO 4A2.....	223
FIGURA 155- VENTILCONVETTORI SOFFITTO: INDICI DI COMFORT NELL'ALLOGGIO 9A3.....	224
FIGURA 156- VENTILCONVETTORI SOFFITTO: INDICI DI COMFORT NELL'ALLOGGIO 12A1.....	225
FIGURA 157- POTENZA [W] MEDIA NELL'ORA DI RIFERIMENTO COMPLESSIVA DEI TRE ALLOGGI, AL VARIARE DEI TERMINALI UTILIZZATI	226

Indice delle tabelle

TABELLA 1- INTERVALLO DI APPLICABILITÀ DEGLI INDICI PMV E PPD PER GLI AMBIENTI MODERATI	31
TABELLA 2- CATEGORIE DI COMFORT SECONDO LA NORMA UNI-EN 7730	34
TABELLA 3- CARATTERIZZAZIONE DEI PIANI DELL'EDIFICIO A.....	43
TABELLA 4 – TABELLE DEI VALORI SPERIMENTALI DEL COEFFICIENTE TOTALE DI SCAMBIO TERMICO [W/M ² K] NEL CASO DI PANNELLI RADIANTI A PAVIMENTO; CASO RAFFRESCAMENTO E RISCALDAMENTO [24]	69
TABELLA 5- VALORI SPERIMENTALI DEL COEFFICIENTE TOTALE DI SCAMBIO TERMICO [W/M ² K] ADOTTATI PER I PANNELLI RADIANTI A PAVIMENTO.....	69
TABELLA 6- TABELLE DEI VALORI SPERIMENTALI DEL COEFFICIENTE TOTALE DI SCAMBIO TERMICO [W/M ² K] NEL CASO DI PANNELLI RADIANTI A SOFFITTO; CASO RAFFRESCAMENTO E RISCALDAMENTO [25]	70
TABELLA 7- VALORI SPERIMENTALI DEL COEFFICIENTE TOTALE DI SCAMBIO TERMICO [W/M ² K] ADOTTATI PER I PANNELLI RADIANTI A SOFFITTO [25]	70
TABELLA 8- VALORI DI FLUSSO SUPERFICIALE TOTALE [W/M ²] MISURATO E FLUSSO RADIANTE [W/M ²] CALCOLATO, CON INCERTEZZA SPERIMENTALE, NEL CASO DI PANNELLI RADIANTI A SOFFITTO [25]	71
TABELLA 9- RANGE DEGLI INDICI DI COMFORT	183
TABELLA 10- PARAMETRI COMFORT INVERNALE	184
TABELLA 11- PARAMETRI COMFORT INVERNALE	207

Introduzione

Partendo dalla prima rivoluzione industriale fino ad arrivare ai dati attuali, la domanda di energia globale è andata costantemente crescendo come conseguenza di una sua penetrazione sempre più capillare in ogni aspetto della quotidianità. Che si tratti di vettori termici, meccanici o elettrici, l'energia è alla base della società moderna.

In particolare, nel 2018, secondo quanto riportato dal recentissimo studio condotto da BP [2], la crescita di consumo di energia primaria mondiale ha registrato un importante aumento pari a +2.9%, valore più alto dal 2010.

Lo sviluppo industriale e tecnologico in ragione di quello energetico va però contestualizzato in un contesto più ampio in cui è l'ambiente circostante a pagare le conseguenze dell'innalzamento della qualità di vita del genere umano. Le alterazioni sul clima e sugli equilibri naturali globali derivate dalle azioni degli esseri umani nei confronti di ciò che li circonda risultano sempre più significative. Prima tra tutti, la quantità sempre più massiccia di gas climalteranti rilasciati in atmosfera.

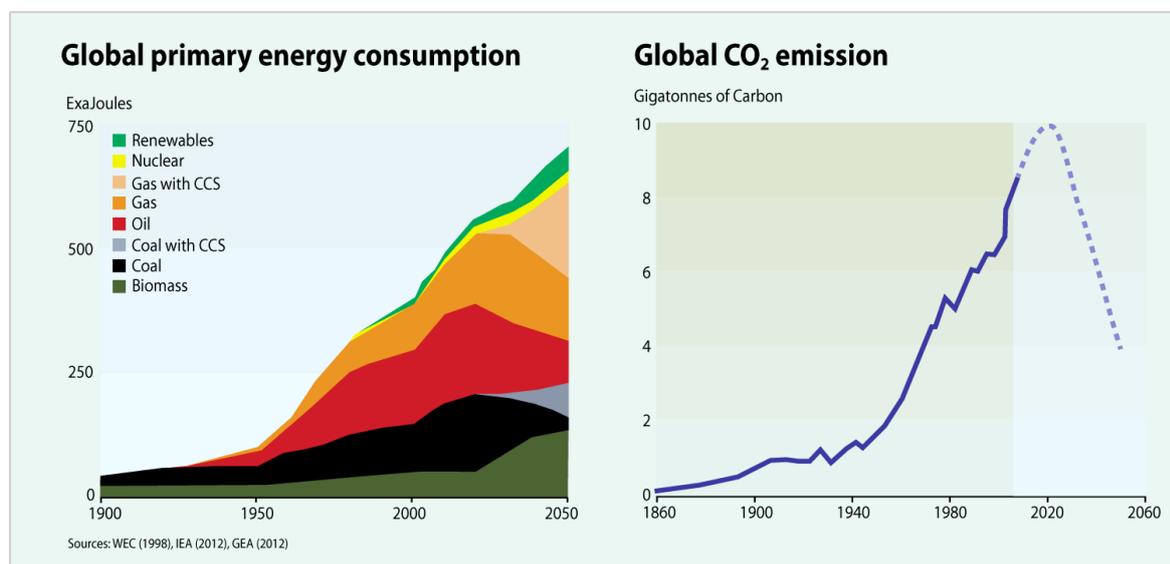


Figura 1- Consumo globale di energia primaria [1] [3]

Come evidenziato dalla Figura 1, gli andamenti globali di consumo di energia primaria e quantità di CO₂ prodotta ed emessa dalle attività umane sono assolutamente correlati. Essendo ritenuta tale sostanza il principale gas serra dell'atmosfera terrestre [4], vi è la necessità di porre un freno all'attuale modo di produrre e consumare energia. È quanto mai

necessario impiegare tecnologie e risorse in favore di uno sviluppo della società che implichi un minor impatto ambientale.

A questo scopo, il 25 settembre 2015 l'Assemblea Generale delle Nazioni Unite ha adottato l'Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile, corredata da una lista di 17 obiettivi riguardanti tutti gli aspetti della vita umana e del pianeta (Sustainable Development Goals – SDGs) che dovranno essere raggiunti da tutti i paesi membri entro il 2030.

L'obiettivo numero 11 riguarda le città, luogo in cui attualmente risiede più del 50% della popolazione mondiale e dove si concentra oltre l'80% delle attività economiche globali. Queste hanno un notevole impatto ambientale: pur occupando solamente il 3% della superficie terrestre, sono responsabili del 75% del consumo di risorse e di emissioni globali. Lo scopo è quello di rendere gli insediamenti umani inclusivi, sicuri, duraturi e sostenibili. [6]

Analizzando nello specifico il nostro paese, pur tenendo in considerazione l'impatto negativo che la crisi economica globale ha avuto sulla domanda energetica, si può notare come nel 2018 anche in Italia la domanda di energia è tornata ad aumentare, e l'aumento ha riguardato tutti i settori. Si riportano in forma di grafico comparativo i dati raccolti dal Ministero dello Sviluppo Economico nel 2018. [7]

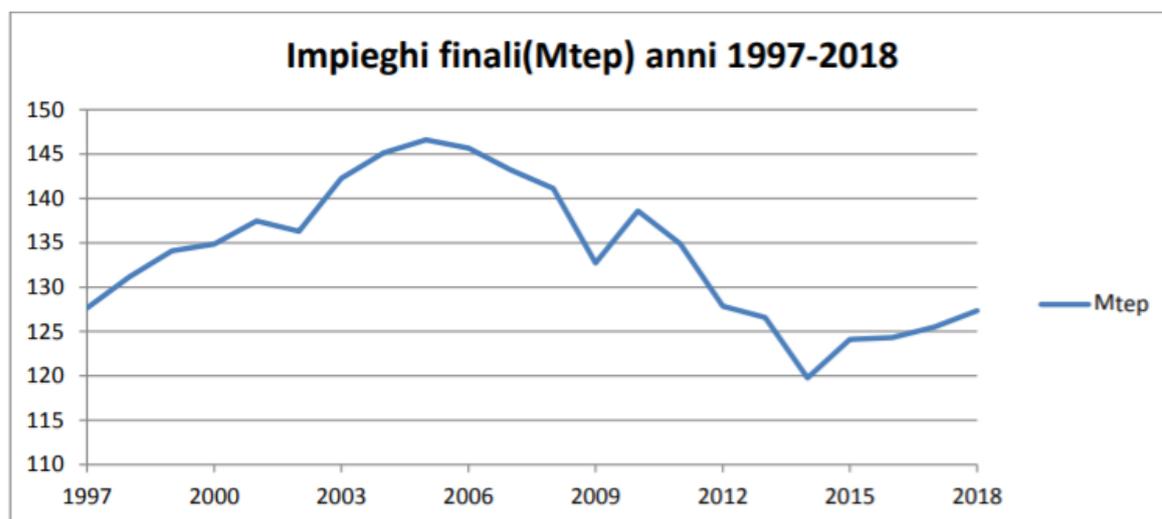


Figura 2- Consumi finali di energia in Italia (1997-2018) [7]

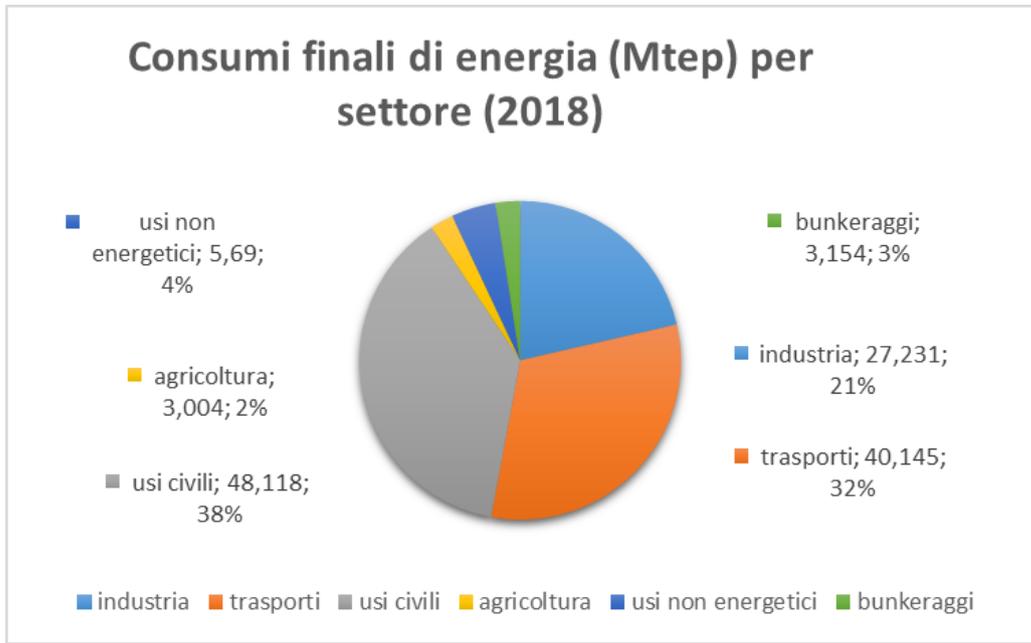
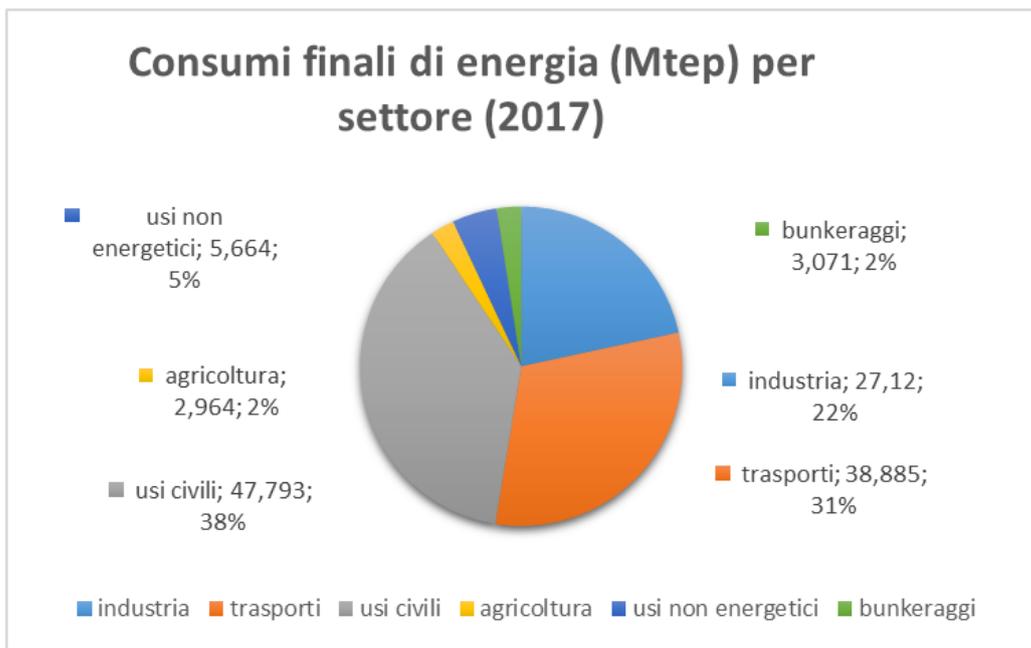


Figura 3- Confronto consumi di energia per usi finali in Italia per gli anni 2017 e 2018 [7]

Dai grafici sovrastanti è evidente come il contributo dei soli termini trasporti ed usi civili sia pari, nel complesso, a più di 2/3 del fabbisogno totale. Il peso assolutamente preponderante di questi due contributi, che trovano la loro maggiore partecipazione proprio negli agglomerati urbani, rende evidente le motivazioni dietro la scelta di dedicare un intero obiettivo dei SDGs alle città.

In particolare, il peso dei soli usi civili per l'Italia sia pari circa al 38%, valore in linea con quello europeo. In Europa, difatti, i soli edifici sono responsabili del consumo di circa il 40% della domanda di energia primaria, quota di contributo decisamente importante. [3] [5]

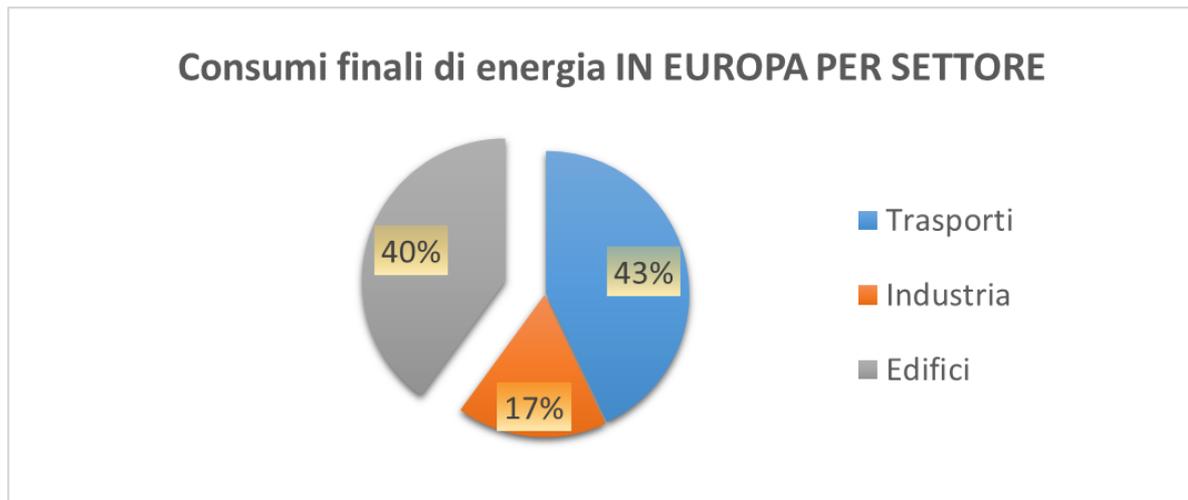


Figura 4- Consumo di energia primaria europea per uso finale [5]

La quota di usi civili, oltre a rappresentare una voce di consumo assolutamente rilevante nel bilancio totale, lo è anche e soprattutto nel bilancio urbano. Dunque, nell'ottica di raggiungere l'obiettivo numero 11 e diminuire dunque il fabbisogno energetico delle città, questa assume ruolo di indiscussa priorità.

Inoltre, occorre considerare che risulta molto più semplice agire nel breve periodo sugli edifici piuttosto che nel settore dei trasporti. Nel settore dei trasporti rientrano difatti tutti i mezzi sia pubblici che privati, la cui gestione ed ottimizzazione risulta soggetta a numerose variabili come incentivi ed agevolazioni alle aziende produttrici e ai privati che necessitano di vari anni per essere formulati, approvati ed elargiti.

All'interno della voce *Edifici Residenziali*, figurano tutti i vari contributi che la costituiscono i quali impattano in modo sensibilmente diverso sul bilancio energetico totale. Difatti, secondo il report del 2018 dell'Eurostat riguardo gli usi finali di energia negli edifici residenziali dei diversi paesi europei, in Italia più del 65% del totale dell'energia è finalizzata al solo riscaldamento degli alloggi, mentre per il raffrescamento la stima è attorno al 10%.

Seppur sia specificato che i dati sono acquisiti e forniti dai singoli stati secondo modalità e criteri diversi, di conseguenza è sconsigliato un paragone degli stessi basato sulla sola comparazione dei valori elencati, per il nostro scopo puramente qualitativo volto ad un'introduzione della questione energetica queste informazioni sono più che idonee. Di seguito si riportano in forma tabellare e grafici tutti i dati del report, in cui figurano anche le altre quote del bilancio totale.

	Space heating	Space cooling	Water heating	Cooking	Lighting and appliances	Other end uses
EU - 27	63.6	0.4	14.8	6.1	14.1	1.0
EU - 28	63.6	0.3	15.0	5.7	14.6	0.9
Belgium	73.5	0.1	11.9	1.7	12.5	0.4
Bulgaria	52.8	0.4	18.0	8.5	20.2	0.0
Czechia	68.5	0.1	17.0	6.2	6.6	1.6
Denmark	62.5	0.0	21.3	1.6	14.0	0.6
Germany	66.0	0.2	16.9	6.5	9.4	0.9
Estonia	72.7	0.0	11.8	4.9	10.6	0.0
Ireland	60.5	0.0	19.1	2.3	17.2	0.9
Greece	54.5	3.6	15.2	6.2	20.5	0.0
Spain	43.1	1.0	17.0	7.4	31.4	0.0
France	64.9	0.2	11.3	5.5	18.0	0.0
Croatia	68.3	1.9	10.0	6.5	13.2	0.0
Italy	66.6	0.7	12.4	6.6	12.5	1.4
Cyprus	35.4	11.4	23.9	7.3	21.8	0.1
Latvia	66.0	0.0	18.5	7.1	7.9	0.6
Lithuania	70.3	0.0	8.9	6.4	14.4	0.0
Luxembourg	78.7	0.3	7.6	2.6	10.9	0.0
Hungary	71.7	0.1	12.8	4.9	10.4	0.0
Malta	20.4	12.3	25.4	14.4	25.7	1.9
Netherlands	63.4	0.2	16.7	2.1	17.5	0.1
Austria	69.0	0.0	14.8	2.7	10.3	3.1
Poland	65.3	0.0	16.4	8.3	10.0	0.0
Portugal	28.2	0.6	17.4	35.6	18.1	0.0
Romania	62.9	0.3	13.5	9.8	13.4	0.0
Slovenia	61.2	0.5	16.8	4.3	17.2	0.0
Slovakia	67.1	0.2	14.0	5.7	13.1	0.0
Finland	66.9	0.1	15.1	1.0	11.5	5.5
Sweden	54.8	0.0	14.1	1.5	19.2	10.3
United Kingdom	63.5	0.0	16.4	2.8	17.3	0.0
Norway	66.4	0.1	12.9	1.5	18.2	0.8
North Macedonia	60.4	2.1	12.5	9.8	15.2	0.0
Albania	31.4	5.7	21.3	29.5	12.1	0.0
Serbia	61.1	0.5	14.0	7.2	17.2	0.0
Bosnia and Herzegovina	73.1	0.6	9.6	5.0	11.8	0.0
Kosovo*	70.3	3.6	6.7	7.4	9.7	2.3
Moldova	70.5	0.1	9.9	11.7	7.8	0.0
Ukraine	54.8	0.4	13.3	17.5	14.0	0.0

Figura 5- Consumo finale di energia negli edifici residenziali europei per paese e per uso finale [8]

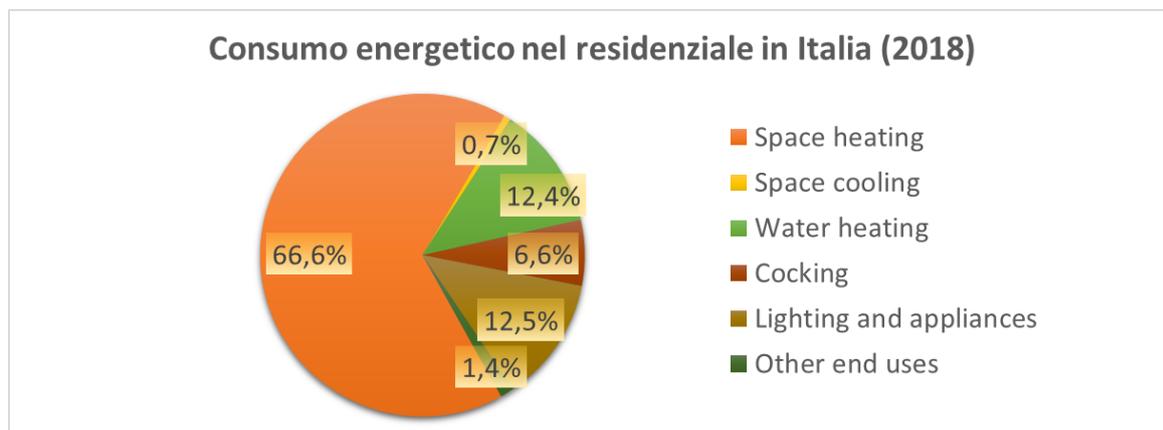


Figura 6-Consumo finale di energia nel residenziale in Italia [8]

Obiettivo dell'analisi è garantire una migliore gestione delle risorse di energia per quanto riguarda gli usi civili per la climatizzazione, senza però prescindere dal benessere e dal comfort termoigrometrico necessario alla salute psicofisica degli occupanti.

In questo studio, attraverso la caratterizzazione e il confronto tra diverse soluzioni proposte di terminali dell'impianto HVAC, si cercherà di giungere alla definizione della soluzione più idonea nel caso particolare di edifici multifamiliari situati nel nord d' Italia, generalizzando i ragionamenti avanzati su un edificio usato come caso studio sito nel comune di Milano.

Oltre alla valutazione del costo energetico per la climatizzazione associato a ciascuna diversa tipologia di terminale, caratterizzata da diverse strategie di scambio di calore con l'ambiente, si guarderà anche e soprattutto all'aspetto del comfort degli occupanti sotto diversi punti di vista.

● Overview

Nello specifico, lo studio si compone di 7 Capitoli:

- *Capitolo 1: Il concetto di comfort e la situazione negli edifici multifamiliari del nord d'Italia*

In questo primo capitolo, che riprende e continua il discorso cominciato nell'introduzione, viene esposta la teoria del comfort ed evidenziata la sua importanza durante le fasi di progettazione degli edifici.

Come ultimo paragrafo troviamo invece una panoramica sulle modalità con cui si progettano gli edifici residenziali nel nord d'Italia, da dieci anni a questa parte, con particolare riferimento alle modalità di generazione di calore, eventuale presenza e configurazioni diverse per la VMC, tipologie di terminali di climatizzazione considerati. I dati sono stati gentilmente condivisi da A.I. Engineering, che ha messo a disposizione i suoi archivi in modo da permettere questa importante analisi statistica, punto di partenza per le riflessioni dello studio.

- *Capitolo 2: Descrizione del Caso Studio e degli Strumenti del Software IES VE*

Questo secondo capitolo si addentra nel dettaglio dell'Edificio A, caso studio su cui sono stati avanzati tutti i ragionamenti e le modellazioni successive. Descrivendo e motivandone la scelta, si introducono inoltre i tre alloggi tipo che lo caratterizzano: 12.A1, 4.A2, 9.A3.

Continuando con il ragionamento, si passa alla trasposizione del caso studio nell'ambiente virtuale del software IES VE, descrivendo dettagliatamente tutti gli strumenti di modellazione e analisi che sono stati utilizzati. Nello specifico, particolare attenzione viene posta sullo strumento di modellazione CFD MicroFlo, in quanto in questa sezione l'approccio al problema varia sensibilmente tra stagione invernale ed estiva.

- Capitolo 3: Descrizione e modellazione di terminali in IESVE

In questo caso, il titolo è assolutamente esaustivo e permette a colpo d'occhio di capire l'argomento del capitolo. I terminali discussi sono: pannelli radianti e ventilconvettori installati a pavimento e soffitto, radiatori, terminali ibridi.

Assieme alla caratterizzazione dei terminali, vi è anche una considerevole sezione riguardante il limite di MicroFlo di non poter modellare lo scambio termico radiativo e i conseguenti accorgimenti che sono stati avanzati per far fronte a questa situazione.

- Capitolo 4: Comparazione risultati dell'analisi CFD– Profili di temperatura

A valle delle simulazioni di tutti i terminali e di tutte le loro tipologie di posa sia in inverno che in estate, vengono analizzati i risultati in termini di profili di temperatura che si sviluppano in ambiente in situazioni di regime. Alla raffigurazione 3D dell'alloggio o dei singoli ambienti sarà sovrapposto il campo di temperatura identificato da una scala cromatica ben definita.

- Capitolo 5: Comparazione risultati dell'analisi CFD– Campi di velocità dell'aria

Stesso procedimento utilizzato per il capitolo 4 viene riproposto nel capitolo 5, in cui il campo di velocità è mostrato sotto forma di linee iso-velocità sovrapposte al campo vettoriale. Anche in questo caso è utilizzata la scala cromatica, strumento indispensabile per processare visivamente molte informazioni in poco tempo.

- Capitolo 6: Comparazione risultati dell'analisi CFD– Parametri di comfort

Questo capitolo si differenzia rispetto ai due precedenti per le modalità in cui la comparazione degli effetti che i terminali hanno sull'ambiente viene effettuata: se nei Capitolo 4 e 5 l'analisi avveniva ambiente per ambiente, nel Capitolo 6 si analizzano gli interi alloggi nel loro complesso, per valutare l'effettivo stato di comfort che si instaura complessivamente.

Essendo i terminali dimensionati e caratterizzati dall'aver caratteristiche tali da garantire un adeguato stato termico e velocità dell'aria immessa in ambiente non troppo elevate, nessuno di questi scenari produrrà risultati estremi e pessimi. Ci si soffermerà soprattutto sul valore di PMV e PPD.

- Capitolo 7: Valutazioni finali e conclusioni

In questo Capitolo conclusivo, per entrambe le casistiche estive ed invernali, si mettono insieme tutte le informazioni acquisite e si traggono le valutazioni finali e le conclusioni, accompagnando agli aspetti analizzati nei capitoli precedenti valutazioni della potenza complessiva necessaria associata ad ogni terminale.

Capitolo 1: Il concetto di comfort e la situazione negli edifici multifamiliari del nord d'Italia

1.1. Teoria del comfort

Creare un ambiente confortevole è uno degli obiettivi più importanti e al contempo complessi da raggiungere nella progettazione degli edifici.

L'importanza dello studio deriva dall'evidenza secondo cui un ambiente pienamente confortevole è per definizione salubre e contribuisce non solo al benessere dei cinque sensi, ma anche alla salute generale degli individui scongiurando il presentarsi di malattie correlate ad un microclima ostile.

Le malattie che possono incorrere sono suddivise in due gruppi: al primo appartiene la cosiddetta sindrome dell'edificio malsano (Sick Building Syndrome), caratterizzata da una sintomatologia di modesta entità (mal di testa, sonnolenza, irritabilità...) che si risolve o si attenua rapidamente con l'allontanamento dal luogo di lavoro; al secondo appartengono invece malattie con un quadro clinico ben definito che non si risolvono rapidamente (allergie, asma, bronchiti, turbe psichiche...).

Numerosi studi hanno inoltre correlato un ambiente confortevole ad una migliore concentrazione e produttività lavorativa, minori livelli di stress, migliore qualità del sonno e della vita con un generale senso di soddisfazione. [13][14][15]

La complessità legata al raggiungimento di un ambiente pienamente confortevole è invece legata alla diversità e alla vastità di elementi oggettivi e non che lo influenzano, e contemporaneamente alla mancanza di una definizione precisa di comfort.

Nella norma UNI-EN-ISO 7730 il comfort termico viene definito come "Quella condizione mentale di soddisfazione nei riguardi dell'ambiente termico". Questo è determinato da diversi parametri fisici tra cui temperatura e velocità dell'aria, grado di isolamento dell'abbigliamento utilizzato, e da parametri soggettivi quali la tolleranza a sbalzi termici e correnti d'aria, metabolismo etc.

Fanger fu uno dei primi studiosi a cimentarsi sul tema, effettuando numerosi esperimenti con soggetti di sesso ed età diversa in camere termostatiche, scoprendo che il comfort termoigrometrico è legato ad una correlazione tra sensazione termica (soggettiva) ed attività svolta (oggettiva).

In una valutazione più completa ed ampia di comfort fisico e psichico nell'ambiente considerato si devono considerare in aggiunta altri parametri, tra cui la qualità dell'aria, il sistema d'illuminazione, la condizione di rumore presente, la funzionalità dell'ambiente etc.

Secondo queste definizioni, il comfort risulta una condizione del tutto soggettiva, impossibile da misurare. Volendo però giungere ad una definizione del comfort che ne sostenga l'oggettività, è necessario affrontare il problema da un punto di vista fisico.

Vista la difficoltà di un tale approccio olistico, durante la trattazione verrà affrontato il tema del comfort solo dal punto di vista termoigrometrico. L'esperienza mostra che, in condizioni stazionarie, la sensazione di benessere dipende da sei grandezze, di cui le prima quattro sono di carattere ambientali e le ultime due soggettive:

- Temperatura dell'aria
- Temperatura media radiante delle superfici che delimitano l'ambiente
- Umidità relativa dell'aria
- Velocità dell'aria
- Attività fisica svolta
- Grado di isolamento termico dell'abbigliamento indossato

Nella voce relativa all'attività fisica svolta rientra il contributo del metabolismo, parametro soggettivo che indica l'insieme dei processi che, all'interno del corpo umano, trasformano l'energia chimica potenziale introdotta con gli alimenti, o eventualmente accumulata in riserve corporee, in lavoro muscolare e calore.

I processi metabolici sono complessivamente esotermici, ed il flusso di energia generato in tal modo all'interno del corpo viene chiamato potenza prodotta per metabolismo, o potenza metabolica.

La potenza metabolica (M) risulta pari alla quantità di energia chimica trasformata in energia termica o meccanica dal corpo per unità di tempo. È frequentemente espressa in Met ($1 \text{ Met} = 58.15 \text{ W/m}^2$), in cui 1 Met corrisponde al calore prodotto nell'unità di tempo e di superficie da una persona seduta e a riposo. Questa dipende unicamente dal tipo di attività svolta. La norma UNI EN ISO 7730 ne fornisce i valori per i diversi tipi di attività.

È opportuno precisare che le condizioni di comfort termoigrometrico possono essere ottenute con molteplici combinazioni di queste grandezze, motivo per cui non esiste una sola configurazione corretta nello studio del comfort in un ambiente.

1.1.1. Comfort termoigrometrico e neutralità termica

Se al livello soggettivo lo stato di comfort termoigrometrico è individuabile in uno stato psicofisico di soddisfazione per l'ambiente in cui si è immersi, al livello oggettivo si parla invece di neutralità termica.

La neutralità termica è caratterizzata dall'assenza di accumulo termico nel corpo umano e da una conseguente inattività dei meccanismi di termoregolazione corporea. Questa è attuata dall'ipotalamo che, servendosi delle informazioni registrate dai termorecettori, è in grado di indurre stimoli corporei in grado di garantire l'omeotermia della parte più interna del corpo intorno ai 37°C. Vi sono due principali categorie di strategie compensatrici corporee attuate dall'ipotalamo per evitare oscillazioni della temperatura:

- I. *Comportamentale*, in cui rientrano brividi e sudorazione;
- II. *Vasomotoria*, in cui rientrano i meccanismi di vasocostrizione e vasodilatazione periferica.

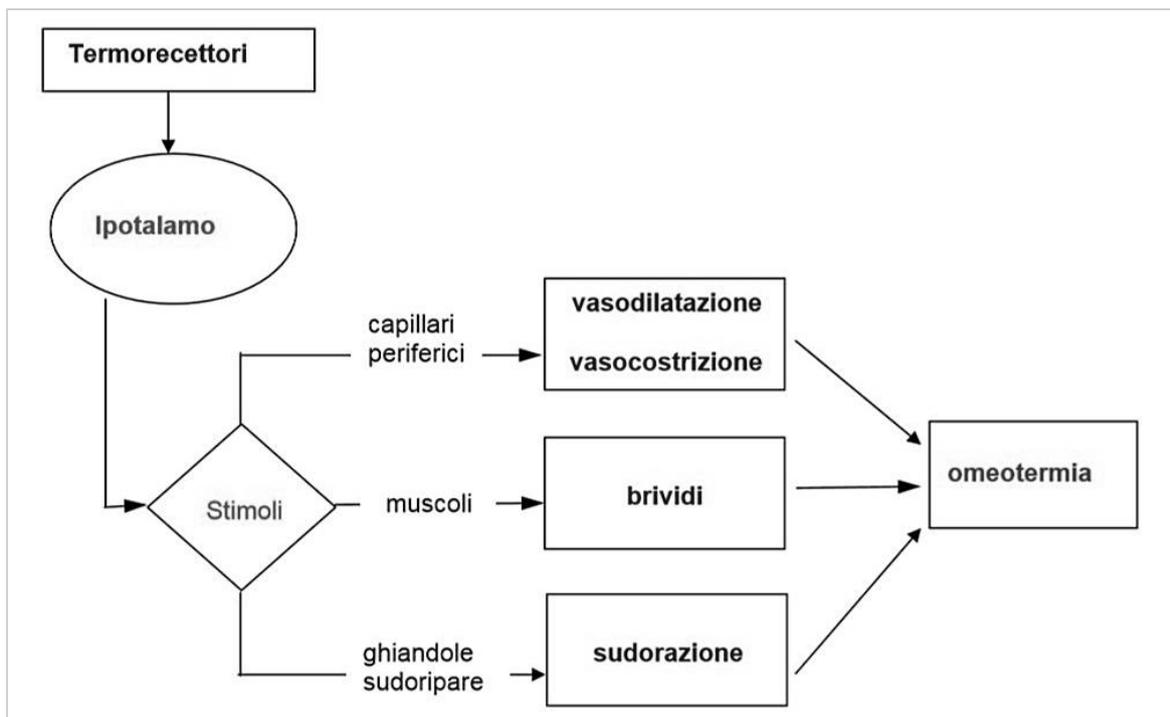


Figura 7- Schema a blocchi raffigurante le modalità e le strategie di termoregolazione umana che, in risposta a stimoli esterni, agisce per garantire l'omeotermia

L'approccio fisico allo studio del comfort termoigrometrico si basa sull'assimilazione del corpo umano ad un sistema aperto, che scambia cioè massa ed energia con l'ambiente circostante. Gli scambi energetici che avvengono sono suddivisi in contributi:

- *Sensibili*, in cui rientrano tutti gli scambi di calore per conduzione e convezione generati da una differenza di temperatura;
- *Latenti*, in cui rientrano gli scambi di calore legati alle quantità di vapore che abbandona il corpo umano attraverso sudorazione, traspirazione e respirazione;
- *Dell'irraggiamento solare*, diretto o riflesso dall'atmosfera o da superfici verticali ed orizzontali;

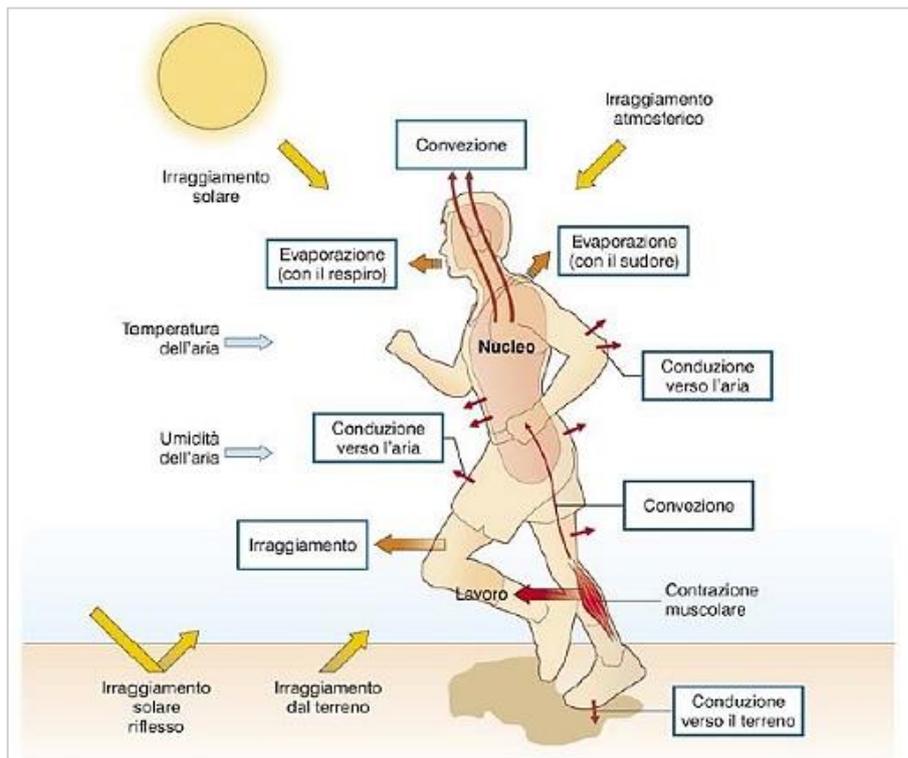


Figura 8- Bilancio energetico corpo umano, Edi.Ermes srl Milano

In condizione di neutralità, dunque di comfort, si ha un equilibrio tra energia entrante ed uscente dal sistema ed assenza di accumulo all'interno del corpo. L'equazione fisica di bilancio che descrive questo stato è analizzata nel dettaglio nel capitolo che segue.

1.1.2. Bilancio energetico corpo umano

Il corpo umano può essere distinto in due zone termiche principali, le cui temperature caratteristiche sono dettate dall'azione del sistema di termoregolazione umana, quali:

- *esterna*, comprensiva di pelle e tessuti sottocutanei, alla temperatura T_{sk} che risulta fortemente influenzata dalle oscillazioni termiche esterne;
- *interna*, che comprende gli organi vitali, caratterizzata dalla temperatura maggiormente stabile che si aggira generalmente intorno a $T_{core} = 37^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$;

In ambienti caldi, per evitare l'innalzamento della temperatura interna, si possono verificare sia la vasodilatazione dei vasi sanguigni, che aumentando l'afflusso di sangue verso la periferia del corpo permette una migliore dissipazione di calore verso l'esterno, sia la sudorazione. Quest'ultima basa la sua efficacia sulla grande quantità di energia (2400 kJ) rilasciata per kg di acqua evaporata dalla pelle. Dunque, un parametro importante nello studio del comfort è l'umidità relativa dell'aria.

Viceversa, in ambienti freddi, per evitare l'abbassamento della temperatura corporea, si possono verificare sia i brividi, che producono lavoro muscolare e dunque energia, sia vasocostrizione periferica dei vasi sanguigni, che riduce lo scambio termico con l'esterno.

Il controllo del calore è governato dalle leggi fisiche di conduzione, convezione, irraggiamento ed evaporazione. In termini di potenza, è possibile scrivere il primo principio della termodinamica per sistemi aperti come:

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = S = M - W - \sum \dot{Q} - \sum \dot{m}_s h_s [W]$$

In cui:

- S è la variazione di potenza interna totale del sistema; in condizioni di comfort, essendo nello stato di neutralità termica e non essendoci dunque accumulo corporeo, è assunta nulla;
- M e W sono le due potenze presenti nel sistema, rispettivamente pari alla metabolica e a quella scambiata con l'esterno;

La differenza $M-W$ è pari alla quota del carico metabolico che non si trasforma in lavoro e che deve essere scambiata sotto forma di energia termica o che, in alternativa, contribuirà all'aumento dell'energia interna del sistema (S). Poiché il rendimento meccanico del corpo umano è molto basso, si tende a trascurare la quota di W .

- $\sum \dot{Q}$ è l'insieme delle potenze termiche scambiate con l'esterno; questa quota risulta somma delle potenze sensibili e latenti scambiate per conduzione e convezione;
- $\sum \dot{m}_s h_s$ è l'insieme delle potenze termiche scambiate con l'esterno per effetto di scambio di massa; in questa quota rientrano i contributi di respirazione, traspirazione e sudorazione;

Sviluppando l'equazione del primo principio, trascurando la potenza meccanica prodotta ($W = 0$), esplicitando i singoli termini delle potenze termiche presenti e imponendo la condizione di neutralità termica ($S = 0$) si ottiene:

$$M = \underbrace{C + R + C_K}_{POT. TERM. SECCA} + \underbrace{C_{VE} + E_{VE}}_{R_{RES}} + \underbrace{E_D + E_{SW}}_{E_{SK}} [W]$$

In cui:

- C, R, C_K sono le potenze termiche disperse rispettivamente per convezione, irraggiamento e conduzione; la loro somma è pari alla potenza termica "secca" scambiata;
- $R_{RES} = C_{VE} + E_{VE}$ potenza termica complessivamente dispersa con la respirazione, somma della quota sensibile (C_{VE}) e della quota latente (E_{VE});
- $E_{SK} = E_D + E_{SW}$ potenza termica latente complessivamente scambiata dalla pelle, somma della potenza dispersa attraverso la traspirazione (E_D) e la sudorazione (E_{SW});

Esplicitando i contributi, l'equazione di bilancio risulta funzione non solo delle grandezze fisiche introdotte nel capitolo 1.1, ma anche di grandezze governate dal sistema di termoregolazione fisiologico come temperatura della pelle (T_{SK}) e potenza termica dispersa per traspirazione (E_{SW}), a loro volta però dipendenti dall'attività svolta.

Nell'equazione finale, si evidenzia come la potenza metabolica (M) serva a mantenere attivi gli organi e costante la temperatura del corpo ($\frac{\partial U}{\partial \tau} = 0$), dissipando un po' di calore all'esterno.

1.1.3. PMV e PPD

La parziale soggettività delle sensazioni introduce elementi di imprevedibilità, per cui una valutazione sufficientemente accurata delle condizioni di benessere dovrà far riferimento ad indagini di tipo statistico. A tal proposito, lo studioso Fanger propose un indice razionale, basato cioè sulla soluzione dell'equazione di bilancio energetico del corpo umano, in grado di correlare la sensazione termica ad un voto relativo alla percezione dell'ambiente.

Questo indice di comfort è il Predicted Mean Vote, o PMV, caratterizzato dall'aver una scala di 7 valori compresi tra -3, corrispondente alla percezione di freddo intenso, e +3, corrispondente ad estremo caldo. Questo indice è basato sul bilancio termico del corpo. L'analisi statistica effettuata con l'uso del PMV permette di valutare lo stato di comfort a partire dallo scostamento dalle condizioni di perfetto comfort, individuate dal valore nullo dell'indice.

Un altro indice utilizzato è il Predicted Percentage of Dissatisfied, o PPD, il quale rappresenta la percentuale prevedibile di persone che non si troveranno in condizioni di comfort termoigrometrico in un dato ambiente.

I due indici sono legati dalla relazione che segue, in cui si nota una quota minima, pari al 5%, di malcontento all'interno il campione di persone analizzato anche se le condizioni di comfort sono perfettamente rispettate, ovvero nel caso di $PMV=0$.

$$PPD = 100 - 95 e^{(-0.03353 PMV^4 - 0.2179 PMV^2)}$$

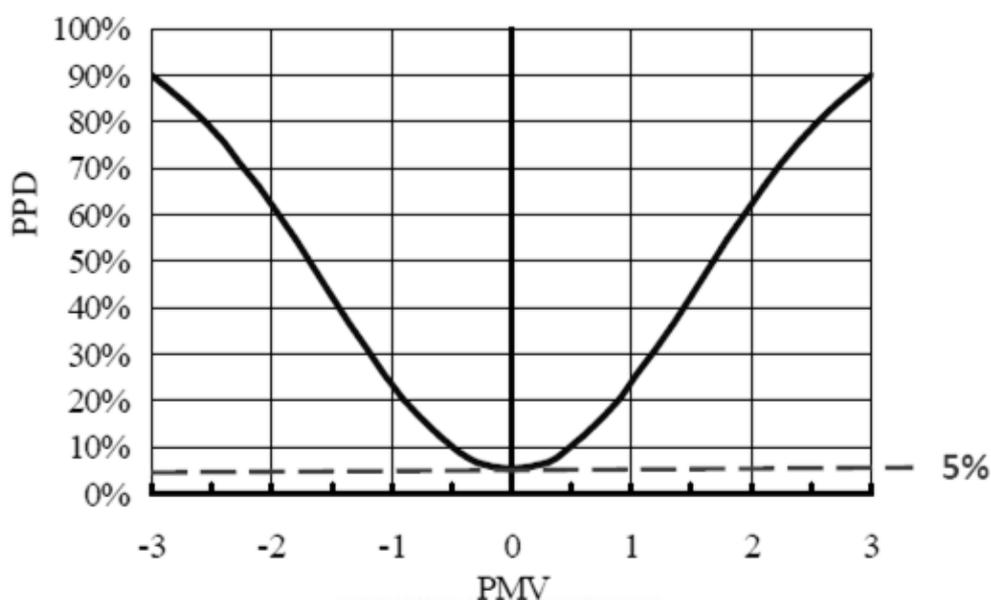


Figura 9- Relazione analitica e grafica tra PMV e PPD

Questi due indici rappresentano una valutazione globale dell'ambiente microclimatico. Tuttavia, si possono verificare delle situazioni di discomfort localizzato che interessano in porzioni specifiche del corpo, di cui si parlerà nel paragrafo successivo.

Gli ambienti termici vengono convenzionalmente distinti in tre tipologie, in ragione del benessere termico degli occupanti, ovvero dei valori di PMV e PPD registrati:

- Ambienti moderati, in cui si può avere comfort ($S = 0$) o discomfort ($S \geq 0$);
- Ambienti severi caldi, caratterizzati da stress termico in cui $S \gg 0$;
- Ambienti severi freddi, caratterizzati da stress termico in cui $S \ll 0$;

Essendo lo studio incentrato su edifici residenziali, si procederà con la trattazione degli ambienti moderati.

Gli intervalli di applicabilità delle variabili ambientali in cui è possibile attuare la definizione degli indici PMV e PPD per gli ambienti moderati, ovvero ambienti in cui si ha il valore di PMV compreso tra i -2.0 e +2.0, sono riassunti nella tabella seguente. Ad ogni grandezza fisica corrisponde la propria unità di misura, simbolo utilizzato nelle relazioni matematiche ed intervallo considerato.

Tabella 1- Intervallo di applicabilità degli indici PMV e PPD per gli ambienti moderati

<i>Grandezza fisica</i>	Simbolo ed Unità di Misura	Intervallo di Applicabilità
<i>Temperatura dell'aria</i>	t_a [°C]	10-30
<i>Temperatura media radiante</i>	t_r [°C]	10-40
<i>Velocità dell'aria</i>	v_a [m/s]	0-1
<i>Umidità relativa dell'aria</i>	RH [%]	30-70
<i>Attività metabolica</i>	M [met]	0.8-4
<i>Resistenza termica del vestiario</i>	I_{cl} [clo]	0-2

La variazione della velocità dell'aria risulta essere una quantità fortemente impattante sulla variazione del valore di PMV. Al contrario, l'umidità relativa incide relativamente poco sul risultato, difatti nel range 30-70% si ha una variazione della sensazione termica corrispondente a quella che si avrebbe variando la temperatura dell'aria di solamente 1°C circa.

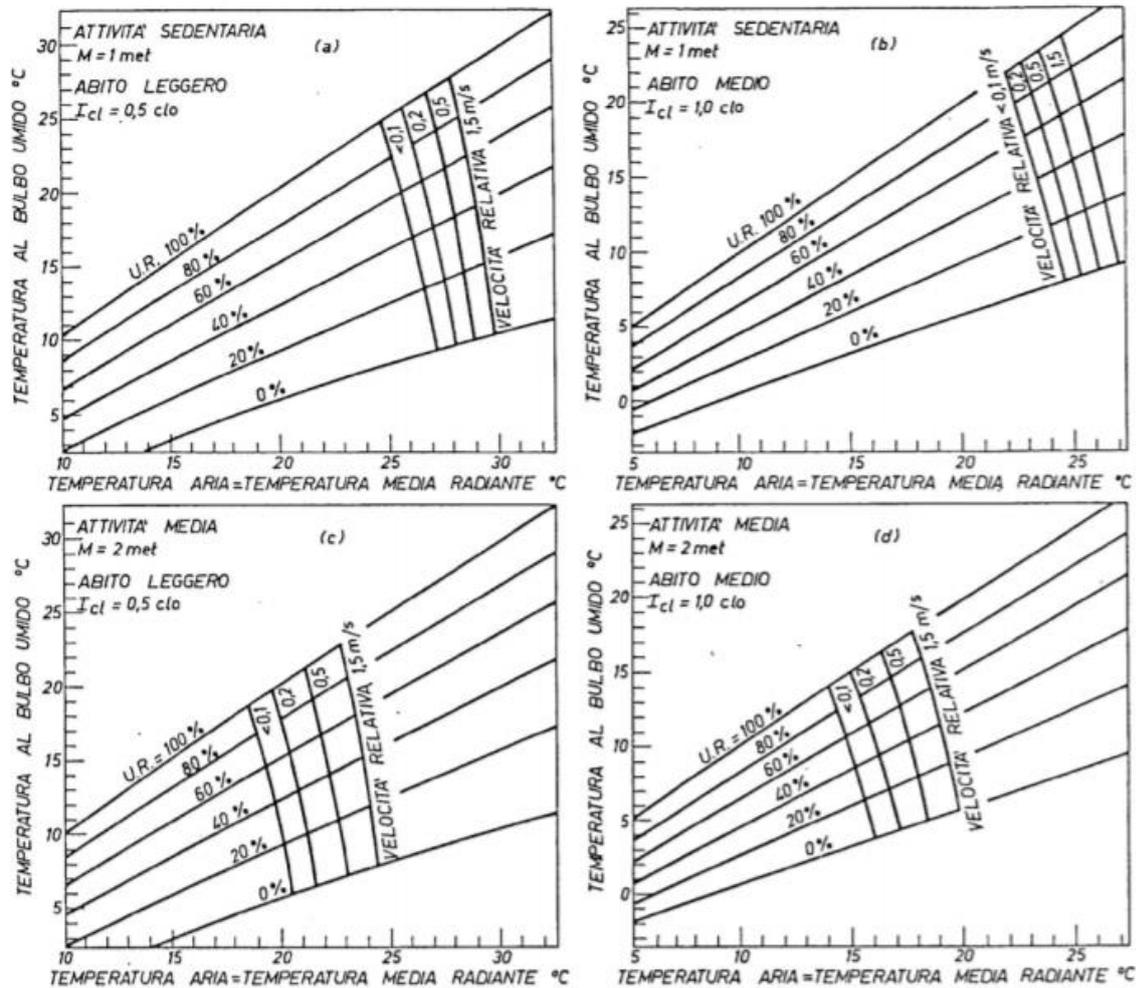


Figura 10- Diagramma di Fanger in cui sono evidenziate le linee di benessere al variare della velocità relativa dell'aria, relative ad un'umidità relativa che varia tra lo 0% al 100%

La soluzione algebrica dell'equazione di bilancio del paragrafo precedente si presenta laboriosa, per cui in genere si ricorre ad opportuni diagrammi mostrati di seguito dove, trascurando l'effetto dell'umidità dell'aria, sono riportate le linee di benessere, cioè linee che soddisfano la relazione di Fanger.

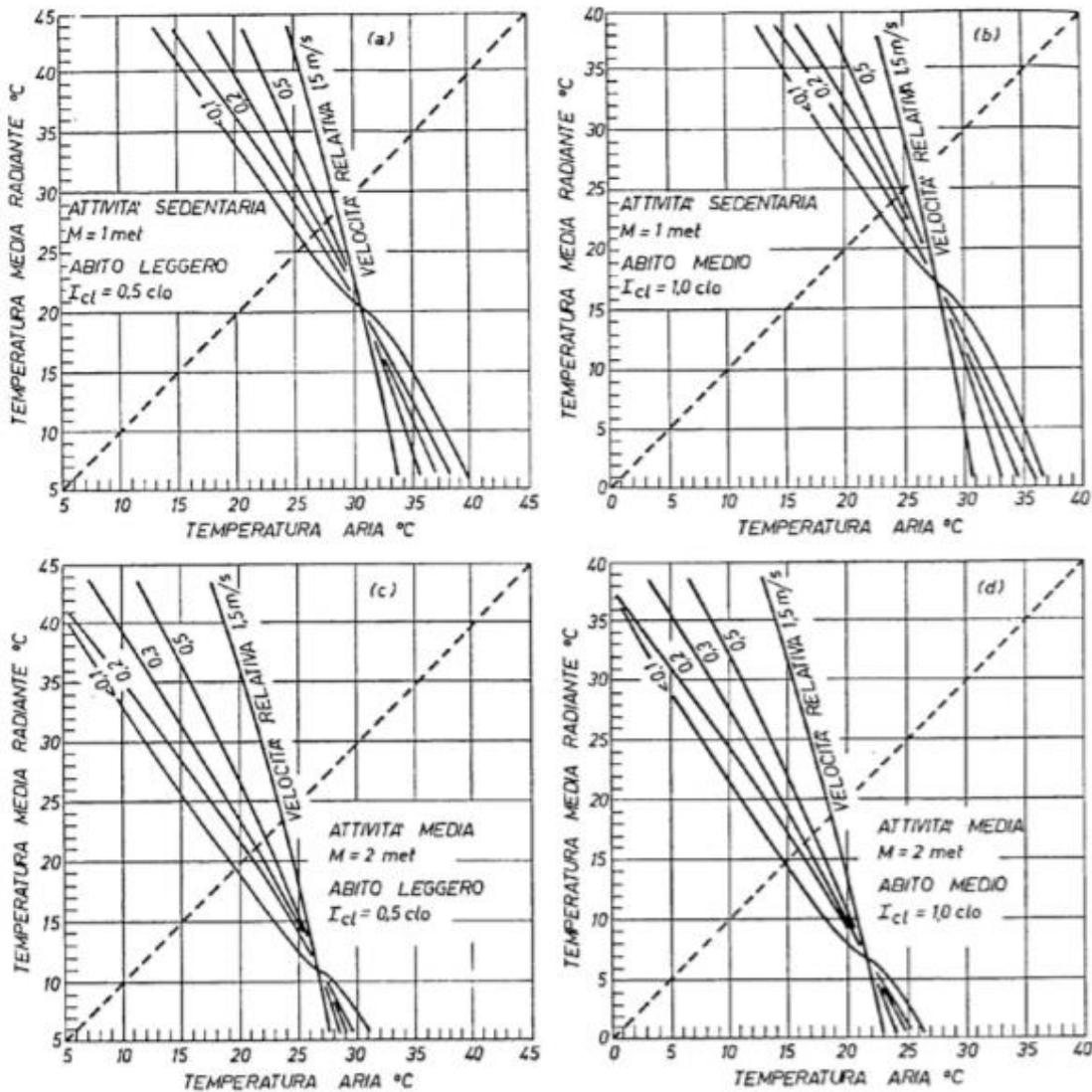


Figura 11- Diagramma di Fanger in cui sono evidenziate le linee di benessere al variare della velocità relativa dell'aria, relativamente ad un'umidità relativa del 50%

I diagrammi mettono in evidenza come la temperatura media radiante, nel caso di basse velocità dell'aria, assume quasi la stessa importanza della temperatura dell'aria ambiente. Pertanto, con riferimento alle condizioni invernali, tanto minore sarà la temperatura media delle pareti, tanto maggiore, a parità d'abbigliamento, dovrà essere la temperatura dell'aria.

L'equazione di bilancio, con le giuste condizioni al contorno, consente dunque di ottenere un singolo valore di variabile studiata a partire da cinque variabili note. Tuttavia, la sensazione di discomfort non si avverte in un preciso valore di temperatura bensì in un intervallo, detto intervallo individuale di comfort. Sperimentalmente, vi è un intervallo di temperatura di almeno 1°C in cui l'organismo si adatta alla situazione dell'ambiente e la sensazione di caldo e di freddo non vengono percepite.

Dal punto di vista progettuale, essendo inevitabile una quota di insoddisfatti, la normativa [16] impone generalmente un valore soglia di PPD pari al 10% sia per ambienti

moderati nei casi invernali che estivi, cioè un intervallo di PMV compreso tra -0.5 e +0.5, ipotesi adottata anche nell'appendice dello noto standard nazionale americano ANSI/ASHRAE 55 [11]. Con questa ipotesi progettuale, si hanno condizioni ambientali che soddisfano almeno l'80% degli occupanti e contemporaneamente si hanno a disposizione intervalli di lavoro delle grandezze fisiche controllate molto più ampi.

Più in particolare, la norma [16] prevede la suddivisione degli ambienti in tre tipologie ai quali vanno applicati differenti valori di PMV e PPD in funzione della loro diversa fruizione.

Tabella 2- Categorie di Comfort secondo la norma UNI-EN 7730

Categoria di Comfort	PPD [%]	PMV [-]
A	<6%	[-0.2;+0.2]
B	<10%	[-0.5;+0.5]
C	<15%	[-0.7;+0.7]

Una più snella rappresentazione grafica delle condizioni di comfort è possibile mediante la definizione della temperatura operativa. Questa è definita come la temperatura uniforme delle pareti e dell'aria di un ambiente fittizio, in cui il soggetto scambierebbe la stessa potenza termica secca, considerando dunque i soli contributi di convezione ed irraggiamento, che scambia effettivamente nel locale. Questa risulta funzione della temperatura media radiante delle pareti e della temperatura dell'aria.

Nel diagramma che segue, caratteristico della tipologia B di ambiente, è possibile valutare la temperatura operativa di comfort ed il relativo intervallo di tolleranza mediante una procedura semplificata.

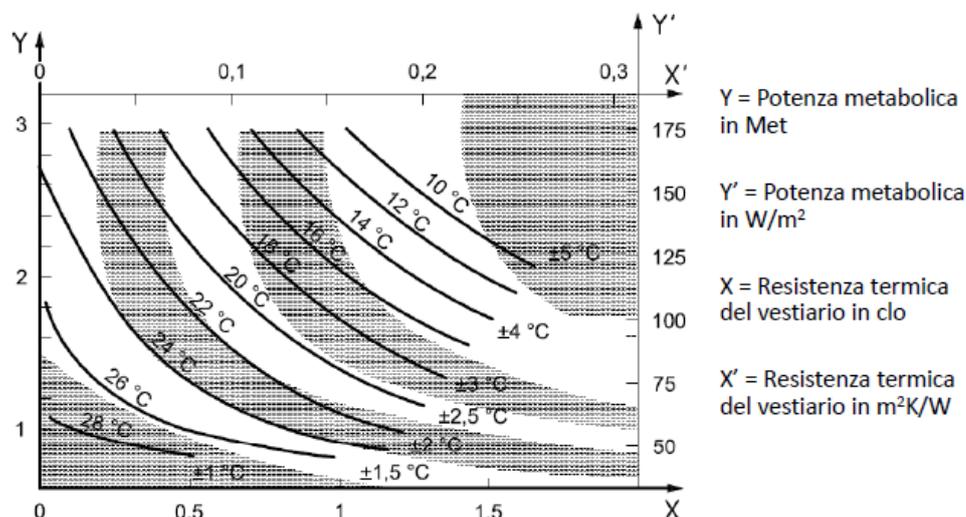


Figura 12- Diagramma semplificato per la valutazione della temperatura operativa, e la relativa tolleranza, richieste in un ambiente di categoria B al fine di avere condizioni di comfort termico

1.1.4. Discomfort localizzato

Gli indici PMV e PPD valutano le condizioni di benessere globale di un campione di persone nei confronti dell'ambiente, motivo per cui può accadere che in condizioni di neutralità termica, ovvero in assenza di discomfort globale ($PMV=0$), si abbia sensazione di discomfort locale. Il comfort termoigrometrico espresso dai limiti del PMV non è dunque sufficiente ad accertare il benessere completo in un ambiente confinato. Occorre tenere presente altri fattori, tra cui:

- Gradienti verticali di temperatura;
- Presenza di pavimenti eccessivamente caldi o freddi;
- Presenza di asimmetria radiante;
- Correnti d'aria, in grado di provocare un ripido gradiente temporale di temperatura della pelle;

Tra gli indici in grado di quantificare il discomfort locale troviamo ad esempio il DR, acronimo inglese per il *Draft Risk*, esprime la percentuale di insoddisfatti a causa di correnti d'aria. Questo è calcolato con una relazione che prevede la misura e l'elaborazione della temperatura media e della velocità dell'aria nell'ambiente considerato.

Figurano anche il PDa, che quantifica la percentuale di insoddisfatti in funzione della differenza tra la temperatura dell'aria al livello della testa e quella al livello delle caviglie per una persona seduta (gradiente verticale temperatura dell'aria), il PDp, percentuale di insoddisfatti in funzione della temperatura del pavimento, e il PDr percentuale di insoddisfatti in funzione delle differenze tra le temperature radianti piane delle diverse superfici dell'ambiente.

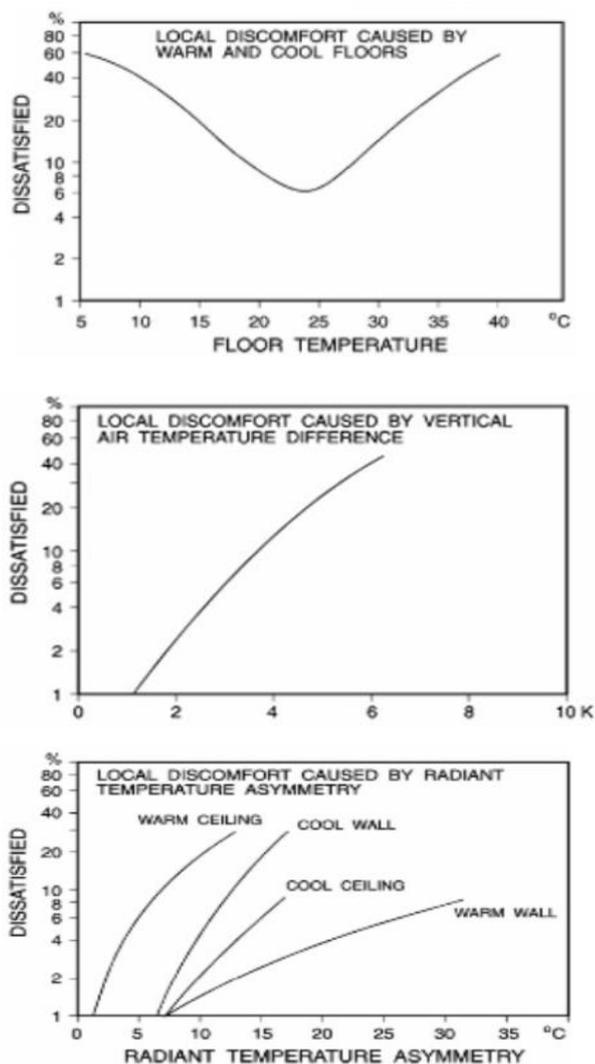


Figura 13- Indici di discomfort localizzato, dall'alto verso il basso: PDp, PDa, PDr

Questi indici di discomfort locale devono rientrare in determinati intervalli di valori a seconda della categoria di ambiente che si sta analizzando. Di seguito è riportata la tabella A.1 della normativa UNI EN ISO 7730.

Category	Thermal state of the body as a whole		Local discomfort			
	PPD %	PMV	DR %	PD % caused by		
				vertical air temperature difference	warm or cool floor	radiant asymmetry
A	< 6	- 0,2 < PMV < + 0,2	< 10	< 3	< 10	< 5
B	< 10	- 0,5 < PMV < + 0,5	< 20	< 5	< 10	< 5
C	< 15	- 0,7 < PMV < + 0,7	< 30	< 10	< 15	< 10

Figura 14- Limiti di accettabilità per il comfort termico-igrometrico (UNI EN ISO 7730 tabella A.1)

1.2. Indagine statistica sulla situazione degli edifici multifamiliari nel nord d'Italia

Grazie alle risorse a cui ho avuto accesso grazie alla collaborazione con lo studio di ingegneria A.I. Studio di Torino, si è svolta un'analisi statistica nei confronti degli edifici multifamiliari di nuova costruzione che sorgono nel nord d'Italia negli ultimi dieci anni (2009-2019). Si sono analizzati le tipologie di terminali di riscaldamento e raffrescamento gli alloggi, l'eventuale presenza e la struttura della ventilazione meccanica controllata, la centrale di generazione termica, in 20 interventi edilizi diversi, la grandissima maggioranza sita nel Comune di Milano

Volendo analizzare la caratterizzazione impiantistica delle centrali termiche dei casi studio, le quali si occupano non solo di provvedere al carico termico richiesto dall'impianto di climatizzazione ma anche di quello necessario per la produzione di acqua calda sanitaria (ACS), si procede innanzitutto con il suddividere le diverse tipologie di generazione di energia.

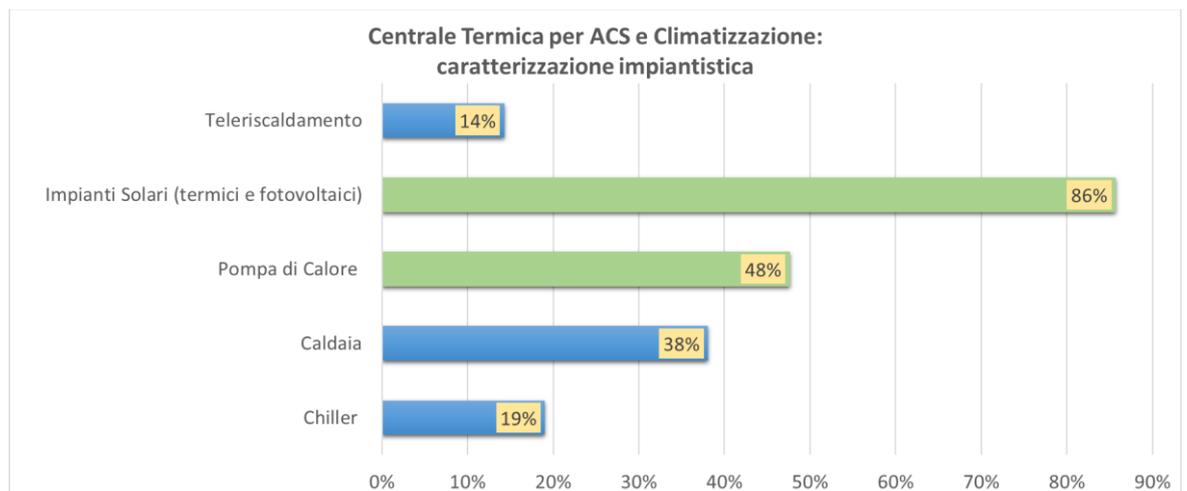


Figura 15- Indagine statistica: caratterizzazione della centrale termica per ACS e impianto di climatizzazione

Il primo dato che si apprende osservando il grafico sovrastante è quello che volutamente è stato messo in evidenza dalla diversa colorazione (verde) della barra dei valori percentuali. Il larghissimo impiego di queste tecnologie è dovuto anche e soprattutto al Decreto Legislativo 28 del 03/03/2011 che impone l'obbligo di utilizzo delle fonti rinnovabili negli edifici di nuova costruzione. La definizione dettagliata di tutte le fonti di energia rinnovabile, in ambito europeo, avviene attraverso la Direttiva 2009/28/CE, recepita in Italia proprio dal D.Lgs. 28/2011; queste risultano essere dunque sole, vento, risorse idriche e geotermiche, maree, moto delle onde, biomasse.

Secondo l'art. 11 difatti, è obbligatorio dotare gli edifici di impianti alimentati da fonti rinnovabili per la copertura dei consumi di calore, elettricità e raffrescamento nel caso di

edificio di nuova costruzione, con una quota percentuale che varia a seconda dell'anno di presentazione del titolo abitativo. È importante specificare che questi obblighi non sussistono più qualora l'edificio sia allacciato ad una rete di teleriscaldamento in grado di sopperire all'intero fabbisogno di calore per il riscaldamento e la fornitura di acqua calda sanitaria.

In quest'ottica risulta dunque più chiaro comprendere come mai le tecnologie di teleriscaldamento, pompa di calore ed impianti solari hanno ottenuto questa popolarità così predominante nell'analisi dei casi studio, quasi tutti successivi al 2011.

Scendendo nel dettaglio della quota rinnovabile derivante da fonte solare, si osserva come non sia molto bilanciata la frequenza di installazione di fotovoltaico e solare termico negli edifici che vede una predominanza di fotovoltaico.

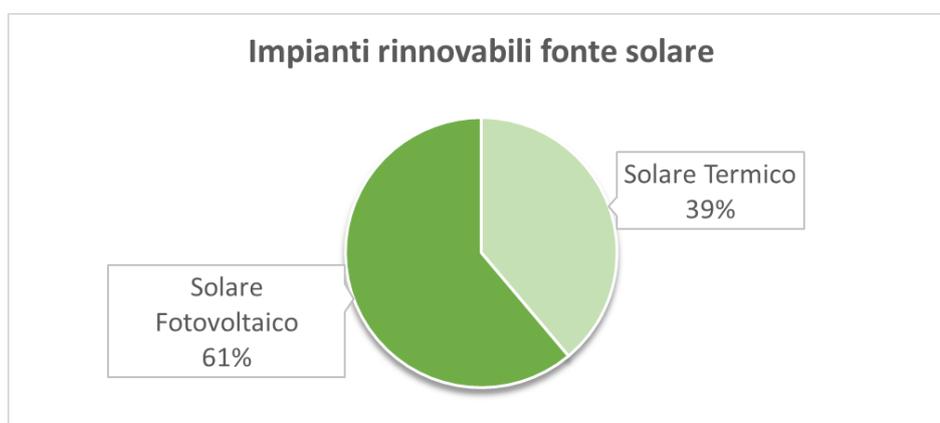


Figura 16- Indagine statistica: impianti rinnovabili a fonte solare

Le pompe di calore, tecnologie in grado di sfruttare l'energia presente in acqua, terreno e aria, sono anch'esse caratterizzate da una netta predominanza di una tipologia sulle altre. Difatti, il tipo acqua-acqua (WW) rappresenta più del 65% delle installazioni totali. Non sono presenti nel campione di studio invece le PdC geotermiche (TW), probabilmente a causa della localizzazione degli edifici nel panorama urbano fittamente sfruttato sia nella parte aerea che interrata.

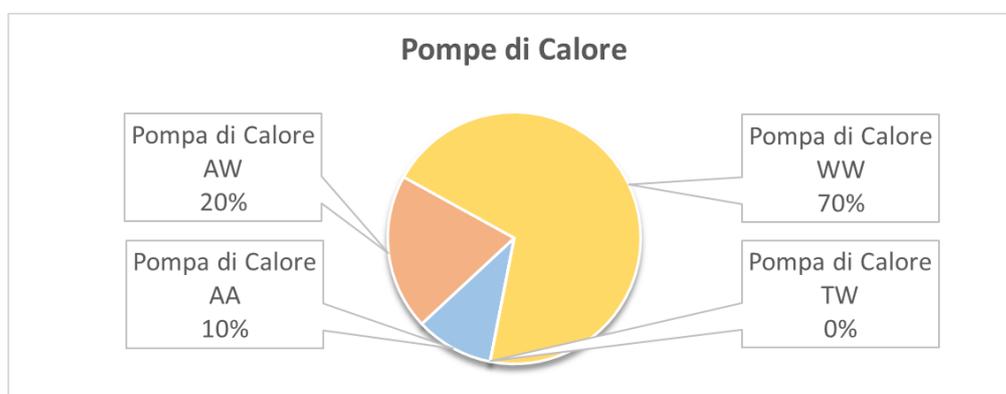


Figura 17- Indagine statistica: frequenza di installazione diverse tipologie di pompa di calore

Per quanto riguarda le caldaie invece, che risultano impiegate in meno 40% dei casi considerati, la totalità degli impieghi è caratterizzata dalla tipologia a condensazione, ma comunque sempre presente nei soli edifici progettati nei primissimi anni dell'intervallo temporale considerato. Nessuna recente progettazione o installazione la prevede, neppure accoppiata ad un altro sistema di generazione di calore di tipo rinnovabile.

I terminali di climatizzazione, macroarea di primario interesse, sono stati dapprima suddivisi nelle principali categorie che verranno modellate e studiate in questo studio.

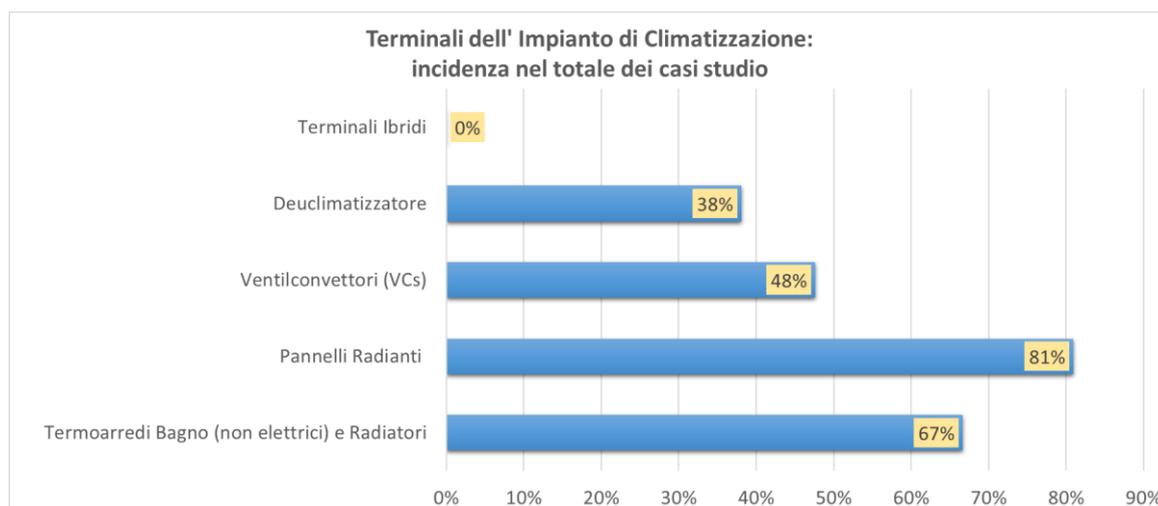


Figura 18- Indagine statistica: terminali dell'impianto di climatizzazione

Si nota subito come siano completamente assenti dalla scena impiantistica dei terminali di climatizzazione i terminali ibridi, caratterizzati da un sistema di riscaldamento/raffrescamento degli ambienti ad aria accoppiato ad una piastra radiante sulla parte anteriore. Nuova tecnologia ancora poco conosciuta, verrà trattata nello studio ed analizzata nei pro e nei contro relativi al benessere termoisometrico e all'efficienza energetica nella performance estiva ed invernale.

I ventilconvettori invece, presenti come unico terminale oppure accoppiati ad altre soluzioni per la parte di riscaldamento, sono largamente impiegati, difatti li ritroviamo nella metà dei casi studio analizzati. Di questi, la grande maggioranza si occupa anche del controllo isometrico dell'ambiente, grande qualità che solo questa tipologia di terminale possiede.

Sono largamente impiegati anche i deumidificatori, terminali agenti in collaborazione con la ventilazione meccanica in grado di deumidificare ed abbattere parte dei carichi termici estivi; risultano molto diffusi ogni qual volta sia presente la ventilazione meccanica controllata (VMC) e si rendono assolutamente necessari nel caso di compresenza con altri terminali che predispongono le condizioni per la creazione di condensa superficiale, come accade ad esempio con i pannelli radianti a pavimento per uso estivo.

Il largo impiego dei radiatori trova la sua fortuna soprattutto nei piccoli ambienti in cui è necessario apportare calore con contenuti volumi di ingombro. Nel campione di interventi analizzato difatti, la quasi totalità delle installazioni di radiatori è limitata ai servizi igienici, che a loro volta si spono perfettamente con questa tipologia impiantistica poiché hanno la sola necessità di riscaldamento invernale.

Rimangono da trattare i soli pannelli radianti. Questo tipo di terminale, estremamente versatile e discreto, domina senza dubbio la panoramica dei terminali per il riscaldamento invernale, mentre per il raffrescamento estivo, anche a causa della possibilità di condensa superficiale che può venire a crearsi nelle installazioni a pavimento o a parete, sono spesso messi da parte in favore dei ventilconvettori.

Seppur l'installazione a soffitto prevenga questo limite, e consenta altresì un'ottima resa estiva dell'impianto e minori accorgimenti per quel che riguarda l'arredamento dell'alloggio rispetto alle varianti a pavimento e parete, risulta essere meno diffusa.

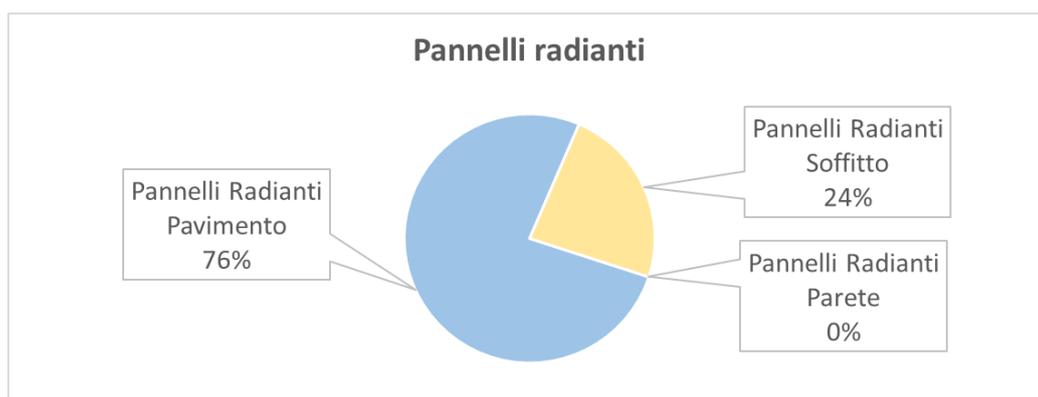


Figura 19- Indagine statistica: diversi tipi di installazione dei pannelli radianti

Ultimo oggetto dell'analisi dell'impianto HVAC del campione di interventi edilizi considerati è la ventilazione degli ambienti, che può essere suddivisa in meccanica controllata (VMC) o naturale. Come si può osservare dal grafico seguente, la strategia di ventilazione naturale è stata preferita in veramente pochi, e di quei pochi la totalità sono stati progettati nei primissimi anni dell'intervallo temporale considerato.

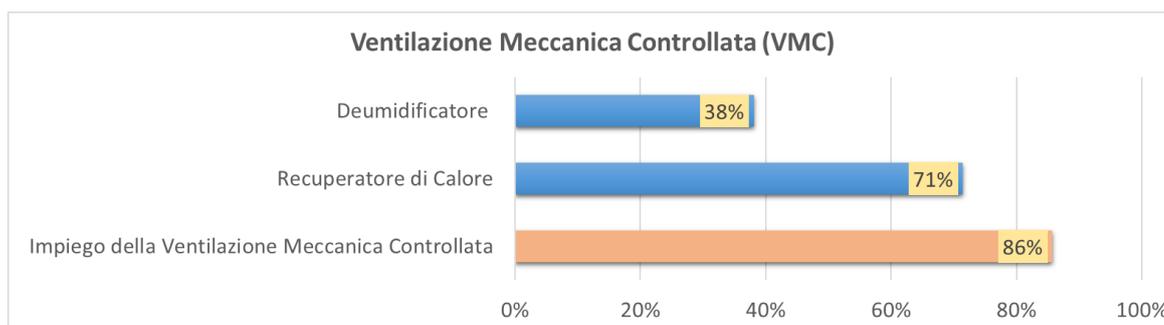


Figura 20- Indagine statistica: frequenza di utilizzo della ventilazione meccanica controllata e sue caratteristiche

Come detto in precedenza, in materia di contenimento dei consumi energetici in Italia i vari decreti legislativi che si sono susseguiti fino ad oggi hanno dettato i criteri per un'edilizia energeticamente consapevole caratterizzata da serramenti sempre più performanti associati a involucri energeticamente prestanti. Il rischio che si corre orientandosi verso interventi edilizi poco ragionati è tuttavia quello di arrivare ad ottenere unità abitative che 'non respirano'.

L'attenzione per la qualità dell'aria dell'ambiente esterno è ormai molto diffusa, mentre molto spesso viene largamente sottovalutata l'importanza della qualità dell'aria negli ambienti confinati. Una cattiva qualità dell'aria interna causata da un'assenza di corretto ricambio dell'aria è causa di malessere degli occupanti, riduzione della capacità di lavoro, ristagno di umidità e proliferazione di muffe (causa di asma, allergie respiratorie e riniti croniche) e presenza di composti organici volatili (VOC).

Di qui l'esigenza di utilizzare un sistema meccanico di ventilazione, preferibilmente dotato di recupero di calore sull'aria espulsa. Nei casi studio analizzati, la presenza del recuperatore di calore è molto forte, anche in ragione dei notevoli risparmi energetici in relazione al costo e alle elevate performance del prodotto.

Altra caratteristica non sempre presente ma necessaria in alcune soluzioni impiantistiche, come già accennato nel capitolo sui terminali dell'impianto di climatizzazione, è la presenza di deumidificatori al servizio della VMC, che oltre a garantire il controllo igrometrico ambientale alleggeriscono il carico che grava sul sistema di raffrescamento ambientale. Questo, come purtroppo si può osservare, presenta una diffusione molto minore rispetto al recuperatore di calore, pari solo al 38% dei casi.

Capitolo 2: Descrizione del Caso Studio e degli Strumenti del Software IES VE

2.1. Edificio A

Il complesso residenziale oggetto dello studio è un edificio multifamiliare in fase di costruzione localizzato nell'area metropolitana di Milano (MI). Esso è costituito da 34 appartamenti distribuiti in modo non uniforme su un totale di 15 piani fuori terra; il piano interrato è adibito a cantine e locali tecnici mentre il sedicesimo piano funge da copertura e contiene zone tecniche.

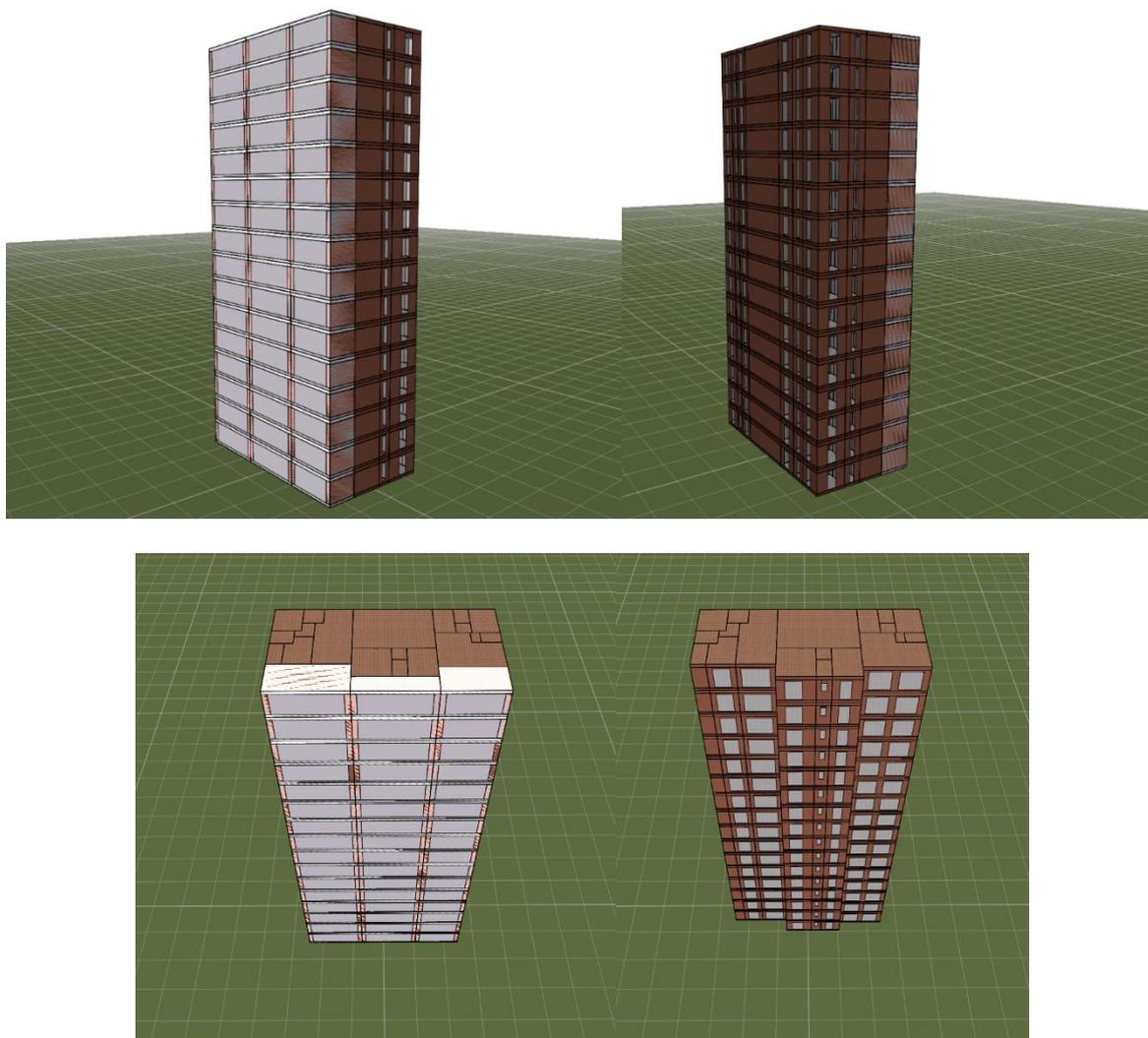


Figura 21- Viste 3D dell'Edificio A – In alto : vista sud-est (sinistra) e nord-ovest (destra); In basso: la vista da sud dell'intero edificio (sinistra) e dell'involucro al netto dei balconi esterni che affacciano verso sud (destra);

La figura seguente mostra in modo schematico la caratterizzazione dei piani dell'edificio attraverso una simbologia a due numeri ed una lettera, individuando con il primo e ultimo numero rispettivamente numero del piano e numero dell'alloggio nel piano.

Tabella 3- Caratterizzazione dei piani dell'edificio A

<i>Piani</i>	<i>Caratterizzazione dei piani dell'edificio A</i>		
<i>PT</i>	00.Aree Comuni		
<i>1</i>	1.A1	1.A2	
<i>2</i>	2.A1		2.A2
<i>3</i>	3.A1	3.A2	3.A3
<i>4</i>	4.A1	4.A2	4.A3
<i>5</i>	5.A1		5.A2
<i>6</i>	6.A1	6.A2	6.A3
<i>7</i>	7.A1	7.A2	
<i>8</i>	8.A1	8.A2	
<i>9</i>	9.A1	9.A2	9.A3
<i>10</i>	10.A1		10.A2
<i>11</i>	11.A1	11.A2	11.A3
<i>12</i>	12.A1	12.A2	12.A3
<i>13</i>	13.A1		
<i>14</i>	14.A1		14.A2
<i>15</i>	15.A1		

L'incongruenza grafica che si osserva confrontando la suddivisione degli alloggi di cui sopra e la vista dall'alto della Figura 21 è dovuta a motivi di modellazione, come approfondito e spiegato meglio nei capitoli seguenti.

Per quanto riguarda la destinazione d'uso delle aree comuni poste al piano terra e quelle poste al di sotto del complesso (che non sono state considerate ne modellate), sono state destinate ad ospitare locali di aggregazione comuni e locali tecnici, come ad esempio quello della centrale termofrigorifera. Il dispendio energetico e la potenza termica che la centrale termofrigorifera dovrà soddisfare dipende sensibilmente dal tipo di terminale da alimentare nelle due diverse configurazioni estiva ed invernale.

2.2. Alloggi tipo

All'interno dell'edificio A, sono stati scelti tre alloggi tipo all'interno dei quali verranno svolte le simulazioni e tratte le conclusioni dei risultati ottenuti. Criteri per la scelta degli alloggi tipo sono:

- Quantità e tipologia di elementi finestrati;
- Numero e tipologia delle esposizioni verso l'esterno;
- Varietà degli ambienti interni per dimensioni, geometrie ed esposizione;

Una vista d'insieme degli alloggi tipo è riportata di seguito, in modo da poter osservare a colpo d'occhio come ognuno di questi sia rappresentativo di diverse caratteristiche.

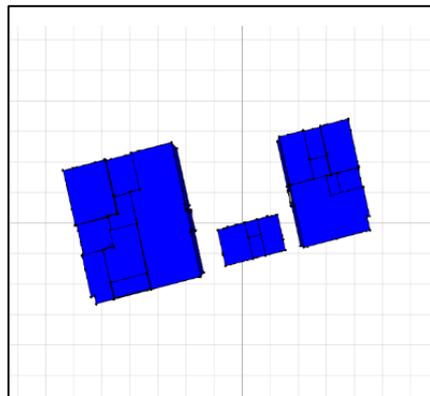
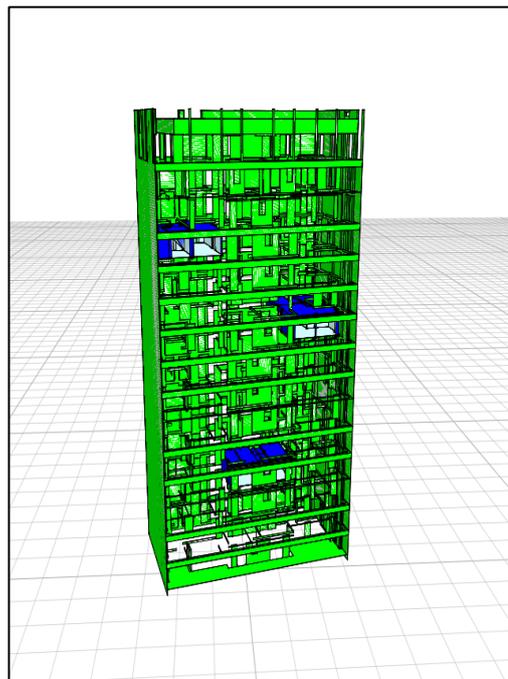


Figura 22-Sopra vista 3D dell'Edificio A con enfasi sugli alloggi tipo, sotto vista dall'alto dei soli alloggi tipo in prospettiva

Quello presente in Figura 22 è l'edificio reale modellato sulla piattaforma di modellazione 3D Revit e, com'è possibile osservare, rispetta la caratterizzazione dei piani dell'edificio A schematizzata nella precedente Tabella 3.

La Figura 21 invece, che mostra com'è stato modellato l'Edificio A su IES VE, è stato ottenuto come sovrapposizione di 15 piani, ognuno ottenuto come somma degli alloggi tipo 4.A2, 9.A3 e 12.A1. Sono dunque stati eliminati alloggi diversi da quelli tipo e sostituiti in modo da rispettare sempre i vincoli del vano scale, degli elementi finestrati e dell'involucro opaco. Il grado di dettaglio scelto difatti è un ottimo compromesso tra velocità di creazione del modello 3D dell'Edificio A e accuratezza degli spazi presenti nel complesso residenziale.

La trattazione prosegue, scendendo nei dettagli, riportando e discutendo dei singoli appartamenti e delle relative peculiarità che hanno portato alla loro scelta.

2.2.1. Alloggio tipo #1: Bilocale 4.A2

Il primo alloggio scelto è situato in uno dei piani bassi dell'edificio multifamiliare ed è caratterizzato da una metratura ridotta, pari complessivamente a circa 40 m².

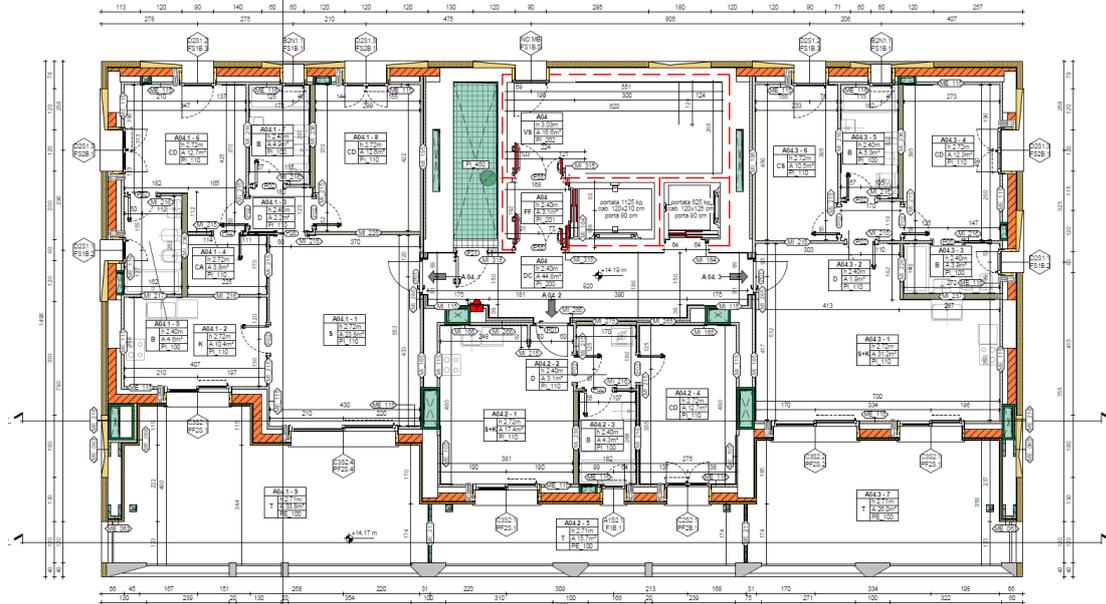


Figura 23- Pianta piano 4 Edificio A; l'alloggio 4.A2 è quello situato frontalmente al vano scale con singola esposizione a sud.

Il bilocale proposto è caratterizzato dunque dall'aver piccoli ambienti, la totalità dei quali si affaccia sullo stesso balcone esposto a Sud attraverso tre aperture finestrate; i restanti quattro lati dell'alloggio sono confinanti con altri appartamenti e, per il lato a nord, l'affaccio è sulla zona comune delle scale e vano ascensore.

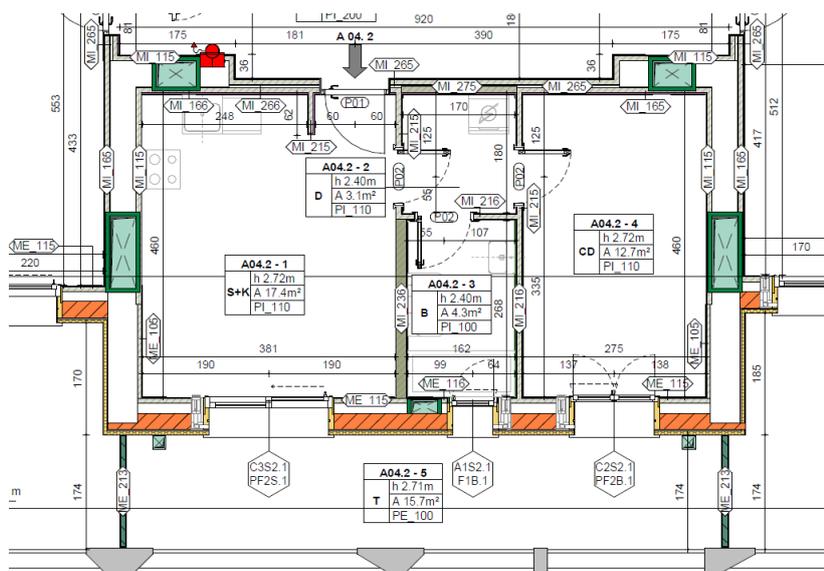


Figura 24- Pianta piano 4 Edificio A: particolare alloggio 4.A2

Questa tipologia di appartamento permette di fare ragionamenti su distribuzione di temperatura e moto dell'aria in spazi ridotti, caratterizzati dall'aver limitate superfici finestrate, pochi ponti termici e scarsa esposizione ad agenti esterni quali vento e radiazione solare diretta, data la sua singola esposizione a sud per mezzo di un ampio balcone.

2.2.2. Alloggio tipo #2: Trilocale 9.A3

Il secondo alloggio scelto differisce dal primo innanzitutto per la posizione, in quanto situato in un piano molto più alto, ed in secondo luogo per la geometria interna dei locali e la superficie calpestabile, che è pari a poco più di 70 m², quasi il doppio dell'alloggio precedente.

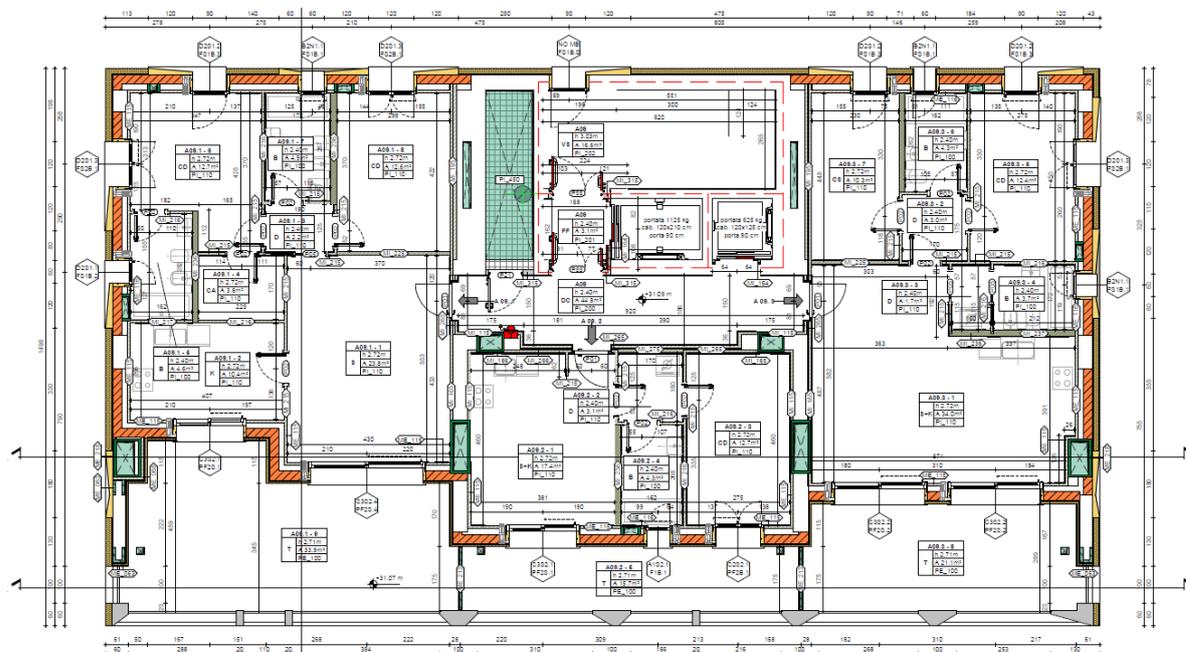


Figura 25- Pianta piano 9 Edificio A; l'alloggio 9.A3 è quello situato a destra del vano scale.

In questo trilocale vi sono due ambienti dalle dimensioni ridotte che possono essere adibiti a camere o studi, e un ambiente spazioso di 35 m² destinato a zona giorno e relax. Oltre alle dimensioni, la zona giorno è provvista di due grandi aperture finestrate orientate a sud che affacciano sul medesimo balcone.

Altri spazi presenti sono un disimpegno, un antibagno cieco, due bagni finestrati affacciati ad est e nord entrambi avente superficie calpestabile di circa 4 m².

quantità di elementi finestrati era elemento tanto significativo da portare a scegliere un alloggio diverso.

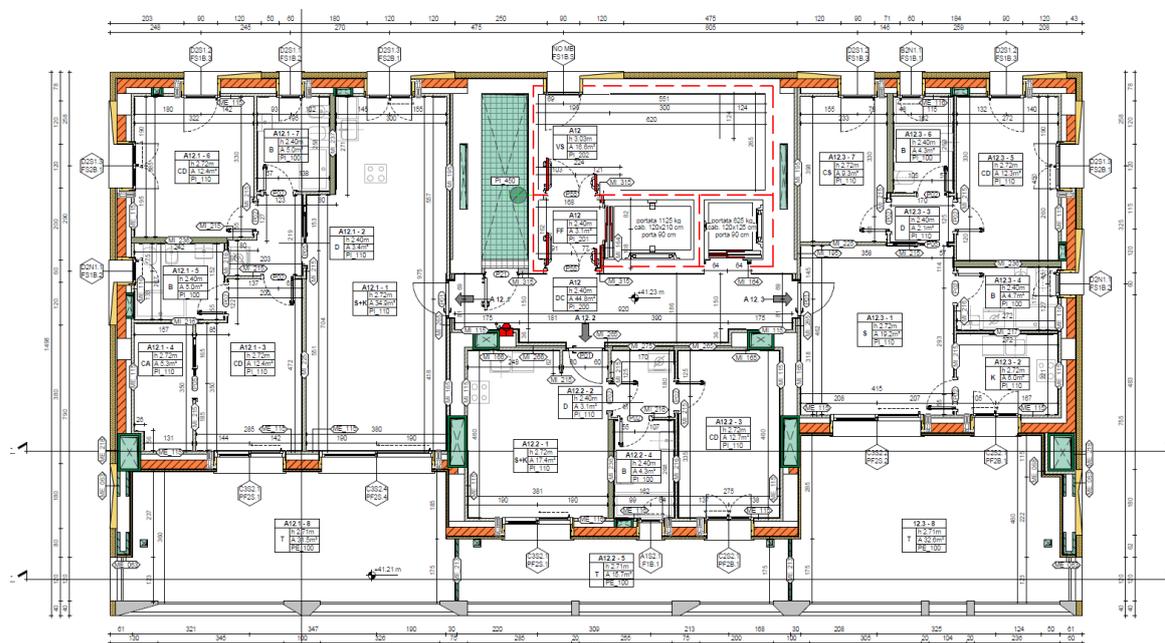


Figura 27- Pianta piano 12 Edificio A; l'alloggio 12.A1 è quello situato a sinistra del vano scale.

Com'è possibile vedere a colpo d'occhio, peculiarità di questo appartamento è ancora una volta la zona giorno. Avente una geometria che permette una doppia esposizione nella direzione nord-sud, questo grande spazio di oltre 37 m² presenta nel lato a sud un involucro quasi interamente trasparente, mentre nell'affaccio a nord troviamo una superficie vetrata, comunque, presente ma di dimensioni ridotte.

Questa tipologia di ambiente permette di fare ragionamenti sulla distribuzione di temperatura e moto dell'aria in spazi di dimensioni medio-grandi, caratterizzati dall'aver grandi superfici finestrate, tanti ponti termici ed elevata esposizione ad agenti esterni quali vento e radiazione solare diretta in estate.

La geometria dello spazio è significativamente diversa dalle altre incontrate, in quanto la dimensione maggiore è circa tre volte quella minore. Questa geometria particolare stretta e lunga permette di osservare come il posizionamento di terminali in diversi punti dell'ambiente sia in grado di cambiare significativamente lo stato di comfort interno, di creare o meno zone caratterizzate da forti moti convettivi oppure in grado di assicurare una distribuzione di temperatura quasi perfettamente uniforme lungo tutte le direzioni.

A completare l'appartamento troviamo due bagni finestrati, un disimpegno, due camere da letto ed una cabina armadio dotata anch'essa di finestra. La geometria delle camere è anch'esso motivo di studio nella scelta dei terminali.

È riportato di seguito il dettaglio in pianta del luminoso alloggio, in cui è possibile apprezzare, grazie alle diverse etichette, le proporzioni tra superfici finestrate e dimensioni degli ambienti.

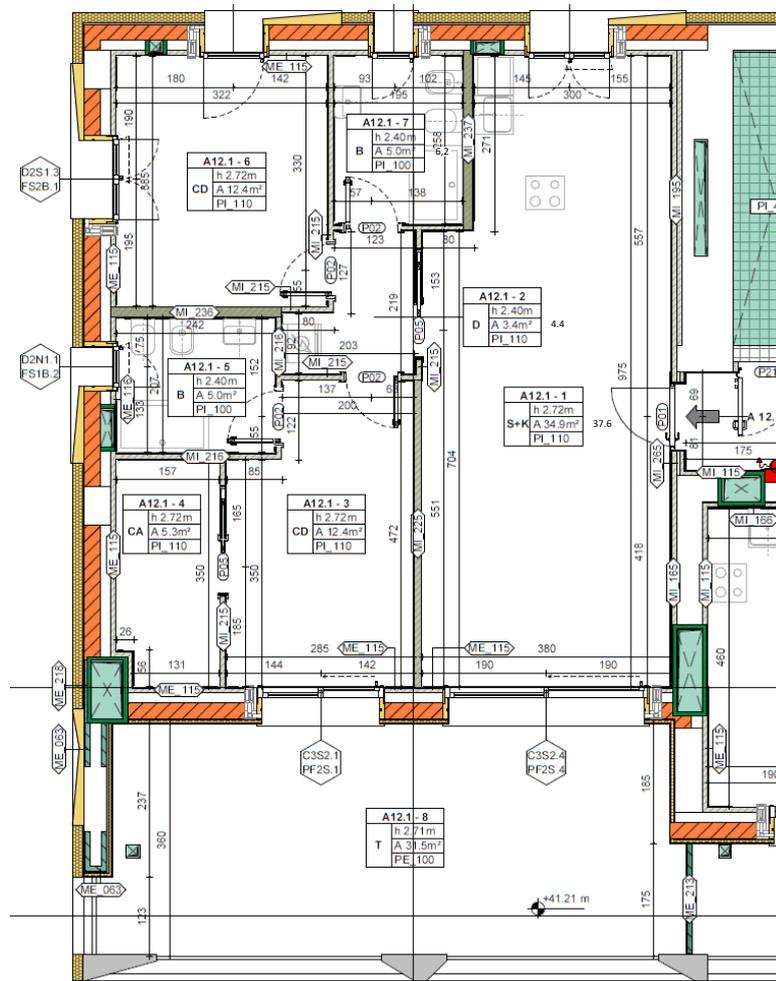


Figura 28- Pianta piano 12 Edificio A: particolare alloggio 12.A1

2.3. Strumento di modellazione 3D: ModelIT e Building Template Manager

ModelIT è il modulo di costruzione del modello dell'Ambiente Virtuale (VE) presente nel software utilizzato che consente di creare i modelli 3D richiesti dagli altri moduli all'interno del software.

Come accennato nel paragrafo precedente, il processo di modellazione dell'Edificio A è stato quello della sovrapposizione di 15 piani, ognuno ottenuto come somma degli alloggi tipo 4.A2, 9.A3 e 12.A1. Sono dunque stati eliminati alloggi diversi da quelli tipo e sostituiti in modo da rispettare sempre i vincoli del vano scale, degli elementi finestrati e dell'involucro opaco.

Il grado di dettaglio scelto è un ottimo compromesso tra velocità di creazione del modello 3D dell'Edificio A e accuratezza degli spazi presenti nel complesso residenziale.

In più, tra un piano e l'altro, è stata creata una "zona cuscinetto", che impedisce la diretta adiacenza di alloggi posti uno sopra l'altro, in cui è possibile far passare non solo tubazioni dell'aria per la Ventilazione Meccanica Controllata ma utilizzabile anche per posizionare terminali particolarmente ingombranti.

I balconi sono invece stati trattati in modo completamente diverso, definiti cioè come soli elementi di ombreggiamento privi di informazioni termiche e fisiche più specifiche.

Building Template Manager (BTM) è invece lo strumento che fornisce il mezzo per specificare gli attributi degli oggetti usati per l'assegnazione successiva a spazi, costruzioni e altri oggetti in un modello di ambiente virtuale. In questa sezione è stato possibile definire:

- Le proprietà degli elementi del fabbricato edilizio, che comprende sia l'involucro opaco che quello trasparente, in quanto a specifiche termiche e fisiche;
- Le caratteristiche dell'edificio in quanto ad apertura e permeabilità dei componenti vetrati;
- Le proprietà termiche degli spazi definiti come stanza, vuoto (vano scale ed ascensori), plenum di mandata e ritorno (la cosiddetta "zona cuscinetto");
- Le specifiche tecniche per gli strumenti LightPro e Radiance, i quali non verranno trattati nello studio.

In particolare, nella sezione di definizione degli schemi termici (Thermal Templates), è possibile descrivere dettagliatamente il sistema di climatizzazione in quanto a temperature di

set point e quota di scambio termico radiativo dei terminali, ma anche l'inserimento di apporti interni gratuiti, presenza di infiltrazioni d'aria etc.;

Le infiltrazioni d'aria sono state considerate solamente all'interno delle stanze, quindi escludendo anche il vano scale ed ascensori dal ragionamento, ed è stato fissato il valore annuale pari a 0.4 ach.

L'apporto gratuito dovuto alla presenza di impianto di illuminazione e persone è anch'esso stato considerato solamente all'interno delle stanze, considerando 6 W/m² per le luci e rispettivamente 64 W/persona e 46 W/persona per la quota sensibile e latente del calore prodotto dalle persone. La metratura destinata ad occupare una sola persona al fine del calcolo dell'apporto termico è stata considerata pari a 14 m² al fine cautelativo.

Difatti, la Circolare del Ministero dell'Interno n. 7170 del 18 novembre 2009 specifica che la certificazione relativa all'idoneità abitativa potrà fare riferimento alla normativa contenuta nel Decreto ministeriale 5 luglio del 1975 che stabilisce i requisiti igienico-sanitari principali dei locali di abitazione e che precisa anche i requisiti minimi di superficie degli alloggi, in relazione al numero previsto degli occupanti. La normativa prevede che siano dedicati 14 m² a persona per le prime 4 persone presenti in un determinato ambiente, e solamente 10 m² per le successive considerate.

2.4. Simulazione termica dinamica: ApacheSim, SunCast e VistaPro

ApacheSim è uno strumento di simulazione termica dinamica basato sulla modellazione matematica dei primi principi dei processi di trasferimento del calore che si verificano all'interno e intorno a un edificio. Il programma fornisce un ambiente per la valutazione dettagliata dei progetti di edifici e sistemi, consentendo loro di essere ottimizzati per quanto riguarda i criteri di comfort e l'uso di energia.

La preparazione dei dati di input termico consiste in tre compiti principali:

- Specifica dell'ubicazione dell'edificio e dei dati meteorologici
- Specifica dei dati degli elementi edilizi (proprietà del tessuto edilizio)
- Specifica dei dati di spazio (condizioni in ogni spazio)

Come dati di output lo strumento di Apache fornisce una grandissima quantità di informazioni per ogni livello di decomposizione del sistema (superficie, stanza, intero edificio). Queste informazioni saranno la base di tutti i ragionamenti e le simulazioni che seguiranno. I risultati ottenuti con le simulazioni dinamiche operate da Apache possono essere visualizzate con VistaPro ed utilizzate negli altri strumenti del software.

Molto utile è la possibilità di utilizzare informazioni derivanti da altri moduli di simulazione per arricchire i dati di input di Apache, che si occupa di sole simulazioni termiche. In particolare, si è utilizzato lo strumento SunCast per avere una più profonda comprensione di come i balconi siano in grado di ombreggiare gli alloggi dell'Edificio A. Segue una vista 3D dell'Edificio A attraverso il visualizzatore del suddetto modulo.

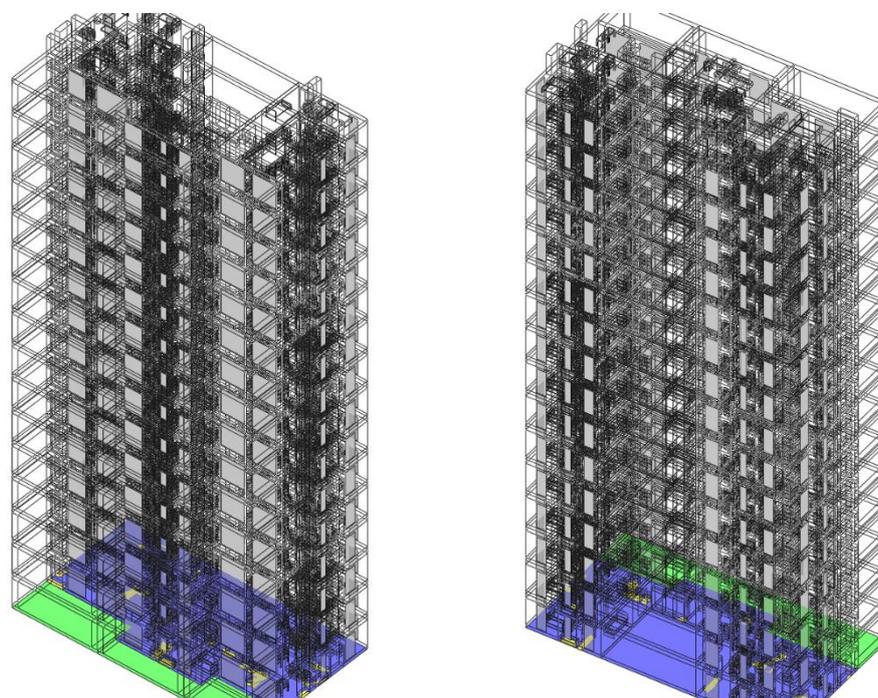


Figura 29- Vista sud-est (sinistra) e nord-ovest (destra) dell'Edificio A attraverso strumento di visualizzazione di SunCast: dettaglio dell'involucro trasparente

VistaPro è dunque lo strumento che si trova nel gruppo di applicazioni per l'analisi termica all'interno dell'ambiente virtuale IES. In particolare, permette di analizzare rapidamente in forma grafica o tabellare i risultati di una o più simulazioni effettuate utilizzando gli altri strumenti del software.

Essendo lo scopo dello studio la valutazione del comfort degli occupanti mediante l'analisi CFD degli alloggi, la quale viene svolta in un preciso istante dell'anno, l'analisi su VistaPro intende estrapolare proprio questa informazione essenziale per modellare il sistema di climatizzazione in estate e in inverno: la scelta di giorno ed ora rappresentativi delle due situazioni limite. Le caratteristiche che questi due momenti particolari devono avere sono:

- Temperatura esterna di progetto, che nel caso invernale è pari a -5°C e nel caso estivo è pari a 33°C , come da norma UNI EN 16798-1;
- Tasso di occupazione elevato, in quanto il comfort degli alloggi deve essere valutato nelle condizioni in cui all'interno vi siano effettivamente persone;
- Giorno feriale, non caratterizzato dunque dalle incertezze e dalle fluttuazioni tipiche riconducibili a giorni festivi in cui il numero degli occupanti o le attività svolte in alloggio possono variare sensibilmente rispetto alla norma;

I due giorni che sono risultati idonei per lo scopo sono il 7 gennaio (ore 18:30) per il sistema di riscaldamento e il 24 luglio per il sistema di raffrescamento. Essendo il contributo dell'apporto solare determinante nel carico del sistema di raffrescamento, per il caso estivo si sono considerati diversi orari per l'estrapolazione dei dati necessari a seconda dell'ubicazione dell'alloggio trattato: per gli alloggi 4.A2 (SUD) e 12.A1 (ovest) si è considerato lo scenario delle 15:30, mentre per l'alloggio 9.A3 (EST) quello delle 11:30 del mattino.

Segue la rappresentazione dell'edificio rispetto alla posizione del sole nel cielo nel giorno di progetto invernale e nei due giorni estivi.

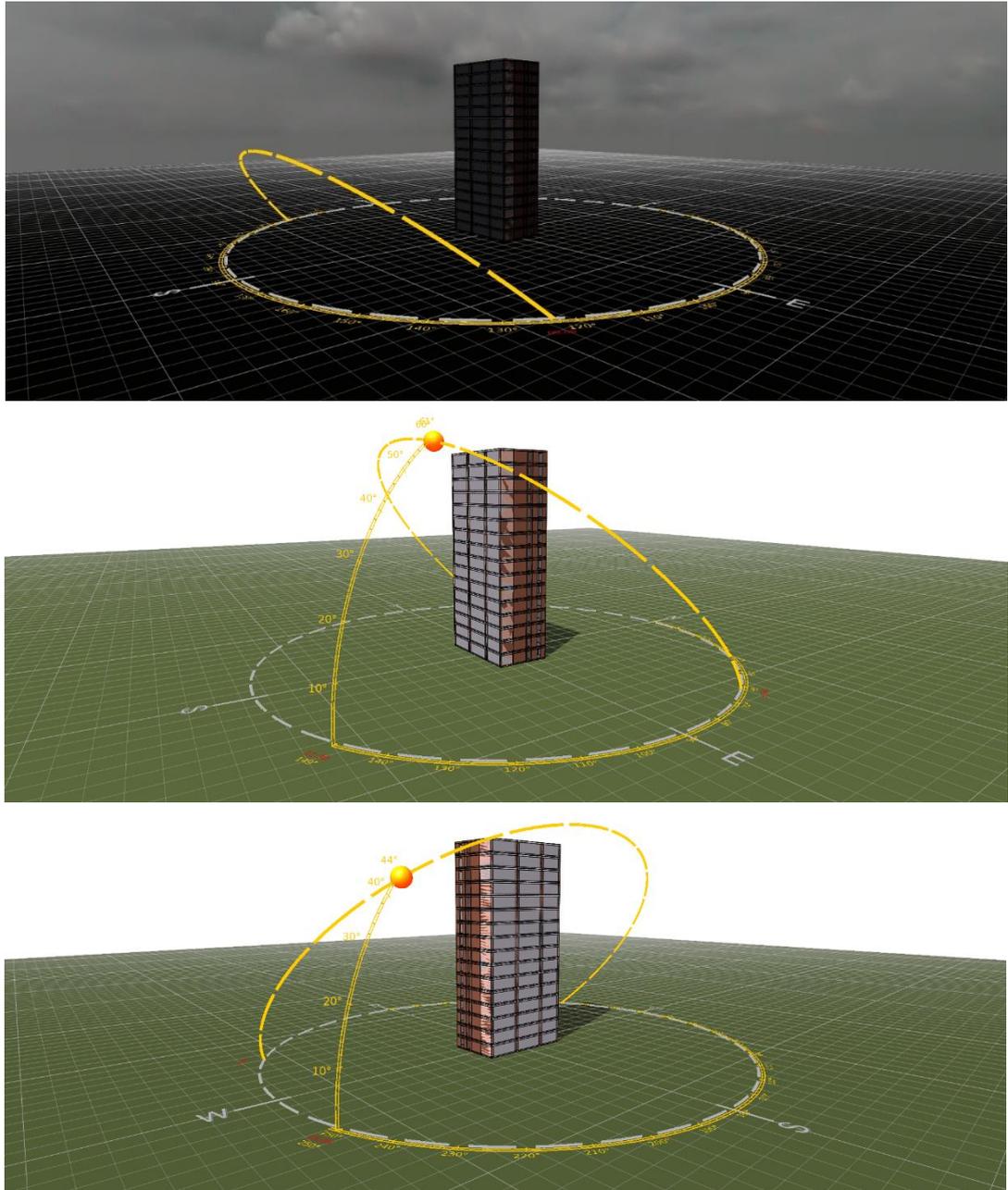


Figura 30- Posizione del sole nel cielo nei giorni di progetto per la modellazione del sistema di riscaldamento (7 gennaio ore 1830) e raffreddamento (24 luglio, ore 11:30 e ore 15:30) in MicroFlo

Si specifica che riscaldamento e il raffreddamento di corridoi e disimpegni di qualsivoglia forma e dimensione non è stato previsto in quanto si assume che questa tipologia di ambiente sia temperata grazie all'azione delle zone climatizzate circostanti.

Nella sezione di VistaPro è anche possibile esportare le condizioni al contorno (Boundary Conditions) per un determinato giorno ed orario. Le quantità che possono essere esportate sono:

- Temperature di tutte le superfici interne all'ambiente;
- Sola componente convettiva degli apporti interni (Internal Gains) inseriti durante la simulazione con Apache;
- Rateo di generazione di H₂O e CO₂ dovuti agli apporti interni inseriti durante la simulazione con Apache;

I flussi dovuti a infiltrazioni, componenti dell'impianto HVAC e ogni altro scambio d'aria non meglio specificato, non sono informazioni che possono essere importate. Il file contenente le BCs può comunque essere aperto e letto così da permettere la conoscenza dei carichi di raffrescamento e riscaldamento richiesti in quel momento in un particolare alloggio.

2.5. Strumento di modellazione CFD: MicroFlo

MicroFlo è lo strumento dell'ambiente virtuale (VE) di IES che permette la Computational Fluid Dynamics (CFD), cioè la simulazione numerica del flusso di fluidi e dei processi di trasferimento del calore, in un determinato ambiente per un ben definito istante di tempo.

In particolare, MicroFlo consente la risoluzione matematica di flussi d'aria e processi di scambio termico mediante la risoluzione numerica di un insieme di equazioni differenziali parziali del secondo ordine accoppiate, non lineari (equazioni di conservazione).

La soluzione numerica è condotta attraverso la linearizzazione e discretizzazione dell'insieme di equazioni di conservazione, che richiede la suddivisione del dominio di calcolo in un numero di volumi finiti contigui non sovrapposti su ciascuno dei quali le equazioni di conservazione sono espresse sotto forma di lineare equazioni algebriche; questo insieme di volumi finiti è indicato come una griglia.

L'equazione algebrica lineare risultante impostata per l'intero dominio è poi risolta in uno schema iterativo, che tiene conto dell'accoppiamento non lineare. Più fine è la griglia dei volumi finiti, più la soluzione delle equazioni algebriche rappresenterà le equazioni differenziali originali, ma più tempo richiederà la simulazione.

In sintesi, la CFD implica la soluzione numerica delle seguenti equazioni di governo: quantità di moto, energia, continuità di massa, turbolenza, frazione in massa.

Come accennato precedentemente, è possibile importare e inserire in modo localizzato i soli apporti gratuiti interni (*internal gains*) della stanza, separati in componente radiativa e convettiva: la prima è importata secondo l'effetto che genera in ambiente, ovvero provocando un innalzamento omogeneo della temperatura superficiale delle superfici, mentre la seconda è inizialmente posta diffusa nel volume.

Questa strategia di rappresentare lo scambio termico radiativo in termini di effetti che produce sull'ambiente è necessaria in quanto MicroFlo non supporta la risoluzione numerica delle relative equazioni che lo governano.

Nei prossimi paragrafi si definiranno nello specifico le strategie adottate durante le simulazioni estive ed invernali volte a garantire il massimo grado di aderenza con la realtà fisica.

2.5.1. Caso invernale

Se la componente radiativa è aggiunta indirettamente e automaticamente all'ambiente, per la componente convettiva della sorgente termica è possibile una manipolazione della sua localizzazione nella stanza. In più, durante l'importazione, le varie quote convettive derivanti da diverse sorgenti sono riportate separatamente, il che permette di applicare puntualmente anche solo una particolare categoria di sorgente. Anche il rateo di generazione di vapore acqueo e CO₂ calcolato sulla base del calore latente degli apporti gratuiti è importato in ambiente inizialmente in modo diffuso.

Come conseguenza, sono possibili due approcci nella stessa simulazione CFD: alcuni apporti possono essere applicati in modo omogeneo all'interno dell'ambiente semplicemente non localizzandoli, come ad esempio quelli dovuti all'occupazione delle persone e all'illuminazione, mentre altri tipi di *internal gains* possono essere inseriti in modo più preciso.

Da qui deriva l'idea di inserire la quota di riscaldamento in ambiente sotto forma di *internal gain* per aggirare il limite del programma che impedisce l'inserimento dei flussi dovuti ai terminali dell'impianto di riscaldamento.

In particolare, il processo si compone dei seguenti passaggi:

- I. Identificazione del momento (giorno, ora) per il quale si decide di procedere con la CFD.

L'identificazione del momento che si andrà a studiare nel dettaglio con MicroFlo dipende sicuramente dalle condizioni climatiche esterne, che sono

state scelte più vicine possibili a quelle di progetto invernali, ma anche dalla presenza effettiva di persone, uniche e dirette beneficiarie di uno studio volto alla massimizzazione del comfort ambientale.

II. Definizione dell'internal gain da applicare in ambiente.

Dall'analisi energetica perseguita nel singolo alloggio, si evidenzia il carico (W) che il sistema di riscaldamento deve garantire per il rispetto dei valori di set point.

Al fine di inserire in modo fittizio questo carico in ambiente sotto forma di *internal gain*, si procede con l'azzeramento dell'apporto del sistema di riscaldamento per l'istante studiato inserendo negli apporti interni una quota di potenza pari a soddisfare la richiesta: a questo punto, per l'istante studiato, la domanda che il sistema di riscaldamento dovrà soddisfare sarà pari a zero.

Questa manipolazione viene fatta cercando di comportare il minor impatto possibile sul sistema in modo da mantenere aderenza con la realtà. In particolare, vengono controllate la *temperatura media dell'aria* e la *media radiante* prima e dopo il processo di sostituzione, e viene definito il nuovo internal gain con quota radiante e convettiva analoga all'impianto che andrà a sostituire.

Come è possibile osservare dal confronto seguente, il processo assicura la piena aderenza con la realtà poiché lo scostamento dai dati reali è minimo ($< 0.15\text{ }^{\circ}\text{C}$) in tutte le casistiche.

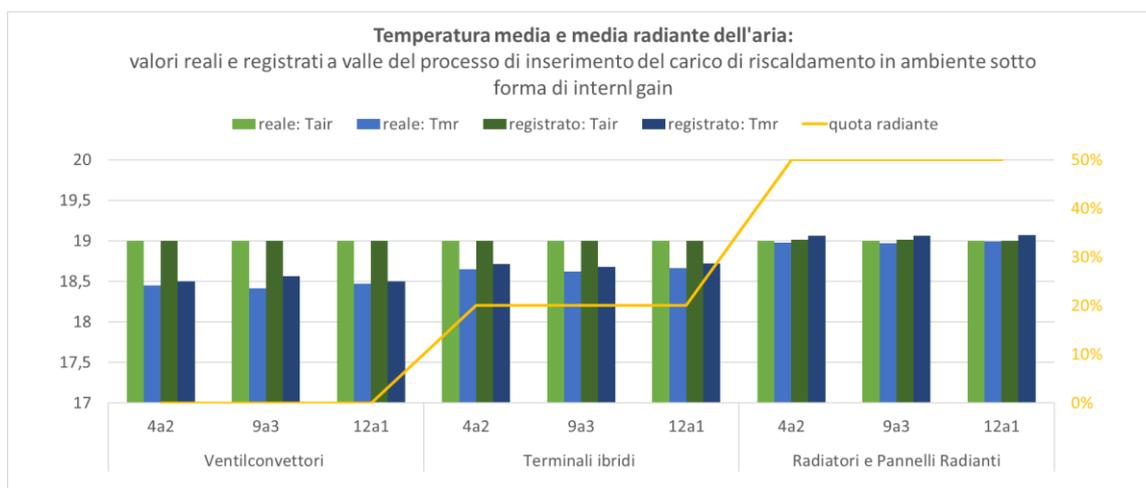


Figura 31- Attendibilità del processo di inserimento del carico di riscaldamento in ambiente sotto forma di internal gain: confronto grafico tra valori della temperatura media radiante (Tmr) e media (Tair) dell'aria reali e registrati a valle del processo

III. Lavoro su MicroFlo.

A questo punto, avendo definito ed inserito in ogni alloggio, per un determinato istante, l'impianto di climatizzazione fittizio, si procede con una nuova simulazione che fornirà nuove condizioni al contorno (BCs) e nuovi valori delle sorgenti degli *internal gains* da importare in MicroFlo, il quale mostrerà con precisione la quota convettiva del sistema di riscaldamento che potrà essere inserita puntualmente in ambiente.

MicroFlo impone anche dei bilanci che vengono rispettati tassativamente, tra cui figurano quello di uguaglianza tra aria immessa e ripresa e in ambiente e uno riguardante le potenze termiche. Nel momento in cui si importano le condizioni al contorno di un determinato ambiente difatti, si può scegliere di importare anche i carichi interni, azione opzionale che è stata utile nel caso precedente del riscaldamento. Facendo ciò però ci si interfaccia con il bilancio di potenza imposto da MicroFlo, che limita la potenza delle sorgenti che possono essere inserite puntualmente al valore totale dei carichi interni: se si eccede il valore limite, il programma inserirà un carico frigorifero in grado di bilanciare l'eccesso di calore.

2.5.2. Caso estivo

Per quanto riguarda la modellazione su MicroFlo del sistema di raffrescamento, il procedimento descritto per il caso invernale è del tutto inutile in quanto non vi è nessuna sorgente di calore da localizzare. Essendo impossibile inserire un carico di raffrescamento fittizio diffuso in ambiente così da poter aggirare questo ostacolo e localizzare le sorgenti frigorifere senza vincoli, come nel caso del riscaldamento, si è proceduto per una strada diversa.

La potenza termica frigorifera caratteristica di ciascun alloggio è stata inserita in ambiente nelle camere e nelle zone giorno secondo una ripartizione che tiene conto della superficie degli ambienti, incrementando all'occorrenza la quota percentuale delle stanze sottoposte a condizioni più severe e al contempo decrementando le altre in modo da ottenere sempre il bilancio dell'alloggio.

A seconda della tipologia di terminale, si sono seguite strade diverse.

Per quanto riguarda i ventilconvettori e i terminali ibridi in assetto da raffrescamento (vedi descrizione dei terminali ibridi paragrafo 3.4.1.) si è imposto il 100% di quota convettiva e 0% di radiativa per il sistema di raffrescamento. Essendo che lo scambio termico per convezione può essere modellato e rappresentato in MicroFlo, si sono create le condizioni per poterlo inserire puntualmente in ambiente.

Il processo è composto da due passaggi:

I. Realizzazione di due diverse simulazioni, una reale e una fittizia.

La simulazione *reale*, completa e in grado di modellare la realtà del momento, ha come scopo il fornire l'effettivo valore di *potenza termica* erogata da sistema di raffrescamento per un determinato alloggio nel momento di studio;

La simulazione *fittizia*, in cui l'edificio risulta privo di sistema di controllo interno di temperatura ma comprensivo di illuminazione e quota di occupazione, ha come scopo il fornire le *condizioni al contorno* per quel che riguarda le temperature superficiali interne degli alloggi prima che il sistema di raffrescamento entri in azione;

Queste due simulazioni serviranno rispettivamente per ottenere la quota di sorgente frigorifera richiesta dall'ambiente e le condizioni al contorno da importare in MicroFlo per ottenere le condizioni in cui il sistema di raffrescamento dovrà operare.

II. Definizione e posa del fabbisogno frigorifero in alloggio.

Come accennato precedentemente, Micro impone dei bilanci di potenze nel momento in cui si decide di importare i carichi interni (internal gains) dell'alloggio: questo comporta una grande limitazione nell'inserimento in ambiente di quote aggiuntive di calore o raffrescamento. Dato che i carichi interni sarebbero rimasti diffusi in alloggio e dato che il loro valore numerico è noto e ben definito per ogni alloggio, si è deciso di non inserirli in ambiente.

In conclusione, nel singolo alloggio si sono importate le sole condizioni al contorno derivate dalla simulazione fittizia, che fornisce la temperatura delle pareti prima che il sistema di raffrescamento entri in azione, e si è localizzata in ambiente la quota di fabbisogno frigorifero calcolata con la simulazione reale depurandola della quota dei carichi interni.

Il raffrescamento con pannelli radianti invece, soprattutto quello operato dalla variante con posa a soffitto, opera quasi esclusivamente per irraggiamento, sfruttando il principio fisico secondo cui un corpo caldo cede sempre calore a un corpo freddo. L'effetto di raffrescamento radiante permette di assorbire il calore presente nelle stanze quando la temperatura dell'ambiente supera la temperatura superficiale della superficie attiva.

In questo caso si è considerata una quota pari al 100% di irraggiamento, il che comporta l'inserimento in ambiente degli effetti del sistema in modo indiretto non appena si importano le BCs dell'alloggio. In questo caso, quindi, sono stati inseriti e considerati anche i carichi interni e sono stati manipolati i valori del coefficiente di scambio termico h_{totale} .

La tipologia di posa a pavimento rappresenta però un'eccezione in ragione del modo singolare in cui questi terminali operano. I pannelli radianti a pavimento attraversati da fluido refrigerato sono in grado di contrastare istantaneamente il carico dovuto all'azione dei raggi del sole che incidono sulla superficie attiva, andando di fatto a contrastare una delle cause dell'innalzamento della temperatura in ambiente prima ancora che questa possa agire.

Per riprodurre il particolare effetto descritto, si è dapprima eliminata la radiazione solare diretta incidente sulle superfici trasparenti inserendo un elemento di ombreggiamento, e si è ricalcolato il fabbisogno di raffrescamento di ogni alloggio.

Capitolo 3: Descrizione e modellazione di terminali in IESVE

In questo capitolo si analizzeranno nel dettaglio le diverse soluzioni impiantistiche scelte per lo studio dei terminali di climatizzazione. Ad una prima parte teorica e descrittiva dello stato dell'arte seguirà quella di modellazione sul software, in cui saranno presenti non solo ragionamenti e valutazioni per far fronte ai limiti di IES VE ma anche rappresentazioni grafiche 3D dei terminali così come appaiono nell'ambiente virtuale.

3.1. Pannelli radianti

3.1.1. Descrizione e stato dell'arte

I terminali appartenenti a questa tipologia impiantistica hanno la caratteristica di essere inseriti all'interno della struttura dell'involucro opaco. Il flusso termico trasferito dal fluido termovettore presente nei tubi viene trasferito all'ambiente da climatizzare soprattutto attraverso scambio per irraggiamento.

Idea dalle origini antichissime, affonda le sue radici nelle culture di Egiziani, Romani e Cinesi. I Romani in particolare utilizzando un solo focolare esterno erano in grado di riscaldare più locali ed addirittura in certi casi più edifici, realizzando così i primi impianti centralizzati di trasporto del calore attraverso la canalizzazione di fumi caldi. Nel 1909, a Londra, la Crittal Co. acquista i diritti del brevetto del professor Baker sul "sistema per riscaldare i locali con acqua calda convogliata in tubi sotto pavimento", e finalmente nel secondo dopoguerra durante le grandi ricostruzioni si assiste ad una significativa diffusione di questi sistemi.[18]

Affermatasi in modo diffuso nel mercato edilizio da oltre settant'anni, si può considerare come una tecnologia matura ed affinata, in cui ai primi tubi in ferro distanti alimentati da fluido ad alta temperatura si è sostituito un più efficiente sistema di molteplici tubi ravvicinati che, grazie all'elevata superficie disperdente, possono essere alimentati a bassa temperatura, caratteristica che li vede bene quando abbinati a pompe di calore.

Di seguito vengono riportate in Figura 32 Figura 33 Figura 34 le tre soluzioni in cui questi terminali possono essere presenti nei locali: all'interno della soletta nel caso di installazioni a pavimento, oppure fissati a pareti o soffitti attraverso guide verticali che ne permettono la posa oppure attraverso pannelli prefabbricati.

Generalmente nella configurazione di posa verticale questi sono installati lungo le pareti esterne, ma qualora fosse necessario possono essere messe anche nelle pareti interne. Anche nel caso degli ambienti destinati alla funzione di servizio igienico si può pensare a questa soluzione, in quanto la posa del sistema di riscaldamento può avvenire anche al di sotto delle mattonelle.

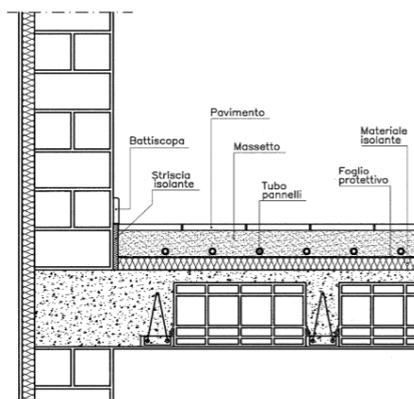


Figura 32- Installazione a pavimento - Struttura di soletta radiante tipo [18];

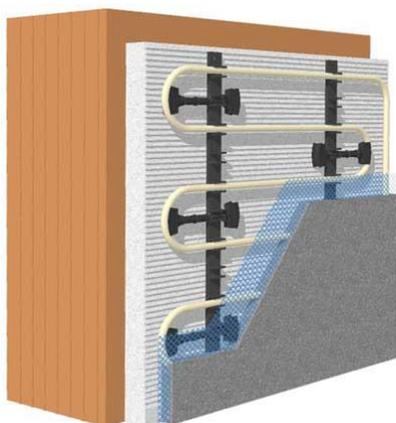


Figura 33- Installazione a parete - Sinistra: struttura di parete verticale con pannello radiante prefabbricato tipo; Destra: - Posa in loco di un sistema a pannelli radianti a parete fissati attraverso l'uso di guide



Figura 34- Installazione a soffitto di pannello radiante prefabbricato; si possono vedere nel dettaglio a destra le valvole di intercettazione per l'allaccio alla rete idrica rispettivamente per il circuito di mandata e ritorno.

Come si osserva dagli esempi soprastanti, geometrie di posa sono essenzialmente due, a serpentina o a spirale. Le due si distinguono soprattutto per la modalità con cui sono trattati i tubi di ritorno, caratterizzati dall'aver all'interno fluido termovettore energeticamente impoverito.

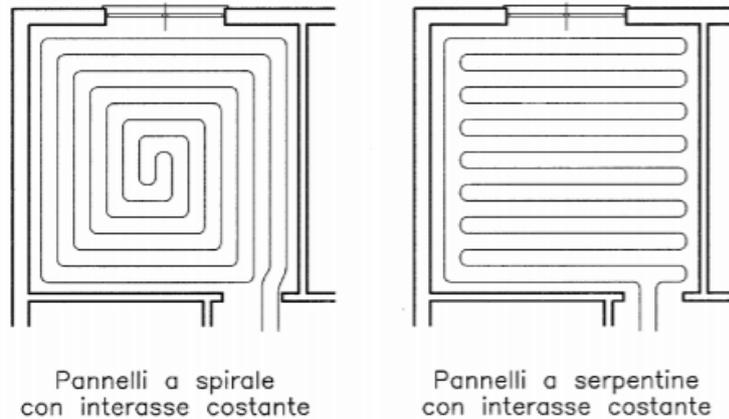


Figura 35- Pannelli radianti: geometrie di posa dei tubi contenenti fluido termovettore [18]

Il sistema a spirale consente di ottenere una temperatura dell'elemento strutturale più omogenea in quanto i tubi di mandata e ritorno appaiono alternati tra loro, in più appare di più facile applicazione in quanto vi sono solamente due curve a 180°.

Viceversa, il sistema a serpentine consente di creare una zona a minor flusso termico erogato, il che può tornare utile in situazioni in cui già in fase progettuale si può identificare una copertura parziale dell'elemento strutturale che ospita il sistema. Inoltre, nel caso di spazi con forme irregolari, questa seconda tipologia di posa consente una maggiore flessibilità.

I pannelli a spirale possono essere realizzati sia con interasse costante, come nel caso raffigurato precedentemente, che con interasse variabile, come riportato nella figura che segue, in modo da adattarsi a geometrie complesse oppure per far fronte a maggiori zone di dispersione termica.

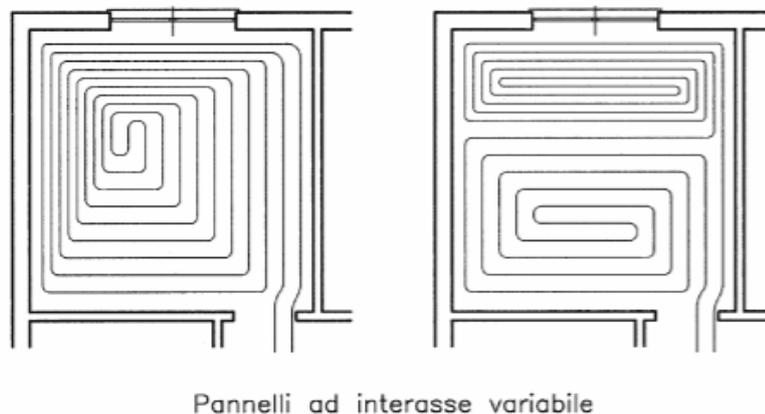


Figura 36- Pannelli radianti: geometrie di posa a serpentina con interasse variabile dei tubi contenenti fluido termovettore [18]

La forza di questo sistema risiede sicuramente nella versatilità di utilizzo, in quanto in grado di erogare sia flusso termico di riscaldamento che di raffrescamento a seconda della temperatura del fluido termovettore circolante all'interno dei tubi, ma anche nel poco ingombro che permette un pieno sfruttamento degli spazi. L'utilizzo di fluido termovettore a bassa temperatura consente un risparmio energetico non indifferente, accompagnato da un minore impatto ambientale.

Dal punto di vista della salute e del comfort degli occupanti, tra i vantaggi figurano anche le condizioni di assoluta igiene garantite, il benessere termico e la qualità dell'aria.

I pannelli radianti, soprattutto quelli a pavimento, sono caratterizzati difatti dall'aver una curva di temperatura molto simile a quella ideale. Come evidenziato dalla figura che segue difatti, per poter assicurare in un locale condizioni di benessere termico si deve avere una distribuzione verticale di temperatura che tenderà ad essere abbastanza costante attorno ai 19°C, con picchi di $\pm 3^\circ\text{C}$ raggiunti in positivo nella zona a soffitto e negativo nella zona inferiore, in prossimità del pavimento.

È bene evidenziare come il minor gradiente termico verticale che si osserva utilizzando i sistemi radianti piuttosto che quelli con convettori o radiatori permette risparmi energetici tanto più elevati tanto più sono alti i locali in cui questi sono utilizzati.

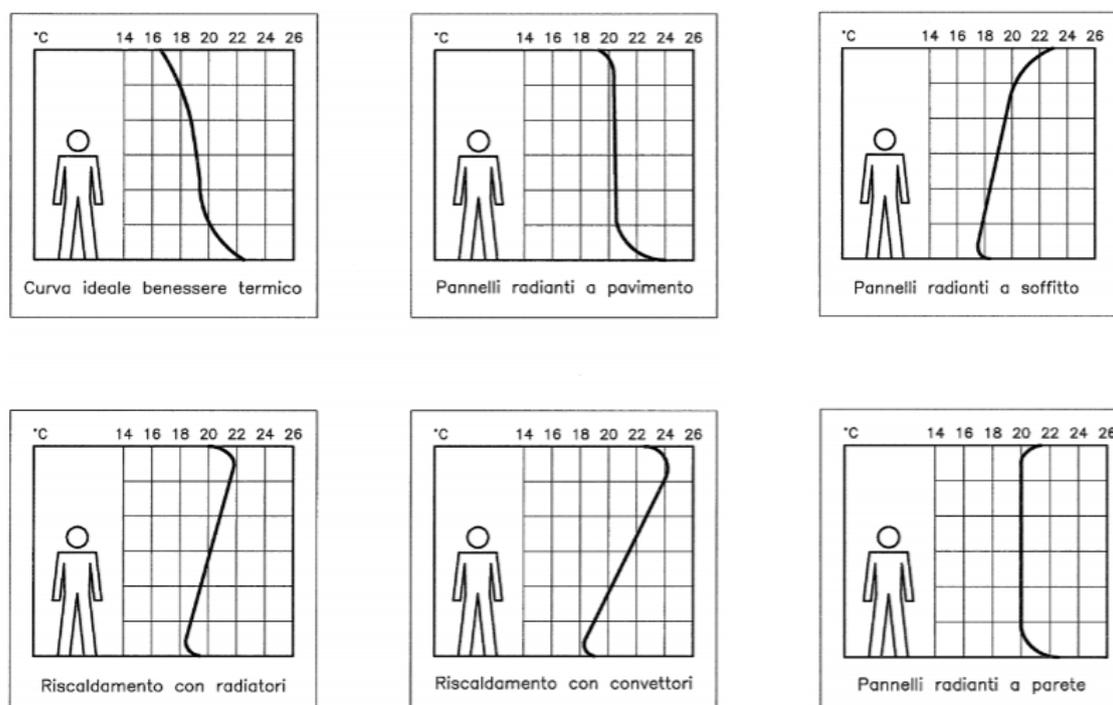


Figura 37- Curva di temperatura per varie tipologie impiantistiche [18]

Per quanto concerne la qualità dell'aria invece, l'assenza di un corpo scaldante a diretto contatto con l'aria permette di evitare la combustione del pulviscolo atmosferico, causa di

arsura e irritazioni faringee, mentre lo scambio termico prevalentemente radiativo consente di limitare molti i moti convettivi dell'aria con conseguente limitata circolazione di polvere.

I limiti di questa tipologia impiantistica riguardano la temperatura superficiale dell'elemento strutturale, che può indurre stati di discomfort localizzato agli occupanti, l'elevata inerzia termica dell'impianto, che li vede maggiormente adatti a soluzioni climatizzate con continuità, e la difficoltà progettuale.

Nel caso di raffrescamento, a questi si aggiungono anche l'incapacità di deumidificare l'ambiente, con relativo pericolo di formazione di zone umide a contatto con il corpo raffrescato, e la limitata resa frigorifera. L'integrazione necessaria di sistemi di umidificazione estivi rende la loro performance estiva caratterizzata da un maggiore costo ed ingombro che deve essere tenuto in considerazione.

La tipologia di pannelli radianti a pavimento che consente di limitare significativamente il principale limite di questa tecnologia, ovvero l'inerzia termica elevata, è noto come variante "a basso spessore". Elemento caratterizzante di questa variante è difatti l'esiguo spessore dello strato che separa i tubi dall'ambiente interno della stanza: complessivamente lo spessore dei pannelli può essere così ridotto fino a 20-30 mm totali.

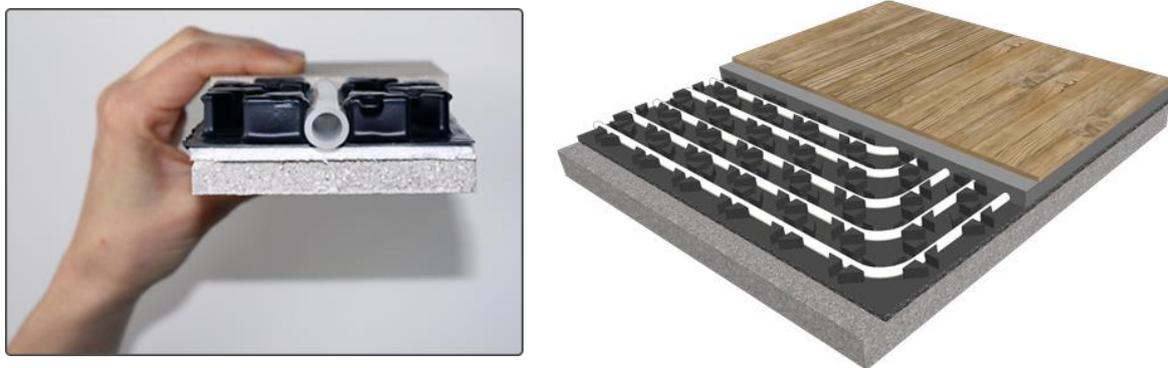


Figura 38- Pannelli radianti a pavimento "a basso spessore"

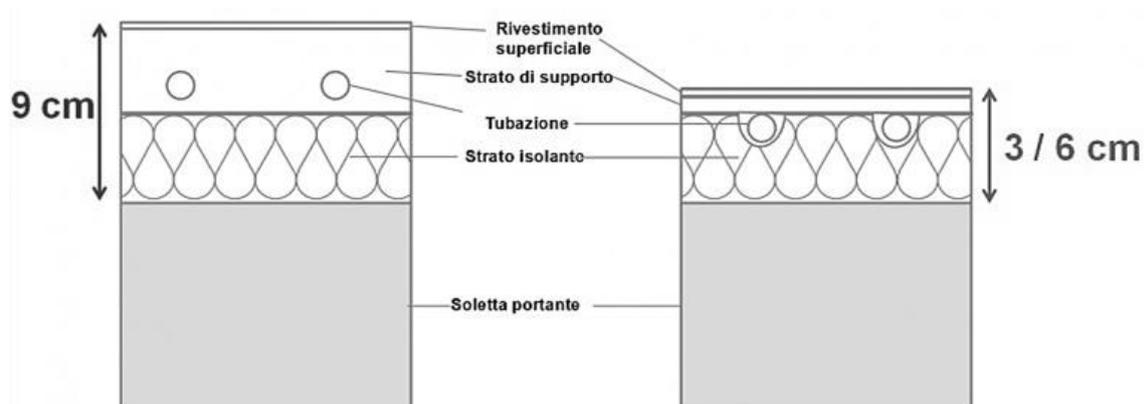


Figura 39-Confronto pannelli radianti a pavimento tradizionali (sinistra) e "a basso spessore" (destra)

Per quanto riguarda il lato economico, risulta praticamente impossibile stabilire dati medi significativi in merito ai costi richiesti per realizzare gli impianti a pannelli. Troppe, infatti, sono le variabili da prendere in esame, quali ad esempio il tipo di impianto (autonomo o centralizzato) o il sistema di regolazione.

Si può comunque ritenere che gli impianti a pannelli costino mediamente dal 10 al 30% in più degli impianti a radiatori con regolazione climatica. Per quanto riguarda invece i costi di gestione, gli impianti a pannelli consentono risparmi mediamente variabile dal 10 al 15% rispetto agli impianti tradizionali e consentono pertanto di ammortizzare in tempi relativamente brevi il maggior costo sostenuto per la loro realizzazione. [18]

3.1.2. Limiti del software e accorgimenti necessari

Il software, pur rimane validissimo nella descrizione dei fenomeni convettivi e conduttivi, non è però in grado di modellare gli scambi termici radiativi nella sezione *MicroFlo* in cui si sono svolte le analisi CFD. Per ovviare a questo limite, è possibile perseguire la strada descritta nel capitolo precedente, ovvero modellando distintamente la quota termica convettiva e radiativa inserita in ambiente.

Nella definizione dell'impianto di climatizzazione con pannelli radianti, come per tutti gli altri terminali che seguiranno, si procede dunque secondo una divisione in percentuale della potenza termica: parte radiativa verrà inserita in ambiente comportando il solo incremento (o decremento) delle temperature superficiali delle pareti, e restante parte convettiva verrà inserita puntualmente.

Difatti, seppur nella realtà la grande maggioranza dello scambio termico in questo tipo di impianti avvenga per irraggiamento, vi è una frazione, circa il 5-10%, che viene scambiata sotto forma di flusso convettivo che si instaura in ambiente in cui è presente una superficie calda/fredda ed un fluido a temperatura diversa (aria).

La quota di flusso radiativo però, nella realtà, non viene distribuita in modo uniforme tra le superfici non attive dell'ambiente, bensì risulta funzione dei loro angoli e distanze (*fattori di vista*): in caso di superfici parallele e vicine, come possono essere pavimento e soffitto di un ambiente dalla grande metratura, lo scambio termico per irraggiamento tra le due superfici risulta essere massimo e quello con le altre superfici minimo [19] [20].

MicroFlo, non essendo uno strumento pensato per trattare con precisione lo scambio radiativo, non è in grado di trattare l'argomento così nel dettaglio, limitandosi ad agire sulle temperature di tutte le superfici in modo uguale ed omogeneo.

Questa forte semplificazione rischia di impattare profondamente sul risultato finale in quanto la quantità di flusso termico scambiata con diverse superfici varia grandemente a seconda dell'angolo e distanza tra superficie attiva e non attiva, temperature delle due, geometria dell'intero ambiente. Inoltre, il programma non tiene conto degli ambienti in cui è presente l'impianto di climatizzazione e in quale no (come, ad esempio, i disimpegni per il caso invernale) bensì tratta ogni superficie allo stesso modo.

Dato che nel caso invernale la superficie attiva è quella a temperatura maggiore, in grado quindi di instaurare moti convettivi con l'aria, al fine di ridurre questo effetto di omogeneizzazione delle temperature superficiali tra superfici attive e non attive e di uguaglianza di fenomeni tra ambienti climatizzati e non, si è deciso di limitare la quota di scambio termico radiativo del sistema al valore di 50%.

Nel caso estivo invece, essendo i terminali più freddi dell'ambiente ma la temperatura superficiale delle superfici attive limitata a causa di fenomeni di condensa, vi sono generalmente minori differenze di temperatura tra superfici attive e non attive con conseguenti minori flussi convettivi indotti; si è optato dunque per assegnare all'intero sistema la quota di irraggiamento pari al 100%.

La restante parte, come anticipato, sarà dedicata allo scambio convettivo, il quale ha però bisogno di alcuni accorgimenti, in quanto deve essere abbinato ad un adatto coefficiente di scambio termico che dovrebbe essere aumentato della parte radiante e non soltanto essere derivato da correlazioni di convenzione naturale.

Un articolo del 2013 pubblicato sulla rivista Energy and Buildings [23] tratta esattamente questo argomento nel caso di pannelli radianti a pavimento. Raccogliendo dati con strumenti ad alta precisione, gli autori hanno prodotto due diverse tabelle di dati che forniscono valori di coefficiente h_{totale} di scambio termico, acquisiti in condizioni di regime, al variare della temperatura di ingresso del fluido termovettore. I dati sono disponibili sia per il caso di raffrescamento che riscaldamento, com'è possibile vedere di seguito.

Tabella 4 – Tabelle dei valori sperimentali del coefficiente totale di scambio termico [W/m²K] nel caso di pannelli radianti a pavimento; caso raffrescamento e riscaldamento [23]

Table 1
Measured and calculated characteristics parameters for a heated radiant floor by volume flow rate A (1.0 dm³ min⁻¹) and volume flow rate B (3.3 dm³ min⁻¹).

Parameter	T_{supply} [°C]					
	30	35	40	45	50	55
Volume flow rate A (volume flow rate B) [dm ³ min ⁻¹]						
T_{return}	28.4 (29.4)	33.0 (34.2)	36.6 (38.7)	41.0 (43.3)	44.6 (48.0)	48.8 (52.3)
T_s	25.3 (26.2)	28.2 (29.3)	32.0 (32.1)	34.8 (35.5)	37.4 (38.6)	39.6 (42.4)
$T_{mr0.6}$	22.4 (23.2)	24.5 (25.3)	27.2 (26.6)	29.2 (29.2)	30.9 (31.5)	32.3 (34.4)
$T_{mr1.1}$	22.0 (22.9)	24.1 (24.8)	26.6 (25.8)	28.5 (28.3)	30.3 (30.6)	31.5 (33.6)
$T_{op0.6}$	22.4 (23.4)	24.5 (25.3)	27.0 (26.4)	29.0 (29.0)	30.9 (31.3)	32.1 (34.4)
$T_{op1.1}$	22.2 (23.1)	24.3 (25.0)	26.8 (26.0)	28.7 (28.5)	30.5 (30.8)	31.7 (33.8)
T_{AUST}	21.8 (22.7)	23.7 (24.3)	25.6 (25.1)	27.9 (27.3)	29.1 (29.5)	30.6 (32.6)
$T_{a0.1}$	21.9 (23.8)	24.9 (25.7)	27.6 (26.8)	29.6 (27.0)	31.4 (31.8)	32.7 (35.2)
$T_{a0.6}$	22.3 (23.5)	24.4 (25.2)	26.9 (26.3)	28.9 (28.8)	30.8 (31.2)	32.0 (34.3)
$T_{a1.1}$	22.4 (23.3)	24.4 (25.1)	26.9 (26.3)	28.9 (28.8)	30.7 (31.0)	31.9 (34.1)
$T_{a1.7}$	22.1 (23.0)	24.0 (24.8)	26.5 (25.8)	28.4 (28.2)	30.3 (30.5)	31.5 (33.6)
q_{total}	25.1 (26.4)	35.8 (38.2)	47.8 (54.8)	58.6 (65.2)	68.8 (78.0)	80.0 (88.4)
$h_{total0.6}$	8.7 (9.4)	9.5 (9.6)	9.7 (9.7)	10.1 (10.1)	10.5 (10.7)	10.8 (11.1)
$h_{total1.1}$	8.2 (8.5)	9.0 (8.9)	9.2 (9.1)	9.5 (9.4)	9.9 (10.0)	10.2 (10.4)
q_r	18.7 (18.9)	25.2 (27.8)	35.9 (39.7)	40.4 (47.7)	49.6 (54.8)	54.3 (60.2)
h_r	5.4 (5.4)	5.5 (5.6)	5.7 (5.7)	5.8 (5.8)	6.0 (6.0)	6.1 (6.2)
q_c	6.4 (7.4)	10.5 (10.4)	11.9 (15.1)	18.2 (17.4)	19.2 (23.2)	25.7 (28.2)
$h_{c0.1}$	1.9 (3.0)	3.2 (2.9)	2.7 (2.9)	3.5 (2.1)	3.2 (3.4)	3.7 (3.9)
$h_{c0.6}$	2.2 (2.8)	2.7 (2.5)	2.3 (2.6)	3.1 (2.6)	2.9 (3.1)	3.4 (3.5)
$h_{c1.1}$	2.2 (2.6)	2.7 (2.5)	2.3 (2.6)	3.1 (2.6)	2.9 (3.1)	3.3 (3.4)
$h_{c1.7}$	2.0 (2.3)	2.5 (2.3)	2.2 (2.4)	2.8 (2.4)	2.7 (2.9)	3.2 (3.2)

Table 2
Measured and calculated characteristics parameters for a cooled radiant floor by volume flow rate A (1.0 dm³ min⁻¹) and volume flow rate B (3.3 dm³ min⁻¹).

Parameter	T_{supply} [°C]				
	7.5	10.0	13.0	15.0	16.5
Volume flow rate A (Volume flow rate B) [dm ³ min ⁻¹]					
T_{return}	9.8 (9.1)	11.6 (11.2)	14.8 (13.9)	16.6 (15.7)	17.7 (17.1)
T_s	11.5 (11.5)	13.3 (13.5)	15.0 (15.1)	16.7 (17.4)	17.4 (17.4)
$T_{mr0.6}$	16.3 (16.5)	17.2 (18.9)	17.4 (17.9)	18.7 (20.6)	18.3 (18.3)
$T_{mr1.1}$	17.5 (17.1)	18.2 (19.5)	17.7 (18.5)	19.1 (21.4)	18.4 (18.6)
$T_{op0.6}$	16.3 (16.3)	17.4 (18.7)	17.4 (17.9)	18.7 (20.6)	18.5 (18.6)
$T_{op1.1}$	17.5 (17.3)	18.2 (19.7)	17.9 (18.5)	19.1 (21.4)	18.7 (18.9)
T_{AUST}	18.3 (18.0)	19.0 (20.5)	18.3 (18.9)	19.6 (21.7)	19.0 (19.1)
$T_{a0.1}$	15.4 (15.4)	16.3 (17.7)	16.8 (17.2)	18.1 (19.8)	18.2 (18.3)
$T_{a0.6}$	16.4 (16.2)	17.5 (18.5)	17.5 (17.9)	18.8 (20.7)	18.7 (19.0)
$T_{a1.1}$	17.6 (17.3)	18.3 (19.8)	18.0 (18.6)	19.2 (21.4)	19.0 (19.2)
$T_{a1.7}$	18.2 (17.8)	18.9 (20.2)	18.1 (18.8)	19.6 (21.9)	19.2 (19.4)
q_{total}	34.1 (32.8)	28.9 (35.4)	16.5 (19.4)	14.6 (22.5)	8.1 (8.9)
$h_{total0.6}$	7.0 (6.7)	7.1 (6.8)	6.9 (7.0)	7.1 (7.0)	7.2 (6.9)
$h_{total1.1}$	5.6 (5.6)	5.8 (5.7)	5.8 (5.7)	6.0 (5.7)	6.0 (5.7)
q_r	33.9 (32.3)	28.7 (35.0)	16.4 (19.3)	14.5 (22.1)	8.0 (8.8)
h_r	5.0 (4.9)	5.0 (5.0)	5.0 (5.1)	5.0 (5.2)	5.0 (5.1)
q_c	0.2 (0.5)	0.2 (0.4)	0.1 (0.1)	0.1 (0.4)	0.1 (0.1)
$h_{c0.1}$	0.1 (0.1)	0.1 (0.1)	0.1 (0.1)	0.1 (0.2)	0.1 (0.1)
$h_{c0.6}$	0.1 (0.1)	0.1 (0.1)	0.1 (0.0)	0.1 (0.1)	0.1 (0.1)
$h_{c1.1}$	0.0 (0.1)	0.0 (0.1)	0.0 (0.0)	0.0 (0.1)	0.1 (0.1)
$h_{c1.7}$	0.0 (0.1)	0.0 (0.1)	0.0 (0.0)	0.0 (0.1)	0.1 (0.1)

Avendo assunto come temperature di alimentazione del sistema di climatizzazione invernale 40°C ed estiva 15°C, considerando i valori di portata volumetrica relativi alla casistica B e i risultati a 1.1 m da terra (condizioni di riferimento per persone in piedi), si ottengono i seguenti coefficienti nel caso a pavimento.

Tabella 5- Valori sperimentali del coefficiente totale di scambio termico [W/m²K] adottati per i pannelli radianti a pavimento

Raffrescamento estivo	$h_{totale\ cool\ 1.1}$	5,7 W/m ² K
Riscaldamento invernale	$h_{totale\ heat\ 1.1}$	9,1 W/m ² K

Un articolo simile nei contenuti è stato pubblicato nel 2016 dalla rivista Applied Thermal Engineering [24], il quale scende nel dettaglio dei fenomeni legati ai pannelli a soffitto.

A differenza dell'articolo precedente, qui gli autori hanno considerato una sola casistica di portata volumetrica del fluido termovettore, pari alla casistica B precedente, la quale meglio rispecchia le mie condizioni di analisi dei terminali.

Tabella 6- Tabelle dei valori sperimentali del coefficiente totale di scambio termico [W/m²K] nel caso di pannelli radianti a soffitto; caso raffrescamento e riscaldamento [24]

Table 1

Measured and calculated characteristics parameters for a heated radiant ceiling.

	T_{supply} [°C]								
	25	30	35	40	45	50	55	60	65
ϵ [-]	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
T_s [°C]	20.87	23.06	24.55	26.32	27.48	29.09	30.66	31.86	31.74
$T_{mr0.6}$ [°C]	19.70	21.08	21.72	22.67	22.98	23.65	22.63	24.86	24.33
$T_{mr1.1}$ [°C]	19.62	20.96	21.56	22.48	22.75	23.40	22.34	24.57	24.00
$T_{op0.6}$ [°C]	19.52	20.76	21.33	22.19	22.39	23.02	22.74	24.03	23.46
$T_{op1.1}$ [°C]	19.58	20.85	21.45	22.34	22.57	23.22	22.97	24.26	23.73
$T_{a0.1}$ [°C]	19.45	20.55	20.90	21.70	21.70	22.25	22.65	22.85	22.35
$T_{a0.6}$ [°C]	19.35	20.45	20.95	21.70	21.80	22.40	22.85	23.20	22.60
$T_{a1.1}$ [°C]	19.55	20.75	21.35	22.20	22.40	23.05	23.60	23.95	23.45
$T_{a1.7}$ [°C]	19.80	21.20	21.90	24.95	28.30	23.95	24.75	25.25	24.70
q_{total} [W m ⁻²]	6.63	11.43	16.73	21.70	27.80	32.03	37.75	44.35	47.30
$h_{total0.6}$ [W m ⁻² K ⁻¹]	4.94	4.98	5.20	5.25	5.46	5.49	5.56	5.67	5.71
$h_{total1.1}$ [W m ⁻² K ⁻¹]	5.17	5.19	5.40	5.45	5.66	5.68	5.74	5.84	5.90
q_r [W m ⁻²]	6.49	12.05	17.63	24.34	28.91	34.83	41.32	46.14	49.67
h_r [W m ⁻² K ⁻¹]	5.21	5.31	5.36	5.43	5.47	5.54	5.59	5.64	5.61
q_c [W m ⁻²]	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$h_{c0.1}$ [W m ⁻² K ⁻¹]	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$h_{c0.6}$ [W m ⁻² K ⁻¹]	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$h_{c1.1}$ [W m ⁻² K ⁻¹]	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$h_{c1.7}$ [W m ⁻² K ⁻¹]	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Table 2

Measured and calculated characteristics parameters for a cooled radiant ceiling with ($\epsilon = 0.10$) and without ($\epsilon = 0.90$) aluminium foil.

	T_{supply} [°C]					
	7.5	10.0	12.5	15.0	10.0	
ϵ [-]	0.90	0.90	0.90	0.90	0.10	
T_s [°C]	17.85	18.47	19.15	20.20	16.74	
$T_{mr0.6}$ [°C]	19.46	19.80	20.34	21.04	18.24	
$T_{mr1.1}$ [°C]	19.50	19.84	20.34	21.00	18.26	
$T_{op0.6}$ [°C]	19.53	19.80	20.27	20.97	18.17	
$T_{op1.1}$ [°C]	19.50	19.77	20.27	21.00	18.33	
$T_{a0.1}$ [°C]	19.70	19.90	20.40	21.10	18.60	
$T_{a0.6}$ [°C]	19.60	19.80	20.20	20.90	18.10	
$T_{a1.1}$ [°C]	19.50	19.70	20.20	21.00	18.40	
$T_{a1.7}$ [°C]	19.40	19.60	20.20	21.00	18.20	
q_{total} [W m ⁻²]	16.50	13.00	10.35	7.35	8.50	
$h_{total0.6}$ [W m ⁻² K ⁻¹]	9.82	9.77	9.24	9.55	5.94	
$h_{total1.1}$ [W m ⁻² K ⁻¹]	10.00	9.92	9.24	9.19	5.35	
q_r [W m ⁻²]	10.92	8.48	7.57	5.72	1.17	
h_r [W m ⁻² K ⁻¹]	5.17	5.20	5.23	5.28	0.56	
q_c [W m ⁻²]	5.58	4.52	2.78	1.63	7.33	
$h_{c0.1}$ [W m ⁻² K ⁻¹]	3.02	3.14	2.22	1.81	3.94	
$h_{c0.6}$ [W m ⁻² K ⁻¹]	3.19	3.40	2.65	2.33	5.39	
$h_{c1.1}$ [W m ⁻² K ⁻¹]	3.38	3.65	2.65	2.04	4.42	
$h_{c1.7}$ [W m ⁻² K ⁻¹]	3.60	3.96	2.65	2.04	5.02	

Avendo assunto come temperature di alimentazione del sistema di climatizzazione ancora una volta invernale 40°C ed estiva 15°C, considerando i valori di portata volumetrica relativi alla casistica B e i risultati a 1.1 m da terra (condizioni di riferimento per persone in piedi), si ottengono i seguenti coefficienti nel caso a soffitto.

Tabella 7- Valori sperimentali del coefficiente totale di scambio termico [W/m²K] adottati per i pannelli radianti a soffitto [24]

Raffrescamento estivo	$h_{totale\ cool\ 1.1}$	9,19 W/m ² K
Riscaldamento invernale	$h_{totale\ heat\ 1.1}$	5,45 W/m ² K

È inoltre fornita una terza tabella contenente il flusso superficiale totale misurato e flusso radiante calcolato, con incertezza sperimentale, nel caso di pannelli radianti a soffitto. Se ne riporta di seguito una parte.

Tabella 8- Valori di flusso superficiale totale [W/m²] misurato e flusso radiante [W/m²] calcolato, con incertezza sperimentale, nel caso di pannelli radianti a soffitto [24]

Table 3
Measured total heat flux density and calculated radiant heat flux density with their experimental uncertainty for a heated radiant ceiling.

	T_{supply} [°C]						
	25	30	35	40	45	50	55
q_{total} [W m ⁻²]	6.63 ± 0.13	11.43 ± 0.23	16.73 ± 0.33	21.70 ± 0.43	27.80 ± 0.56	32.03 ± 0.64	37.75 ± 0.76
q_r [W m ⁻²]	6.49 ± 1.80	12.05 ± 1.97	17.63 ± 2.15	24.34 ± 2.36	28.91 ± 2.53	34.83 ± 2.72	41.32 ± 2.86

Volutamente non si è menzionato il caso dell'installazione a parete. Questa tipologia di pannello radiante non è stata trattata in quanto la manipolazione del coefficiente h_{totale} non poteva essere fatta solamente su superfici a scelta, bensì su tipologie di superfici. Per i pavimenti e i soffitti è stato possibile in quanto la quasi totalità era interessata dal fenomeno, ma imporre un coefficiente così diverso dal normale per tutte le superfici verticale avrebbe comportato un errore troppo elevato.

3.1.3. Modellazione

Nell'ambiente virtuale, i terminali sono stati modellati in modo diverso a seconda della stagione. In inverno, essi sono stati rappresentati come porzioni di superficie, sotto la quale si immagina siano stati posati i tubi contenenti fluido termovettore caldo/freddo a seconda delle necessità, in grado di emettere il 50% della loro energia sotto forma di flusso convettivo, corredato da un opportuno valore di coefficiente di scambio termico h_{totale} innalzato grazie alla componente radiativa. In estate, al contrario, essendo prevista una quota radiativa pari al 100%, non è possibile localizzarli puntualmente in ambiente.

Essendo nella realtà sistemi in grado di scambiare quasi esclusivamente per irraggiamento, per garantire un'adeguata aderenza con la realtà si è verificato che le velocità dell'aria non fossero superiori a 0.15 m/s. Una rappresentazione dei terminali in ambiente segue.

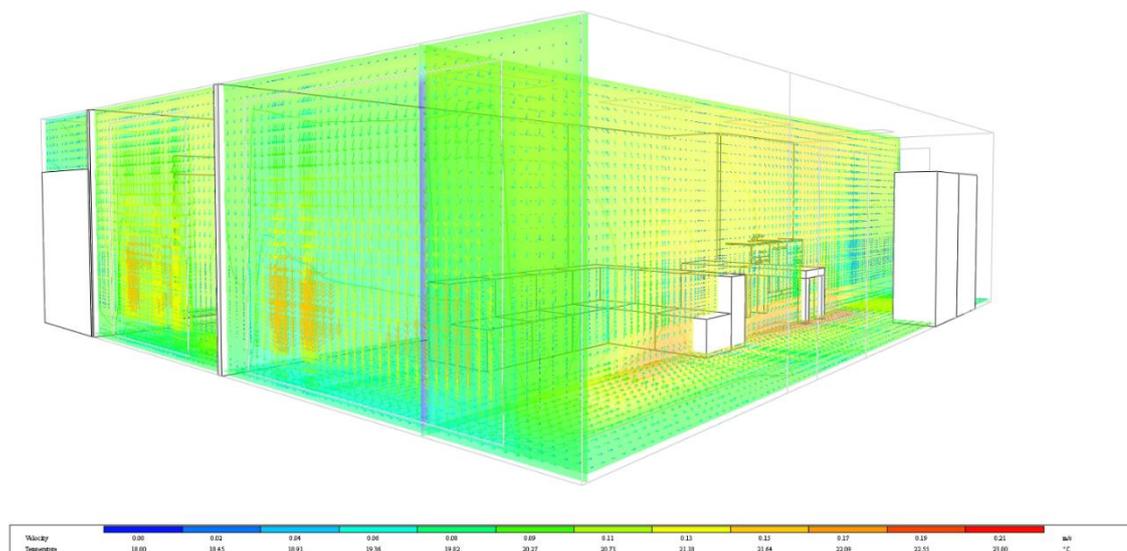


Figura 40-Raffigurazione dell'aspetto dei pannelli radianti a pavimento nell'ambiente virtuale: sovrapposizione del campo di temperatura (riempimento con colore relative linee iso-temperatura) e del campo vettoriale di moto della velocità dell'aria (vettori)

3.2. Ventilconvettori

3.2.1. Descrizione e stato dell'arte

I ventilconvettori (in inglese *fan coil units*) sono terminali a tutto ricircolo d'aria che permettono di cedere o assorbire calore dall'ambiente climatizzato mediante il meccanismo di convezione forzata. La qualità dell'aria e il controllo igrometrico non sono trattati dal terminale, che delega il lavoro all'UTA.

Strutturalmente sono costituiti da una parte dedicata allo scambio termico mediante batterie alettate, una parte relativa al moto dell'aria con ventilatori elettrici accompagnati a filtri dell'aria, un involucro esterno di contenimento e, nel caso di funzione di raffrescamento, una bacinella di raccolta condensa posta inferiormente alle batterie di scambio termico.

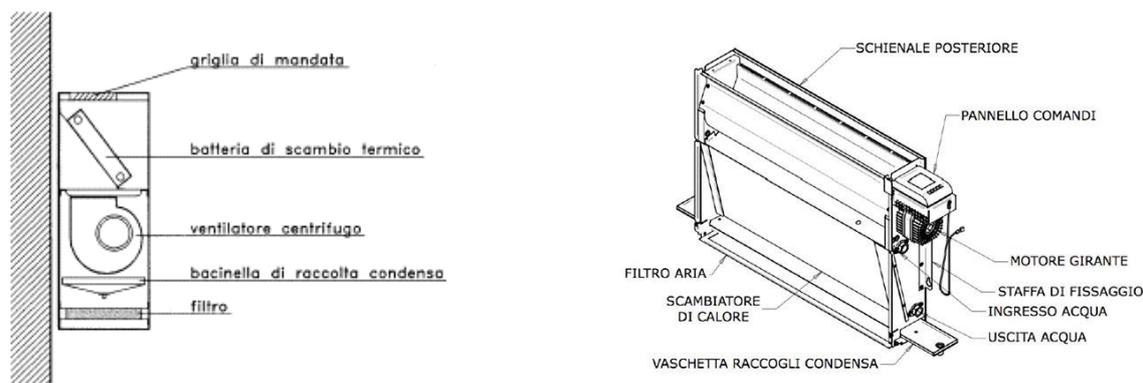


Figura 41- Strutture dei ventilconvettori 230[18]

In base alle caratteristiche del flusso d'aria si distingue in ventilconvettori a percorso libero o canalizzato. Nel caso canalizzato, in relazione alla struttura del sistema che li alimenta, i ventilconvettori possono essere suddivisi in ventilconvettori ad unità centrale, in cui l'elemento che agisce sulla temperatura è unico ed ha varie tubature che raggiungono i vari ambienti, oppure a più unità.

La tipologia centralizzata, seppur abbia un solo elemento in grado di imporre la temperatura di climatizzazione, può essere realizzata in una configurazione più flessibile tale da consentire una zonizzazione della climatizzazione dei locali. Mediante l'uso di serrande regolabili, al variare della portata di aria erogata si assisterà ad un diverso potere climatizzante dell'impianto in quel locale.

Classificandoli invece sulla base della loro collocazione all'interno del locale climatizzato, si può parlare di ventilconvettori a pavimento, soffitto o parete. Ogni variante è caratterizzata da vantaggi e svantaggi legati principalmente ai diversi tipi di moti dell'aria creati

o indotti che variano a seconda della posizione del terminale. Seguono rappresentazioni delle possibili installazioni di un ventilconvettore.

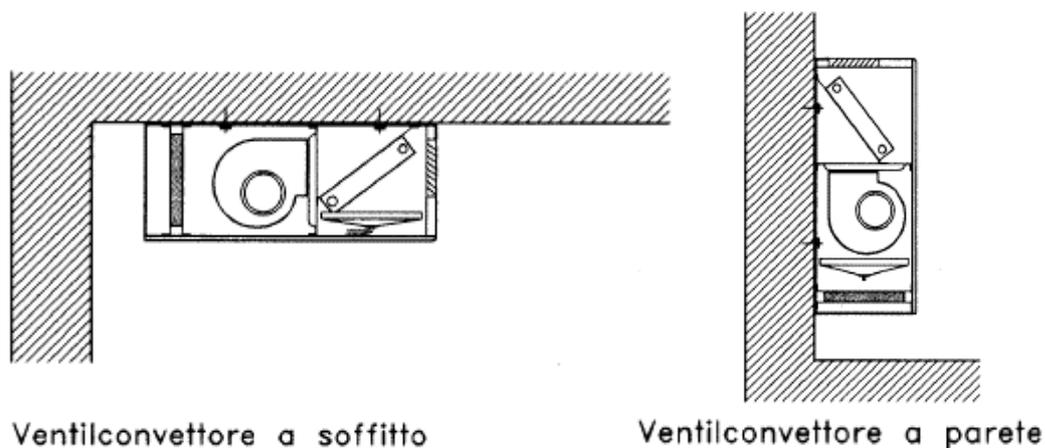


Figura 42- Ventilconvettori a soffitto e parete: dettagli interni [18]

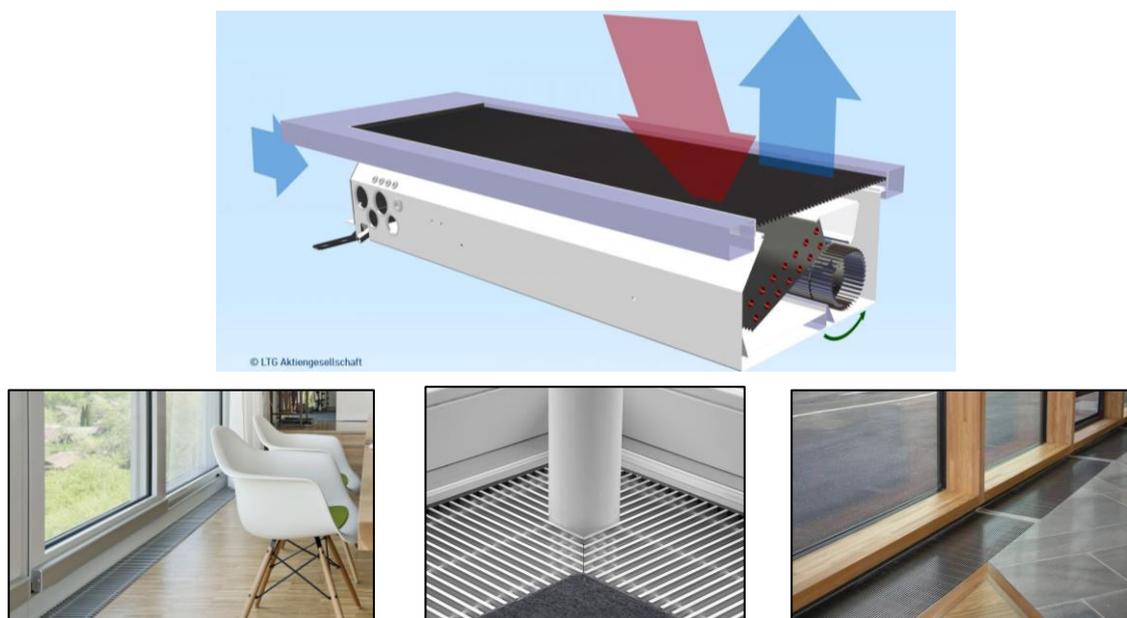


Figura 43- Ventilconvettori a pavimento: in alto schematizzazione e rappresentazione dei flussi di aria ed acqua all'interno del terminale, in basso tre esempi di installazione a pavimento con griglia continua, angolare e discontinua

Come visibile anche dagli esempi riportati in Figura 43, l'installazione di questi terminali è consigliata in corrispondenza di pareti esterne o finestre in modo tale da contrastare al meglio le correnti d'aria fredda, che si formano in corrispondenza di tali superfici, e ridurre la formazione di condensa superficiale interna attorno al corpo scaldante.

In generale ma soprattutto nella tipologia di ventilconvettore a pavimento, particolare attenzione andrà mostrata al filtro dell'aria posto all'ingresso del flusso da raffreddare o riscaldare: questo andrà pulito periodicamente a causa della stratificazione di materiale che inevitabilmente si depositerà sulla sua interfaccia.

In fase progettuale, per garantire una buona distribuzione del calore, è opportuno assicurare una portata d'aria dei ventilconvettori non inferiore a 3,5 volte il volume del locale da riscaldare. [18]

3.2.2. Considerazioni preliminari

I ventilconvettori diffondono il loro potere energetico all'ambiente attraverso l'immissione di aria calda o fredda, a seconda della stagione di riferimento. Questa caratteristica rende necessario fare alcune considerazioni che verranno poi riprese con maggiore cura e dettaglio nel Capitolo 5, interamente dedicato alla Ventilazione Meccanica Controllata.

Come descritto nel paragrafo precedente, i ventilconvettori possono presentarsi sia nella configurazione a percorso libero che canalizzato: nel caso canalizzato il flusso d'aria può o meno provenire dall'UTA, ma sicuramente non arriva dall'ambiente in cui esso è situato, mentre nel caso libero il terminale si serve proprio dell'aria del locale in cui è situato per operare.

È chiaro dunque come, in questo particolare caso, due dei punti cardine di questo studio, ovvero la scelta del terminale ottimale e la definizione della struttura della VMC più appropriata, siano profondamente interconnessi.

La scelta che è stata portata avanti è stata quella di tenere, almeno per quanto riguarda l'analisi del terminale, separati questi due concetti, continuando a modellare gli ambienti come fatto fino ad ora: impianto di climatizzazione e sistema di ricambio dell'aria separati. Questo modo di operare non solo ci consente di isolare l'elemento e vedere come reagisce alla presenza di altri moti dell'aria forzati, ma anche di comparare nel capitolo successivo i risultati con quelli ottenuti degli altri terminali.

3.2.3. Modellazione

Per la modellazione su Software IES VE, i ventilconvettori sono stati trattati come componenti in grado di provvedere al controllo termico ambientale attraverso l'immissione di aria senza creare ingombro in ambiente, sia nel caso di installazioni a pavimento che in controsoffitto.

Nella definizione della strategia di scambio termico con l'ambiente, questo terminale prevede la totalità dell'energia scambiata attraverso scambio termico di tipo convettivo, dunque è stata assegnata una quota pari allo 0% di quota radiante nella definizione del sistema di climatizzazione.

Sono stati modellati nell'ambiente virtuale come sovrapposizione di due elementi: il primo volto ad assicurare il moto dell'aria a convezione forzata mediante un ventilatore posto sul lato del terminale a contatto con la superficie su cui il terminale sarà installato (pavimento o soffitto), il secondo pari ad una sorgente di calore (o sorgente frigorifera, a seconda del periodo) in grado di emettere una ben precisa potenza termica. Di conseguenza, la portata d'aria che passa attraverso il volume emettitore entra in ambiente e rilascia calore (o potenza frigorifera) per convezione. Segue una raffigurazione dei terminali nell'ambiente virtuale.

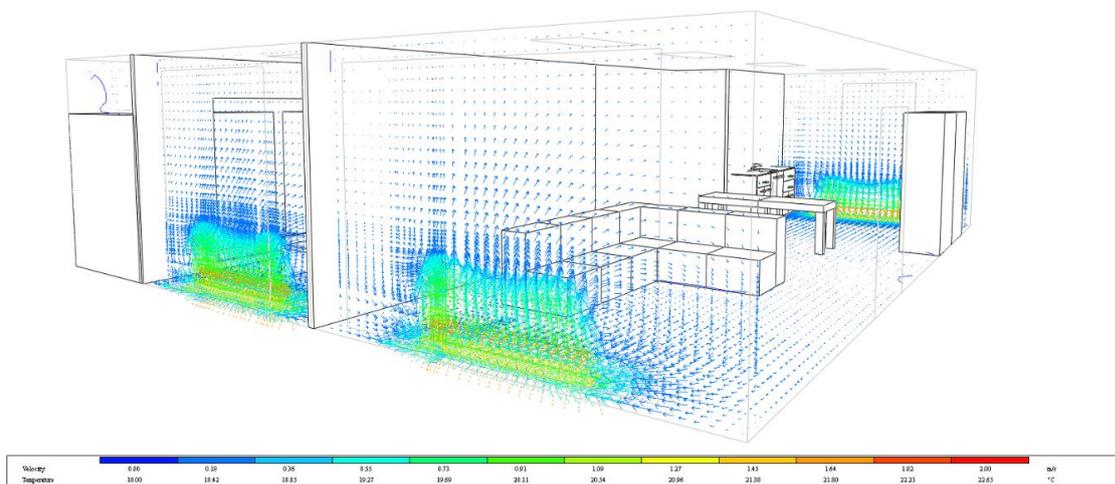


Figura 44- Raffigurazione dell'aspetto dei VCs a pavimento nell'ambiente virtuale

3.3. Radiatori

3.3.1. Descrizione e stato dell'arte

I radiatori sono corpi scaldanti in grado di cedere calore all'ambiente riscaldato per convezione naturale e irraggiamento. Questi terminali sono impiegati nel solo caso di controllo invernale della temperatura, sono alimentati ad acqua e non consentono un controllo igrometrico dell'ambiente.

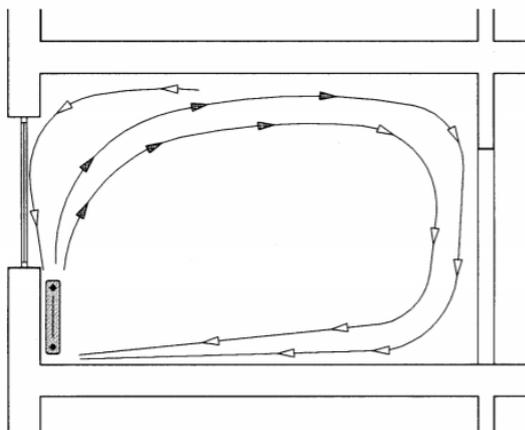


Figura 45- Moti convettivi indotti da un radiatore a parete [18]

Presenti in varie forme, tra cui a colonna piastra o lamelle, e materiali, spaziando tra ghisa acciaio alluminio e altre leghe, risultano essere una tecnologia altamente diffusa e adattabile alle diverse esigenze.



Figura 46- Da sinistra verso destra, tipologie di radiatori in 1) acciaio, 2) alluminio, 3) ghisa

Anche in questo caso, l'installazione è consigliata lungo le pareti esterne e sotto gli elementi finestrati non solo per i motivi esposti nella descrizione dei ventilconvettori ma anche per motivi di comfort: l'accoppiamento di questi corpi caldi a zone a temperatura superficiale minore permette migliori condizioni di benessere fisiologico limitando l'irraggiamento del corpo umano verso le zone fredde. [18]

La tipologia di radiatori che si modellerà e studierà all'interno di questo elaborato è quella *a bassa temperatura*, in cui al tradizionale elevato salto di temperatura operativa del fluido termovettore 90-75°C si preferisce il minore 55-50°C.

L'utilizzo di questa variante consente non solo la riduzione dei costi, ma anche dell'inquinamento, consentendo inoltre l'impiego in centrale termica di tecnologie in grado di raggiungere temperature non troppo elevate.

3.3.2. Modellazione

I radiatori sono stati modellati come piastre 3D, in grado dunque di creare un ingombro all'interno della zona abitativa, caratterizzati dall'aver temperatura superficiale che può essere assunta uniforme e costante.

Anche in questo caso nella modellazione del software è presente il limite dello scambio termico radiativo, che per questi terminali è stato assunto pari circa al 50% del totale, il quale verrà inserito in ambiente sotto forma di incremento delle temperature superficiali delle pareti.

Anche in questo caso la quota radiativa di scambio termico è importante, ma a differenza del discorso fatto precedentemente per i pannelli radianti, non è possibile agire sul valore di h_{totale} , dipendente sia dal coefficiente di scambio termico convettivo h_c che radiativo h_r .

Nel caso precedente difatti, essendo i tubi dei pannelli radianti installati sulla quasi totalità della superficie di riferimento, si è intervenuti proprio sul coefficiente di scambio termico di quell'intera superficie. Per i radiatori, dunque, la trattazione è purtroppo influenzata e limitata da questo limite del software in uso.

La loro creazione 3D avviene, a differenza degli altri terminali, direttamente nella sezione *Componenti* del software, in cui si definiscono forma, in questo caso parallelepipedo, e caratteristiche termofisiche, ovvero potenza termica emessa (quota convettiva), degli oggetti che si andranno ad inserire nello spazio.

Il risultato finale è quello di una piastra in grado di emettere una potenza termica che potrà essere definita di volta in volta nelle varie simulazioni. Segue una rappresentazione dell'aspetto del terminale nell'ambiente virtuale

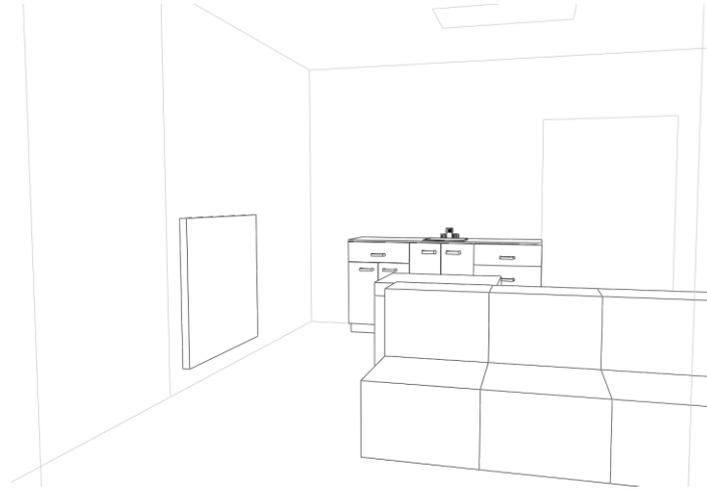


Figura 47- Raffigurazione dell'aspetto dei radiatori posti a parete nell'ambiente virtuale

3.4. Terminali ibridi

3.4.1. Descrizione e stato dell'arte

L'idea di un terminale ibrido nasce dall'esigenza di avere maggiore flessibilità di operazione, efficienza energetica e massimizzazione dello stato di comfort nell'ambiente climatizzato.

Una delle possibili configurazioni per massimizzare i vantaggi e ridurre gli svantaggi di tecnologie già note è quella del gruppo AERMEC che con il suo OMNIA RADIANT presenta sul mercato un elemento dal funzionamento a ciclo annuale in grado di operare secondo quattro modalità **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** Soluzione molto simile sul mercato è fornita anche dal gruppo OLIMPIA SPLENDID con il suo Bi2 Air SLR Air inverter. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**

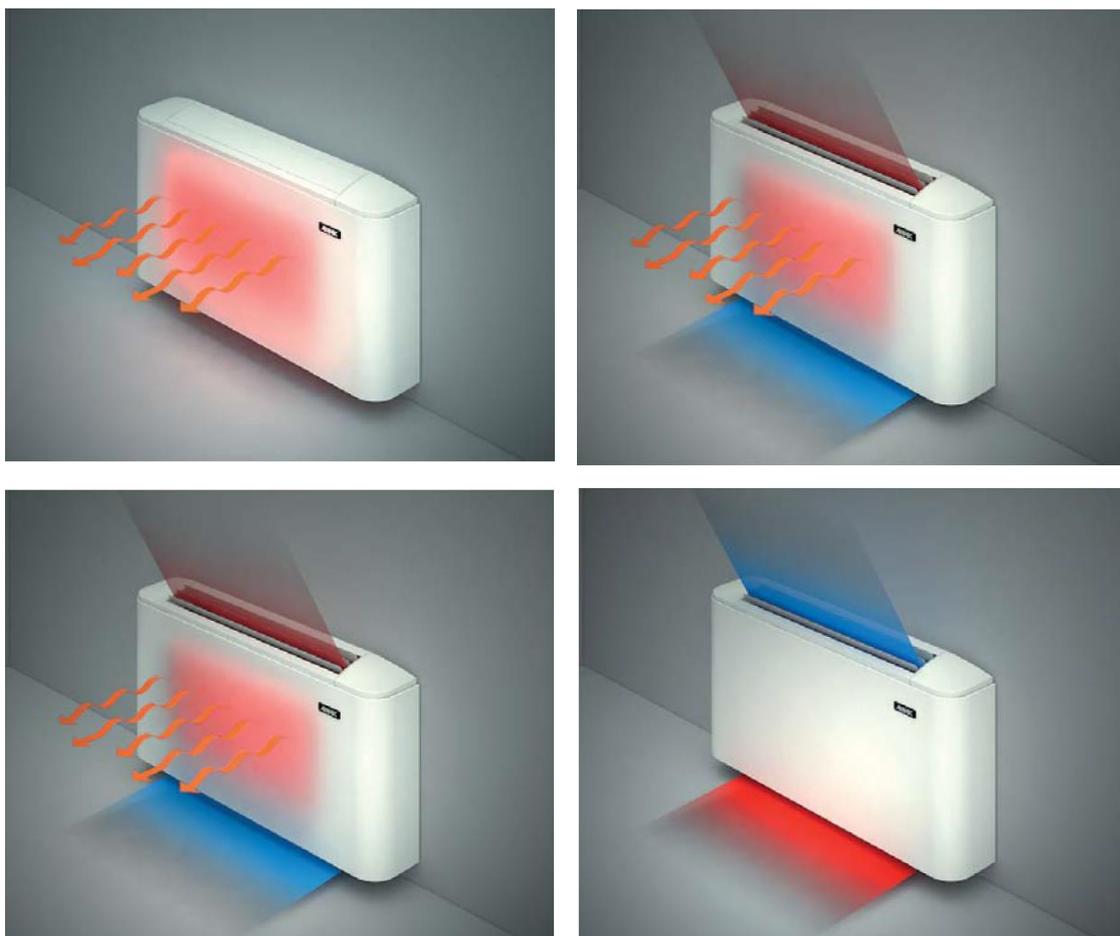


Figura 48- Quattro modalità di funzionamento del terminale ibrido AERMEC OMNIA RADIANT -
Da sinistra verso destra e dall'alto verso il basso: Radiante, Radiante + Convezione Naturale, Radiante + Convezione Forzata, Convezione Forzata (raffrescamento) **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**



Figura 49-Terminale ibrido di OLIMPIA SPLENDID: Bi2 AirnSLR Air inverter **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**

Ibrido tra un radiatore a piastre ed un ventilconvettore, questo terminale è in grado di lavorare sia d'estate, attraverso la sola modalità a convezione forzata, che d'inverno. La performance invernale è caratterizzata da un'elevata flessibilità in quanto permette di usufruire o meno sia della convezione che della componente radiante dell'elemento.

Il riscaldamento a sola piastra radiante consente una modalità di operazione di massima silenziosità e risparmio energetico, in grado di permettere la massima conversione di energia proveniente dal fluido termovettore in flusso termico irraggiato. A questo funzionamento si può anche associare una parte di scambio termico convettivo qualora la testata a tripla aletta superiore venga lasciata aperta: in questa situazione si crea difatti uno spontaneo moto ascendente dell'aria all'interno dell'apparecchio che consente di erogare aria calda dalla sua sommità.

Nel caso in cui risulti necessario un intervento di riscaldamento più importante, è possibile usufruire del meccanismo che accoppia piastra radiante e convezione forzata. Questa modalità di funzionamento consente un più rapido raggiungimento della temperatura desiderata dall'utente in tutto l'ambiente sfruttando importanti spostamenti di aria.

La sola componente di scambio termico per convezione forzata tra fluido termovettore presente nei tubi e aria ambientale è utilizzata principalmente d'estate, a cui ad un controllo termico è possibile associare anche quello igrometrico grazie all'azione di deumidificazione.

Il grande vantaggio è osservabile nel risparmio energetico, in quanto l'abbinamento piastra radiante-batteria di scambio termico alettata garantisce riscaldamento ambientale con temperature del fluido termovettore (acqua) più basse di un radiatore tradizionale, passando dai circa 65°C ai 45°C. nel caso di utilizzo accoppiato con pompa di calore, questa differenza di temperatura richiesta dall'apparecchio consente un notevole aumento di efficienza energetica.

Un altro aspetto a cui guardare è la qualità dell'aria ricircolata in modalità ibrida che, a differenza della soluzione a radiatore tradizionale, passa attraverso un sistema di filtraggio in grado di catturare le particelle di polvere e sporco più grossolane impedendone lo stazionamento nel locale.

3.4.2. Modellazione

In fase di modellazione, è stato necessario definire preliminarmente due delle quattro diverse modalità di funzionamento da utilizzare rispettivamente per riscaldamento e raffrescamento per lo studio del moto dell'aria e della distribuzione della temperatura nell'ambiente.

Essendo che in modalità puramente radiante o radiante accoppiata a convezione naturale il comportamento era analogo o strettamente riconducibile a quello osservato nel caso di radiatori tradizionali, per la casistica invernale si è optato per la soluzione a scambio termico radiativo accoppiato a convezione forzata.

Nel caso estivo invece, seppur la strategia di raffrescamento sfruttando la sola tipologia di scambio termico per convezione forzata fosse stata precedentemente analizzata con i ventilconvettori, la diversa posizione del terminale in ambiente, posto a parete, ha fatto sì che si studiasse la sua performance anche nel caso di raffrescamento.

Nonostante ciò, va evidenziato ancora una volta come la flessibilità di operazione tra i due estremi di funzionamento a puro radiatore e ventilconvettore è il grande vantaggio di questo terminale, di cui si terrà conto in sede di valutazioni finali.

Per quanto riguarda la modellazione all'interno del simulatore, si è cercato di restare più fedeli possibile alla realtà modellando un elemento capace di scambiare energia con l'ambiente sia con componente convettiva che radiativa, in questo caso assunta pari al 20% del totale. L'errore sul valore del coefficiente totale di scambio termico in questo caso risulterà molto ridotto rispetto ai radiatori.

Si è dunque creato un componente 3D, raffigurato nella figura seguente, composto da due parti ben distinte:

- III. Parte esterna, definisce non solo le dimensioni del terminale in ambiente ma è anche dotata inferiormente del ventilatore in grado di provocare il moto dell'aria all'interno del pezzo;

- IV. Parte interna, incarnata dalla piastra emettitrice, sorgente di calore calda o fredda, da cui l'aria aspirata inferiormente ed espulsa superiormente trae energia.

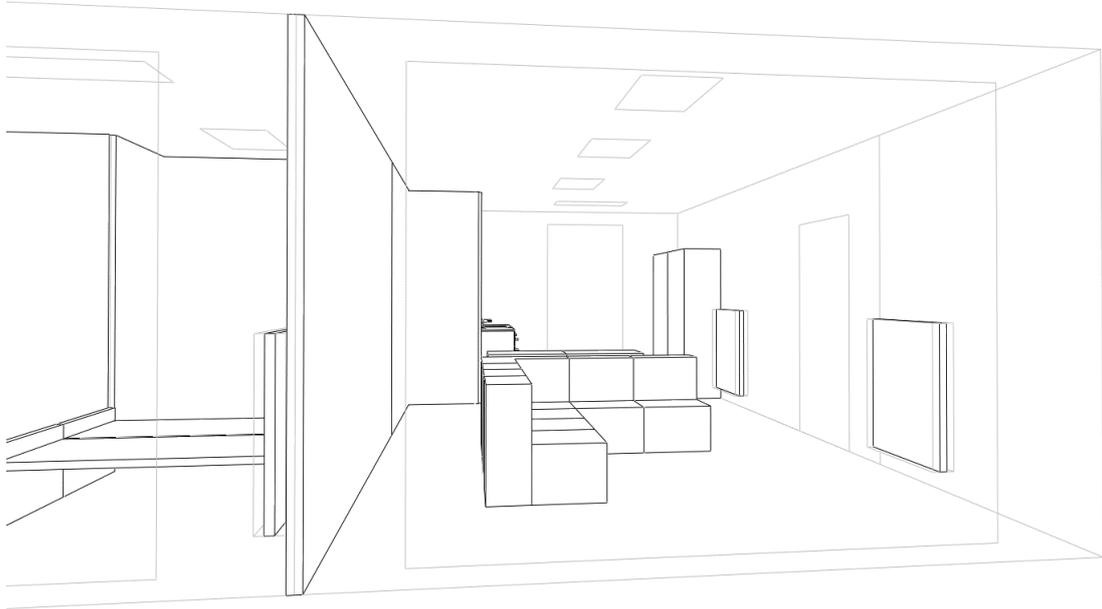


Figura 50- Rappresentazione dell'aspetto dei terminali ibridi posti a parete nell'ambiente virtuale

Capitolo 4: Comparazione risultati dell'analisi CFD– Profili di temperatura

4.1. Introduzione

In questo capitolo si discuteranno nel dettaglio e si confronteranno le diverse soluzioni per i terminali di climatizzazione descritte ed introdotte nei capitoli precedenti, focalizzandosi in particolare sulla distribuzione di temperatura.

Per quanto riguarda la VMC, seppur la sua trattazione non sarà trattata nel dettaglio, si è deciso di tenerne conto inserendo all'interno degli ambienti, a soffitto, diffusori ed estrattori al fine di rendere più veritiera l'analisi. Difatti, eseguire uno studio per valutare il comfort dell'ambiente senza includere tutti gli elementi che saranno poi effettivamente presenti renderebbe i risultati poco attendibili. Lo stesso discorso vale per gli ingombri e gli ostacoli ai moti dell'aria nella stanza, il più delle volte identificati da grandi elementi di arredo, che sono stati modellati ed inseriti negli alloggi a loro volta.

Per quanto concerne il confronto tra le diverse tipologie, particolare attenzione sarà prestata alle seguenti casistiche:

- Prossimità di elementi finestrati e muri perimetrali, elementi caratterizzati da temperatura superficiale minima in ambiente;
- Prossimità di diffusori ed estrattori, elementi che contribuiscono a creare velocità locali di temperatura;
- Zone scarsamente o non influenzate affatto dagli elementi descritti sopra;

Anche se accennato nei capitoli precedenti, è bene specificare che i disimpegni e i corridoi non sono stati sede né di terminali dell'impianto di riscaldamento né di quello di raffrescamento: il loro spazio si intende difatti temperato dalle zone adiacenti trattate come camere da letto o zone giorno. Per quanto riguarda i servizi igienici invece, sono stati riscaldati ma non raffrescati, per cui figureranno come zona climatizzata in inverno ma non in estate. Al loro interno sono stati installati anche terminali la cui posa è sconsigliata in bagno, come i terminali ibridi, per esigenze di localizzazione delle sorgenti di calore in modo proporzionato alla superficie degli ambienti e secondo le caratteristiche definite a valle della simulazione. La loro trattazione comunque sarà solamente marginale in quanto ambienti particolari che richiedono un discorso a parte.

L'impianto di climatizzazione invernale prevede per la temperatura media dell'aria (Tair) un valore minimo da garantire in ambiente pari a 19°C e nessun limite massimo. Il contributo degli occupanti e, in situazioni di scarsa illuminazione esterna, il contributo del sistema di illuminazione possono dunque comportare situazioni di *overheating*, ovvero situazioni in cui la temperatura media dell'aria risulti superiore alla minima richiesta. Nel caso specifico, avendo scelto come momento di analisi il giorno feriale del 7 gennaio alle ore 18:30, la temperatura interna dell'aria sarà mediamente superiore alla minima richiesta.

L'impianto di climatizzazione estivo prevede per la temperatura media dell'aria (Tair) un valore massimo pari a 25°C e nessun limite minimo. Nel caso di contributo degli occupanti e, in situazioni di scarsa illuminazione esterna, il contributo del sistema di illuminazione possono creare situazioni in cui la temperatura media dell'aria risulti superiore alla minima richiesta. Nel caso specifico, avendo scelto come momento di analisi il giorno feriale del 24 luglio alle ore 11:30 (appartamento a est) e 15:30 (appartamento a ovest e sud), la temperatura interna dell'aria potrà eccedere localmente la massima dichiarata.

In estate, inoltre, le tipologie di terminali a disposizione del sistema di climatizzazione diminuiscono, in quanto i radiatori non possono essere impiegati, e di conseguenza rimangono i ventilconvettori, i pannelli radianti e i terminali ibridi. Per questi ultimi, come anticipato nel Capitolo 3, l'assetto estivo prevede il solo funzionamento da *fan coil* a parete, dunque si giungerà ad una situazione molto vicina a quella dei ventilconvettori.

4.2. Caso invernale

4.2.1. Radiatori

I radiatori sono il terminale per impianto di riscaldamento più diffuso. Di forme, materiali e dimensioni variabili, soprattutto nelle recenti varianti che permettono l'alimentazione anche a basse temperature, risultano versatili, economici e di facile installazione. La tipologia di radiatori considerata e modellata, come detto nel capitolo precedente, è quella *a bassa temperatura*. Caratterizzato da un salto termico di 5°C, con acqua in mandata ad una temperatura di progetto a 55°C, l'elemento sarà caratterizzato da una temperatura superficiale di 52.5 °C.

Il loro impiego in ambienti di piccola dimensione, come i bagni, è tutt'ora diffusissimo, mentre in ambienti di dimensioni maggiori spesso vengono preferiti altri terminali. Come anticipato nel Capitolo 3 si prediligono le pareti esterne, sebbene sia possibile e, a volte, necessaria l'installazione anche in quelle interne, come ad esempio in piccoli ambienti aventi la superficie esterne in gran parte finestrata (es bagni).

Nelle figure che seguono si è impostato come intervallo del gradiente cromatico per la visualizzazione dei risultati 18.5-24. Anche se localmente la temperatura delle superfici può essere minore (superfici trasparenti) o maggiore (superfici dei corpi scaldanti), questo intervallo è risultato il migliore per commentare lo stato dell'ambiente occupato.

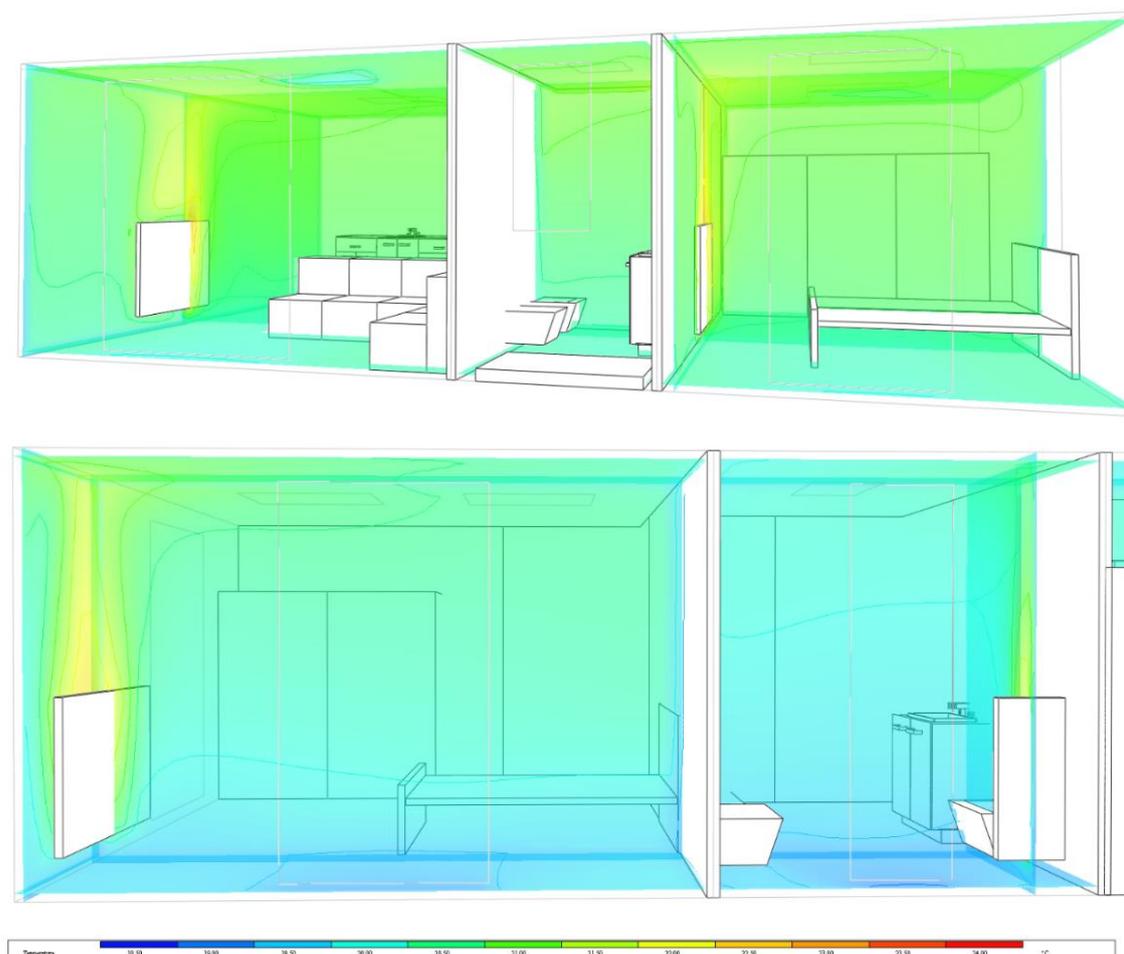


Figura 51- Radiatori: campo di temperatura in ambienti di ridotte dimensioni; 4A2 sopra, 12A1 sotto

La percentuale di flusso termico scambiato per radiazione aiuta a mantenere alta le temperature delle pareti, consentendo di ottenere una distribuzione verticale di temperatura più che accettabile: seppur vi sia giustamente un minimo gradiente termico per condizioni fisiche legate alla diversa densità del fluido aria, questo rimane all'interno degli 0.5°C in ogni punto della zona abitata.

Nel caso dell'alloggio 4.A2, gli ambienti di ridotte dimensioni esposti su un solo lato sono caratterizzati da dispendi energetici abbastanza bassi. In questo caso, la posa dei terminali non è quella ottimale, in quanto sono installati sulle pareti che affacciano verso altri alloggi o interne e non verso pareti esterne, più fredde.

Nel caso dell'alloggio 12.A1, l'ambiente analizzato, quello della camera 2, risulta esposto su due lati, entrambi finestrati: nord, dove è installato il terminale, e ovest. In questo caso, la posa dei terminali è ottima: si nota facilmente come in questo secondo caso il terminale riesca a mitigare la presenza di due superfici a temperatura minore rispetto alle altre.

Come atteso, seppur si parli di radiatori a bassa temperatura, la temperatura dell'aria nelle immediate vicinanze del terminale risulta di qualche grado superiore rispetto alla media ambientale, ma la variazione rimane contenuta a 23°C.

La variazione orizzontale di temperatura è caratteristica inevitabile di questi impianti, e derivata dal fatto che il corpo scaldante è di dimensioni ridotte ed esposto direttamente all'aria ambientale, ma in questo caso specifico, in cui le temperature superficiali delle pareti sono elevate e in cui gli ambienti non sono ampi, rimane contenuta e assolutamente accettabile.

In generale, la valutazione del comportamento dei radiatori all'interno di questi ambienti piccoli e riparati è ottima, in quanto non solo si riescono ad ottenere le condizioni termiche adatte in ogni punto dell'alloggio, ma questo avviene con piccoli gradienti verticali.

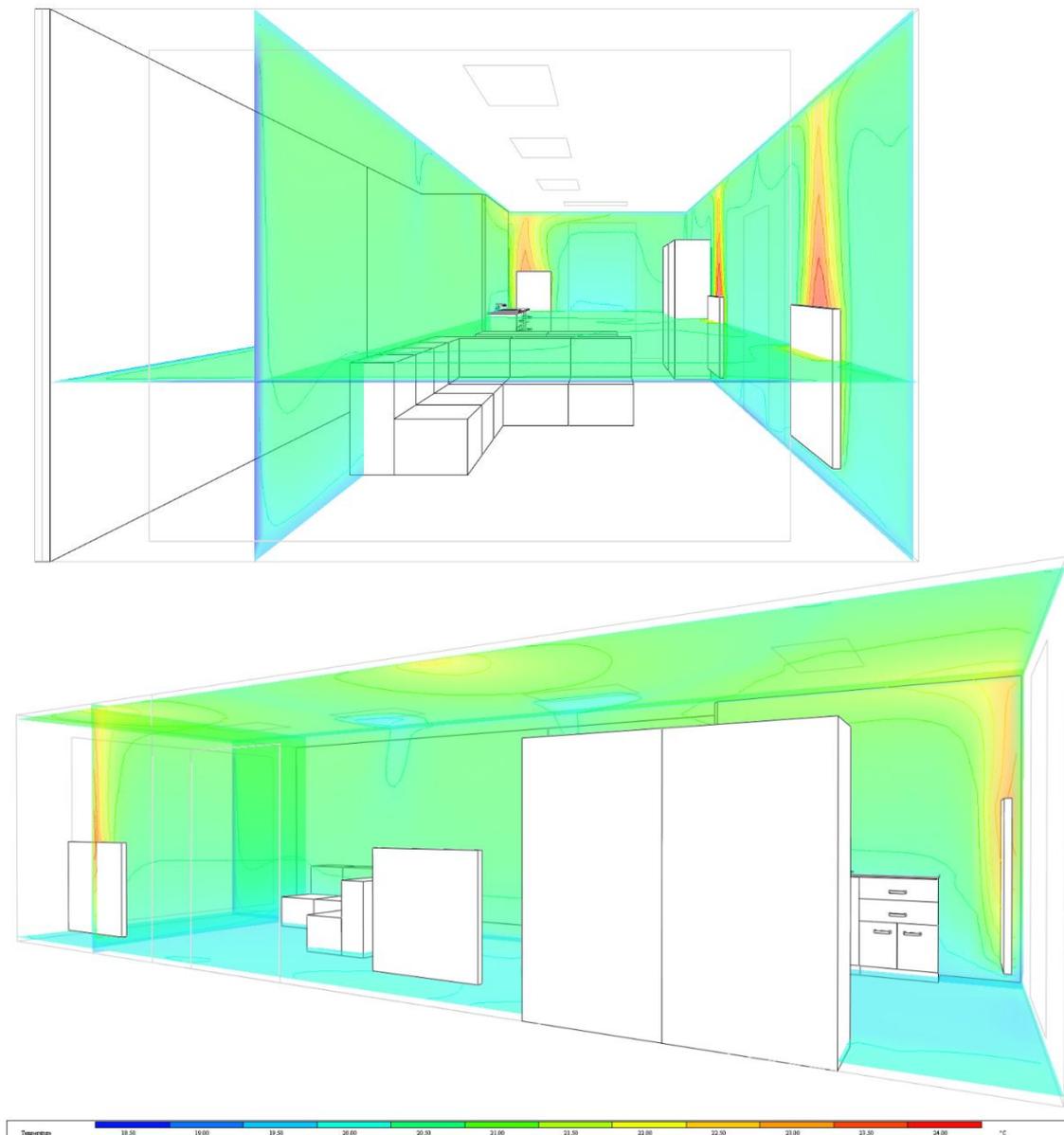


Figura 52- Radiatori: campo di temperatura in ambienti di grandi dimensioni; 12A1

Spostando l'attenzione verso un ambiente del tutto differente dai due precedenti, si procede con il commento della zona giorno dell'alloggio 12.A1, caratterizzata da un'ampia metratura sviluppata in lunghezza da sud, dove troviamo un importante elemento finestrato che affaccia sul balcone, a nord, anche qui con un elemento finestrato ma di dimensioni minori.

Complessivamente si tratta dunque di un ambiente di grandi dimensioni, esposto per pochi m² verso l'ambiente esterno su due lati, mentre il terzo affaccia sul vano scale, luogo in cui non avviene il controllo della temperatura ma pur sempre chiuso e riparato.

La percentuale di flusso termico scambiato per radiazione aiuta a mantenere alta le temperature delle pareti, seppur sia molto netta la differenza tra quelle interne e quelle esterne, soprattutto se si considera l'involucro trasparente. In questo contesto, la posizione dei terminali in ambiente gioca un ruolo principale in quanto, se fossero stati installati lungo le pareti interne, si avrebbe avuto uno scenario completamente diverso.

In questa configurazione ottimale, che tiene anche e soprattutto conto della geometria dell'ambiente, i due radiatori principali per potenza termica emessa sono posizionati lungo il lato lungo, il quale affaccia quasi interamente verso il vano scale e ascensore. La restante quota termica da inserire in ambiente è localizzata lungo il lato corto che volge a nord, in modo da fornire più energia laddove è necessario.

Seppur il posizionamento dei terminali in ambiente sia quello volto a minimizzare gli svantaggi legati a questa tecnologia di riscaldamento, risulta ancora importante sia il gradiente termico che si crea nel piccolo spazio tra i corpi scaldanti e la superficie degli elementi finestrati, sia il gradiente orizzontale di temperatura presente nella zona occupata.

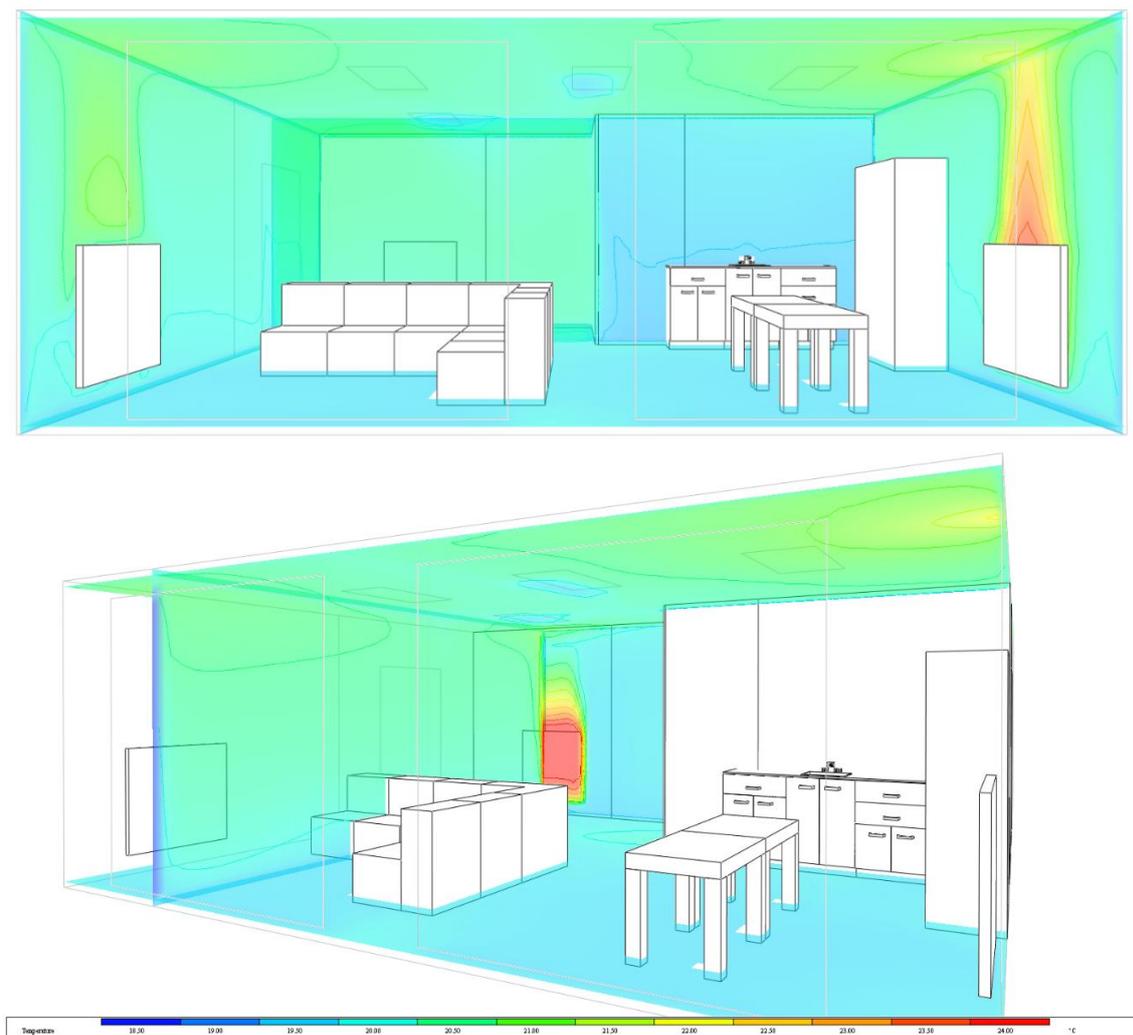


Figura 53- Radiatori: campo di temperatura in ambienti di grandi dimensioni; 9A3

Come ultimo esempio, troviamo la zona giorno dell'alloggio 9.A3, caratterizzata da un'ampia metratura sviluppata su una base quasi quadrata. Esposto verso l'esterno su due lati, sud ed est, si tratta complessivamente di un ambiente di grandi dimensioni fortemente influenzato dalle condizioni esterne e dai ponti termici; il terzo lato affaccia parzialmente sul vano scale e parzialmente verso un altro alloggio.

La percentuale di flusso termico scambiato per radiazione aiuta a mantenere alta le temperature delle pareti, seppur sia molto netta la differenza tra quelle interne e quelle esterne, soprattutto se si considera la grande superficie trasparente a sud.

In questa configurazione, che tiene anche e soprattutto conto della geometria dell'ambiente, i radiatori hanno tutti e tre la stessa potenza termica: uno è installato lungo la parete esterna, uno su quella interna, uno sulla parete che affaccia sul vano scala. Questo

alloggio rappresenta un ottimo esempio di come la teoria e la pratica a volte non coincidano e si debba scendere a compromessi.

L'influenza degli elementi finestrati e dei ponti termici è presente e crea disomogeneità, così come la presenza di copri scaldanti a temperatura maggiore rispetto a quella ambiente, ma complessivamente l'azione combinata dei tre terminali posti in modo da contrastarne gli effetti, rende l'ambiente abbastanza omogeneo nella parte centrale.

Guardando in particolare la prima immagine, osservando il soffitto, si nota come l'azione scaldante dei due radiatori posti in prossimità delle finestre sia mirata a mitigare la zona fredda che naturalmente si creerebbe in loro assenza.

Soffermandosi invece sulla seconda immagine, si nota l'accumulo di calore indesiderato che si crea anteriormente al terminale installato lungo la parete interna, effetto assolutamente indesiderato in quanto l'obiettivo è quello di creare un ambiente più possibile omogeneo e senza zone di calore/freddo localizzate.

4.2.2. Pannelli radianti

I pannelli radianti sono una tecnologia che ha subito una grande evoluzione sia nella tipologia di posa, che nei materiali, che nelle temperature operative. Nella pratica, si è considerata la loro installazione in alloggio in modo da garantire la massima omogeneità di flusso irradiato.

Il loro impiego in ambienti di piccola dimensione, come i bagni, è soggetto alla limitazione del massimo flusso erogabile in ragione della massima temperatura superficiale della parete attiva per non creare situazioni di discomfort locale. Ideali negli ambienti caratterizzati da ampie metrature, tendono a distribuire in modo meno uniforme il flusso termico per irraggiamento negli ambienti piccoli o dalle geometrie non regolari, come visibile dai grafici che seguono.

Nelle figure che seguono si è impostato come intervallo del gradiente cromatico per la visualizzazione dei risultati 19-24. Anche se localmente la temperatura delle superfici può essere minore (superfici trasparenti) o maggiore (superfici dei corpi scaldanti), questo intervallo è risultato il migliore per commentare lo stato dell'ambiente occupato.

Si comincia con l'analisi della tipologia di posa a pavimento.

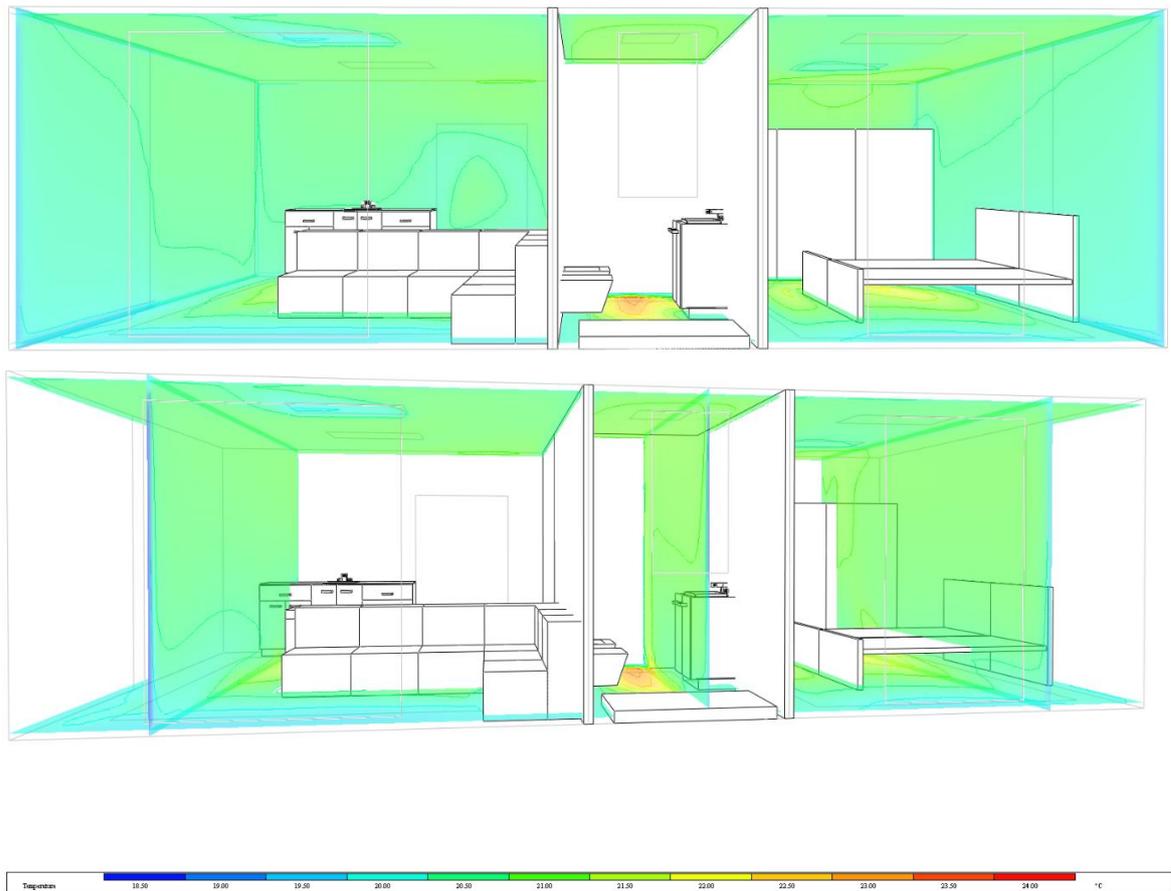


Figura 54- Pannelli radianti pavimento: campo di temperatura in ambienti di ridotte dimensioni; 4A2

La percentuale di flusso termico scambiato per radiazione, che per il caso invernale è la medesima per radiatori e pannelli radianti, permette di ottenere alte temperature delle pareti. Come anticipato, in questa prima configurazione la superficie attiva è quella del pavimento. Nella prima immagine si vede distintamente come la temperatura superficiale delle pareti sia tanto maggiore quanto più si è distanti dagli elementi più freddi come finestre e porta di ingresso.

Come atteso, seppur si parli di terminali a bassa temperatura, la temperatura dell'aria nelle immediate vicinanze della superficie attiva risulta di qualche grado superiore rispetto alla media ambientale, ma la variazione rimane contenuta. In particolare, accumuli di calore si hanno in quelle zone in cui lo scambio radiativo con una o più superfici inattive è ostacolato, come ad esempio sotto i letti o i tavoli.

In generale, la valutazione del comportamento dei pannelli radianti a pavimento all'interno di questi ambienti piccoli e riparati è buona, in quanto si riescono ad ottenere le condizioni termiche di set point (e oltre) in ogni punto dell'alloggio, con però la presenza di locali accumuli di calore indesiderati.

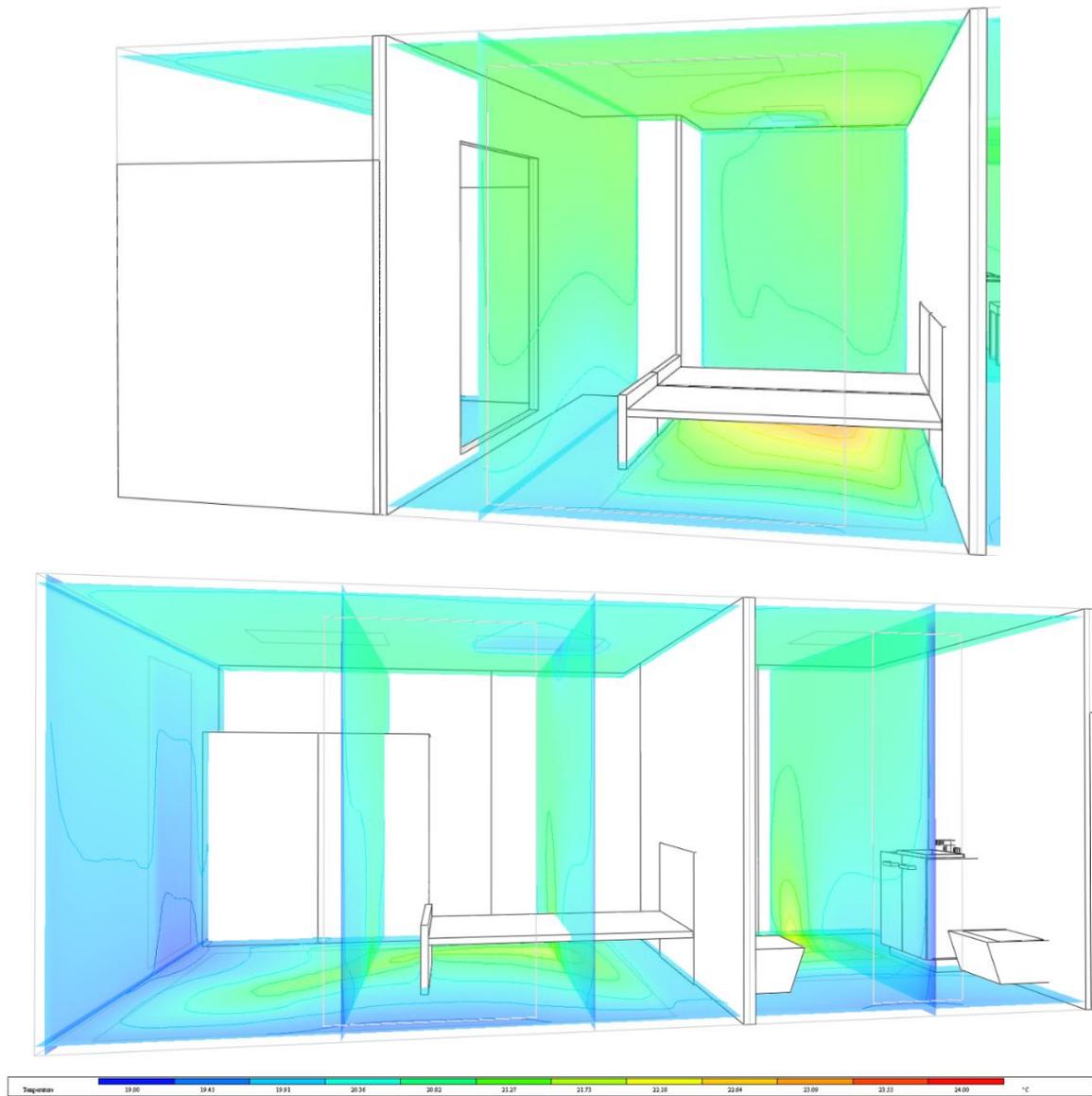


Figura 55- Pannelli radianti pavimento: campo di temperatura in ambienti di ridotte dimensioni; 12A1

Si procede con il commento delle due camere dell'alloggio 12.A1.

La camera 1, in alto nella figura, è composta da due zone, notte e cabina armadio, comunicanti, ed ha una superficie leggermente superiore all'altra. Doppia esposizione esterna verso sud, con grande elemento finestrato, ed ovest, dal lato della cabina armadio, vede l'installazione dei pannelli radianti nella sola zona notte.

La camera 2, in basso, è anch'essa esposta su due lati, entrambi finestrati: nord ed ovest. Diversa per metratura e conformazione, questa seconda camera è maggiormente esposta alle condizioni climatiche esterne in quanto non beneficia dell'azione protettiva del balcone.

Risulta ancora una volta molto netta la differenza tra le superfici verticali interne ed esterne, soprattutto se si considera l'involucro trasparente della camera 2 esposta a nord.

In questa tipologia impiantistica, la posizione dei terminali in ambiente come una camera da letto è un'arma a doppio taglio: seppur da una parte non vi siano ingombro né temperature superficiali locali molto elevate, dall'altro lato il vincolo di avere come superficie attiva il pavimento quando uno degli elementi principali d'arredo è il letto fa necessariamente incorrere in effetti indesiderati.

È interessante e importante sottolineare come nella camera 1, in cui la quasi totalità della superficie attiva è posta in prossimità del letto, mostri un accumulo di calore sotto l'elemento di arredo, luogo in cui questa è assolutamente inutile e indesiderata. Complessivamente però, anche come conseguenza di una migliore posizione all'interno dell'involucro edilizio, la distribuzione di temperatura all'interno dell'ambiente è ottima.

Analizzando nello specifico la seconda camera invece, si nota subito come la diversa posizione ed esposizione determini una sostanziale differenza nelle temperature superficiali interne delle pareti. L'aria che lambisce queste ultime difatti risulta molto inferiore rispetto a quella che lambisce le superfici interne, con conseguente gradiente termico verticale ed orizzontale non trascurabile.

Complessivamente, tirando le somme, possiamo affermare che i pannelli radianti a pavimento nelle zone notte caratterizzate da limitate metrature forniscono buone performance seppur incorrono nel limite di perdere una buona parte del loro potere termico a causa dei letti, che tendono a schermare ed impedire il corretto scambio di calore con le pareti inattive, e seppur non riescano a contrastare sorgenti di freddo molto localizzate.

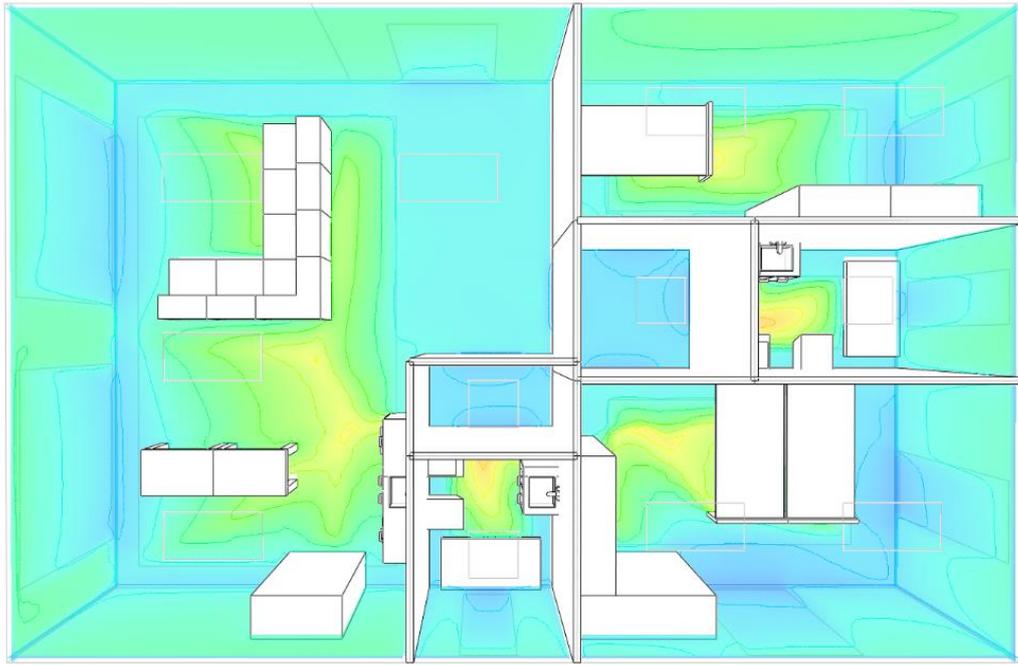


Figura 56- Pannelli radianti pavimento: campo di temperatura in alloggio 9A3

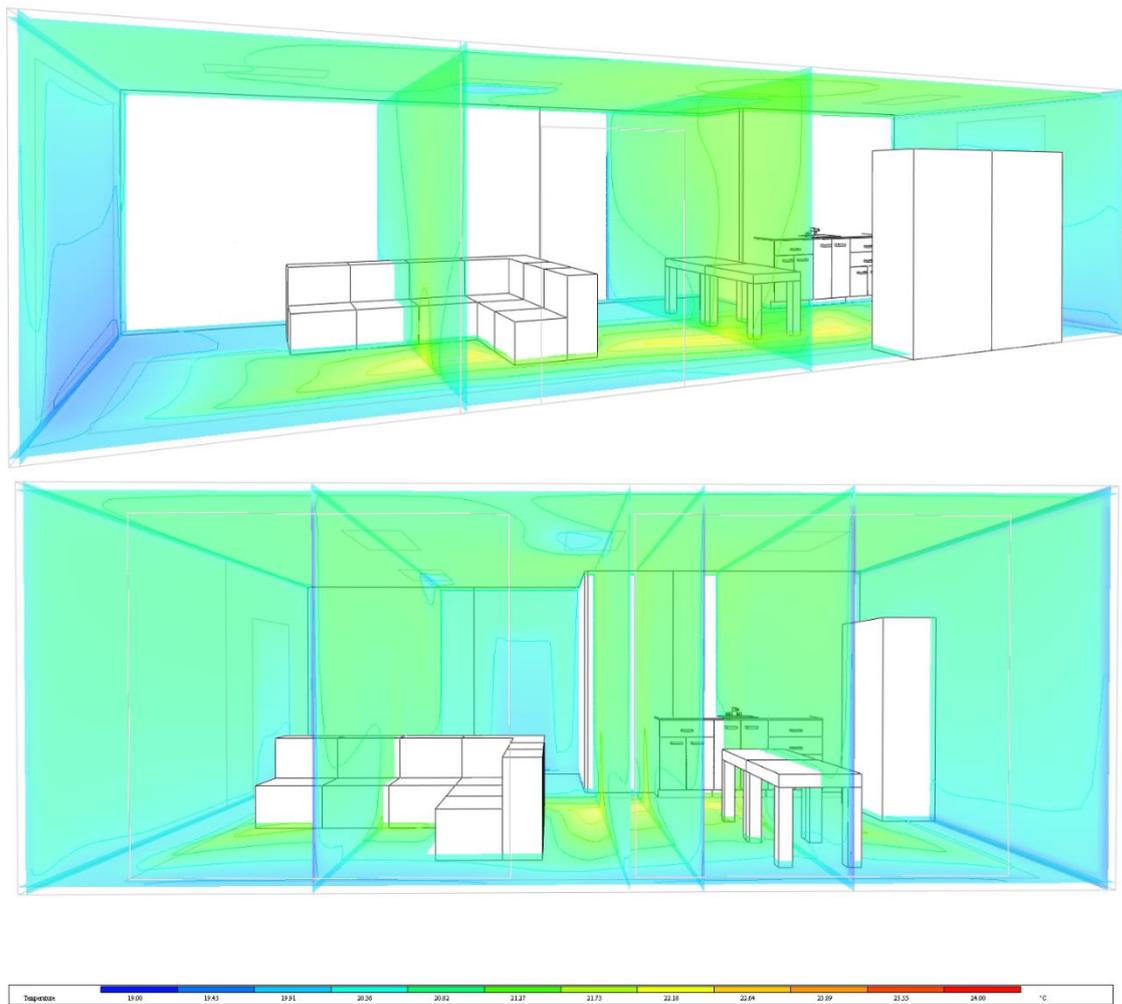


Figura 57- Pannelli radianti pavimento: campo di temperatura in ambienti di grandi dimensioni; 12A1 sopra 9A3 sotto

Come ultima analisi per la tipologia di posa a pavimento, troviamo la zona giorno dell'alloggio 9.A3, caratterizzata da un'ampia metratura sviluppata su una base quasi quadrata, e quella dell'alloggio 12.A1, avente invece base rettangolare con un rapporto lato lungo/lato corto molto pronunciato.

La zona giorno del 9.A3, esposta verso l'esterno su due lati, sud ed est, è un ambiente di grandi dimensioni fortemente influenzato dalle condizioni esterne e dai ponti termici; il terzo lato affaccia parzialmente sul vano scale e parzialmente verso un altro alloggio. Al contrario il salotto del 12.A1 è posizionato in modo strategicamente molto migliore dal punto di vista termico, in quanto esposto lungo i soli lati corti e riparato a sud dall'ampio balcone.

La percentuale di flusso termico scambiato per radiazione aiuta a mantenere alta le temperature delle pareti, che difatti appaiono molto calde, sia nel caso delle interne che delle esterne. È molto utile a riguardo la Figura 56- Pannelli radianti pavimento: campo di temperatura in alloggio 9A3 Figura 56, che ci permette di avere uno sguardo d'insieme delle pareti perimetrali dell'alloggio 9.A3, permettendoci di notare come solo nel caso della camera padronale, esposta su entrambi i lati finestrati, vi sia un gradiente termico indesiderato.

L'influenza degli elementi finestrati e dei ponti termici è comunque presente e crea disomogeneità in entrambi gli ambienti, ma complessivamente l'azione dei terminali rende l'ambiente interno, lontano dalle sorgenti fonte di disturbo, abbastanza omogeneo.

Soffermandosi sulle ultime due immagini che precedono questo paragrafo di analisi, si nota l'accumulo di calore indesiderato che si crea nei pressi di divani e tavoli. Il discorso è il medesimo fatto precedentemente per i letti: il grande limite e vincolo di questa tecnologia è costituito dalla perdita di efficienza se sono presenti in ambiente elementi che schermano il pavimento.

Si analizza ora la tipologia di posa a soffitto. Anche qui il range assegnato al gradiente termico è 19-24.

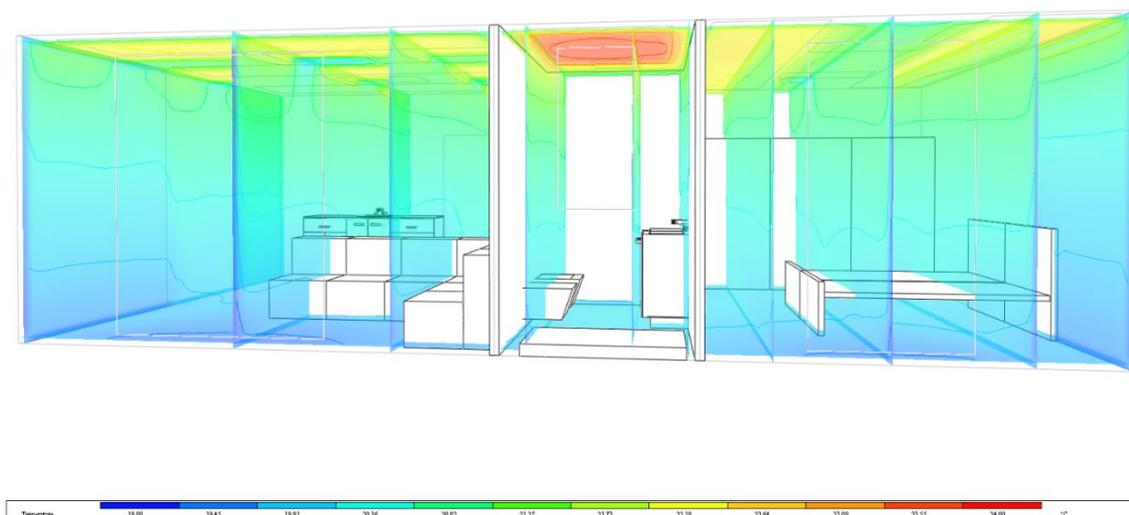


Figura 58- Pannelli radianti soffitto: campo di temperatura in ambienti di ridotte dimensioni; 4A2

La percentuale di flusso termico scambiato per radiazione, che per il caso invernale è la medesima per radiatori e pannelli radianti, permette di ottenere alte temperature delle pareti. Come anticipato, in questa configurazione la superficie attiva è quella del soffitto.

Nell'immagine si vede distintamente come la temperatura superficiale delle pareti sia tanto maggiore quanto più si è distanti dagli elementi più freddi come finestre e porta di ingresso, e quanto più si è vicini alla superficie attiva. Come atteso, seppur si parli di terminali a bassa temperatura, la temperatura dell'aria nelle immediate vicinanze della superficie attiva risulta di superiore rispetto alla media ambientale, ma la variazione rimane contenuta.

Salta subito all'occhio il diverso effetto che i pannelli radianti hanno se installati a soffitto invece che a pavimento: da una distribuzione di temperatura pressoché uniforme, in quanto si agisce laddove si stratifica l'aria più fredda, si passa ad uno scenario opposto in cui la stratificazione dell'aria non è contrastata bensì incoraggiata.

Il gradiente verticale, che è presente e anche molto netto, riesce a rimanere contenuto proprio in virtù del fatto che i terminali utilizzano fluido termovettore a bassa temperatura.

È importante sottolineare un'inversione di tendenza rispetto la tipologia di posa a pavimento: se prima gli elementi di arredo caratterizzati dall'occupare grandi porzioni di pavimento erano da evitare in quanto impedivano il corretto scambio di calore tra superficie attiva e non attiva, in questo la situazione è assoluta opposta. Grande pregio dei pannelli radianti a soffitto è difatti quello di non imporre vincoli sugli arredi né sugli ingombri, in quanto la loro performance è assicurata.

Complessivamente il valore minimo di set point di temperatura è raggiunto in ogni parte dell'alloggio, ma il gradiente verticale di temperatura pronunciato non incarna alla perfezione la curva ideale del comfort degli occupanti.

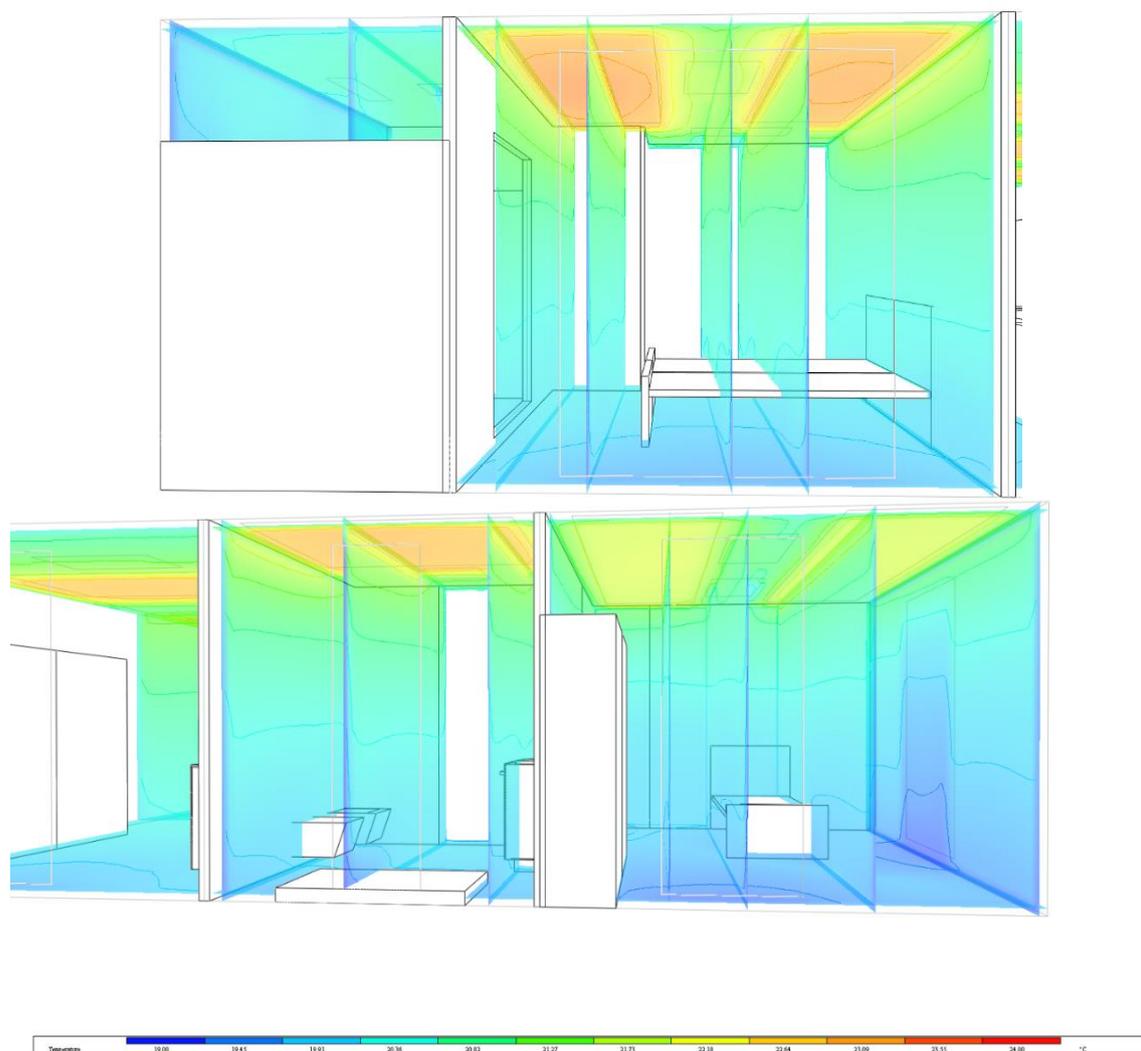


Figura 59- Pannelli radianti soffitto: campo di temperatura in ambienti di ridotte dimensioni; 12A1

Volendo trattare invece ambienti di dimensioni ridotte esposti su più di un lato verso l'esterno, si prendono in esame nuovamente le camere 1 e 2 dell'alloggio 12.A1.

Nel caso della camera 1, più riparata e di dimensioni maggiori, ancora una volta si ha l'installazione dei terminali di riscaldamento nella zona notte ma non nella cabina armadio. A differenza del caso precedente non c'è accumulo di calore sotto letto anzi, in quel punto si crea una zona di aria fredda che proviene dalla finestra antistante.

La temperatura delle pareti interne è assolutamente soddisfacente e non induce gradienti orizzontali, sebbene sia sempre presente quello verticale.

Nel caso della camera 2 invece, esposta su due lati entrambi finestrati e non dotata di balcone protettivo come nel caso precedente, c'è un evidente abbassamento delle temperature delle superfici interne, soprattutto nei confronti della finestra esposta a nord.

Seppur l'effetto dell'esposizione esterna sia visibile, il valore di set point è raggiunto in ogni punto della zona occupata. Il gradiente verticale resta il medesimo e quello orizzontale è più pronunciato dell'altra camera in ragione della duplice presenza di elementi finestrati.

Complessivamente, la performance in questi due ambienti è più che buona.

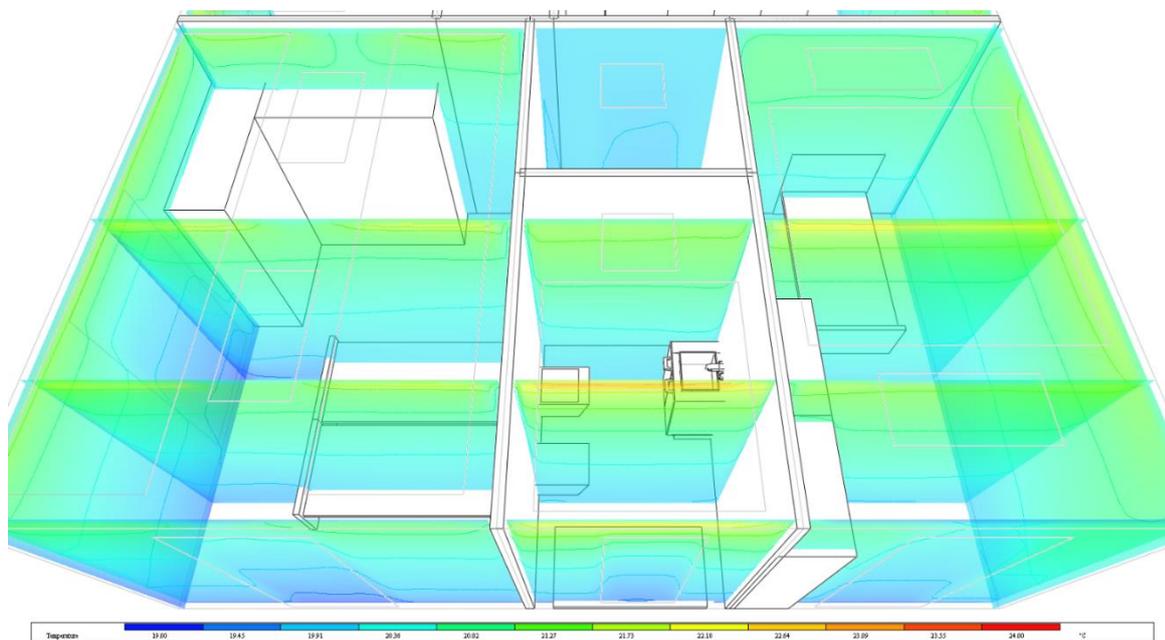


Figura 60- Pannelli radianti soffitto: campo di temperatura in ambienti di ridotte dimensioni; 9A3

Discorso analogo può essere fatto per le due camere dell'alloggio 9.A3, in cui si nota la differenza tra quella di destra, la numero 2 più piccola e meno esposta, manifesti un gradiente termico verticale analogo all'altra stanza ma un gradiente orizzontale pressoché assente.

Ancora una volta, nonostante il forte gradiente termico verticale, la resa dei terminali è molto buona e il valore di set point è raggiunto ovunque.

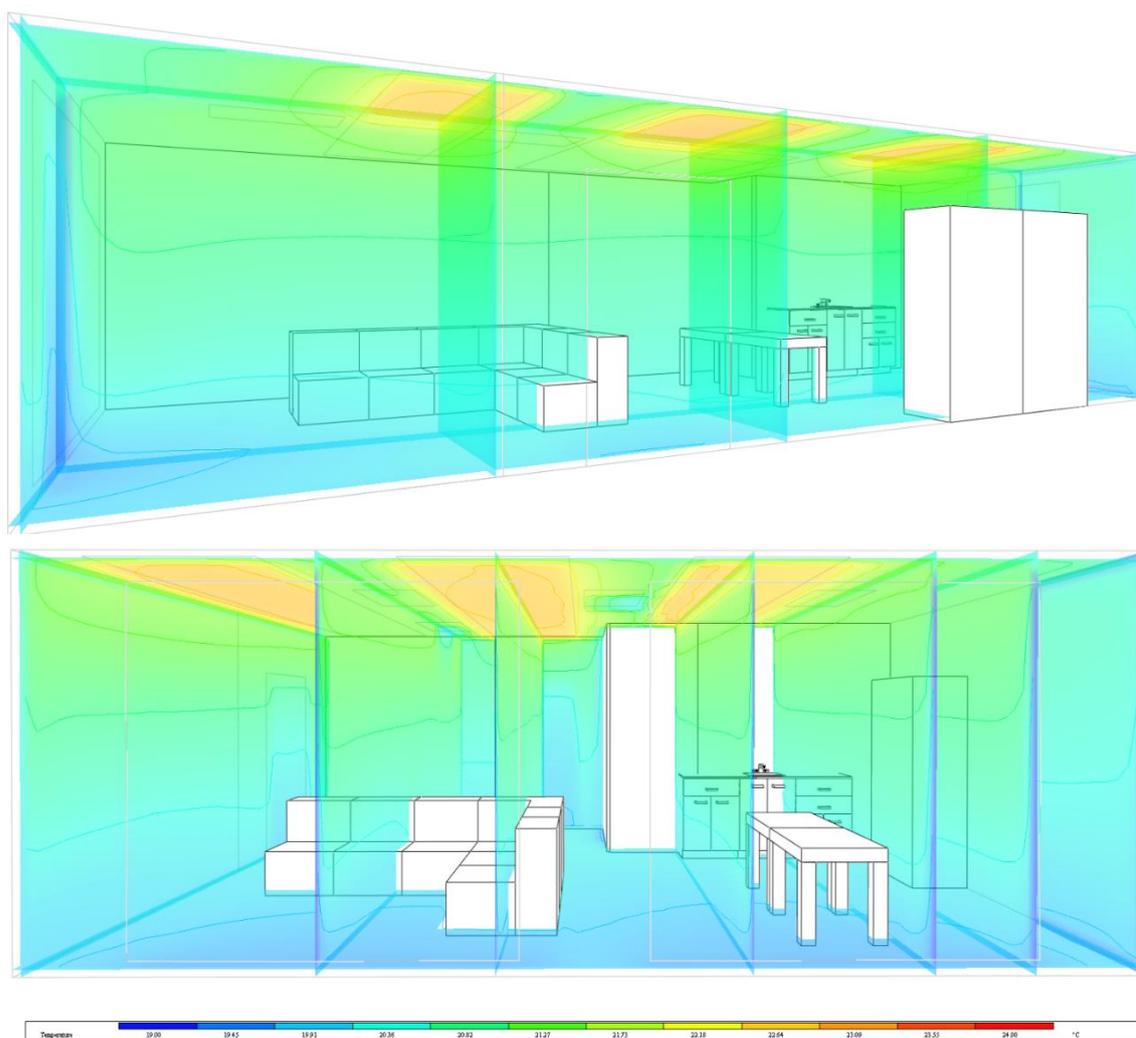


Figura 61- Pannelli radianti soffitto: campo di temperatura in ambienti di grandi dimensioni; 12A1 sopra 9A3 sotto

Come ultima analisi per la tipologia di posa a soffitto, troviamo la zona giorno dell'alloggio 9.A3, caratterizzata da un'ampia metratura sviluppata su una base quasi quadrata, e quella dell'alloggio 12.A1, avente invece base rettangolare con un rapporto lato lungo/lato corto molto pronunciato.

La percentuale di flusso termico scambiato per radiazione aiuta a mantenere alta le temperature delle pareti, che difatti appaiono molto calde, sia nel caso delle interne che delle esterne. L'influenza degli elementi finestrati e dei ponti termici è comunque presente e crea disomogeneità in entrambi gli ambienti, ma complessivamente l'azione dei terminali rende l'ambiente interno, lontano dalle sorgenti fonte di disturbo, abbastanza omogeneo.

In particolare, nel caso di 12.A1, se posti a sufficiente distanza dalle finestre nord e sud, si osserva una stratificazione ambientale che molto si avvicina a quella ideale.

Diverso è il discorso per la zona giorno dell'alloggio 9.A3, maggiormente influenzato dalle condizioni esterne con un numero maggiore di elementi disturbatori come porte finestre e ponti termici. Qui la stratificazione verticale dell'aria resta marcata e l'influenza delle finestre non scompare allontanandosi di poco dalla loro superficie.

Seppur con differenze, anche in questo caso complessivamente il lavoro svolto dai terminali è soddisfacente.

4.2.3. Terminali ibridi

I terminali ibridi hanno una doppia natura: radiante, grazie alla piastra posta frontalmente, e convettiva, dovuta alla ventilazione forzata di aria che lambisce lo scambiatore di calore interno.

Il loro ingombro rende proibitivo il loro utilizzo in ambienti con ristrette metrature, come ad esempio i servizi igienici, e crea comunque problemi anche in ambienti di medie dimensioni. Le performance sono comunque generalmente buone, seppur vi siano terminali in grado di garantire maggiore omogeneità nel profilo di temperatura con minori inconvenienti.

Nelle figure che seguono si è impostato come intervallo del gradiente cromatico per la visualizzazione dei risultati 17.5-24. Anche se localmente la temperatura delle superfici può essere minore (superfici trasparenti) o maggiore (superfici dei corpi scaldanti), questo intervallo è risultato il migliore per commentare lo stato dell'ambiente occupato.

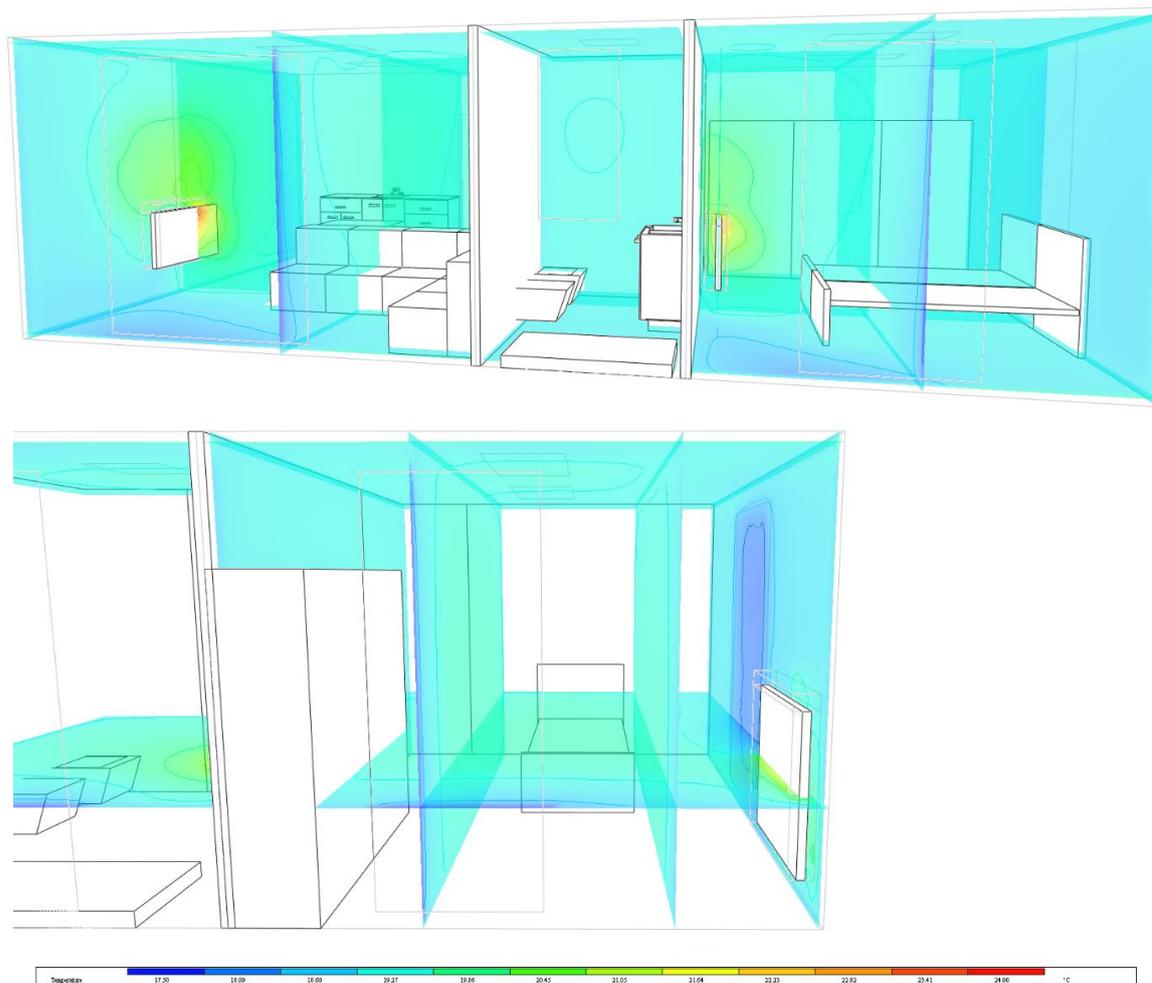


Figura 62- Terminali ibridi: campo di temperatura in ambienti di ridotte dimensioni; 4A2 sopra, 12A1 sotto

La percentuale di flusso termico scambiato per radiazione in questo terzo caso è molto minore che nei casi precedenti, con un valore di appena 20%. Questa quota non è grado di mantenere elevate le temperature delle pareti, seppur queste risultino comunque più calde che nel caso successivo di assenza di radiazione.

Nel caso dell'alloggio 4.A2, gli ambienti di ridotte dimensioni esposti su un solo lato sono caratterizzati da dispendi energetici abbastanza bassi. In questo caso, la posa dei terminali non è quella ottimale, in quanto sono installati sulle pareti che affacciano verso altri alloggi o interne e non verso quelle esterne, più fredde.

Nel caso dell'alloggio 12.A1, l'ambiente analizzato, quello della camera 2, risulta esposto su due lati, entrambi finestrati: nord, e ovest, dove è installato il terminale. In questo caso, la posa dei terminali è ottima. È interessante sottolineare come in questo caso, essendo il terminale posto laddove ce n'è più bisogno, non vi siano accumuli di calore significativi come nell'alloggio 4.A2 poiché tutta la potenza termica installata è utilizzata per riscaldare aria e superfici interne.

Come atteso, seppur si parli di terminali a bassa temperatura, la temperatura dell'aria nelle immediate vicinanze del terminale risulta di qualche grado superiore rispetto alla media ambientale, ma la variazione rimane contenuta.

La variazione orizzontale di temperatura è caratteristica inevitabile di questi impianti, e derivata dal fatto che il corpo scaldante è di dimensioni ridotte ed interagisce direttamente con l'aria ambientale.

In generale, la valutazione del comportamento dei terminali ibridi all'interno degli ambienti piccoli e riparati è discreta, in quanto riescono ad ottenere le condizioni termiche adatte in ogni punto dell'alloggio, ma questo avviene con significativi gradienti orizzontali; la loro performance in ambienti piccoli ed esposti risulta invece più convincente ed efficace.

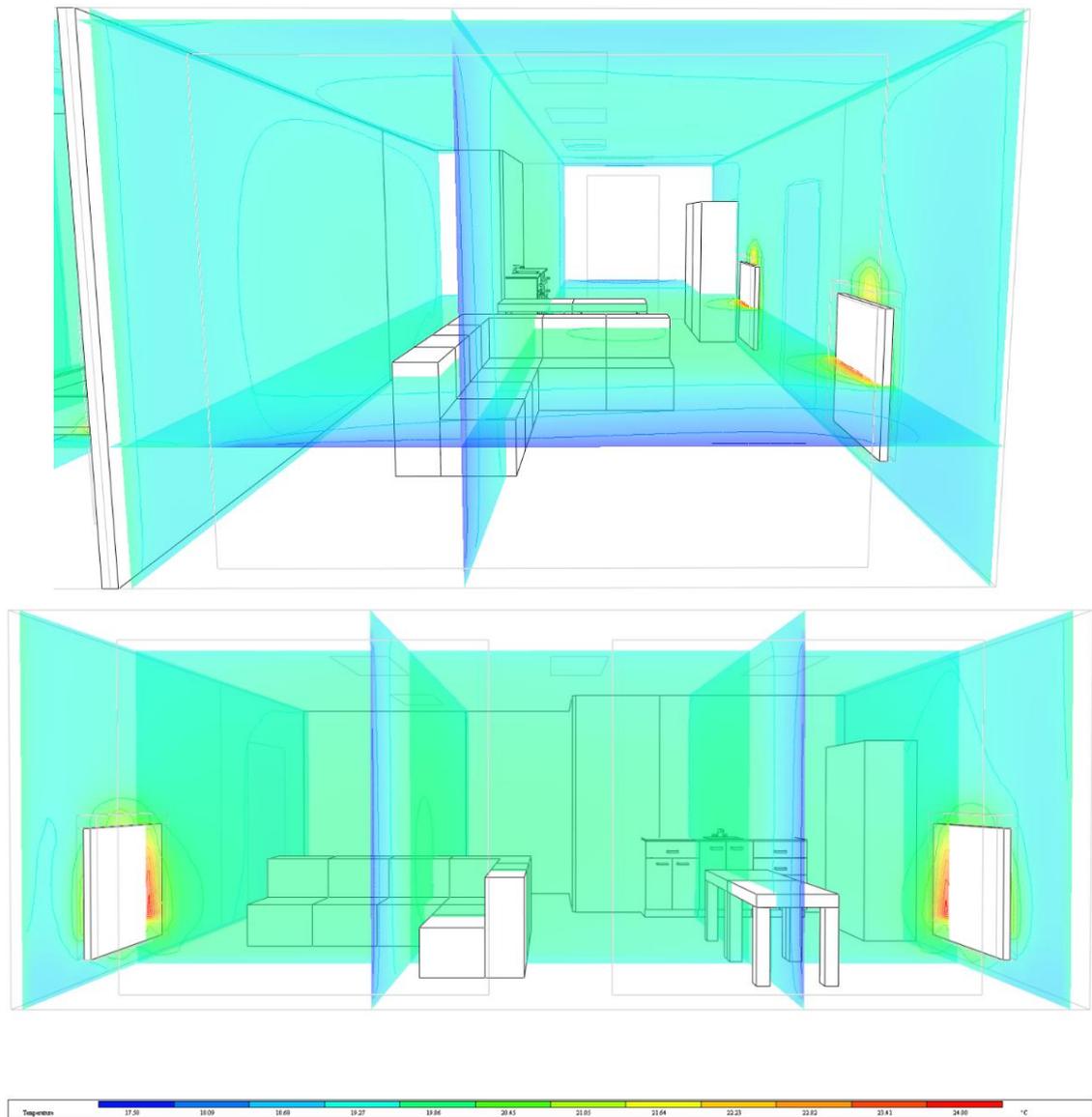


Figura 63- Terminali ibridi: campo di temperatura in ambienti di grandi dimensioni; 12A1 sopra 9A3 sotto

Spostando l'attenzione verso un ambiente del tutto differente dai due precedenti, si procede con il commento della zona giorno dell'alloggio 12.A1, immagine sopra, caratterizzata da un'ampia metratura sviluppata in lunghezza da sud, dove troviamo un importante elemento finestrato che affaccia sul balcone, a nord, anche qui con un elemento finestrato ma di dimensioni minori.

Complessivamente si tratta dunque di un ambiente di grandi dimensioni, esposto per pochi m² verso l'ambiente esterno su due lati, mentre il terzo affaccia sul vano scale, luogo in cui non avviene il controllo della temperatura ma pur sempre chiuso e riparato.

In questa configurazione ottimale dei terminali di riscaldamento, che tiene anche e soprattutto conto della geometria dell'ambiente, i due terminali ibridi sono posizionati lungo il

lato lungo, il quale affaccia quasi interamente verso il vano scale e ascensore: in questo modo non solo si va ad agire tempestivamente sulla parete di dimensione maggiore a temperatura più bassa, ma il moto aereo indotto dalla parte convettiva del terminale contrasta l'effetto negativo della finestra e contemporaneamente ostacola il moto convettivo dell'aria accanto a quest'ultima con la parte centrale dell'ambiente, che resta indisturbata.

Seppur il posizionamento dei terminali in ambiente sia quello volto a minimizzare gli svantaggi legati a questa tecnologia di riscaldamento, risulta ancora importante sia il gradiente termico che si crea nel piccolo spazio tra i corpi scaldanti e la superficie degli elementi finestrati, sia il gradiente orizzontale di temperatura presente nella zona occupata.

Discorso analogo può essere avanzato per il caso dell'alloggio 9.A3, in cui i terminali sono installati lungo la parete esterna e interna che affaccia su un altro alloggio in corrispondenza delle due finestre a sud.

Grande differenza di performance tra queste due casistiche è dettata dalla geometria, che nel caso dell'alloggio 9.A3 permette una migliore azione convettiva dei terminali garantendo volume d'aria e spazio sufficiente da non creare zone ridotte di calore localizzato.

Complessivamente, possiamo affermare che i terminali ibridi sono una soluzione valida nel caso di ambienti aventi ampie geometrie che permettano libertà di moto all'aria trattata, ma al contempo non risultino così spaziosi da non beneficiare della quota radiativa emessa. Abili nel contrastare sorgenti localizzate di disturbo termico ambientale, come abbiamo visto sono in grado di fornire migliori performance se collocati nelle loro immediate vicinanze.

4.2.4. Ventilconvettori

I ventilconvettori sono i terminali che più di tutti creano moto dell'aria in ambiente, e di conseguenza maggiore mescolamento. Anche in questo caso, come per i terminali ibridi, risultano inadeguati per la posa in ambienti di dimensioni contenute.

Questo terminale è l'unico che in entrambe le configurazioni, estiva ed invernale, scambia la sua potenza termica interamente per convezione.

Nelle figure che seguono si è impostato come intervallo del gradiente cromatico per la visualizzazione dei risultati 17.5-24. Anche se localmente la temperatura delle superfici può essere minore (superfici trasparenti) o maggiore (superfici dei corpi scaldanti), questo intervallo è risultato il migliore per commentare lo stato dell'ambiente occupato.

Si comincia a commentare i risultati ottenuti con la modellazione della tipologia di posa a soffitto.

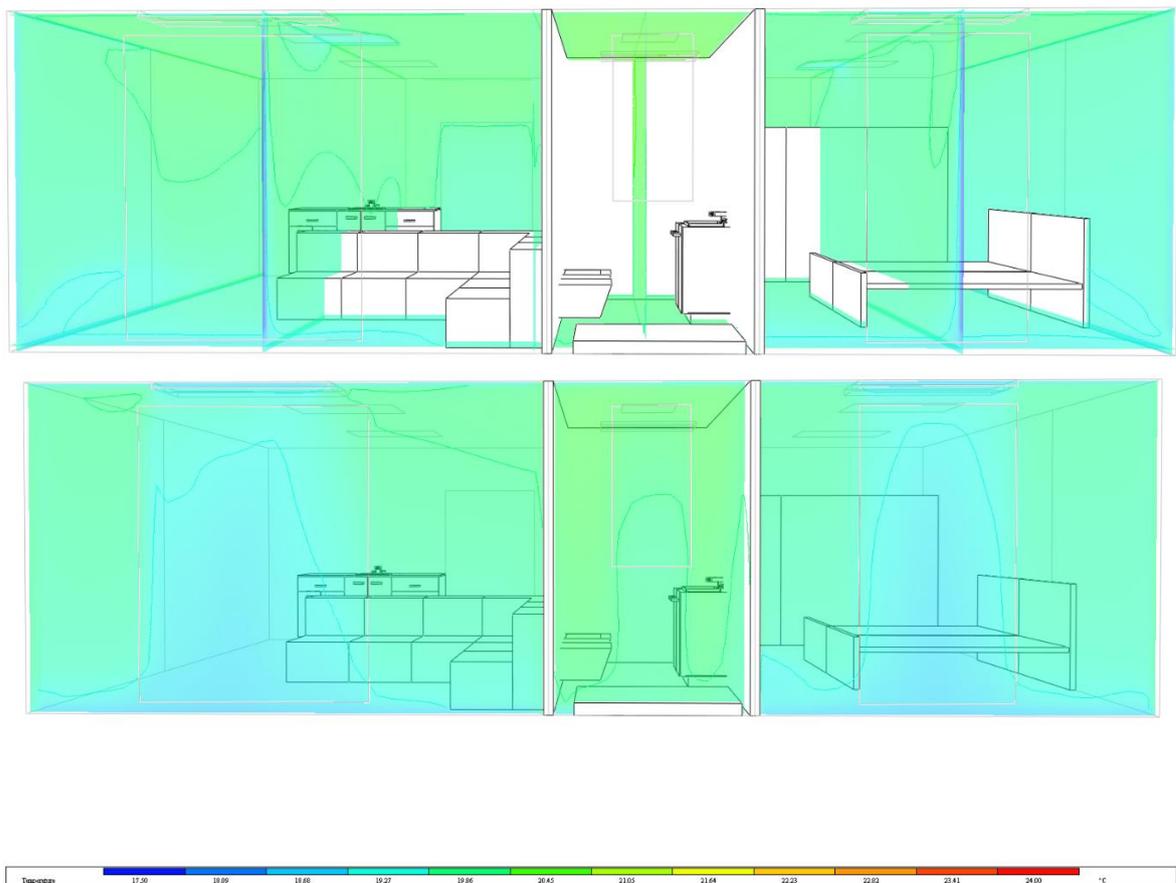


Figura 64- ventilconvettori soffitto: campo di temperatura in ambienti di ridotte dimensioni; 4A2

Il primo alloggio ad essere analizzato è il 4.A2, caratterizzato da due ambienti di dimensioni ridotte: una zona giorno e una zona notte.

È importante evidenziare subito come l'installazione dei terminali sia stata effettuata in corrispondenza degli elementi finestrati, per abbattere tempestivamente il carico che queste inducono in ambiente. Se i ventilconvettori fossero stati installati altrove, per esempio al centro degli ambienti o in corrispondenza degli ingressi, si avrebbe avuto una situazione molto differente a livello sia di temperatura che di velocità dell'aria.

L'azione mirata dei terminali rende possibile ottenere temperature dell'aria nell'immediata vicinanza delle finestre assolutamente accettabili, nonostante questa tipologia di terminale non agisca direttamente sulla temperatura delle pareti. Inoltre, eliminando la principale fonte di disturbo prima che questa possa effettivamente incidere troppo sull'ambiente, anche le altre pareti della stanza riescono a mantenere ottimi valori di temperatura.

Nella prima immagine si vede distintamente il gradiente termico verticale all'interno degli ambienti sia quasi inesistente, indice di un'ottima azione di riscaldamento ambientale. Nell'immagine sottostante, si mettono invece in evidenza le temperature degli involucri esterni trasparente ed opaco, che affacciano entrambi verso sud.

In generale, la valutazione del comportamento dei ventilconvettori a soffitto installati direttamente al di sopra degli elementi finestrati all'interno di questi ambienti piccoli e riparati è ottima, in quanto si riescono ad ottenere le condizioni termiche di set point (e oltre) in ogni punto dell'alloggio, senza incorrere né in gradienti termici significativi né in accumuli di calore/freddo in corrispondenza di elementi di arredo o geometrie particolari della stanza.

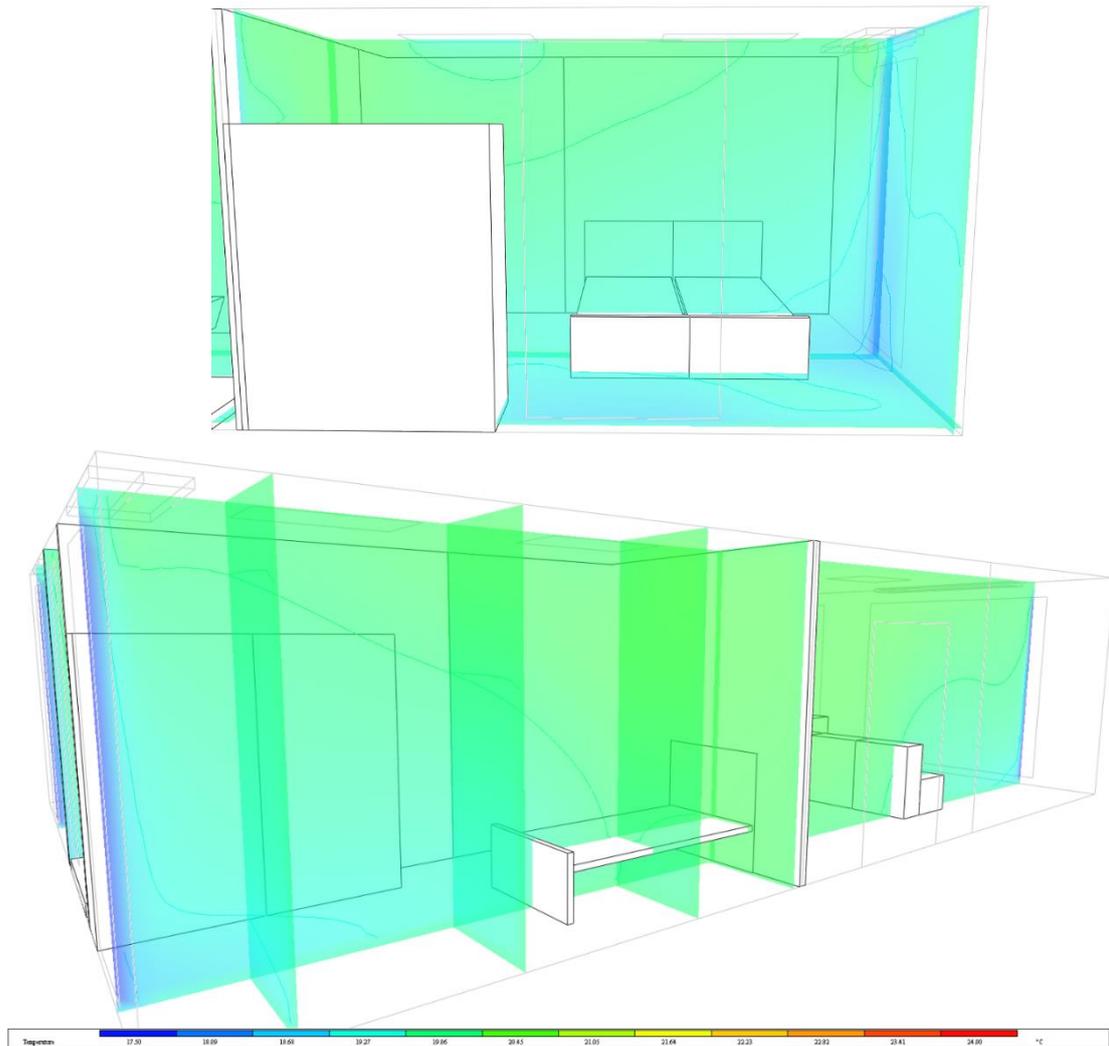


Figura 65- ventilconvettori soffitto: campo di temperatura in ambienti di ridotte dimensioni; 9A3

Sempre restando nell'ambito dei locali di dimensioni ridotte, si analizzano le due camere da letto dell'alloggio 9.A3. Situate al nono piano, la camera 1, sopra, è caratterizzata da doppia esposizione a nord ed est con finestre su entrambi i lati, mentre la camera 2, più piccola, affaccia esternamente solo verso nord con una finestra stretta ma alta quasi fino al soffitto.

Nella camera 1, esposta su due lati, il ventilconvettore è posto sulla parete a nord, proprio al di sopra dell'elemento finestrato, per abbattere istantaneamente il carico maggiore sulla superficie vetrata più critica che non beneficia mai dell'apporto solare gratuito.

Le temperature delle superfici interne è molto buona, mentre di quelle che danno verso l'esterno vi è differenza non solo tra involucro trasparente e opaco ma anche tra parete nord con ventilconvettore e parete ad est senza.

Nella prima immagine della figura di cui sopra, è evidenziato lo stato termico lungo la sezione centrale della camera 1: l'influenza negativa sul gradiente termico derivante dalla finestra è compensata quasi immediatamente, con una piccola perturbazione sulla temperatura che rimane però sempre contenuta in un range di temperatura accettabile.

L'influenza dell'altra finestra, quella su cui non si è agito, è possibile osservarla dalle linee iso-temperatura riportate a pavimento: in questo caso la penetrazione della perturbazione termica è molto più estesa.

Complessivamente in ambiente si possono dire rispettati i caratteri termici minimi, ma è evidente come questa soluzione impiantistica non sia in grado di sopperire in modo ottimale alla compresenza di due importanti sorgenti di disturbo.

Nella camera 2, non solo vi è una sola finestra, ma inoltre il lato esposto verso l'esterno è anche quello sensibilmente più corto dei due. A ovest l'esposizione è verso il vano scale, ambiente chiuso ma non climatizzato.

Le temperature delle superfici interne e di quelle che danno sul vano scala sono buone e simili tra loro, mentre le temperature delle superfici trasparenti e opache esterne sono sensibilmente minori.

Nonostante la grande differenza tra temperatura delle superfici interne ed esterne, il gradiente termico che si instaura in ambiente è concentrato nella zona situata nell'immediata prossimità della finestra, così da rendere il resto della stanza termicamente omogenea e con una temperatura media superiore a quella della camera 1.

Questo secondo esempio di ventilconvettori installati in stanze con singola esposizione esterna e singolo elemento fortemente disturbante, mostra come la loro azione possa risultare efficace.

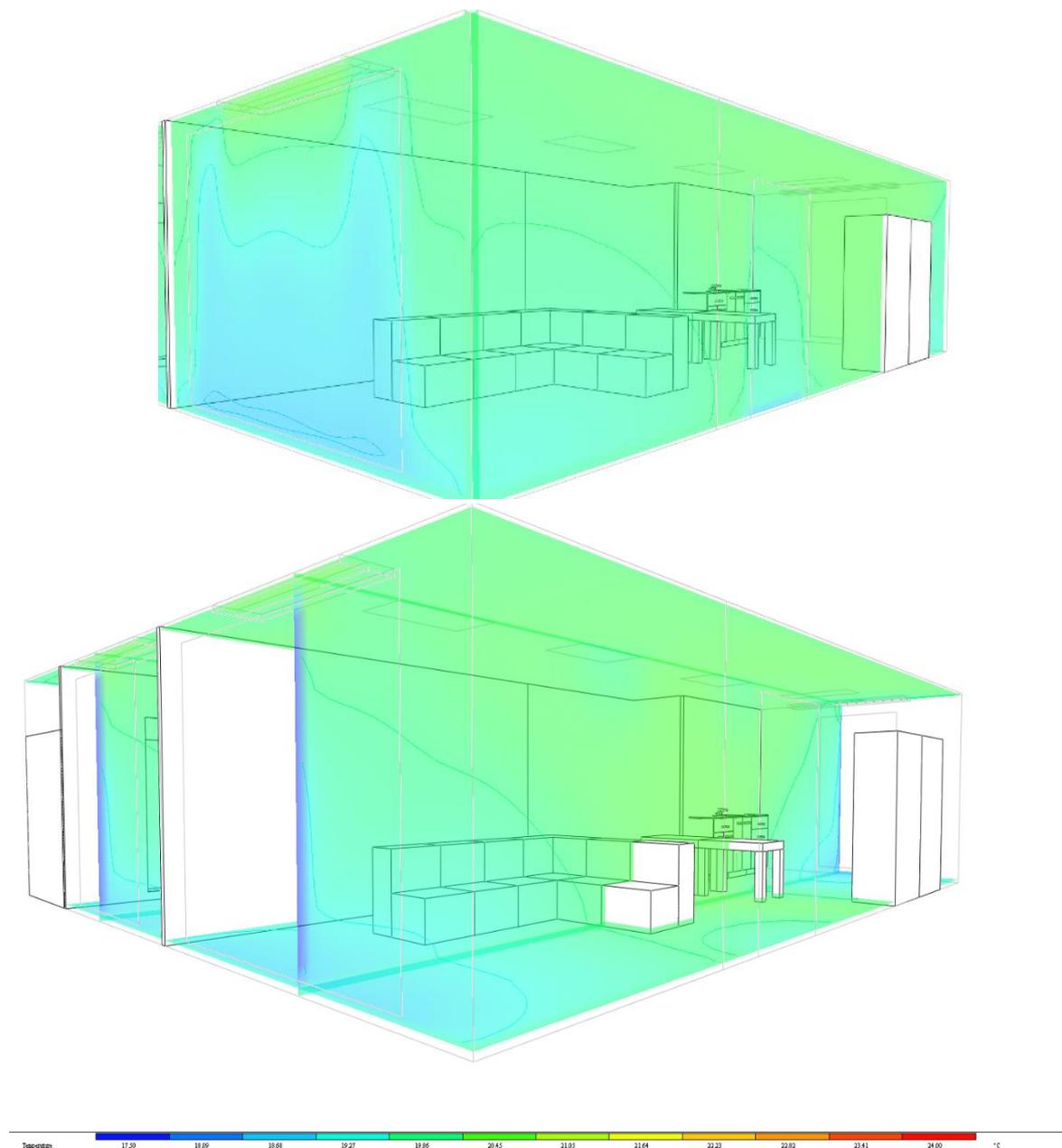


Figura 66- ventilconvettori soffitto: campo di temperatura in ambienti di grandi dimensioni; 12A1

Spostando l'attenzione verso un ambiente del tutto differente dai due precedenti, si procede con il commento della zona giorno dell'alloggio 12.A1, caratterizzata da un'ampia metratura sviluppata in lunghezza da sud, dove troviamo un importante elemento finestrato che affaccia sul balcone, a nord, anche qui con un elemento finestrato ma di dimensioni minori.

Complessivamente si tratta dunque di un ambiente di grandi dimensioni, esposto per pochi m² verso l'ambiente esterno su due lati, mentre il terzo affaccia sul vano scale, luogo in cui non avviene il controllo della temperatura ma pur sempre chiuso e riparato.

In questa configurazione ottimale, che tiene anche e soprattutto conto della geometria dell'ambiente, i due ventilconvettori sono posizionati sopra i due elementi finestrati, secondo una divisione della potenza termica erogata che tiene conto sia della grandezza del terminale che di quella della finestra, in modo da fornire più energia laddove è necessario.

Dalla prima immagine possiamo osservare come, a sud, nella porzione di finestra che per prima risente del getto d'aria riscaldata uscente dal ventilconvettore, si riesca ad ottenere un ottimo effetto climatizzante in grado di contrastare efficacemente l'influenza disturbante della parete vetrata. Dalla seconda immagine è chiaro come la temperatura della superficie della finestra rimanga comunque molto bassa, ma ciò che interessa lo studio in questo capitolo è soprattutto la temperatura dell'aria nella zona abitata.

Sempre nella seconda immagine, è possibile vedere come il gradiente verticale all'interno della zona giorno sia molto influenzato dalla vicinanza alle pareti finestate. Mentre nell'alloggio 4.A2 e nella camera 2 dell'alloggio 9.A3 l'azione dei terminali era efficace, in questo caso la grande superficie e il grande carico termico rendono necessario l'impiego di portate d'aria che inevitabilmente hanno conseguenze sul resto dell'ambiente, non riuscendo a garantire quella discrezione tipica delle situazioni precedenti.

Di conseguenza, seppur la performance sia buona, è già possibile notare come questi terminali siano maggiormente adatti ad altri tipi di situazioni.

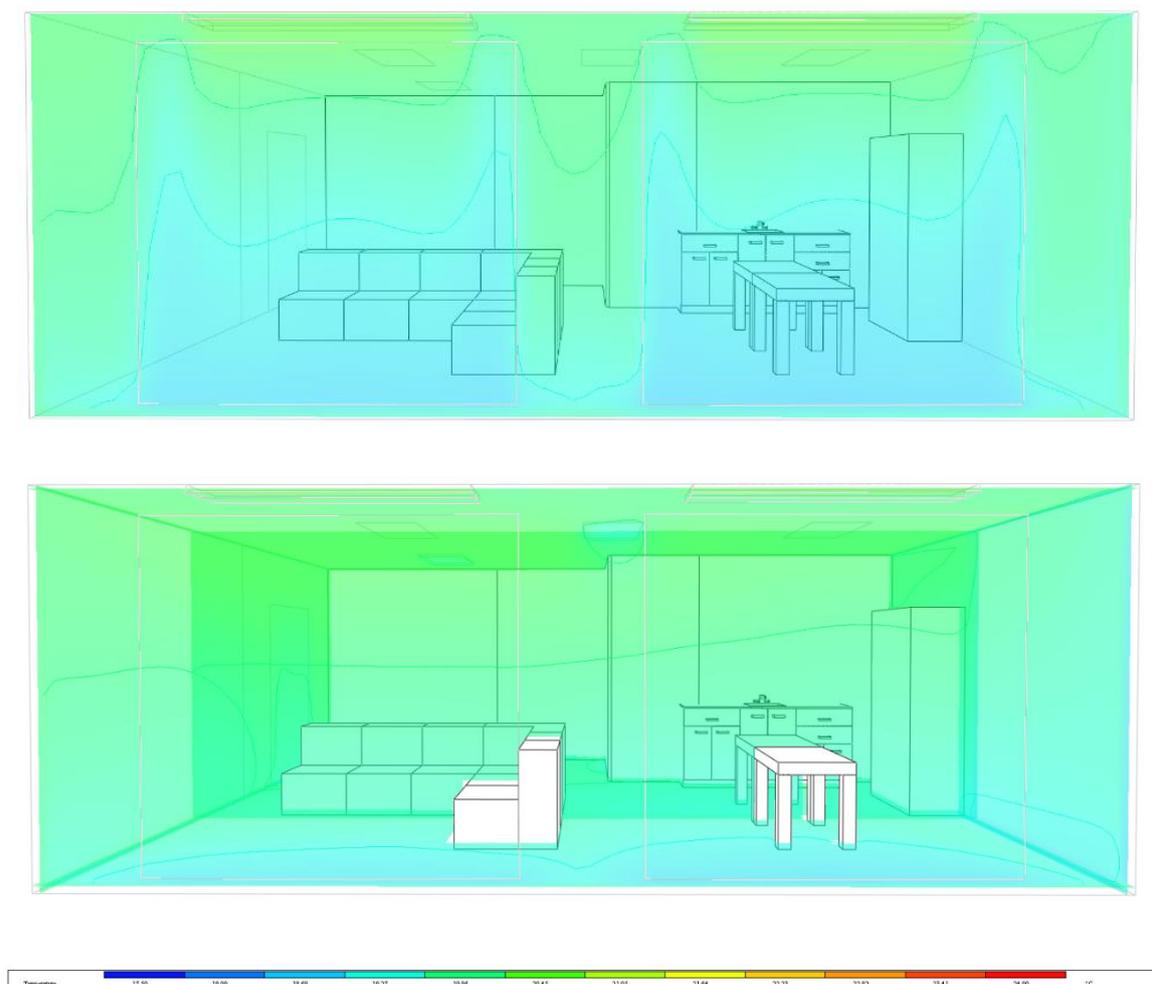


Figura 67- ventilconvettori soffitto: campo di temperatura in ambienti di grandi dimensioni; 9A3

In ultima analisi, troviamo la zona giorno dell'alloggio 9.A3, caratterizzata da una elevata metratura sviluppata su una base quasi quadrata. Esposto verso l'esterno su due lati, sud ed est, si tratta complessivamente di un ambiente di grandi dimensioni fortemente influenzato dalle condizioni esterne e dai ponti termici; il terzo lato affaccia parzialmente sul vano scale e parzialmente verso un altro alloggio.

In questa configurazione, che tiene anche e soprattutto conto della geometria dell'ambiente, i ventilconvettori hanno entrambi la stessa potenza termica in quanto uguali tra loro sono i due elementi finestrati.

Dalla prima immagine possiamo osservare come, a sud, nella porzione di finestra che per prima risente del getto d'aria riscaldata uscente dal ventilconvettore, si riesca ad ottenere un ottimo effetto climatizzante in grado di contrastare efficacemente l'influenza disturbante della parete vetrata.

Nella seconda immagine, è possibile vedere come il gradiente verticale all'interno della zona giorno sia molto influenzato dalla vicinanza alle pareti finestrate: guardando il pavimento e le pareti perimetrali, si può dedurre come vicino alle finestre non vi omogeneità termica, mentre nelle zone più centrali della stanza, è stato evidenziato come il gradiente termico sia quasi inesistente.

Mentre nell'alloggio 4.A2 e nella camera 2 dell'alloggio 9.A3 l'azione dei terminali era efficace, in questo caso la grande superficie e il grande carico termico rendono necessario l'impiego di portate d'aria che inevitabilmente hanno conseguenze sul resto dell'ambiente, non riuscendo a garantire quella discrezione tipica delle situazioni precedenti.

In conclusione, seppur con tutti i limiti descritti, la performance dei terminali in questo caso risulta migliore di quella dell'alloggio 12.A1 in cui gli elementi che creavano disturbo erano posizionati ai due diversi capi della stanza.

Per concludere, la posa a soffitto è ottima dal punto di vista dei vincoli e degli ingombri, e assolutamente adatta a piccoli ambienti riparati in cui vi è una sola finestra. Le performance cominciano a perdere di qualità nel momento in cui le pareti finestrate cominciano ad assumere dimensioni più importanti, fino ad arrivare al caso limite della zona giorno dell'alloggio 12.A1 in cui due grandi elementi finestrati sono presenti a due diversi capi della stanza.

La posa a pavimento è meno diffusa negli alloggi rispetto a quella a soffitto in quanto richiede più pulizia e manutenzione, oltre a rappresentare un elemento di vincolo per quanto riguarda l'arredamento a terra.

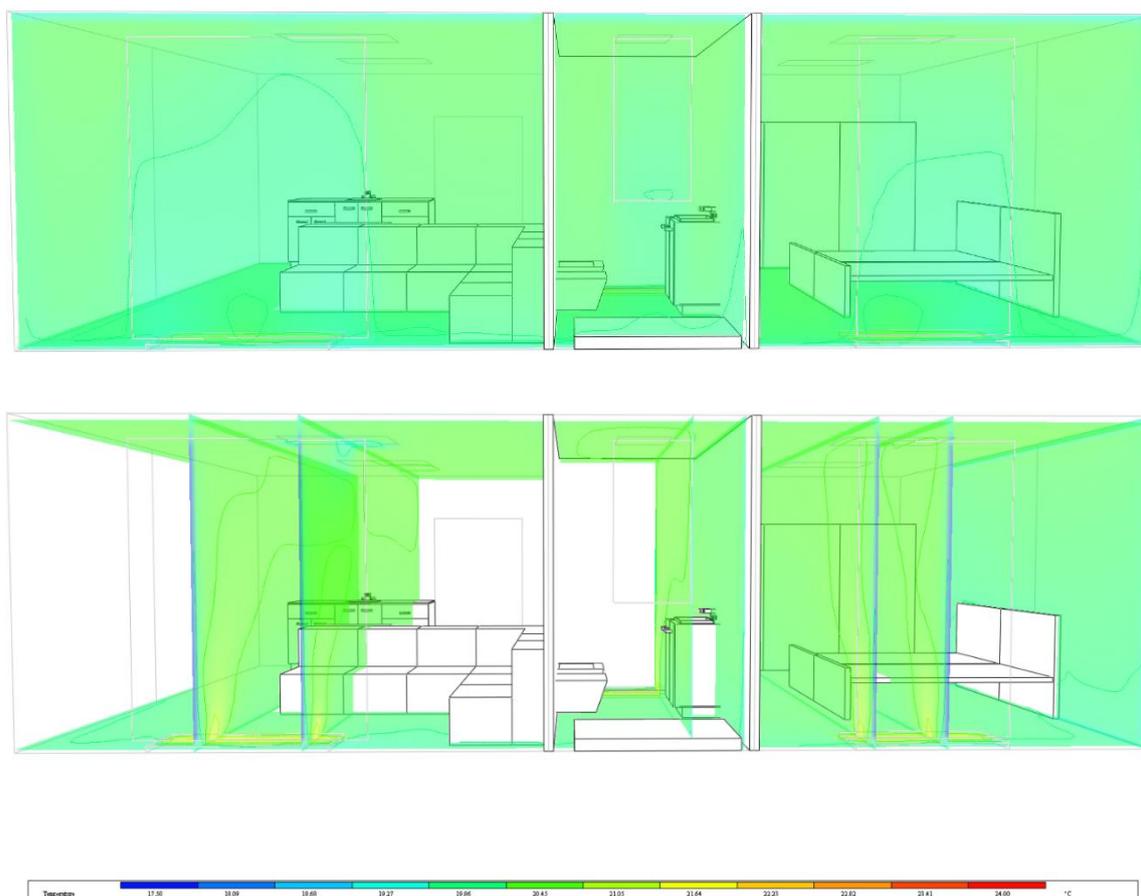


Figura 68- ventilconvettori pavimento: campo di temperatura in ambienti di ridotte dimensioni; 4A2

Il primo alloggio ad essere analizzato è il 4.A2, caratterizzato da due ambienti di dimensioni ridotte: una zona giorno e una zona notte.

È importante evidenziare subito come l'installazione dei terminali sia stata effettuata nuovamente in corrispondenza degli elementi finestrati, per abbattere tempestivamente il carico che queste inducono in ambiente. L'azione mirata dei terminali rende possibile ottenere temperature dell'aria nell'immediata vicinanza delle finestre ottime e perfino migliori rispetto all'installazione a soffitto, nonostante questa tipologia di terminale non agisca direttamente sulla temperatura delle pareti. Inoltre, eliminando la principale fonte di disturbo prima che questa possa effettivamente incidere troppo sull'ambiente, anche le altre pareti della stanza riescono a mantenere ottimi valori di temperatura.

Nella prima immagine si vede distintamente la qualità dell'azione mirata a contrastare l'effetto delle finestre: essendo il getto d'aria calda posizionato laddove è più necessario, ovvero nella parte bassa della finestra per ragioni di stratificazione e convezione dell'aria, il profilo termico che si osserva è assolutamente soddisfacente, anche più della variante a soffitto.

Nella seconda immagine invece è possibile osservare il gradiente termico verticale all'interno degli ambienti: l'aria immessa crea moti convettivi per cui l'effetto di calore localizzato viene trasportato anche all'interno delle stanze, creando piccole perturbazioni termiche. È importante sottolineare non solo la bontà delle perturbazioni ma anche la loro scarsa penetrazione in ambiente, in quanto si esauriscono a poca distanza dall'elemento finestrato.

In generale, la valutazione del comportamento dei ventilconvettori a pavimento installati direttamente al di sotto degli elementi finestrati all'interno di questi ambienti piccoli e riparati è ottima, in quanto si riescono ad ottenere le condizioni termiche di set point (e oltre) in ogni punto dell'alloggio, senza incorrere né in gradienti termici significativi né in accumuli di calore/freddo in corrispondenza di elementi di arredo o geometrie particolari della stanza.

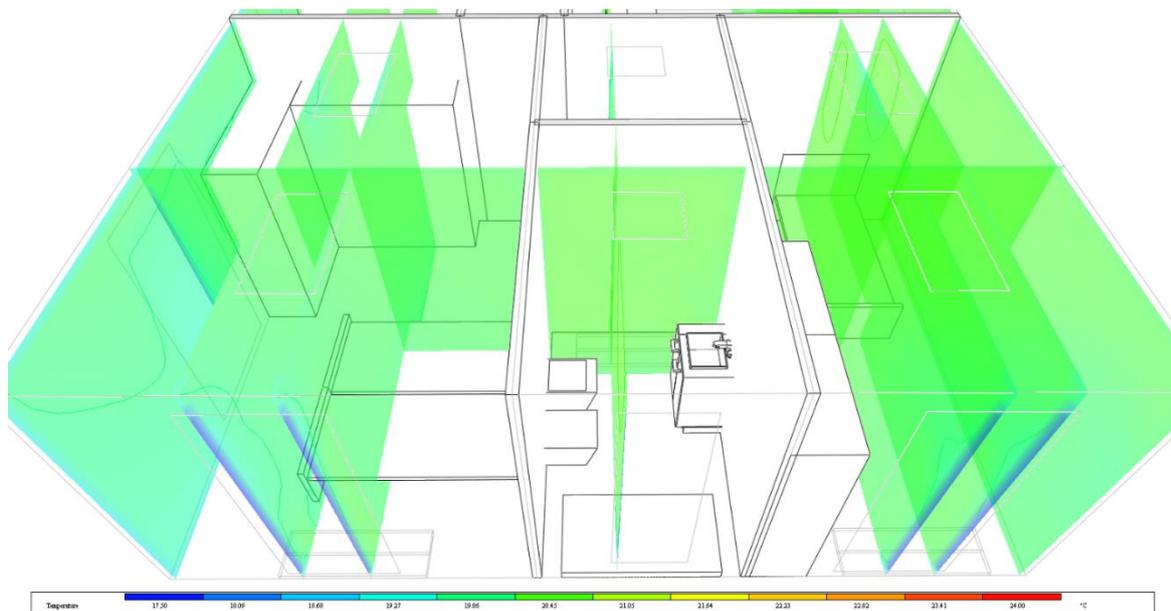


Figura 69- ventilconvettori pavimento: campo di temperatura in ambienti di ridotte dimensioni; 9A3

Sempre restando nell'ambito dei locali di dimensioni ridotte, si analizzano le due camere da letto dell'alloggio 9.A3. Situate al nono piano, la camera 1, a sinistra, è caratterizzata da doppia esposizione a nord ed est con finestre su entrambi i lati, mentre la camera 2, più

piccola, affaccia esternamente solo verso nord con una finestra stretta ma alta quasi fino al soffitto.

Nella camera 1, esposta su due lati, il ventilconvettore è posto sulla parete a nord, proprio al di sotto dell'elemento finestrato, per abbattere istantaneamente il carico maggiore sulla superficie vetrata più critica che non beneficia mai dell'apporto solare gratuito.

Le temperature delle superfici interne è molto buona, mentre di quelle che danno verso l'esterno vi è differenza non solo tra involucro trasparente e opaco ma anche tra parete nord con ventilconvettore e parete ad est senza.

Nell'immagine è evidenziato lo stato termico lungo le sezioni centrali della camera 1: l'influenza negativa sul gradiente termico derivante dalla finestra a nord è compensata immediatamente, mentre l'influenza dell'altra finestra, quella su cui non si è agito, seppur provochi temperature superficiali leggermente minori, comunque è caratterizzata da una penetrazione molto minore rispetto all'installazione a soffitto.

Complessivamente in ambiente sono assolutamente rispettati i caratteri termici minimi, e si può affermare che questa soluzione impiantistica è assolutamente in grado di sopperire in modo ottimale alla compresenza di due importanti sorgenti di disturbo.

Nella camera 2, non solo vi è una sola finestra, ma inoltre il lato esposto verso l'esterno è anche quello sensibilmente più corto dei due. A ovest l'esposizione è verso il vano scale, ambiente chiuso ma non climatizzato.

Le temperature delle superfici interne e di quelle che danno sul vano scala sono buone e simili tra loro, così come quelle temperature delle superfici trasparenti e opache esterne. L'assenza di grande differenza tra temperatura delle superfici interne ed esterne porta all'assenza di un gradiente termico marcato, così da avere una stanza termicamente omogenea.

Complessivamente, ottima performance in entrambe le situazioni.

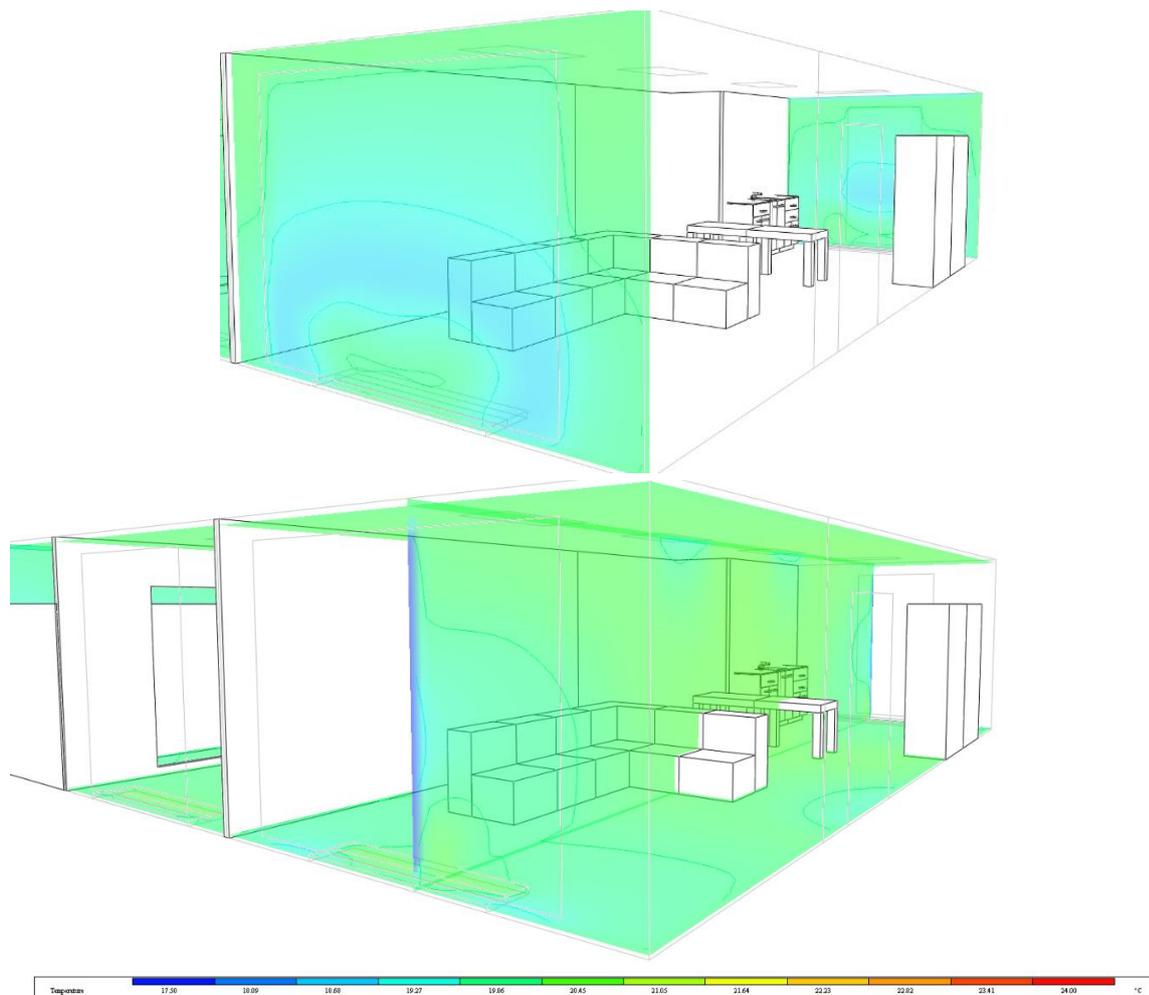


Figura 70- ventilconvettori pavimento: campo di temperatura in ambienti di grandi dimensioni; 12A1

Spostando l'attenzione verso un ambiente del tutto differente dai due precedenti, si procede con il commento della zona giorno dell'alloggio 12.A1, caratterizzata da un'ampia metratura sviluppata in lunghezza da sud, dove troviamo un importante elemento finestrato che affaccia sul balcone, a nord, anche qui con un elemento finestrato ma di dimensioni minori.

Complessivamente si tratta dunque di un ambiente di grandi dimensioni, esposto per pochi m² verso l'ambiente esterno su due lati, mentre il terzo affaccia sul vano scale, luogo in cui non avviene il controllo della temperatura ma pur sempre chiuso e riparato.

In questa configurazione ottimale, che tiene anche e soprattutto conto della geometria dell'ambiente, i due ventilconvettori sono posizionati sotto i due elementi finestrati, secondo una divisione della potenza termica erogata che tiene conto sia della grandezza del terminale che di quella della finestra, in modo da fornire più energia laddove è necessario.

Dalla prima immagine possiamo osservare come, a sud, nella porzione di finestra che per prima risente del getto d'aria riscaldata uscente dal ventilconvettore, si riesca ad ottenere

un ottimo effetto climatizzante in grado di contrastare efficacemente l'influenza disturbante della parete vetrata nella parte bassa che tipicamente è quella più fredda e caratterizzata da velocità dell'aria più elevate.

Dalla seconda immagine è chiaro come la temperatura della superficie della finestra rimanga comunque molto bassa, ma ciò che interessa lo studio in questo capitolo è soprattutto la temperatura dell'aria nella zona abitata o comunque a distanza dalla superficie perimetrale.

Sempre nella seconda immagine, è possibile vedere come il gradiente verticale all'interno della zona giorno sia molto influenzato dalla vicinanza alle pareti finestrate ma in maniera molto meno significativa rispetto all'installazione a soffitto: ciò è anche dovuto alle differenti velocità che si instaurano in prossimità della finestra, in quanto l'azione del terminale tende a smorzarle e non ad alimentarle come nel caso precedente, portando ad uno smorzamento dell'effetto di trascinamento.

Seppur non vi sia assoluta omogeneità in ambiente, la performance rimane ottima.

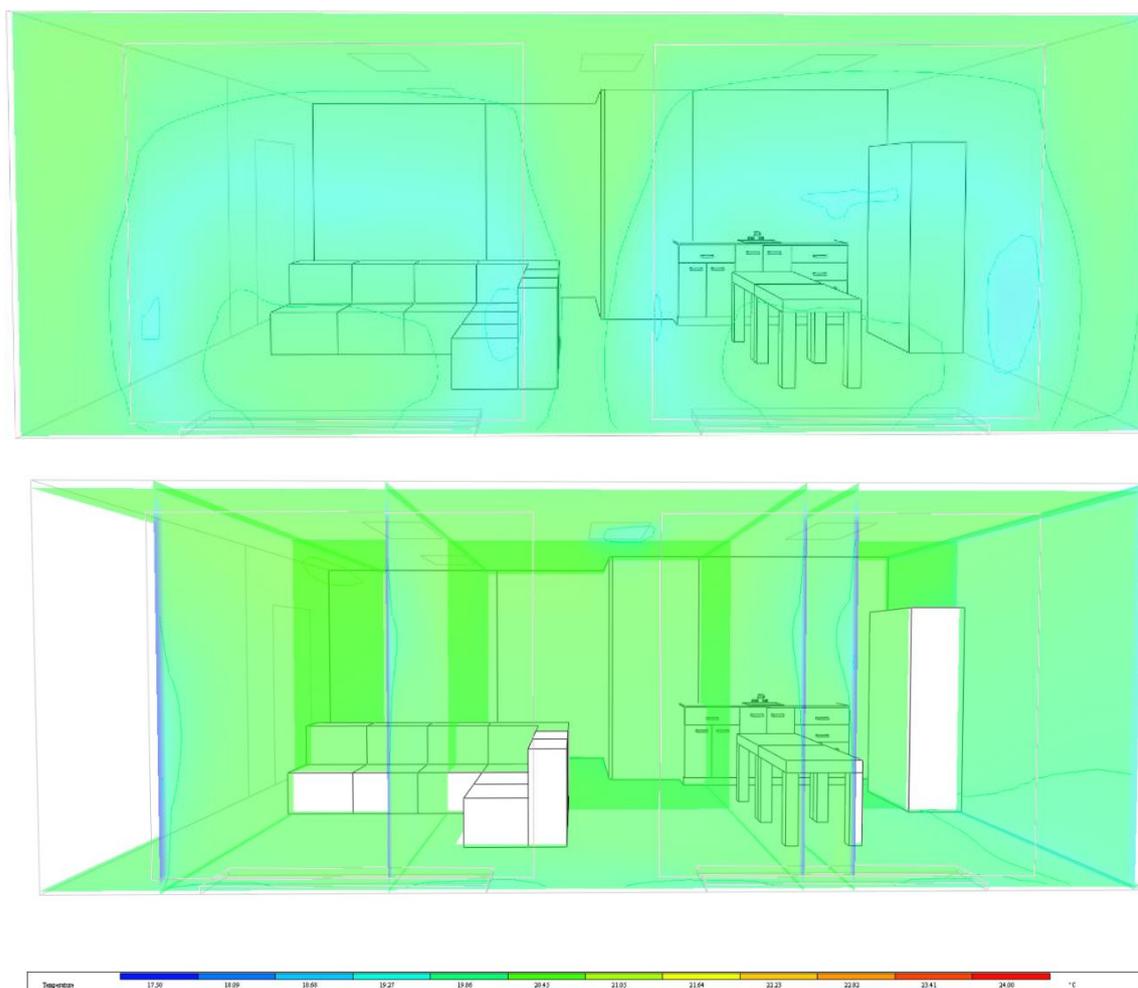


Figura 71- ventilconvettori pavimento: campo di temperatura in ambienti di grandi dimensioni; 9A3

In ultima analisi, troviamo la zona giorno dell'alloggio 9.A3, caratterizzata da una elevata metratura sviluppata su una base quasi quadrata. Esposto verso l'esterno su due lati, sud ed est, si tratta complessivamente di un ambiente di grandi dimensioni fortemente influenzato dalle condizioni esterne e dai ponti termici; il terzo lato affaccia parzialmente sul vano scale e parzialmente verso un altro alloggio.

In questa configurazione, che tiene anche e soprattutto conto della geometria dell'ambiente, i ventilconvettori hanno entrambi la stessa potenza termica in quanto uguali tra loro sono i due elementi finestrati.

Dalla prima immagine possiamo osservare come, a sud, nella porzione di finestra che per prima risente del getto d'aria riscaldata uscente dal ventilconvettore, si riesca ad ottenere un ottimo effetto climatizzante in grado di contrastare efficacemente l'influenza disturbante della parete vetrata nella sua parte più critica.

Nella seconda immagine, è possibile vedere come il gradiente verticale all'interno della zona giorno sia veramente poco, quasi per nulla, influenzato dalla vicinanza alle pareti finestrate: guardando il pavimento e le pareti perimetrali ci si rende conto dell'ottima omogeneità termica instaurata.

Per concludere, la posa a pavimento è davvero ottima dal punto di vista dell'omogeneità termica, ma il discorso legato ai vincoli manutentivi e agli ingombri rimane centrale.

4.3. Caso estivo

4.3.1. Pannelli radianti

I pannelli radianti sono una di quelle tipologie di terminali che consentono il duplice assetto da riscaldamento e raffrescamento. Come descritto al Capitolo 2, la strategia di lavoro delle due diverse tipologie di posa analizzate differiscono sensibilmente.

La posa a soffitto è nota per l'ottima resa e distribuzione di temperatura in ambiente poiché sfrutta al meglio il fenomeno fisico secondo cui le masse calde tendono naturalmente ad innalzarsi al di sopra di quelle fredde.

La quota radiante è stata considerata pari al 100% nel caso estivo, sia per la posa dei terminali a pavimento che a soffitto.

Nelle figure che seguono si è impostato come intervallo del gradiente cromatico per la visualizzazione dei risultati 22-28. Anche se localmente la temperatura delle superfici può essere minore o maggiore (superfici opache e soprattutto trasparenti), questo intervallo è risultato il migliore per commentare lo stato dell'ambiente occupato.

Si comincia con l'analisi e il commento della posa a soffitto.

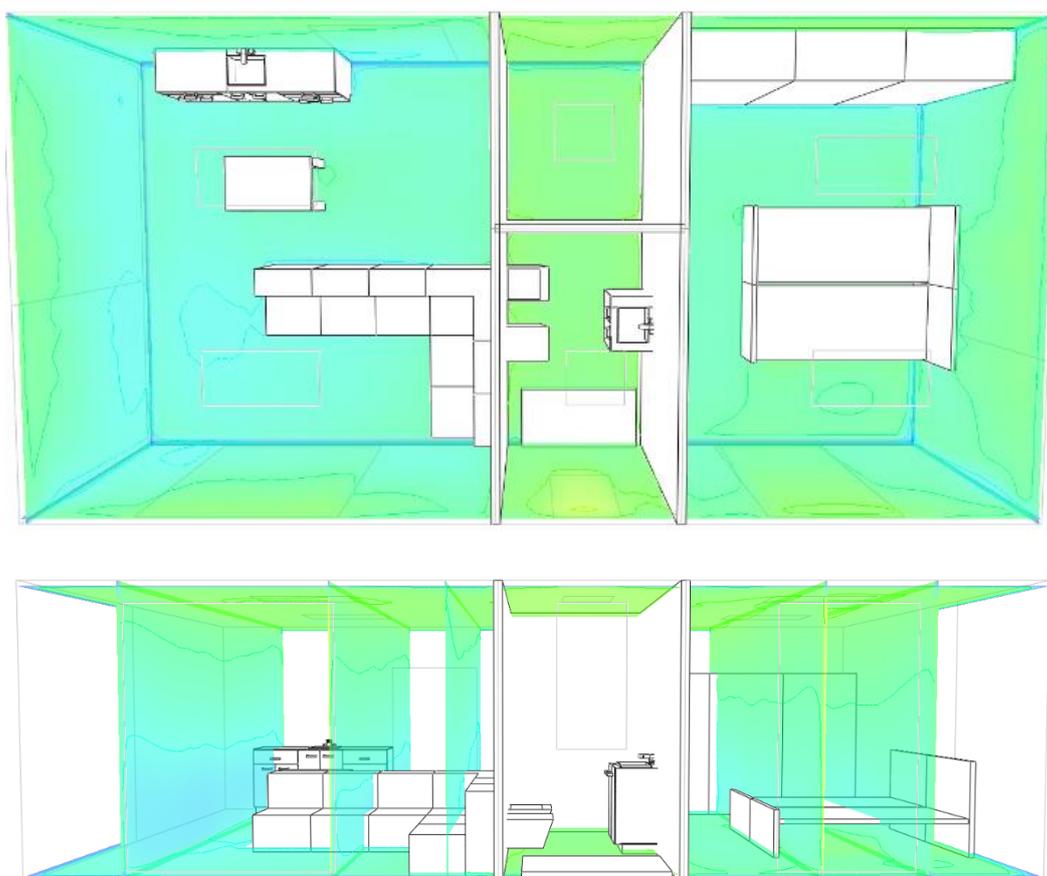


Figura 72- Pannelli radianti soffitto: campo di temperatura in ambienti di ridotte dimensioni; 4A2

Nel caso dell'alloggio 4.A2, gli ambienti analizzati sono caratterizzati dall'aver ridotte dimensioni e dall'essere esposti sul solo lato sud. Sono inoltre caratterizzati da dispendi energetici bassi poiché in corrispondenza delle uniche superfici finestrate troviamo un ampio balcone che le ombreggia completamente.

La percentuale di flusso termico scambiato per radiazione permette di ottenere ottime temperature superficiali interne delle pareti. Come anticipato, in questa prima configurazione la superficie attiva è quella del soffitto. Nella prima immagine si vede distintamente come la temperatura superficiale delle pareti sia tanto minore quanto più si è distanti dagli elementi più caldi come finestre e porta di ingresso.

Dalla prima immagine si nota come la temperatura delle pareti, molto vicine alla temperatura dell'aria ambiente, non favorisca assolutamente il formarsi di un gradiente

orizzontale di temperatura. Inoltre, è da sottolineare il grande effetto benefico che si riscontra anche sulle superfici vetrate a sud, elemento di principale disturbo per l'alloggio.

La seconda immagine evidenzia il gradiente verticale di temperatura che si forma in diverse zone dell'alloggio, mostrando l'ottima azione climatizzante di questa tipologia di terminale.

In generale, la valutazione del comportamento dei pannelli radianti a soffitto all'interno di questi ambienti piccoli e riparati è eccellente, in quanto si riescono ad ottenere le condizioni termiche di set point (e oltre) in ogni punto dell'alloggio senza creare gradienti termici rilevanti.

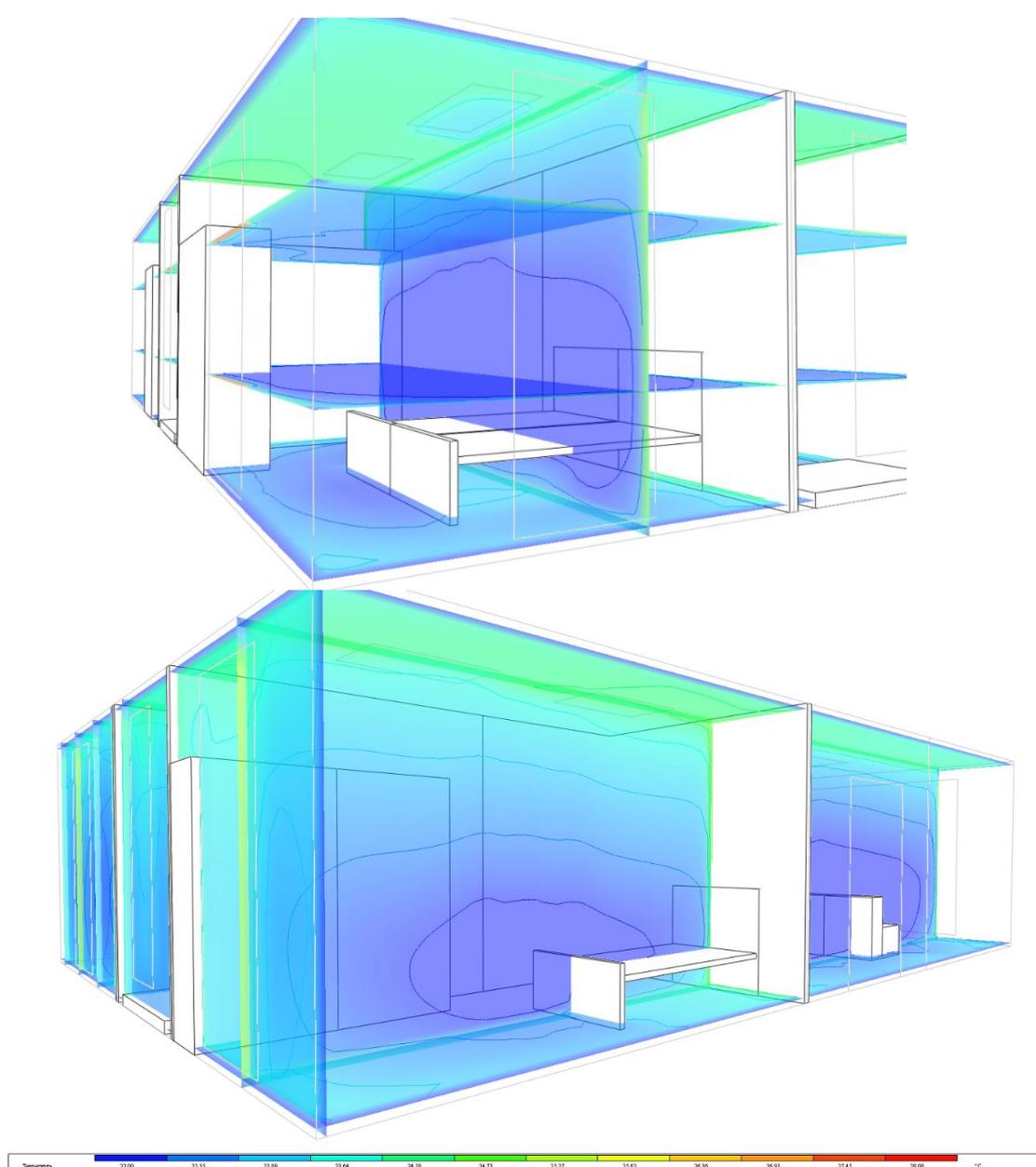


Figura 73- Pannelli radianti soffitto: campo di temperatura in ambienti di ridotte dimensioni; 9A3

Volendo trattare invece ambienti di dimensioni ridotte esposti su più di un lato verso l'esterno, si prende in esame la camera 1 e 2 dell'alloggio 9.A3.

La camera 1, esposta a est e a nord, presenta una finestra su ogni parete perimetrale disponibile.

La temperatura delle pareti interne è assolutamente soddisfacente, con la sola eccezione dell'involucro trasparente esposto ad est esposto direttamente all'azione del sole. Soprattutto in prossimità della sommità di questo elemento finestrato, nell'ambiente si crea un gradiente orizzontale di temperatura, che però resta assolutamente contenuto e che non impatta sulla qualità dell'azione climatizzante.

Complessivamente, la temperatura della stanza è più che ottima, con un piccolo accumulo di calore al di sotto del letto, zone che rimane più schermata dall'azione raffrescante del soffitto. Il gradiente verticale resta quasi impercettibile nella zona occupata.

La camera 2, più riparata e di dimensioni ridotte, presenta una sola finestra sull'unica parete perimetrale disponibile: quella a nord. Avvantaggiata sia nella posizione all'interno dell'edificio che nell'esposizione, che non permette mai di far fronte al carico del sole diretto, il dispendio energetico di questa stanza è minimo.

La temperatura delle superfici è ottima, anche e soprattutto in ragione della peculiarità espositiva, e il gradiente orizzontale è pressoché inesistente. Il gradiente verticale è leggermente più marcato rispetto alla camera 1, ma l'azione climatizzante resta ottima.

Complessivamente, la performance in questi due ambienti è ancora una volta eccellente.

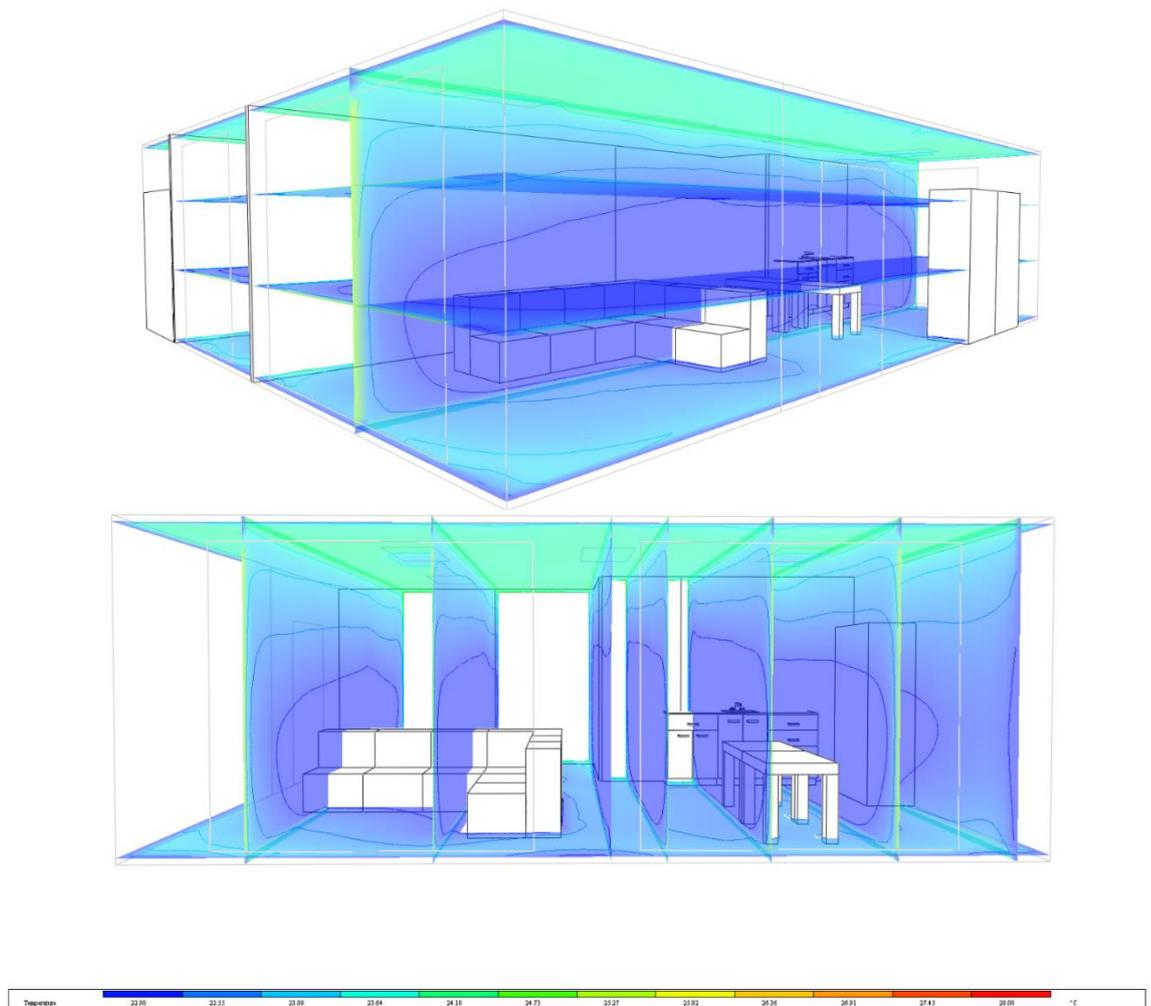


Figura 74- Pannelli radianti soffitto: campo di temperatura in ambienti di grandi dimensioni; 12A1 sopra 9A3 sotto

Come ultima analisi per la tipologia di posa a soffitto, troviamo la zona giorno dell'alloggio 9.A3, caratterizzata da un'ampia metratura sviluppata su una base quasi quadrata, e quella dell'alloggio 12.A1, avente invece base rettangolare con un rapporto lato lungo/lato corto molto pronunciato.

La zona giorno del 9.A3, esposta verso l'esterno su due lati, sud ed est, è un ambiente di grandi dimensioni fortemente influenzato dalle condizioni esterne e dai ponti termici; il terzo lato affaccia parzialmente sul vano scale e parzialmente verso un altro alloggio. Al contrario il salotto del 12.A1 è posizionato in modo strategicamente molto migliore dal punto di vista termico, in quanto esposto lungo i soli lati corti e riparato a sud dall'ampio balcone.

L'influenza degli elementi finestrati e dei ponti termici è minima, e nel caso dell'alloggio 12.A1 quasi assente, permettendo all'intero ambiente di avere le stesse caratteristiche termiche in ogni punto. La temperatura complessiva dell'alloggio è ottima, e va molto oltre i requisiti minimi richiesti, e il gradiente termico verticale rasenta la perfezione.

La trattazione continua con l'analisi e la trattazione del sistema di raffrescamento a pannelli radianti a bassa temperatura installati a pavimento.

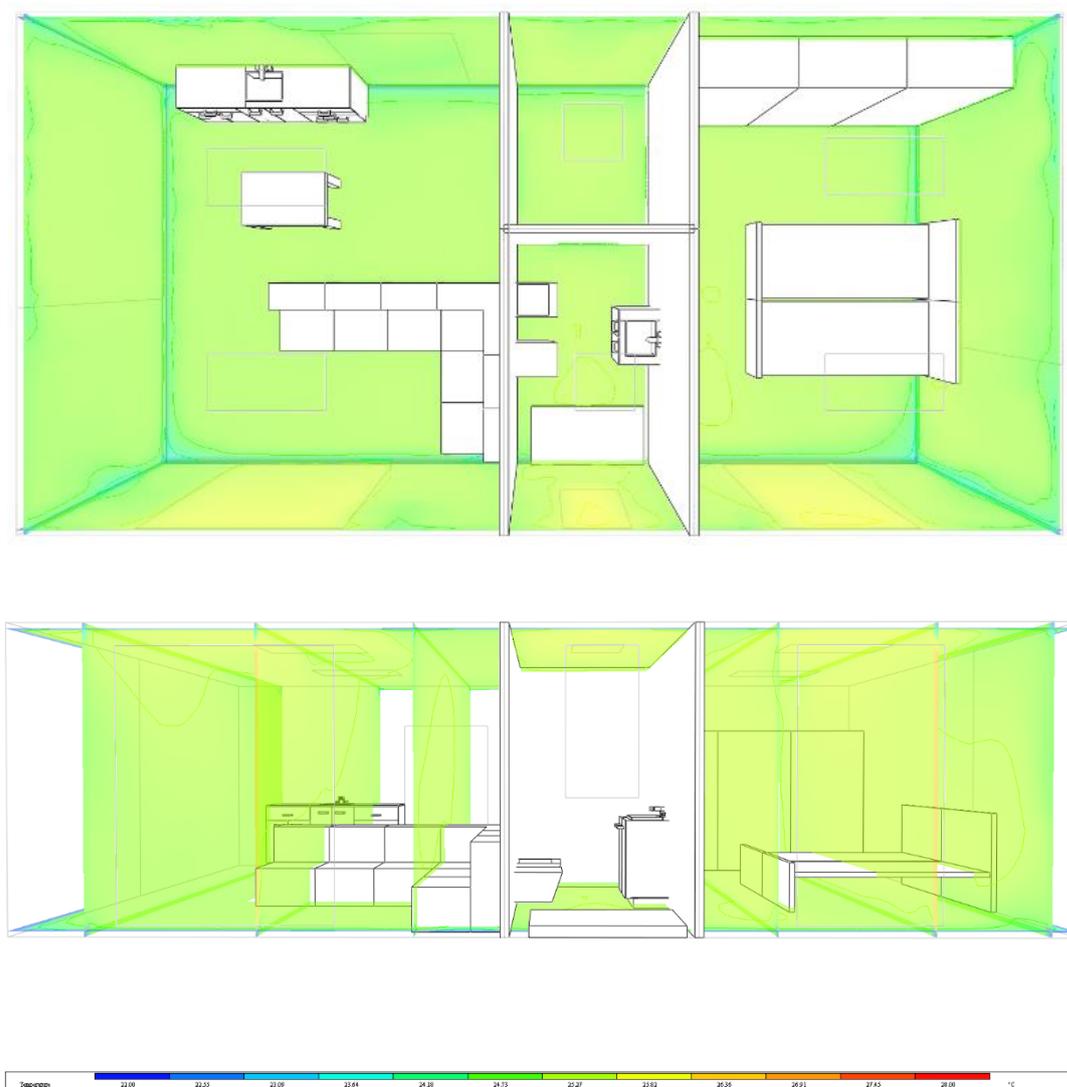


Figura 75- Pannelli radianti pavimento: campo di temperatura in ambienti di ridotte dimensioni; 4A2

La differenza tra le performance climatizzanti delle due tipologie di posa è lampante già a primo sguardo, senza grande necessità di analizzare lo spazio nel dettaglio: la temperatura media all'interno delle stanze è sensibilmente più elevata, seppur sia anche evidente che l'ambiente sia termicamente molto più omogeneo.

In questo primo caso, l'alloggio 4.A2 appare nella prima immagine molto omogeneo, e si nota come la temperatura delle pareti, molto vicine alla temperatura dell'aria ambiente, non favorisca assolutamente il formarsi di un gradiente orizzontale di temperatura, che difatti risulta quasi inesistente.

La seconda immagine ha lo scopo di mettere in risalto il gradiente verticale di temperatura che si forma in diverse zone dell'alloggio, che però in questo caso risulta quasi nullo.

Con una temperatura media all'interno dell'alloggio di poco più di 25°C, la valutazione del comportamento dei pannelli radianti a pavimento all'interno di questi ambienti piccoli e riparati è molto buona dal punto di vista dell'omogeneità, ma non ottima poiché, a parità di dispendio energetico, la soluzione a soffitto riusciva a garantire oltre 1.5°C in meno.

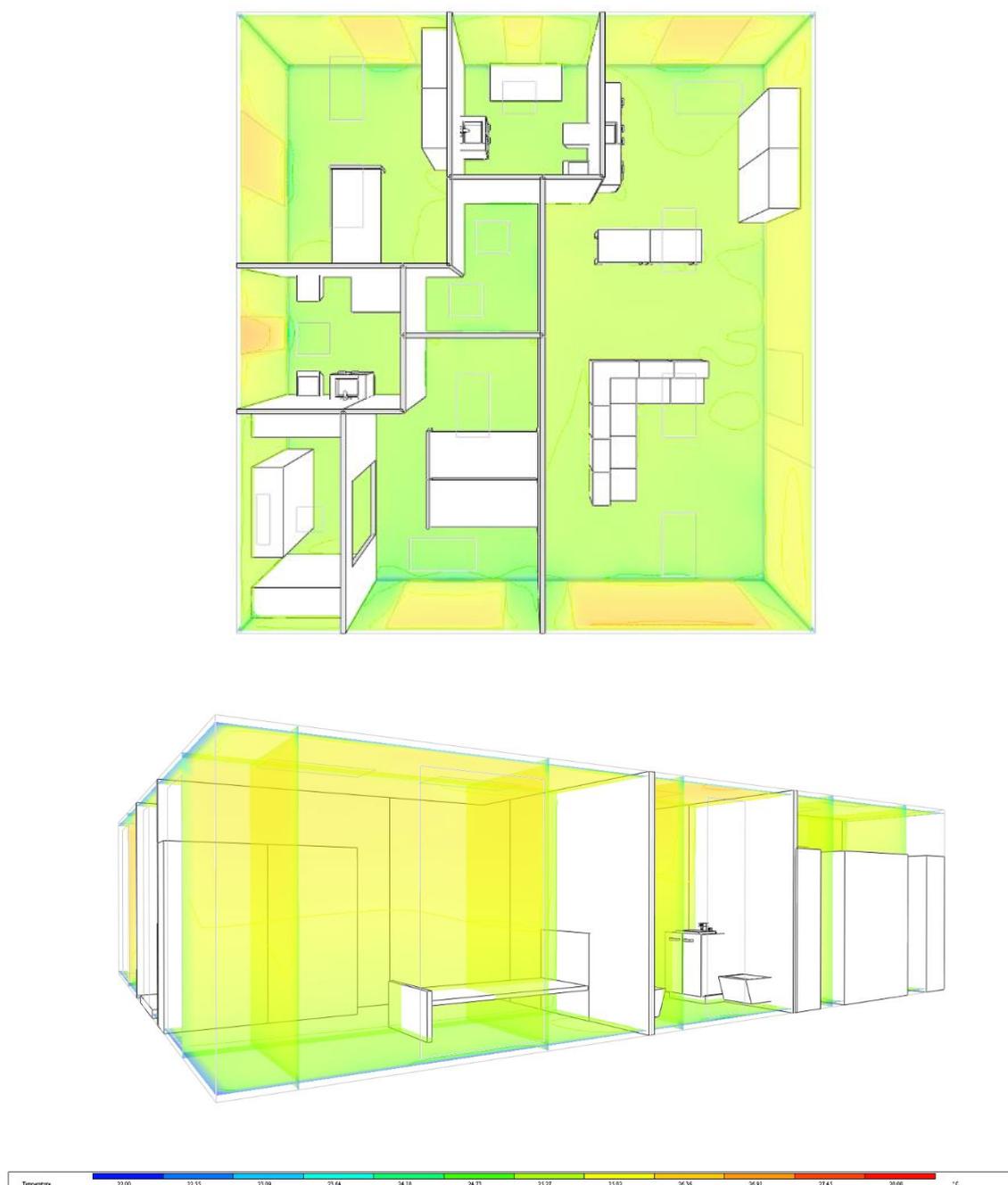


Figura 76- Pannelli radianti pavimento: campo di temperatura in ambienti di ridotte dimensioni; 12A1

Si procede con il commento delle due camere dell'alloggio 12.A1.

La camera 1, visibile nella figura in alto all'interno dell'alloggio, è composta da due zone, notte e cabina armadio, comunicanti, ed ha una superficie leggermente superiore all'altra. Doppia esposizione esterna verso sud, con grande elemento finestrato, ed ovest, dal lato della cabina armadio, vede l'installazione dei pannelli radianti nella sola zona notte.

La camera 2, visibile in basso, è anch'essa esposta su due lati, nord ed ovest, ma questi sono entrambi finestrati a differenza dell'altra camera. Diversa per metratura e conformazione, questa seconda camera è maggiormente esposta alle condizioni climatiche esterne in quanto non beneficia dell'azione protettiva del balcone.

Risulta ancora una volta molto netta la differenza tra le superfici verticali interne ed esterne, soprattutto se si considera l'involucro trasparente della camera 2 esposta a nord.

In questa tipologia impiantistica, la posizione dei terminali in ambiente come una camera da letto è un'arma a doppio taglio: seppur da una parte non vi siano ingombro né temperature superficiali locali troppo basse da creare discomfort, dall'altro lato il vincolo di avere come superficie attiva il pavimento quando uno degli elementi principali d'arredo è il letto fa necessariamente incorrere in effetti indesiderati e in perdita di efficienza del sistema di climatizzazione.

Analizzando nello specifico la camera 2, si nota subito come la diversa posizione ed esposizione della stanza determini una sostanziale differenza nelle temperature superficiali delle pareti interne: difatti sia per l'involucro trasparente che per quello opaco vi è un netto incremento del valore della temperatura. Nonostante ciò. La temperatura nella stanza è omogenea, seppur di poco superiore ai 25°C. Si ricorda che, con lo stesso dispendio energetico, la posa a soffitto era in grado di garantire performance molto migliori.

Complessivamente, tirando le somme, possiamo affermare che i pannelli radianti a pavimento nelle zone notte caratterizzate da limitate metrature forniscono discrete performance, seppur riescano a mantenere molto omogenea la temperatura ambiente.

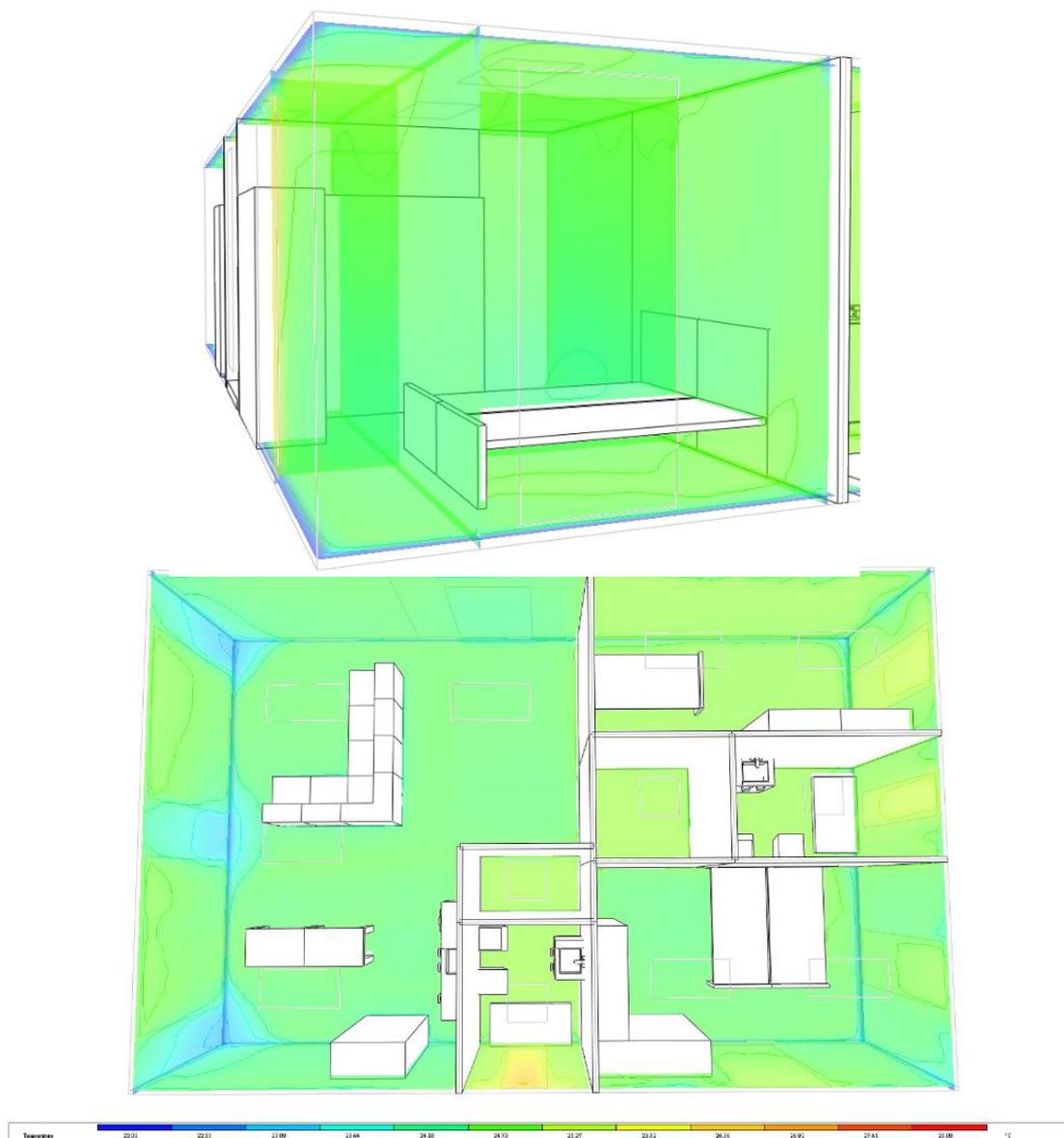


Figura 77- Pannelli radianti pavimento: campo di temperatura in ambienti di ridotte dimensioni; 9A3

La camera 1 dell'alloggio 9.A3, visibile nella figura in alto, è caratterizzata da una doppia esposizione esterna verso est e verso nord, e per ciascuna parete perimetrale presenta un elemento finestrato. La camera 2, visibile solamente all'interno dell'alloggio nella figura in basso, è esposta su un lato, a nord, presentando dunque una sola finestra. Diversa per metratura e conformazione, questa seconda camera è molto meno esposta alle condizioni climatiche esterne.

Le uniche parete a temperatura più bassa di quella ambiente sono quelle dell'involucro opaco che affaccia a sud, le quali sono riparate dal balcone. Per il resto, seppur la temperatura in alloggio sia molto omogenea si rispettano a malapena i valori minimi di set point imposti.

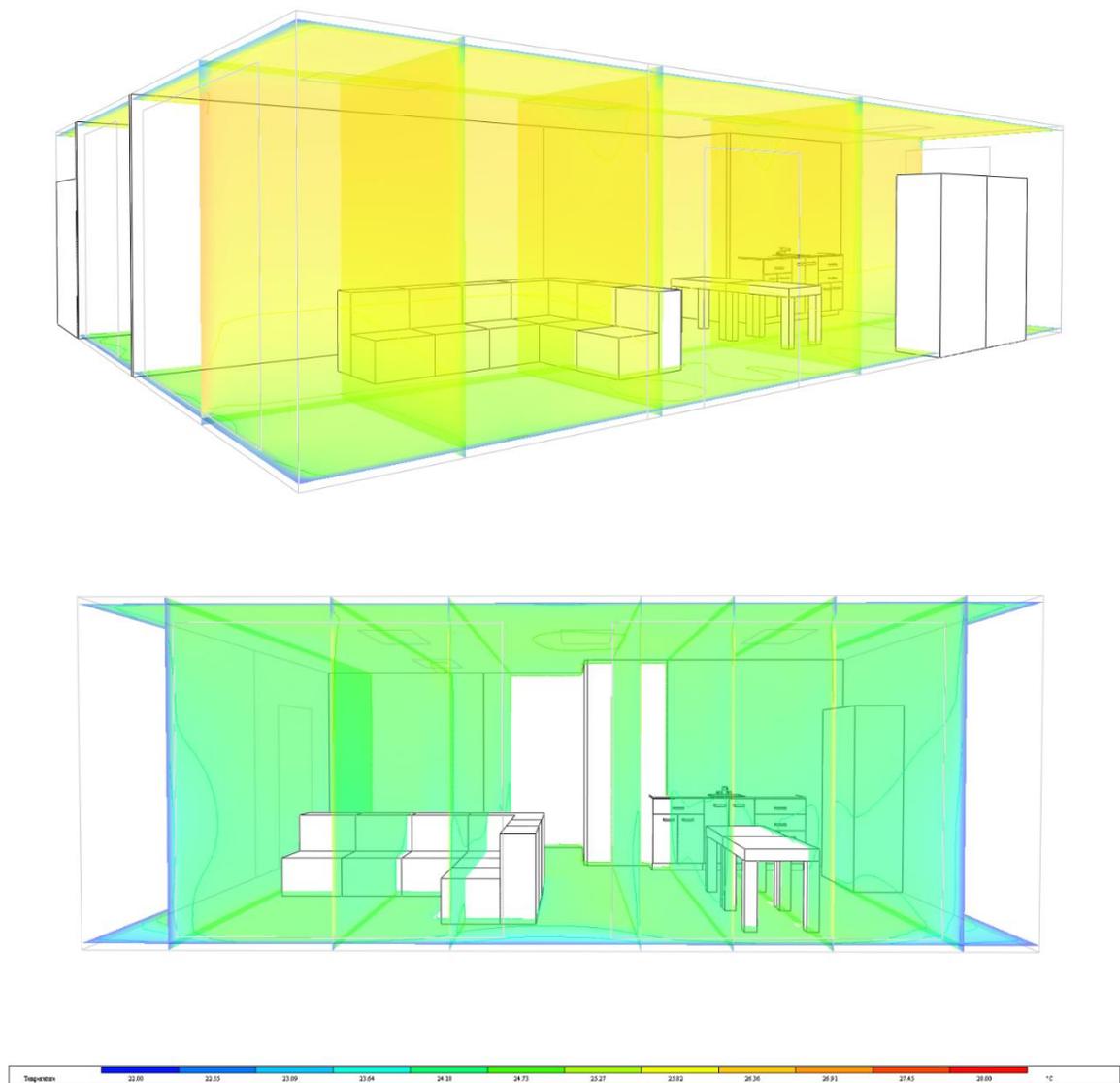


Figura 78- Pannelli radianti pavimento: campo di temperatura in ambienti di grandi dimensioni; 12A1 sopra 9A3 sotto

Come ultima analisi per la tipologia di posa a pavimento, troviamo la zona giorno dell'alloggio 9.A3, caratterizzata da un'ampia metratura sviluppata su una base quasi quadrata, e quella dell'alloggio 12.A1, avente invece base rettangolare con un rapporto lato lungo/lato corto molto pronunciato.

La zona giorno del 9.A3, esposta verso l'esterno su due lati, sud ed est, è un ambiente di grandi dimensioni influenzato dalle condizioni esterne e dai ponti termici seppure la sua esposizione a sud sia influenzata dalla presenza di un ampio balcone a ad est non vi siano elementi finestrati; il terzo lato affaccia parzialmente sul vano scale e parzialmente verso un altro alloggio.

Al contrario il salotto del 12.A1 è posizionato in modo strategicamente migliore dal punto di vista dell'esposizione verso l'esterno, in quanto esposto lungo i soli lati corti e riparato a sud dall'ampio balcone.

Un po' per l'ora del giorno in cui sono stati registrati questi valori, che è al mattino per l'alloggio 9.A3 e in pieno pomeriggio per l'alloggio 12.A1, un po' per la diversa altezza dei due appartamenti, l'alloggio 12.A1 soffre molto di più l'impiego di questi terminali. Soprattutto nella zona giorno, non si riesce ad ottenere i criteri minimi senza l'impiego di altre strategie di raffrescamento attive o passive. L'alloggio 9.A3 ottiene una performance migliore seppure anche lui riesca a stento a rispettare i valori imposti.

Complessivamente, la tipologia di posa a pavimento per i pannelli radianti impiegati nel raffrescamento degli ambienti non risulta essere la scelta migliore dal punto di vista puramente termico.

4.3.2. Terminali ibridi

I terminali ibridi in estate sono caratterizzati dalla sola componente convettiva di scambio termico, in quanto la piastra radiante è utile al solo riscaldamento ambientale.

Il loro ingombro rende proibitivo il loro utilizzo in ambienti con ristrette metrature, come ad esempio i servizi igienici, e crea comunque problemi anche in ambienti di medie dimensioni.

Nelle figure che seguono si è impostato come intervallo del gradiente cromatico per la visualizzazione dei risultati 22-28. Anche se localmente la temperatura delle superfici può essere minore o maggiore (superfici opache e soprattutto trasparenti), questo intervallo è risultato il migliore per commentare lo stato dell'ambiente occupato.

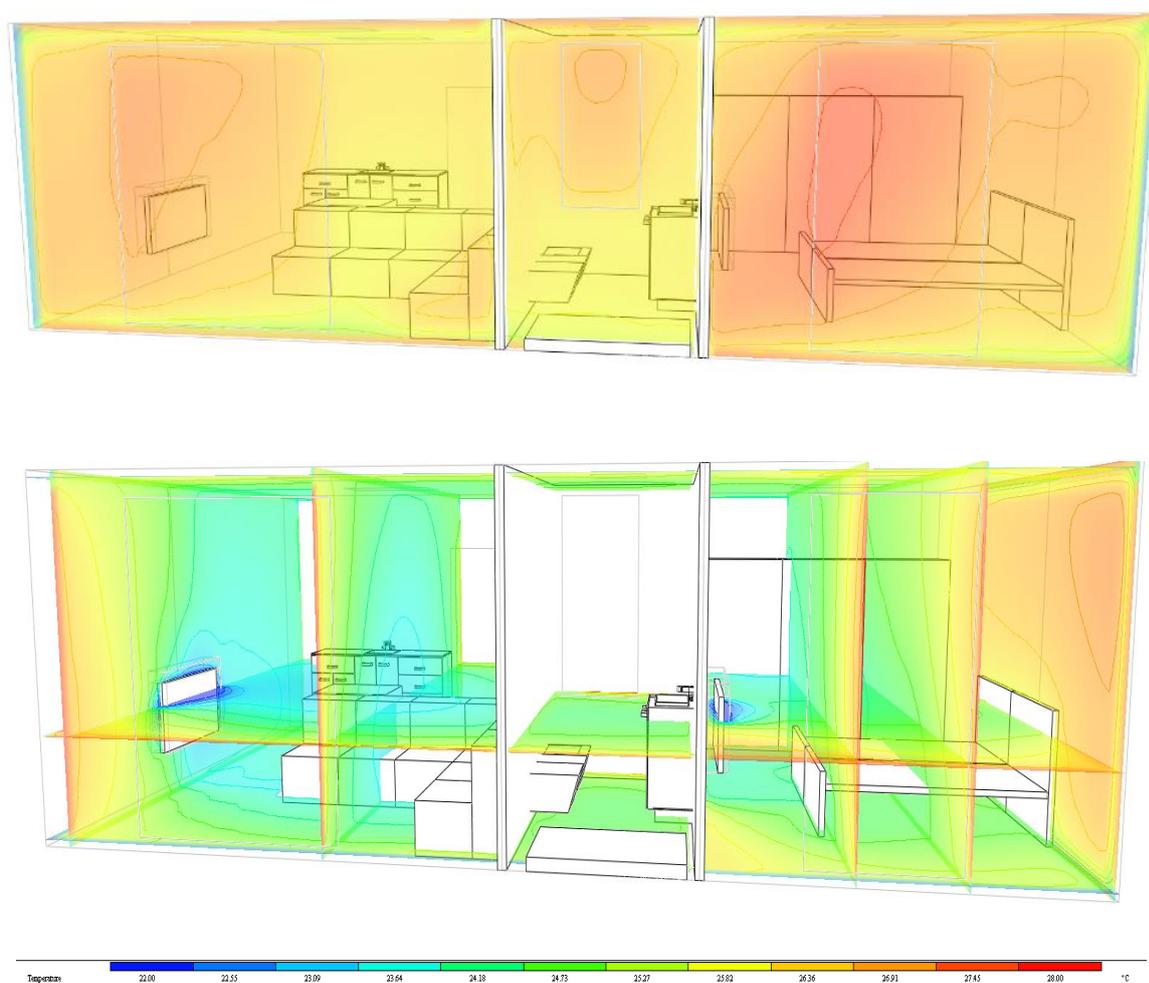


Figura 79- Terminali ibridi: campo di temperatura in ambienti di ridotte dimensioni; 4A2

Il primo alloggio ad essere analizzato è il 4.A2, caratterizzato da due ambienti di dimensioni ridotte: una zona giorno e una zona notte. È importante evidenziare subito come l'installazione dei terminali sia stata effettuata in prossimità degli elementi finestrati, per abbattere il carico che queste inducono in ambiente.

Nella prima immagine si vede distintamente come le superfici verticali opache e trasparenti siano decisamente meno influenzate dall'azione dei terminali rispetto ai pannelli radianti.

Il gradiente termico verticale ed orizzontale all'interno delle stanze è ben evidenziato nella seconda immagine della figura soprastante, in cui è evidente come ottime condizioni termiche si raggiungano solamente nella porzione di spazio interessata dall'azione del terminale. Nelle zone più periferiche, vicino agli angoli, in prossimità di mura perimetrali, la temperatura dell'aria torna a salire rapidamente.

In generale, la valutazione del comportamento dei terminali ibridi all'interno di questi ambienti piccoli e riparati è molto buona, in quanto si riescono ad ottenere ottime condizioni che vanno anche oltre i valori di set point minimi, seppur con tutte le imperfezioni del caso.

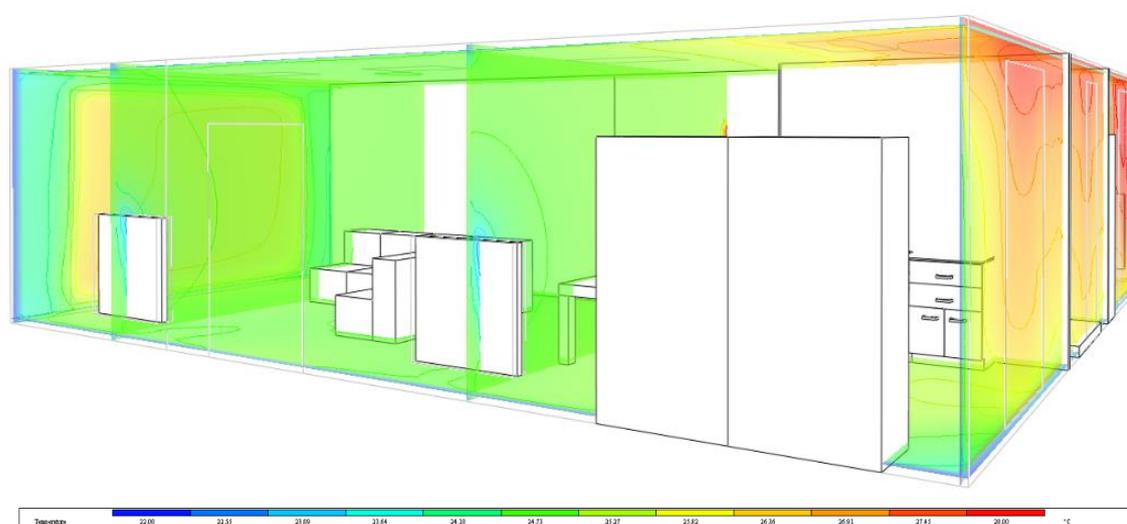


Figura 80- Terminali ibridi: campo di temperatura in ambienti di grandi dimensioni; 12A1

Spostando l'attenzione verso un ambiente del tutto differente dal precedente, si procede con il commento della zona giorno dell'alloggio 12.A1, caratterizzata da un'ampia metratura sviluppata in lunghezza da sud, dove troviamo un importante elemento finestrato che affaccia sul balcone, a nord, anche qui con un elemento finestrato ma di dimensioni minori.

Complessivamente si tratta dunque di un ambiente di grandi dimensioni, esposto però per pochi m² verso l'ambiente esterno su due lati, mentre il terzo affaccia sul vano scale, luogo in cui non avviene il controllo della temperatura ma pur sempre chiuso e riparato.

In questa configurazione ottimale, che tiene anche e soprattutto conto della geometria dell'ambiente, i due terminali sono installati lungo il lato lungo dalla parte che affaccia verso il vano scale. Il posizionamento dei terminali è dettato soprattutto dal loro ingombro, che ne rende impossibile il posizionamento lungo i lati corti.

Qui l'asimmetria è meno evidente rispetto all'alloggio 4.A2, ma comunque è fortemente influenzata dalla vicinanza o meno alla zona servita dal terminale: la parte centrale dell'ambiente ha ottime proprietà termiche, le zone più periferiche meno.

Complessivamente, la risposta del terminale al carico termico a cui è sottoposto è ottima.

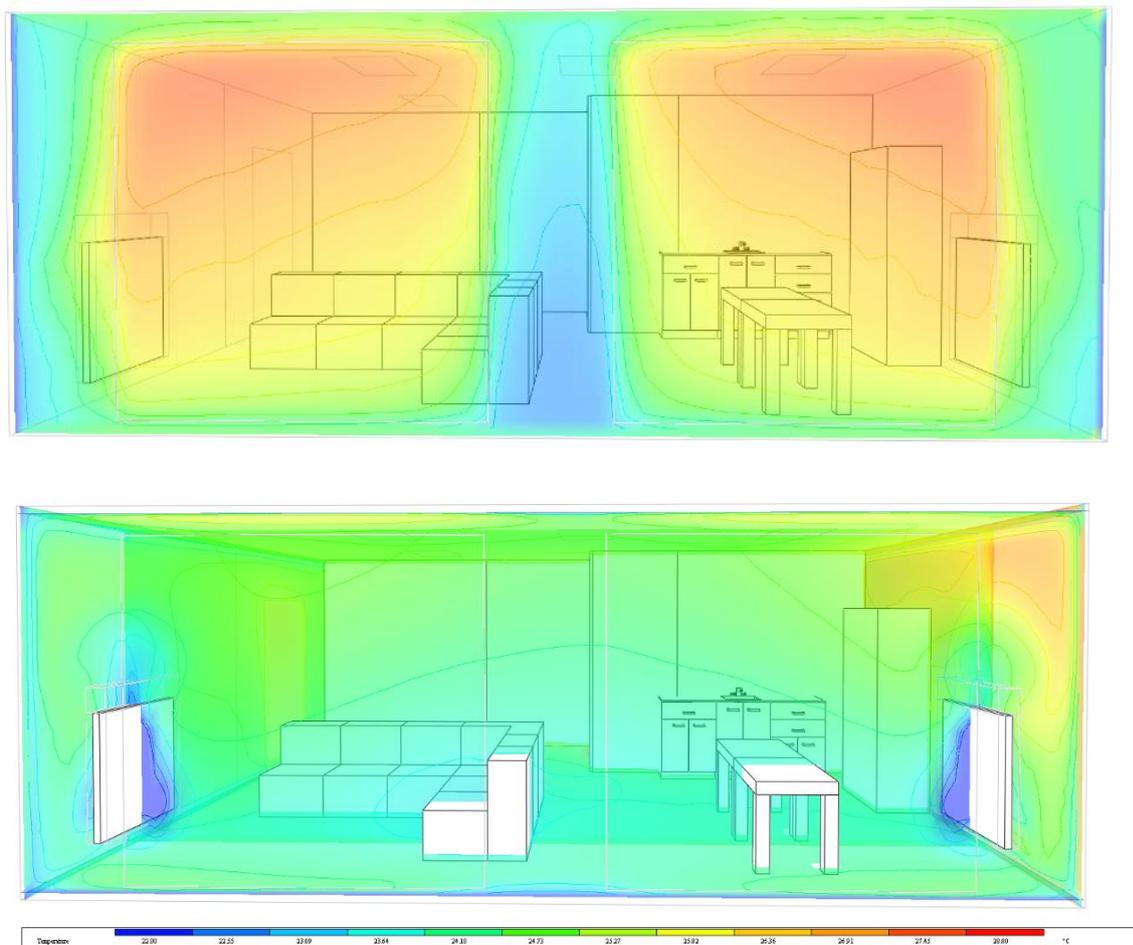


Figura 81- Terminali ibridi: campo di temperatura in ambienti di grandi dimensioni; 9A3

Come ultimo esempio, troviamo la zona giorno dell'alloggio 9.A3, caratterizzata da un'ampia metratura sviluppata su una base quasi quadrata. Esposto verso l'esterno su due lati, sud ed est, si tratta complessivamente di un ambiente di grandi dimensioni fortemente influenzato dalle condizioni esterne e dai ponti termici; il terzo lato affaccia parzialmente sul vano scale e parzialmente verso un altro alloggio.

In questa configurazione, che tiene anche e soprattutto conto della geometria dell'ambiente, i terminali sono installati ai due lati delle finestre: uno è installato lungo la parete esterna, uno sulla parete che affaccia sul vano scala.

L'influenza degli elementi finestrati c'è e crea disomogeneità, così come la presenza dei terminali che erogano aria a temperatura inferiore rispetto a quella ambiente, ma complessivamente l'azione combinata dei terminali posti in modo da contrastare gli effetti del carico entrante rende l'ambiente abbastanza omogeneo nella parte centrale.

Guardando in particolare la prima immagine, si nota come le finestre siano a temperature decisamente elevate rispetto a muri e aria interna.

Soffermandosi invece sulla seconda immagine, si nota come vi sia molta meno asimmetria perché i moti convettivi dell'aria si distribuiscono più omogeneamente senza creare zone fredde localizzate nell'immediata vicinanza del terminale come succedeva negli ambienti piccole dimensioni.

Tirando le somme, i terminali ibridi offrono ottime performance in ambienti che permettono loro di agire in grandi volumi senza incontrare barriere ne ostacolo strutturali, creano ottime condizioni termiche, mentre le prestazioni calano rapidamente in situazioni opposte in cui il limitato volume su cui operare e la presenza di tante pareti ad alta temperatura contribuiscono a creare disomogeneità, stratificazioni e accumuli di calore/freddo.

4.3.3. Ventilconvettori

I ventilconvettori sono i terminali che più di tutti creano dell'aria in ambiente, e di conseguenza maggiore mescolamento dell'aria. Anche in questo caso, come per i terminali ibridi, risultano inadeguati per la posa in ambienti di dimensioni contenute.

Nelle figure che seguono si è impostato come intervallo del gradiente cromatico per la visualizzazione dei risultati 22-28. Anche se localmente la temperatura delle superfici può essere minore o maggiore (superfici opache e soprattutto trasparenti), questo intervallo è risultato il migliore per commentare lo stato dell'ambiente occupato.

Si comincia a commentare i risultati ottenuti con la modellazione della tipologia di posa a soffitto.

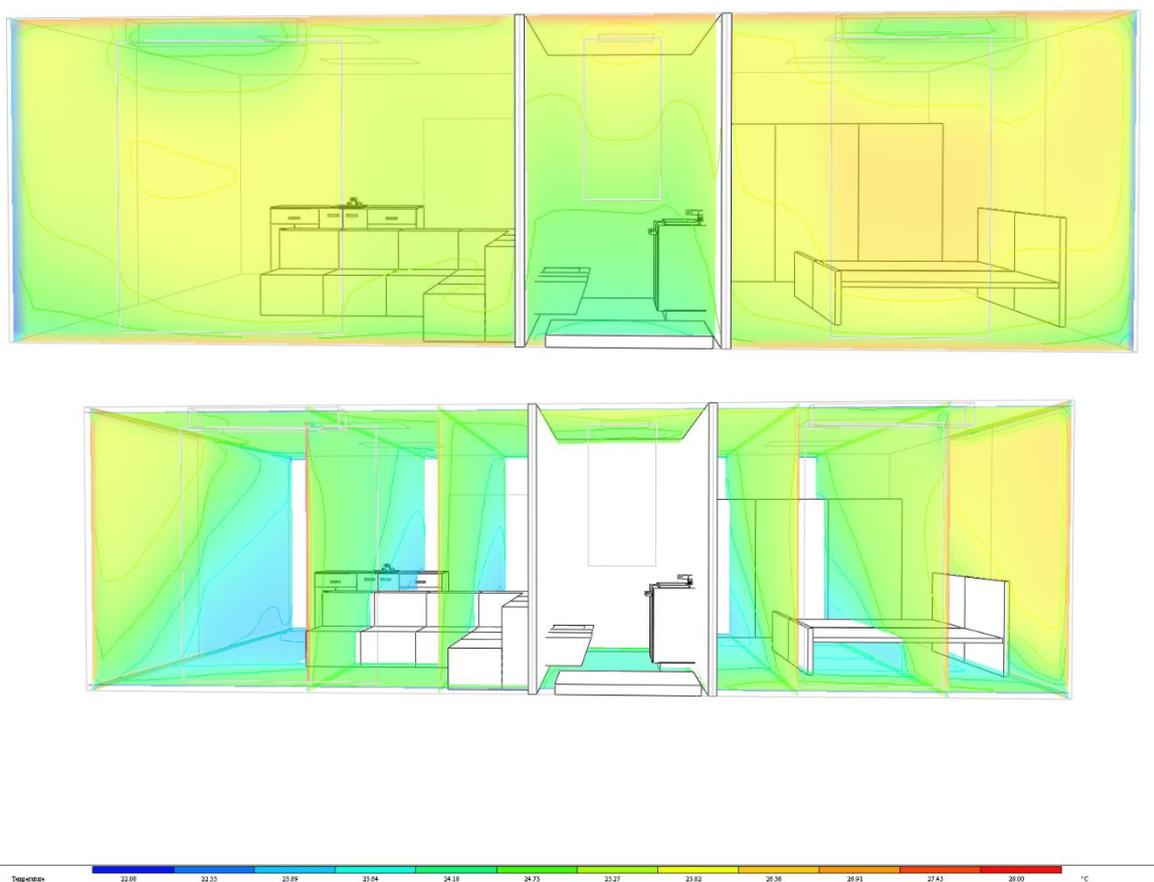


Figura 82- ventilconvettori soffitto: campo di temperatura in ambienti di ridotte dimensioni; 4A2

Nel caso dell'alloggio 4.A2, gli ambienti analizzati sono caratterizzati dall'aver ridotte dimensioni e dall'essere esposti sul solo lato sud. Sono inoltre caratterizzati da dispendi energetici bassi poiché in corrispondenza delle uniche superfici finestrate troviamo un ampio balcone che le ombreggia completamente.

Dalla prima immagine si nota come la temperatura dell'aria nei pressi degli involucri opaco e trasparente che affacciano a sud siano maggiori della ambiente ed è anche visibile l'ottimo lavoro che svolgono i terminali nell'abbattere gran parte del carico totale entrante. Difatti, all'inizio della simulazione, la temperatura delle superfici opache a sud era superiore a 28°C e quella delle superfici trasparenti era quasi 31°C. La temperatura delle finestre inoltre varia fortemente passando dalla zona meno e quella più influenzata dal getto d'aria erogato.

La seconda immagine evidenzia la distribuzione verticale di temperatura che si sviluppa nell'alloggio, mostrando forte disomogeneità nella climatizzante degli spazi questa tipologia di terminale: il gradiente termico che si instaura è fortemente influenzato dalle masse d'aria in movimento negli ambienti e dalle temperature delle pareti, oltre che ovviamente dagli ostacoli ai moti convettivi e al mobilio. Analizzando attentamente proprio l'influenza degli elementi d'arredo, si vede come divano e letto abbiano grande impatto sulla temperatura di quella porzione di spazio.

In generale, la valutazione del comportamento dei ventilconvettori a soffitto all'interno di questi ambienti piccoli e riparati è buona, seppur si instaurino gradienti termici molto marcati e accumuli di calore/aria fredda localizzati.

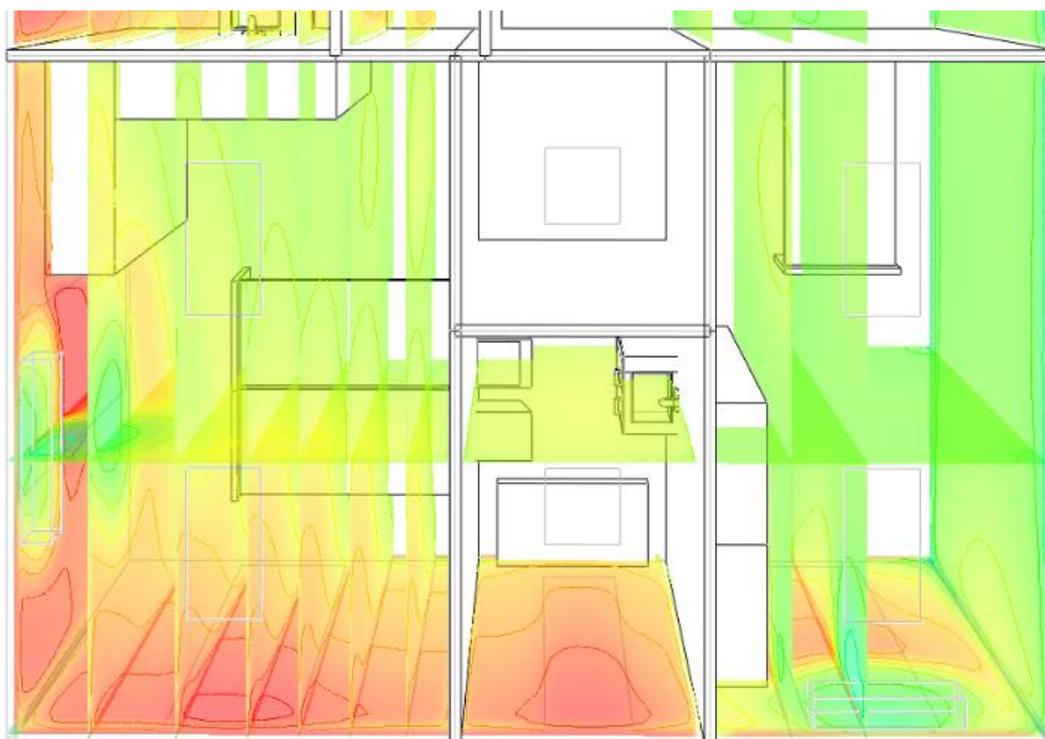


Figura 83- ventilconvettori soffitto: campo di temperatura in ambienti di ridotte dimensioni; 9A3

Volendo trattare invece ambienti di dimensioni ridotte esposti su più di un lato verso l'esterno, si prende in esame la camera 1 e 2 dell'alloggio 9.A3.

La camera 1, esposta a est e a nord, presenta una finestra su ogni parete perimetrale disponibile. La temperatura delle pareti interne e di soffitto e pavimento è assolutamente soddisfacente, mentre quella dell'involucro opaco e trasparente, è decisamente più elevata, seppur nella parte superiore della finestra di est il getto d'aria del terminale riesce ad agire in modo efficace.

È bene notare che è stata cambiata la localizzazione del ventilconvettore : nell'assetto invernale era stato posto sopra la finestra a nord, in estate invece è presente su quella a est, sulla quale il sole incide in modo diretto per molte ore d'estate.

Soprattutto in prossimità della sommità di questi elementi finestrati, nell'ambiente si creano gradienti orizzontali di temperatura, che però restano assolutamente contenuti e che non impattano sulla qualità dell'azione climatizzante.

Complessivamente, la temperatura della stanza soddisfa il valore di set point imposto. Gradienti di temperatura si instaurano soprattutto a causa della differente temperatura di

pareti perimetrali e aria interna, ma la variazione resta contenuta ed accettabile nella zona occupata.

La camera 2, più riparata e di dimensioni ridotte, presenta una sola finestra sull'unica parete perimetrale disponibile: quella a nord. Avvantaggiata sia nella posizione all'interno dell'edificio che nell'esposizione, che non permette mai di far fronte al carico del sole diretto, il dispendio energetico di questa stanza è minimo.

La temperatura delle superfici è ottima, anche e soprattutto in ragione della peculiarità espositiva, e il gradiente orizzontale è presente solamente nelle immediate vicinanze della finestra. Il gradiente verticale è quasi inesistente e complessivamente l'azione climatizzante è eccellente.

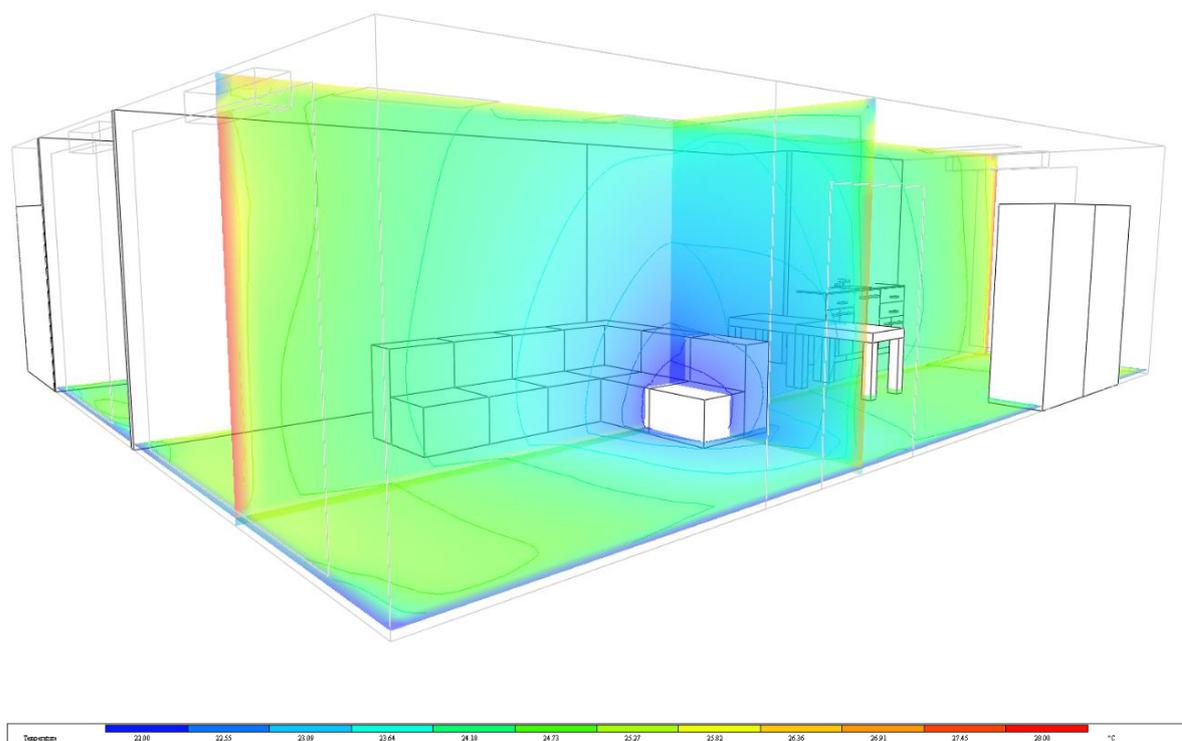


Figura 84- ventilconvettori soffitto: campo di temperatura in ambienti di grandi dimensioni; 12A1

Spostando l'attenzione verso un ambiente del tutto differente dai due precedenti, si procede con il commento della zona giorno dell'alloggio 12.A1, caratterizzata da un'ampia metratura sviluppata in lunghezza da sud, dove troviamo un importante elemento finestrato che affaccia sul balcone, a nord, anche qui con un elemento finestrato ma di dimensioni minori.

Complessivamente si tratta dunque di un ambiente di grandi dimensioni, esposto per pochi m² verso l'ambiente esterno su due lati, mentre il terzo affaccia sul vano scale, luogo in cui non avviene il controllo della temperatura ma pur sempre chiuso e riparato.

In questa configurazione ottimale, che tiene anche e soprattutto conto della geometria dell'ambiente, i due ventilconvettori sono posizionati sopra i due elementi finestrati, secondo una divisione della potenza termica erogata che tiene conto sia della grandezza del terminale che di quella della finestra, in modo da fornire più energia laddove è necessario.

Dall'immagine possiamo osservare la distribuzione di temperatura all'interno della stanza passando per i due assi di simmetria, in cui il gradiente termico verticale e orizzontale all'interno della zona occupata sia molto marcato. In questo caso il grande volume da raffrescare, la posizione molto periferica delle finestre e il grande carico termico localizzato rendono necessario l'impiego di portate d'aria che inevitabilmente hanno conseguenze anche sul resto dell'ambiente, non riuscendo a garantire quella discrezione tipica delle situazioni precedenti in cui, seppur non sempre si ottenevano valori di temperatura di set point, non vi erano gradienti termici così marcati.

Di conseguenza, seppur la performance sia buona, è già possibile notare come questi terminali siano maggiormente adatti ad altri tipi di situazioni.

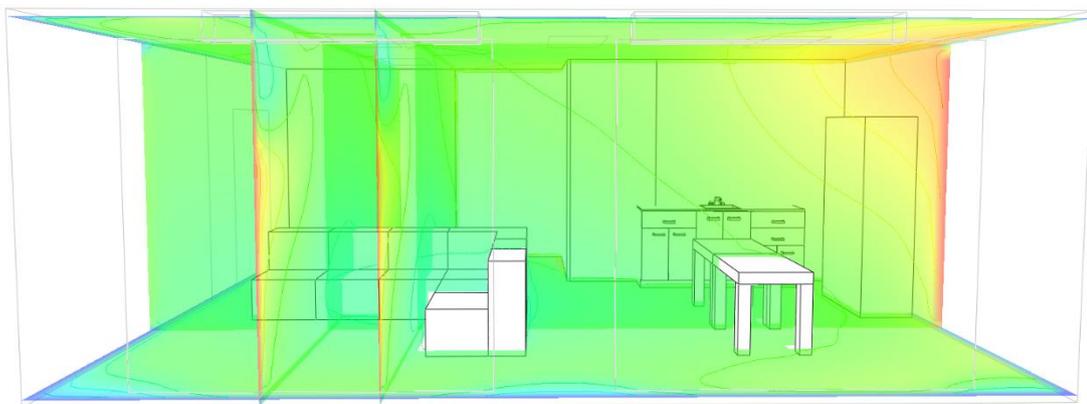
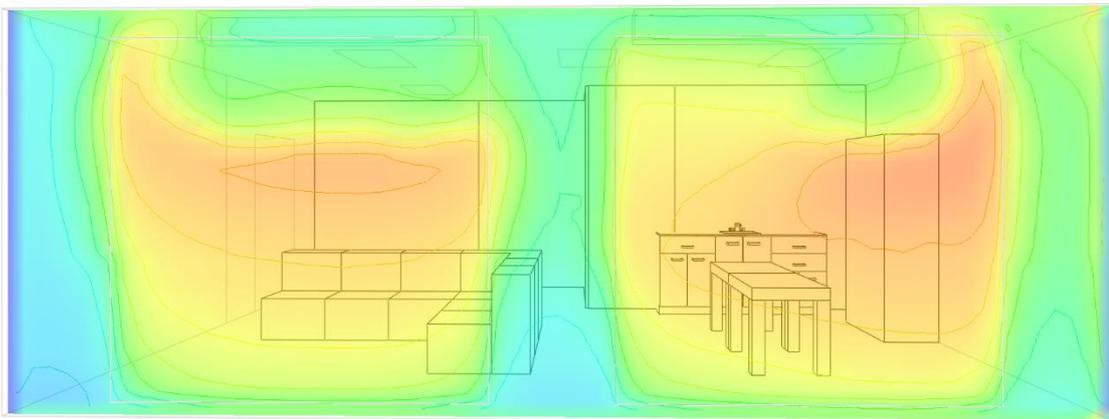
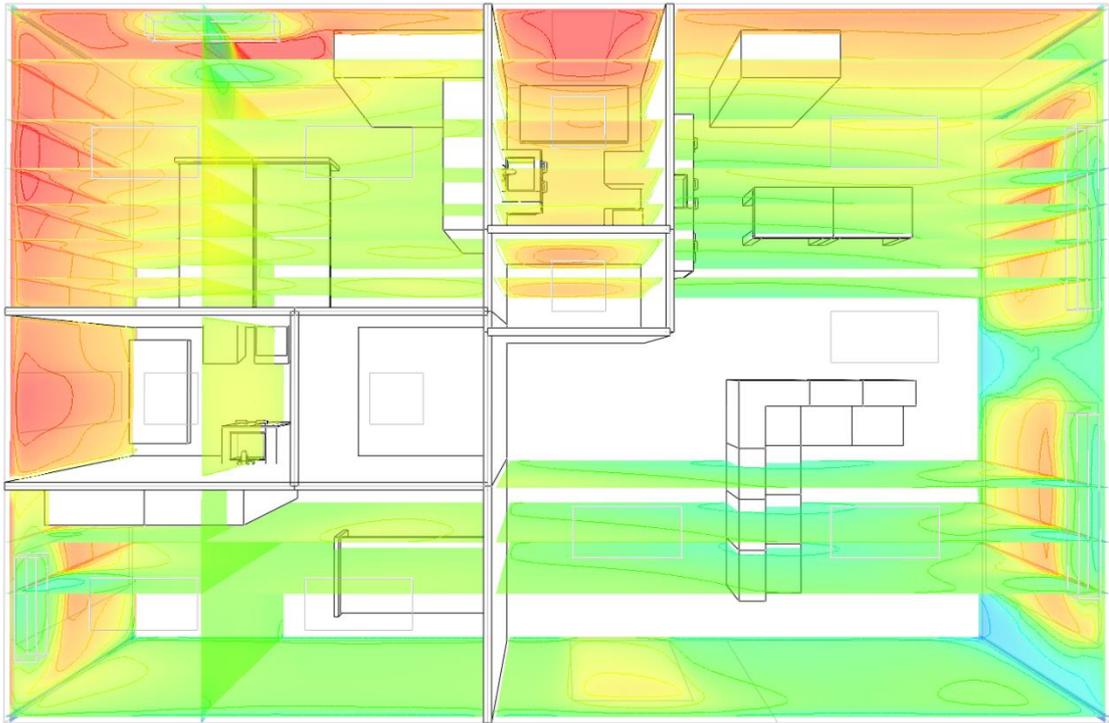


Figura 85- ventilconvettori soffitto: campo di temperatura in ambienti di grandi dimensioni; 9A3

Come ultimo esempio, troviamo la zona giorno dell'alloggio 9.A3, caratterizzata da un'ampia metratura sviluppata su una base quasi quadrata. Esposto verso l'esterno su due lati, sud ed est, si tratta complessivamente di un ambiente di grandi dimensioni fortemente influenzato dalle condizioni esterne e dai ponti termici; il terzo lato affaccia parzialmente sul vano scale e parzialmente verso un altro alloggio. In questa configurazione, i terminali sono installati al di sopra delle finestre.

Guardando in particolare la prima immagine, è subito evidente come l'azione del sole impatti fortemente sulla temperatura delle pareti perimetrali a est, mentre la temperatura esterna agisce sulla facciata di nord più che su quella di sud, grazie all'azione schermante e protettiva del balcone.

Per la parete a sud, si nota come le finestre siano a temperature decisamente elevate rispetto a muri e all'aria interna, e come l'azione dei ventilconvettori sia in grado di mitigarne molto gli effetti, riuscendo a portarle nel punto più caldo ad una temperatura molto minore di quella dell'involucro opaco di est.

Soffermandosi invece sull'ultima immagine, si nota come vi sia molta meno asimmetria perché i moti convettivi dell'aria si distribuiscono più omogeneamente senza creare zone eccessivamente fredde localizzate nell'immediata vicinanza del terminale, come succedeva negli ambienti piccole dimensioni o in cui i moti dell'aria erano ostacolati.

L'influenza degli elementi finestrati c'è e crea disomogeneità, così come la presenza dei terminali che erogano aria a temperatura inferiore rispetto a quella ambiente, ma complessivamente l'azione combinata dei terminali posti in modo da contrastare gli effetti del carico entrante rende l'ambiente abbastanza omogeneo nella parte centrale.

Cambiando soggetto, spostandosi verso la posa a pavimento, c'è da sottolineare come questa sia meno diffusa negli alloggi rispetto a quella a soffitto in quanto richiede più manutenzione e attenzione, oltre a rappresentare un elemento di vincolo per quanto riguarda l'arredamento.

Altro aspetto da sottolineare come premessa, è il diverso modo che hanno questi terminali di agire rispetto al caso precedente: se nell'erogazione del getto d'aria a soffitto c'è uno scontro tra le masse d'aria calda, che sale, e fredda, che scende, che crea conflitti e conseguenti perdite nell'efficienza del sistema, nell'erogazione a pavimento i moti dell'aria sono assecondati e la potenza termica viene rilasciata in modalità equicorrente.

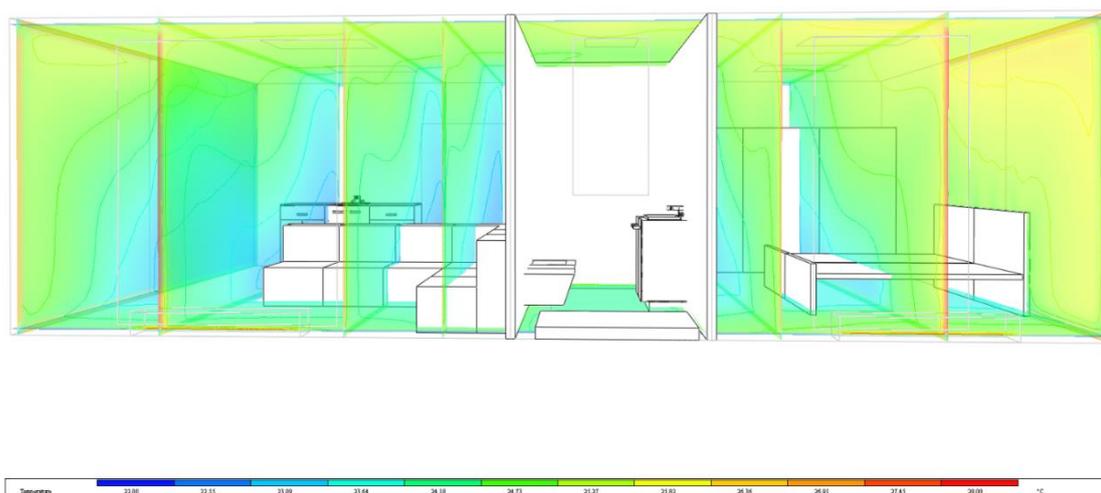


Figura 86- ventilconvettori pavimento: campo di temperatura in ambienti di ridotte dimensioni; 4A2

Nel caso dell'alloggio 4.A2, gli ambienti analizzati sono caratterizzati dall'aver ridotte dimensioni e dall'essere esposti sul solo lato sud. Sono inoltre caratterizzati da dispendi energetici bassi poiché in corrispondenza delle uniche superfici finestrate troviamo un ampio balcone che le ombreggia completamente.

Dall'immagine si nota come la temperatura degli involucri opaco e trasparente che affacciano a sud siano elevate, ma è anche evidente l'ottimo lavoro che svolgono i terminali nell'abbattere gran parte del carico totale entrante.

Nella stanza, mediamente, le condizioni minime di set point sono soddisfatte, seppur la distribuzione di temperatura che si sviluppa nell'alloggio mostra una disomogeneità molto forte e marcata. L'influenza di elementi di arredo è subito visibile, e vi sono inoltre grandi accumuli di aria fredda nella parte di ambiente antistante la zona di azione del getto del ventilconvettore.

In generale, la valutazione del comportamento dei ventilconvettori a pavimento all'interno di questi ambienti piccoli e riparati è molto buona.

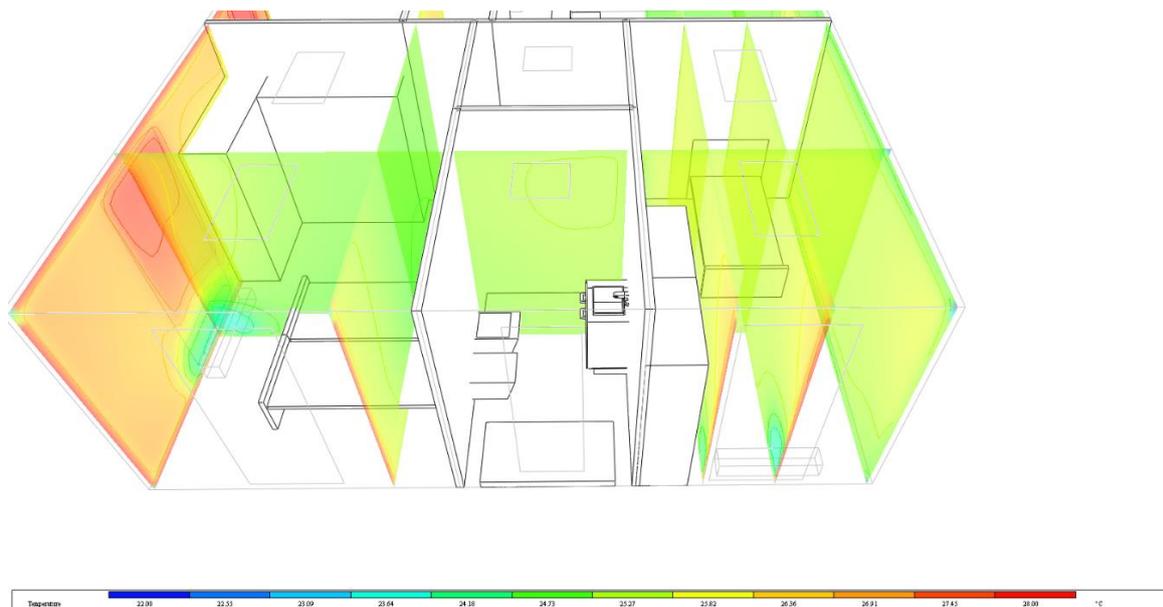


Figura 87- ventilconvettori pavimento: campo di temperatura in ambienti di ridotte dimensioni; 9A3

Volendo trattare invece ambienti di dimensioni ridotte esposti su più di un lato verso l'esterno, si prende in esame la camera 1 e 2 dell'alloggio 9.A3.

La camera 1, esposta a est e a nord, nell'immagine sopra, presenta una finestra su ogni parete perimetrale disponibile. La temperatura delle superfici dell'involucro trasparente e opaco esposte a est sono molto elevate, soprattutto nella superiore inferiore in cui il getto d'aria del terminale non riesce ad agire in modo altrettanto efficace come nella parte inferiore.

È bene notare che è stata cambiata la localizzazione del ventilconvettore : nell'assetto invernale era stato posto sopra la finestra a nord, in estate invece è presente su quella a est, sulla quale il sole incide in modo diretto per molte ore d'estate. I gradienti di temperatura ci sono, ma complessivamente lo stato termico della stanza è ottimo.

La camera 2, più riparata e di dimensioni ridotte, presenta una sola finestra sull'unica parete perimetrale disponibile: quella a nord. Avvantaggiata sia nella posizione all'interno dell'edificio che nell'esposizione, che non permette mai di far fronte al carico del sole diretto, il dispendio energetico di questa stanza è minimo.

La temperatura delle superfici non esterne è ottima, anche e soprattutto in ragione della peculiarità espositiva, e il gradiente orizzontale è presente ma in modo molto meno accentuato e localizzato soprattutto nelle immediate vicinanze della finestra. Il gradiente verticale è minimo e complessivamente l'azione climatizzante è ottima.

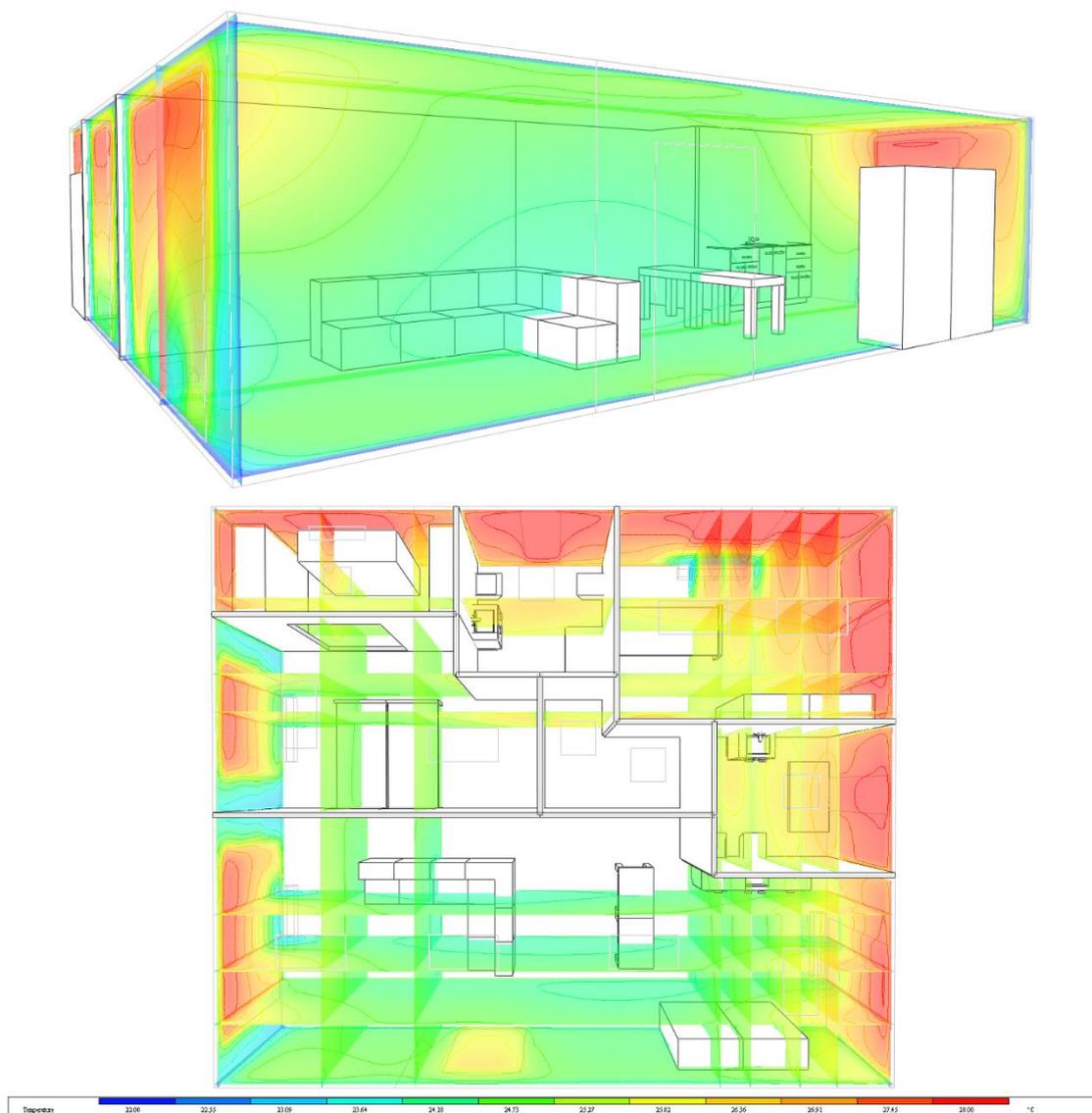


Figura 88- ventilconvettori pavimento: campo di temperatura in ambienti di grandi dimensioni; 12A1

Spostando l'attenzione verso un ambiente del tutto differente dai due precedenti, si procede con il commento della zona giorno dell'alloggio 12.A1, caratterizzata da un'ampia metratura sviluppata in lunghezza da sud, dove troviamo un importante elemento finestrato che affaccia sul balcone, a nord, anche qui con un elemento finestrato ma di dimensioni minori.

Complessivamente si tratta dunque di un ambiente di grandi dimensioni, esposto per pochi m² verso l'ambiente esterno su due lati, mentre il terzo affaccia sul vano scale, luogo in cui non avviene il controllo della temperatura ma pur sempre chiuso e riparato.

In questa configurazione ottimale, i due ventilconvettori sono posizionati sotto i due elementi finestrati, secondo una divisione della potenza termica erogata che tiene conto sia

della grandezza del terminale che di quella della finestra, in modo da fornire più energia laddove è necessario.

Dall'immagine possiamo osservare la distribuzione di temperatura all'interno della stanza in cui il gradiente termico verticale e orizzontale all'interno della zona occupata siano presenti ma contenuti: le temperature elevate delle pareti perimetrali si scontrano fortemente con l'aria ambiente, il getto del terminale crea disomogeneità.

Come conseguenza si creano zone a temperatura fortemente contrastante nell'arco di pochi centimetri, e al centro della stanza di forma un accumulo di aria fredda poiché la zona risulta meno influenzata da terminali e superfici calde.

È bene ricordare e precisare che questa simulazione è relativa alle ore 15:30 del pomeriggio, orario in cui il sole lambisce la parte opposta dell'appartamento consentendo all'intera zona giorno di essere ombreggiata e riparata.

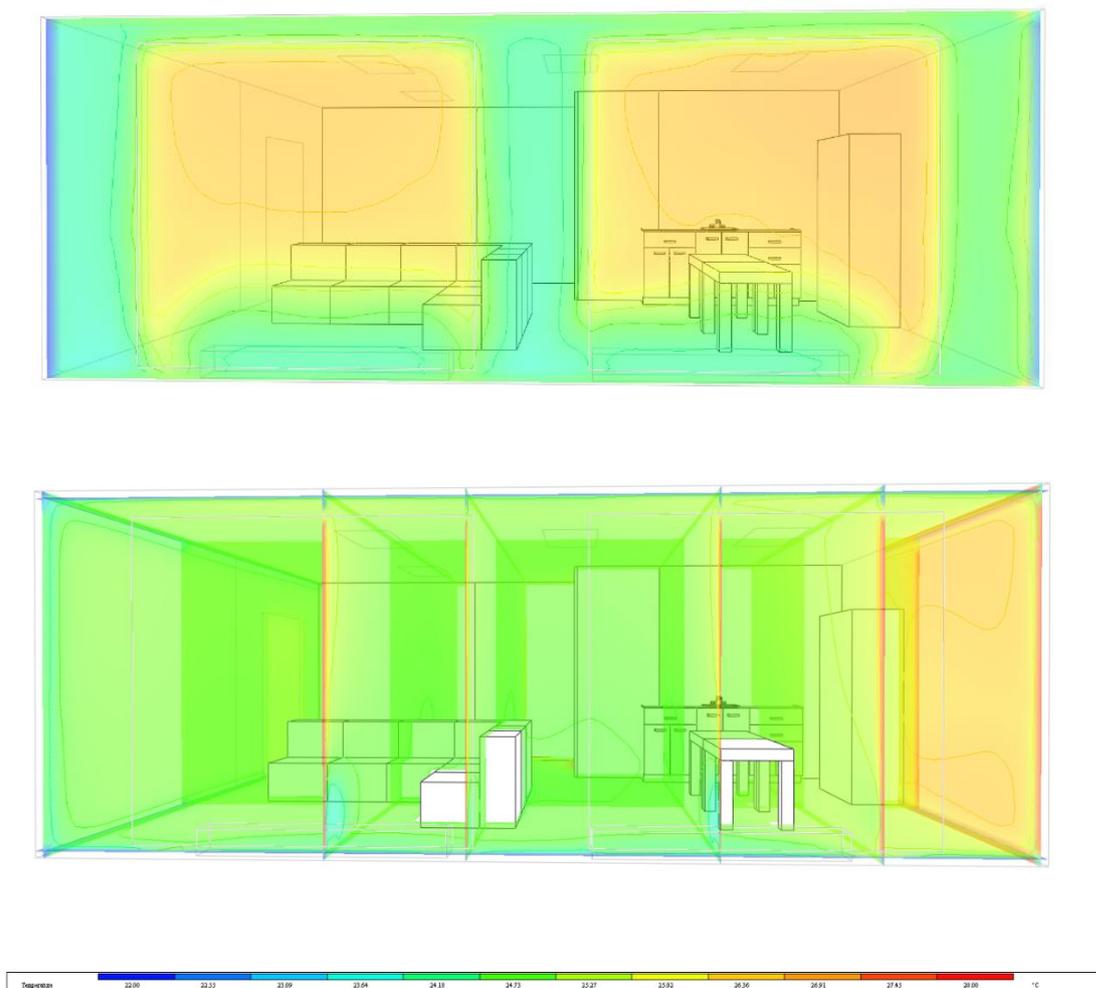


Figura 89- ventilconvettori pavimento: campo di temperatura in ambienti di grandi dimensioni; 9A3

Come ultimo esempio, troviamo la zona giorno dell'alloggio 9.A3, caratterizzata da un'ampia metratura sviluppata su una base quasi quadrata. Esposto verso l'esterno su due lati, sud ed est, si tratta complessivamente di un ambiente di grandi dimensioni fortemente influenzato dalle condizioni esterne e dai ponti termici; il terzo lato affaccia parzialmente sul vano scale e parzialmente verso un altro alloggio. In questa configurazione, i terminali sono installati al di sotto delle due finestre a sud.

Guardando in particolare la prima immagine, si nota come le finestre siano a temperature decisamente elevate rispetto a muri e aria interna, e come l'azione dei ventilconvettori sia in grado di mitigarne molto gli effetti, riuscendo a portarle nel punto più caldo ad una temperatura minore di quella dell'involucro opaco di est.

Soffermandosi invece sulla seconda immagine, si nota come vi sia molta meno asimmetria perché i moti convettivi dell'aria si distribuiscono più omogeneamente senza creare zone fredde localizzate nell'immediata vicinanza del terminale come succedeva negli ambienti piccole dimensioni.

L'influenza degli elementi finestrati c'è e crea disomogeneità, così come la presenza dei terminali che erogano aria a temperatura inferiore rispetto a quella ambiente, ma complessivamente l'azione combinata dei terminali posti in modo da contrastare gli effetti del carico entrante rende l'ambiente abbastanza omogeneo nella parte centrale.

In sintesi, il lavoro dei ventilconvettori a pavimento è ottimo, seppur le performance vanno contestualizzate nell'ambito della velocità dell'aria in uscita, che può variare in modo significativo.

Capitolo 5: Comparazione risultati dell'analisi CFD– Campi di velocità dell'aria

5.1. Caso invernale

5.1.1. Radiatori

I radiatori sono il terminale per impianto di riscaldamento più diffuso. La tipologia di radiatori considerata e modellata, come detto nel capitolo precedente, è quella *a bassa temperatura*. Nelle figure che seguono si è impostato come valore massimo del range di valutazione del campo di moto dell'aria in ambiente 0.44 m/s.

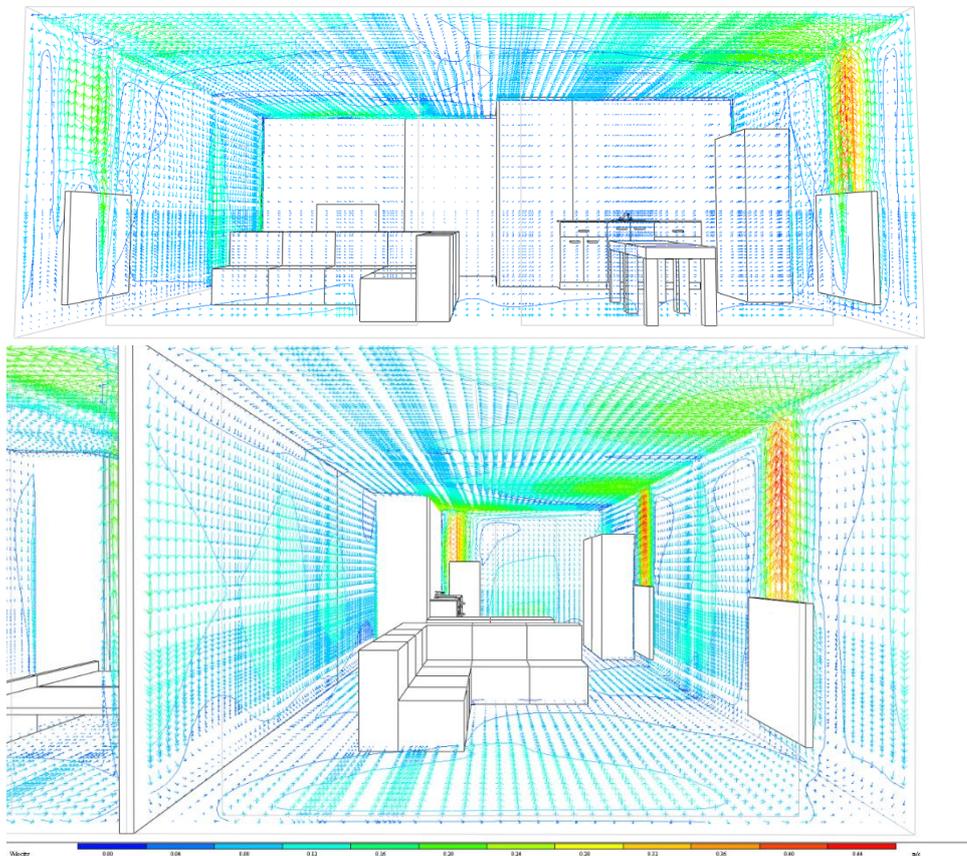


Figura 90- Radiatori: campo di velocità in ambienti di grandi dimensioni; 9A3 sopra, 12A1 sotto

Partendo dall'alloggio 9.A3, è bene specificare che l'azione dei due radiatori è molto diversa e influenzata dalla parete su cui questi sono stati installati. Il radiatore posto contro la parete interna, quello di sinistra, induce difatti moti dell'aria di gran lunga più contenuti rispetto a quello posto a contatto con la superficie esterna, più fredda.

Entrambi i terminali comunque inducono moti a ridosso delle zone perimetrali della stanza e sul soffitto, come si può osservare, ma all'interno della zona occupata, nonostante la presenza di ingombri, l'aria è pressoché ferma.

Nell'ambiente 12.A1, visibile nell'immagine sotto, i terminali sono posti lungo le pareti interne e agiscono lungo le direzioni minori, il che porta a dei gradienti di velocità in ambiente più marcati del caso precedente. I moti dell'aria si riflettono anche su pavimento e pareti opposte rispetto a quelle di installazione dei terminali, ma all'interno della zona occupata la velocità dell'aria risulta impercettibile.

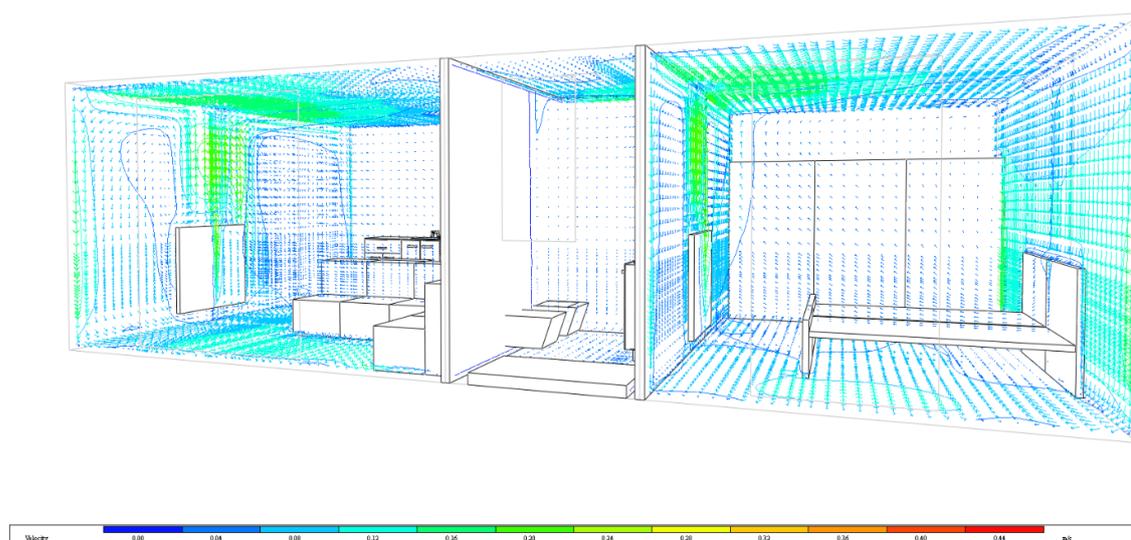


Figura 91- Radiatori: campo di velocità in ambienti di grandi dimensioni; 4A2

In questa seconda tipologia di alloggio, abbiamo ambienti piccoli, esposti su un solo lato, riparati dal balcone a sud. I radiatori sono installati sui due muri non perimetrali, di cui uno interno ed uno che confina con un altro alloggio.

Essendo le temperature delle superfici interne prossime a quella ambiente, si evidenziano moti dell'aria indotti minori rispetto ad altre casistiche, seppur l'influenza dei terminali sia evidente. Complessivamente, non vi è disturbo nella zona occupata.

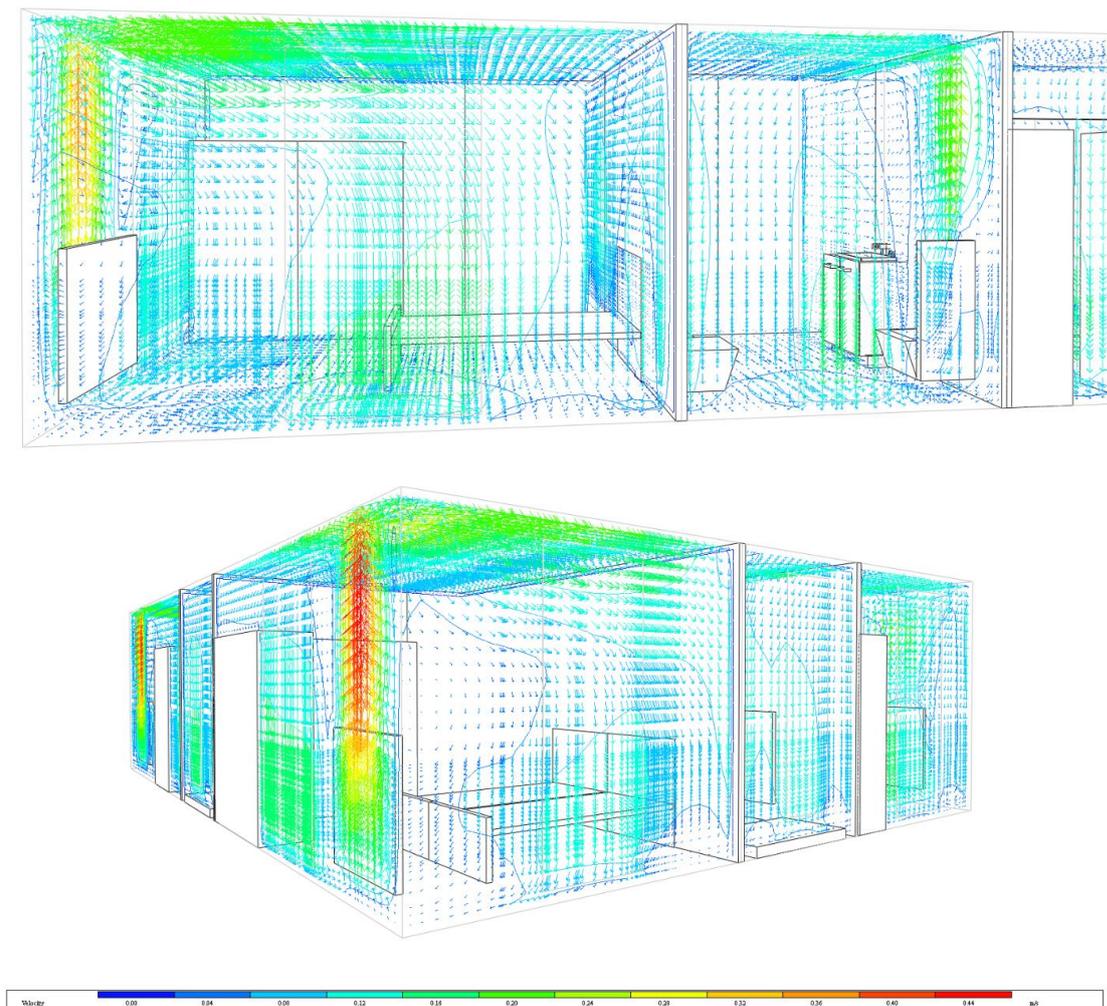


Figura 92- Radiatori: campo di velocità in ambienti di dimensioni ridotte; da sopra a sotto: 9A3

Partendo dalla camera 2 dell'alloggio 9.A3, è bene sottolineare come questa sia esposta all'ambiente esterno solo su un lato, dotato tra l'altro di finestra stretta ma alta. Le caratteristiche di dimensione ridotta, singola esposizione, la rendono un ambiente facile da trattare.

Il radiatore è installato sulla parete esterna, situazione ottimale per questa tipologia di terminale. I moti aerei sono maggiori rispetto ai casi precedenti, a causa del ridotto volume della stanza che facilita il formarsi di correnti ascendenti e discendenti ben distinte.

Per quanto riguarda la camera 1, si tratta di una camera con doppia esposizione e doppia finestra.

Il radiatore è installato sulla parete esterna che volge ad est. I moti che vengono indotti a ridosso della parete sono elevati, ma complessivamente si ottiene una buona performance all'interno della zona occupata, in cui l'aria ha una velocità inferiore a quella camera 2.

5.1.2. Pannelli radianti

I pannelli radianti sono una di quelle tipologie di terminali che consentono il duplice assetto da riscaldamento e raffrescamento. Come descritto al Capitolo 2, la strategia di lavoro delle due diverse tipologie di posa analizzate differiscono sensibilmente.

Nelle figure che seguono si è impostato come valore massimo del campo di moto dell'aria in ambiente 0.3 m/s, valore che deve necessariamente essere rispettato soprattutto nelle zone indisturbate dell'alloggio in quanto i pannelli radianti non sono una tipologia di terminale caratterizzata da spostamenti d'aria di rilevanza.

Si comincia ad analizzare la tipologia di posa a soffitto.

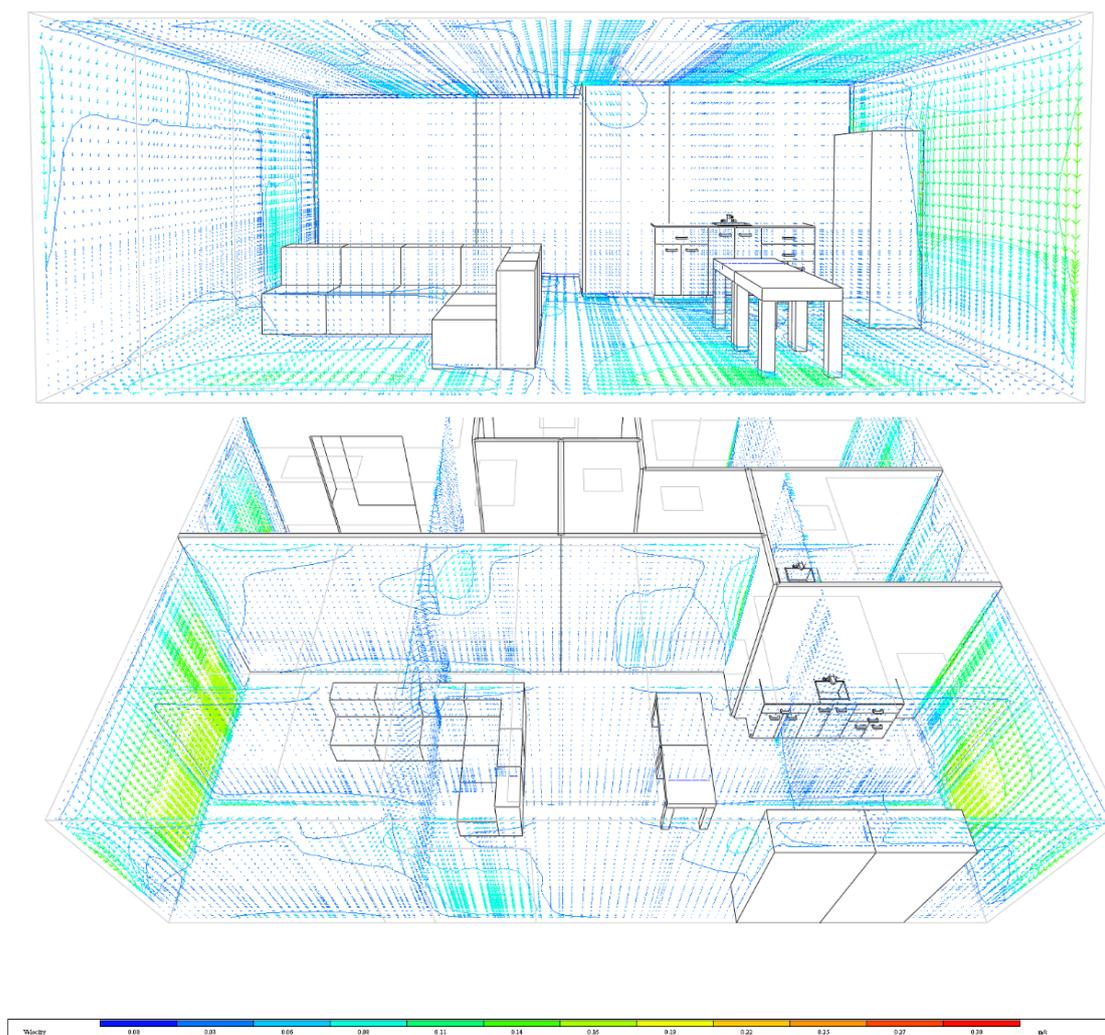


Figura 93- Pannelli radianti a soffitto: campo di velocità in ambienti di grandi dimensioni; 9A3 sopra, 12A1 sotto

In entrambi gli alloggi presenti nella figura di riferimento, è evidente come vi sia un'eccellente strategia di climatizzazione che non crea alcun disturbo all'ambiente.

Nel caso della zona giorno dell'alloggio 9.A3, si ha un ambiente di ampia metratura caratterizzato da una pianta quasi quadrata. Sono indotti moti di bassissima intensità sulle sole superfici delle finestre a sud e sulla parete perimetrale ad est, ma l'aria nella zona occupata è pressoché ferma.

Spostandoci sull'alloggio 12.A1, si cambia tipologia di ambiente poiché questo risulta al contrario a pianta rettangolare in cui un lato è fortemente più corto dell'altro. La presenza di due finestre, una a nord e una a sud, lungo i lati corti permette all'ambiente di essere molto riparato e poco influenzato dalle condizioni esterne.

Neanche in questo caso si sviluppano nella zona occupata moti aerei degni di nota, seppur sulle superfici vetrate e, in generale, sulle superfici confinanti con l'esterno si creano moti convettivi.

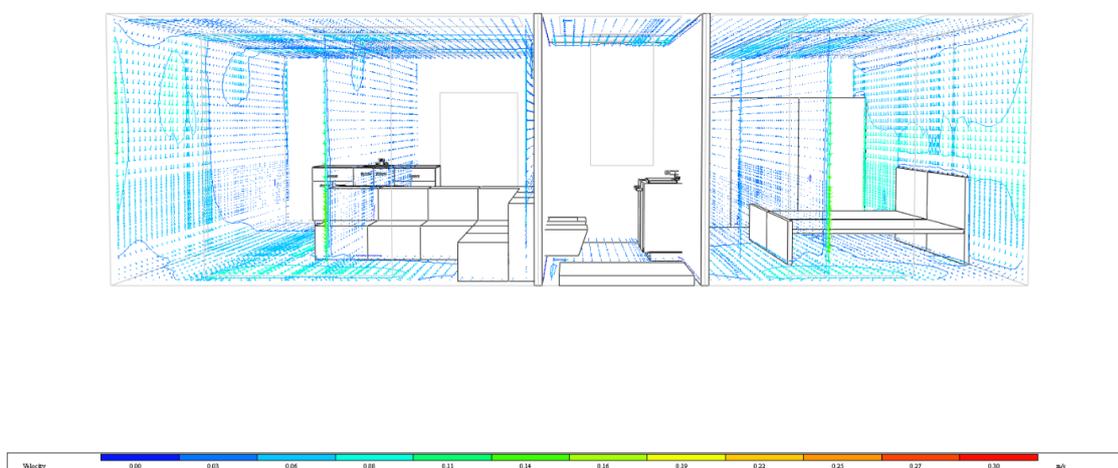


Figura 94-Pannelli radianti a soffitto: campo di velocità in ambienti di ridotte dimensioni; 4A2

Per quanto riguarda gli ambienti piccoli e riparati dell'alloggio 4.A2, essendo le temperature delle superfici interne molto prossime a quella ambiente, non si evidenziano moti dell'aria indotti rilevanti.

Soprattutto all'interno della zona occupata, l'aria risulta essere quasi ferma. Anche lungo le pareti finestrate esterne, e in generale tutte pareti che non sono da considerarsi interne, la velocità dell'aria è di molto minore rispetto ad altre casistiche.

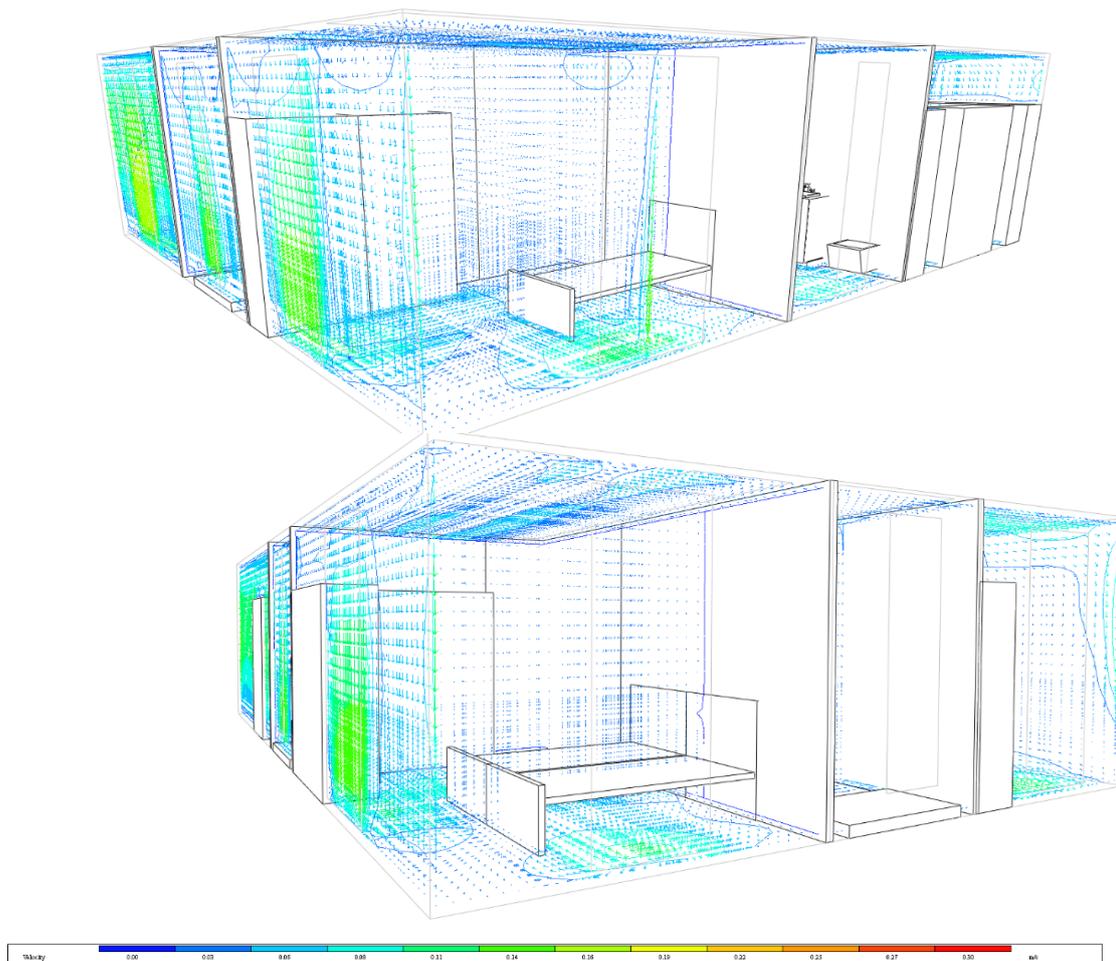


Figura 95- Pannelli radianti a soffitto: campo di velocità in ambienti di dimensioni ridotte; da sopra a sotto: 12A1, 9A3

Stessa situazione si ripresenta per gli ambienti di piccola dimensione degli alloggi 12.A1 e 9.A3, in cui l'elevata esposizione è efficacemente contrastata dalla quota radiativa che agisce direttamente sulla temperatura delle superfici. Nuovamente, non si evidenziano moti dell'aria indotti rilevanti. Soprattutto all'interno della zona occupata, l'aria risulta essere quasi ferma.

Si procede ora con l'analisi della tipologia di posa a pavimento.

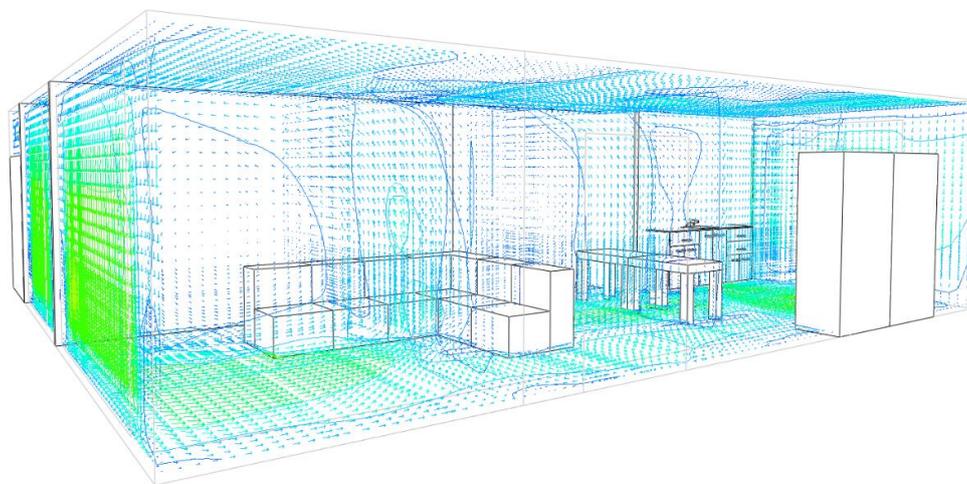
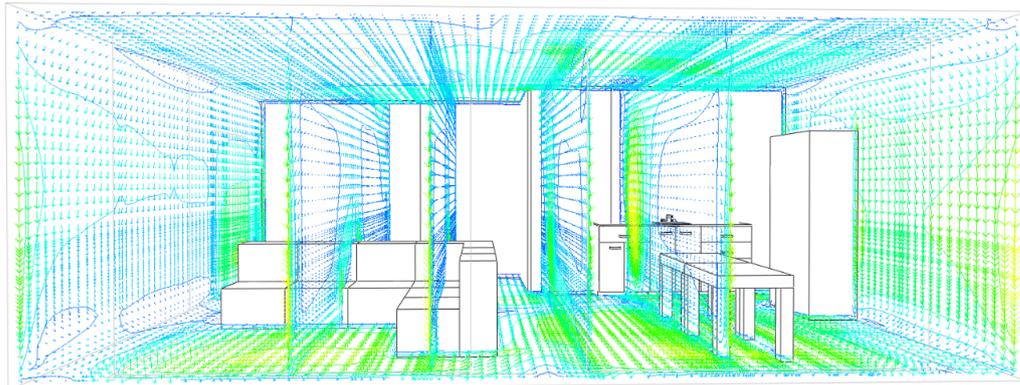


Figura 96- Pannelli radianti a pavimento: campo di velocità in ambienti di grandi dimensioni; 9A3 sopra, 12A1 sotto

Situazione leggermente diversa si prospetta con la tecnologia di posa a pavimento.

In questa seconda modalità di installazione dei terminali, i normali moti che si instaurano all'interno di un ambiente per effetto della diversa densità dell'aria calda, che tenderà a salire, e fredda, che tenderà a scendere, vengono accentuati e incoraggiati dai terminali.

Nonostante questa diversa modalità di interazione tra terminali e ambiente, non vi è uno stato di velocità per cui questi moti possano essere percepiti e risultare quindi fastidiosi per gli occupanti.

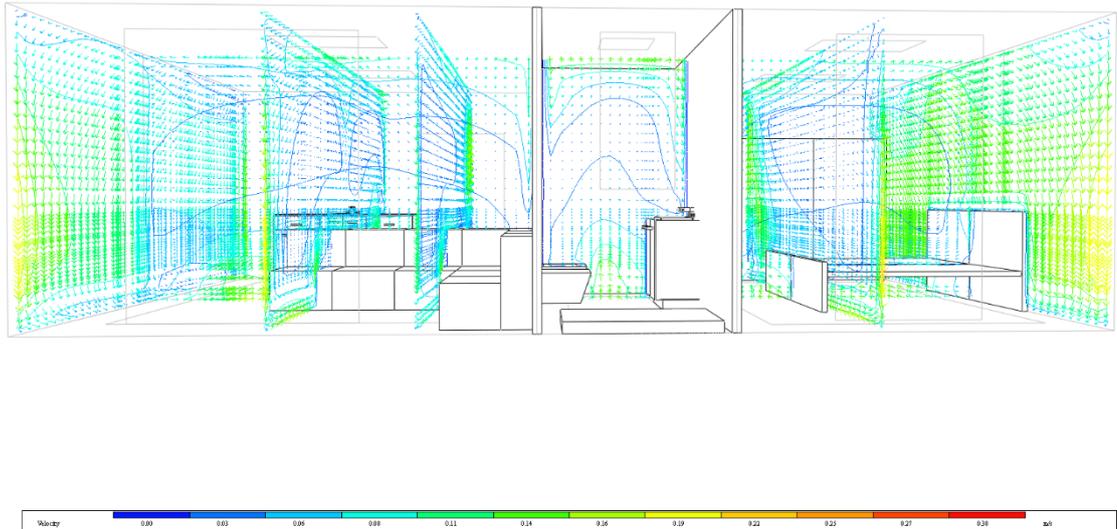


Figura 97-Pannelli radianti a pavimento: campo di velocità in ambienti di grandi dimensioni; 4A2

Ancora una volta, i moti risultano impercettibili e assolutamente non fonte di disturbo per gli occupanti.

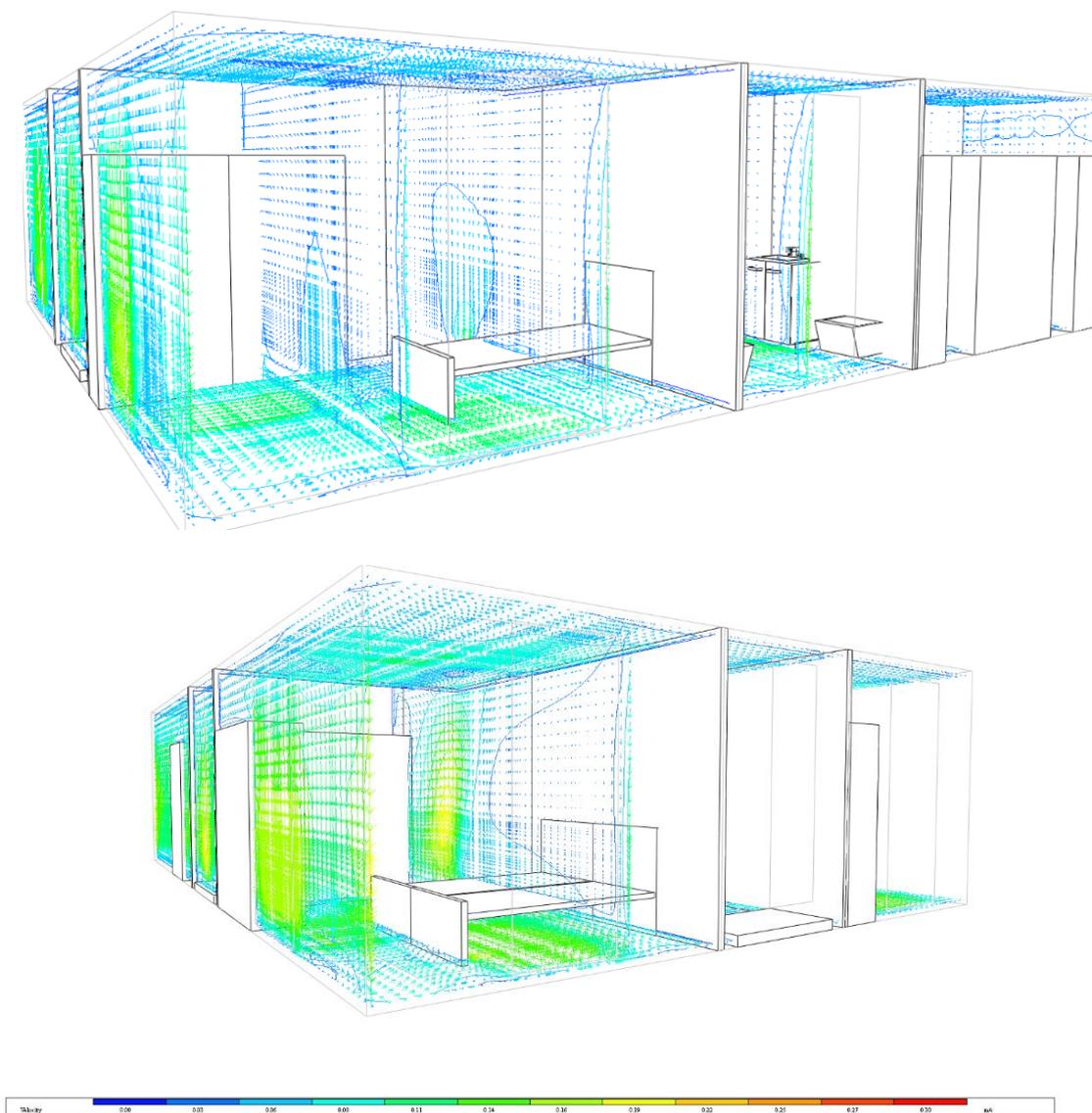


Figura 98- Pannelli radianti a pavimento: campo di velocità in ambienti di dimensioni ridotte; da sopra a sotto: 12A1, 9A3

Stessa situazione si ripresenta per gli ambienti di piccola dimensione degli alloggi 12.A1 e 9.A3, in cui l'elevata esposizione è efficacemente contrastata dalla quota radiativa che agisce direttamente sulla temperatura delle superfici.

Nuovamente, non si evidenziano moti dell'aria indotti rilevanti nella zona occupata, seppur la differenza con il caso a soffitto sia evidente: i moti aerei sono tutti concentrati sulla superficie delle finestre, caratterizzate dalla temperatura minore nella stanza, e su quella della porta che affaccia sul disimpegno, ambiente non riscaldato attivamente.

Complessivamente, la performance è eccellente.

5.1.3. Terminali ibridi

I terminali ibridi hanno una doppia natura: radiante, grazie alla piastra posta frontalmente, e convettiva, dovuta alla ventilazione forzata di aria che lambisce lo scambiatore di calore interno.

Il loro ingombro rende proibitivo il loro utilizzo in ambienti con ristrette metrature, come ad esempio i servizi igienici, e crea comunque problemi anche in ambienti di medie dimensioni. Sono caratterizzati dall'aver una piastra radiante e un meccanismo di scambio termico a convezione forzata.

Nelle figure che seguono si è impostato come valore massimo del range di valutazione del campo di moto dell'aria in ambiente 1.30 m/s.

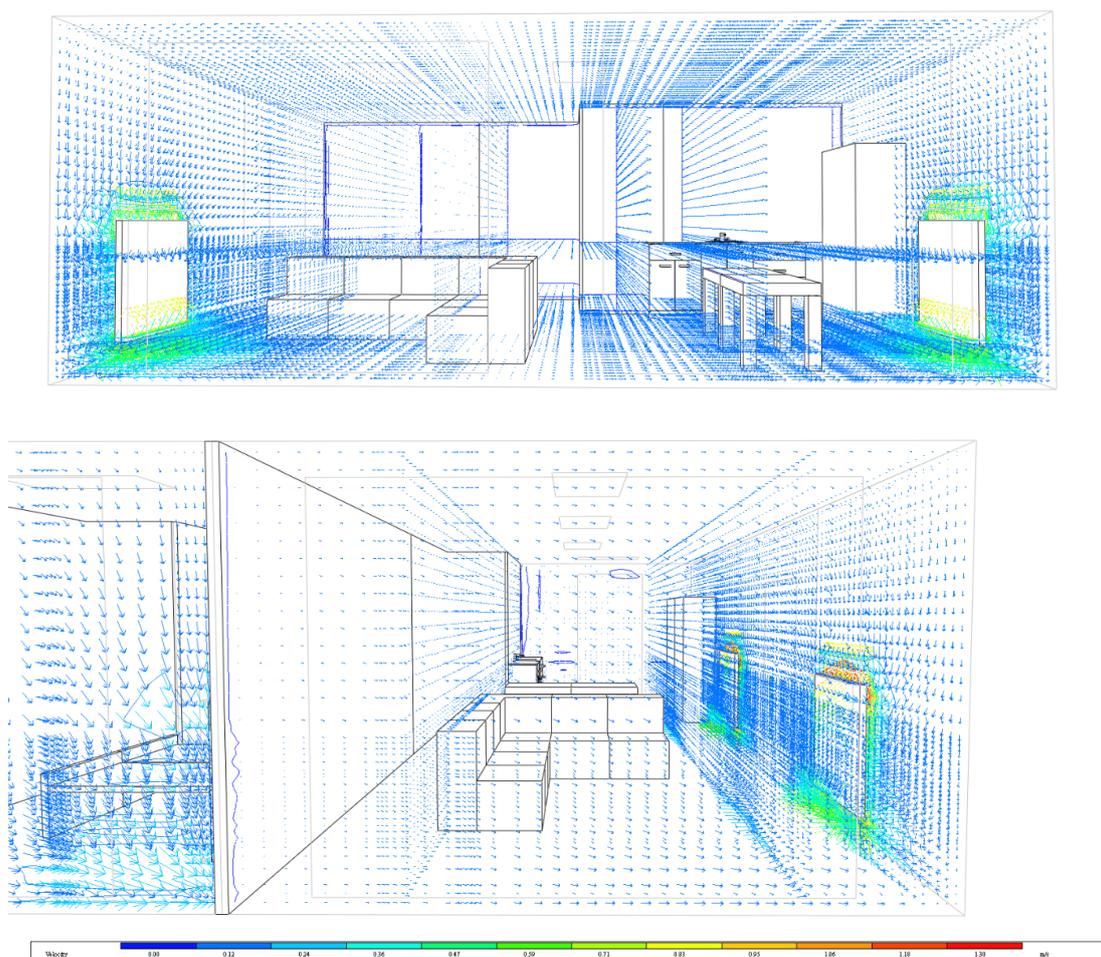


Figura 99- Terminali ibridi: campo di velocità in ambienti di grandi dimensioni; 9A3 sopra, 12A1 sotto

Partendo dall'alloggio 9.A3, si nota come, a differenza del caso dei radiatori, il terminale posto contro la parete interna, quello di sinistra, induce moti dell'aria assolutamente comparabili con quello posto a contatto con la superficie esterna, più fredda: ciò accade per la natura forzata della convezione.

Entrambi i terminali, comunque, inducono moti a ridosso delle zone perimetrali della stanza, come si può osservare, ma all'interno della zona occupata, nonostante la presenza di ingombri, l'aria è pressoché ferma.

Nell'ambiente 12.A1, visibile nell'immagine sotto, i terminali sono posti lungo le pareti interne e agiscono lungo le direzioni minori. I moti dell'aria restano comunque impercettibili quasi ovunque, soprattutto all'interno della zona occupata, poiché la velocità dell'aria erogata dal terminale è inferiore rispetto al suo assetto estivo.

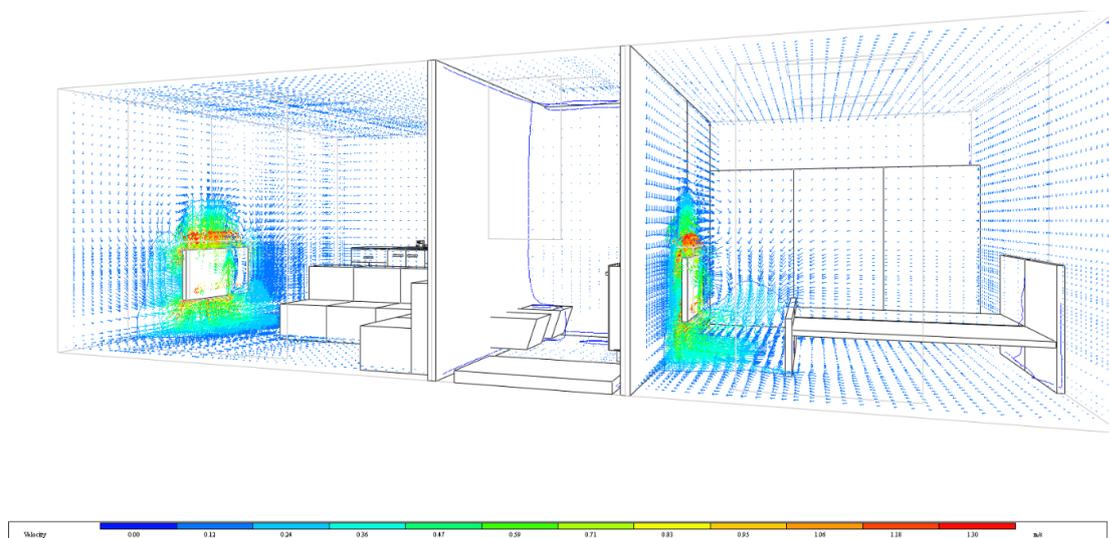


Figura 100- Terminali ibridi: campo di velocità in ambienti di grandi dimensioni; 4A2

In questa seconda tipologia di alloggio, abbiamo ambienti piccoli, esposti su un solo lato, riparati dal balcone a sud. I terminali sono installati sui due muri non esterni, di cui uno interno ed uno che confina con un altro alloggio.

Complessivamente il risultato è molto buono, anche se gli effetti dei terminali in ambiente sono molto più visibili in questo caso rispetto ai due precedenti.

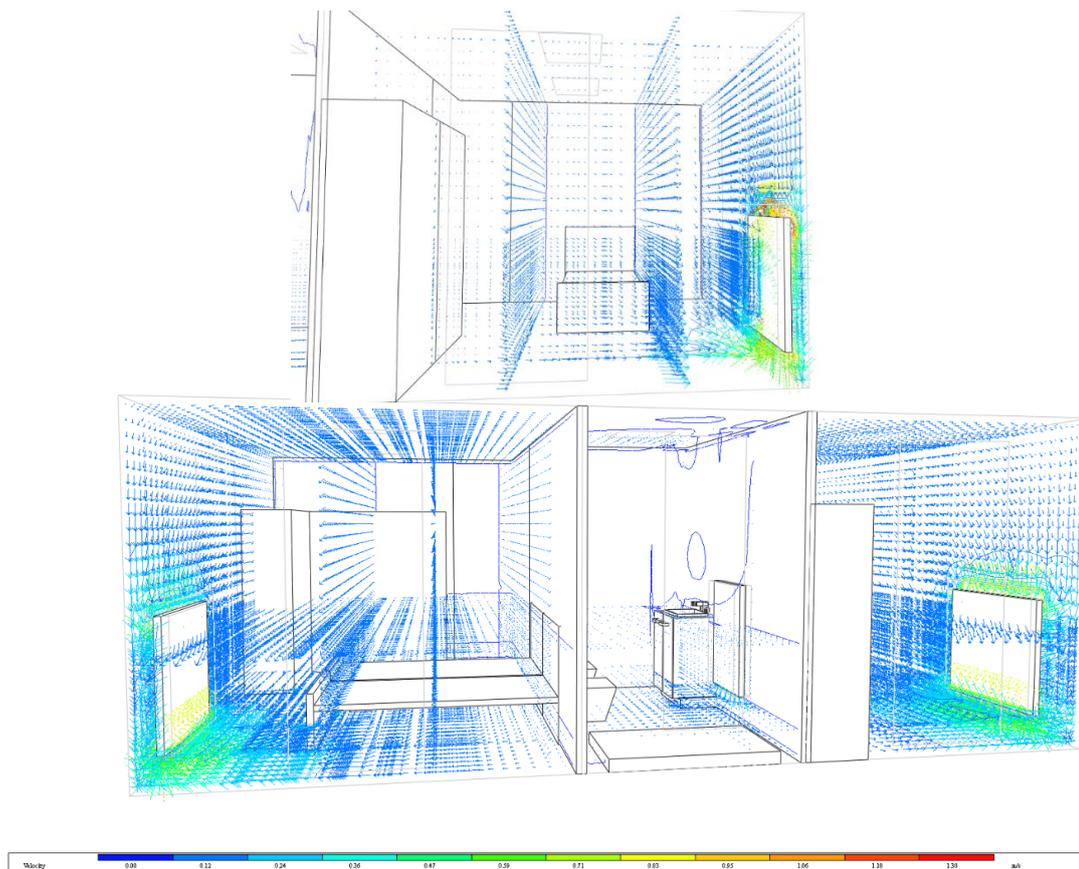


Figura 101- Terminali ibridi: campo di velocità in ambienti di dimensioni ridotte; da sopra a sotto: 9A3

Partendo dalla camera 2 dell'alloggio 9.A3, è bene sottolineare come questa sia esposta all'ambiente esterno solo su un lato, dotato tra l'altro di finestra stretta ma alta. Le caratteristiche di dimensione ridotta, singola esposizione, la rendono un ambiente facile da trattare.

Il terminale è installato sulla parete che affaccia sul vano scale, situazione buona ma non ottimale per questa tipologia di terminale, che subisce il vincolo dell'ingombro. I moti aerei sono i medesimi dei casi precedenti, in quanto la convezione è forzata e la potenza termica installata è ridotta e non in grado di creare grandi moti indotti.

Per quanto riguarda la camera 1, si tratta di una camera con doppia esposizione e doppia finestra.

Il terminale è installato sulla parete esterna che volge ad est. I moti che vengono indotti a ridosso della parete sono comparabili con quelli della camera 2.

Complessivamente il risultato è molto buono, complici le basse velocità dell'aria erogata dal terminale per la componente forzata, e la quota radiativa che raggiunge le superfici degli ambienti.

5.1.4. Ventilconvettori

I ventilconvettori sono i terminali che più di tutti creano moti dell'aria in ambiente, e di conseguenza maggiore mescolamento. Anche in questo caso, come per i terminali ibridi, risultano inadeguati per la posa in ambienti di dimensioni contenute.

Nelle figure che seguono si è impostato come valore massimo del range di valutazione del campo di moto dell'aria in ambiente 1.30 m/s.

Si comincia ad analizzare la tipologia di posa a soffitto.

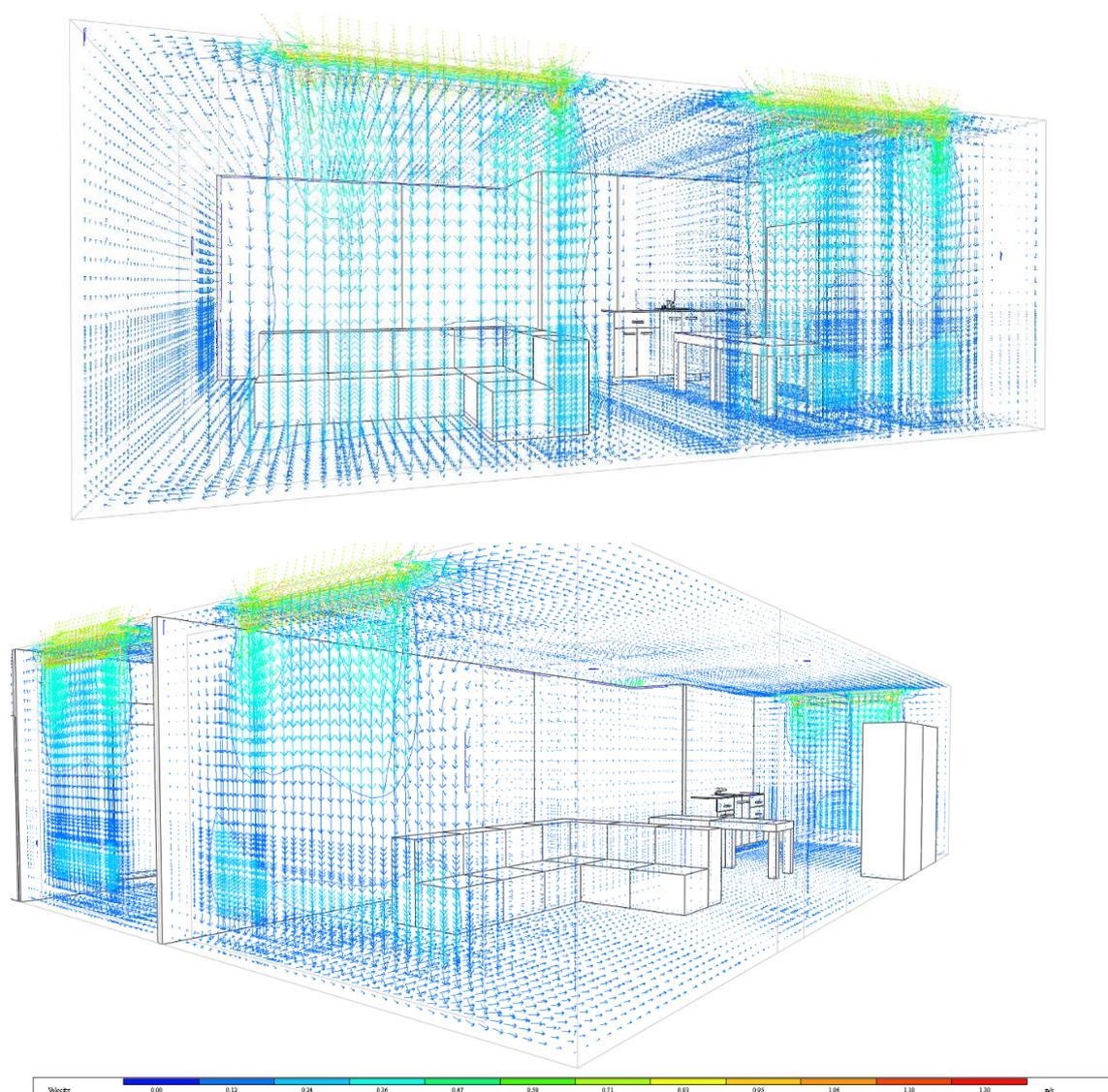


Figura 102- ventilconvettori a soffitto: campo di velocità in ambienti di grandi dimensioni; 9A3 sopra, 12A1 sotto

In entrambi gli alloggi presenti in figura è evidente come vi sia una strategia di riscaldamento che crea molto più disturbo in ambiente rispetto ai casi precedenti.

Nel caso della zona giorno dell'alloggio 9.A3, si ha un ambiente di ampia metratura caratterizzato da una pianta quasi quadrata. Sono indotti moti sulle superfici delle finestre a sud che si trascinano anche nella zona di fronte.

Spostandoci sull'alloggio 12.A1, si cambia tipologia di ambiente poiché questo risulta al contrario a pianta rettangolare in cui un lato è fortemente più corto dell'altro. La presenza di due finestre, una a nord e una a sud, lungo i lati corti permette all'ambiente di essere molto riparato e poco influenzato dalle condizioni esterne.

In questo caso i moti aerei si sviluppano meno nella zona occupata, seppur sulle superfici vetrate e, in generale, sulle superfici confinanti con l'esterno si incontrino le due portate d'aria calda, uscente dal terminale e discendente, e fredda, discendente anch'essa.

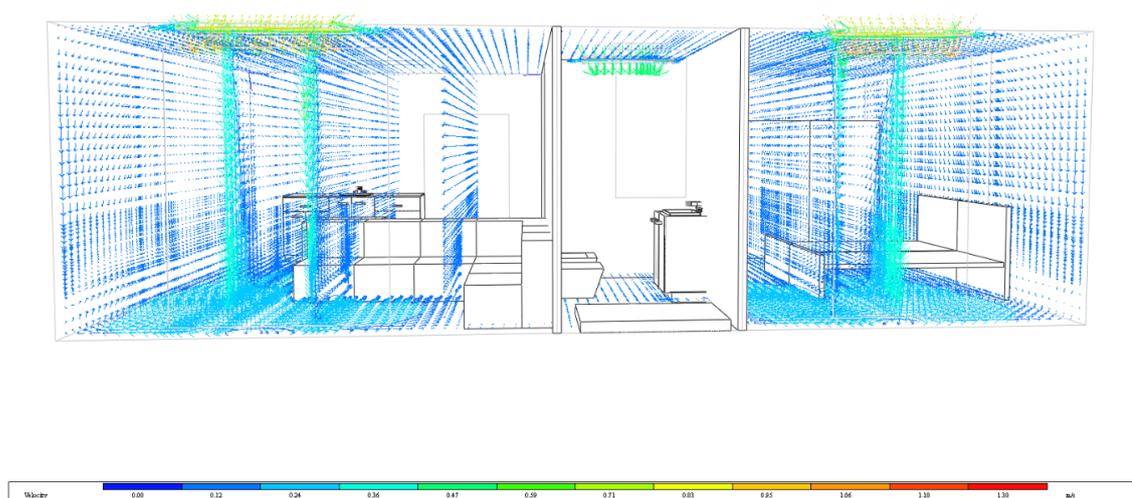


Figura 103-ventilconvettori a soffitto: campo di velocità in ambienti di grandi dimensioni; 4A2

In questa seconda tipologia di alloggio, abbiamo ambienti piccoli, esposti su un solo lato, riparati dal balcone a sud. I ventilconvettori sono installati a soffitto sopra le due finestre principali.

Si evidenzia una velocità maggiore dell'aria sulla superficie degli elementi finestrati, e anche nella zona occupata si percepiscono le influenze dei terminali. Complessivamente, però, il lavoro è buono.

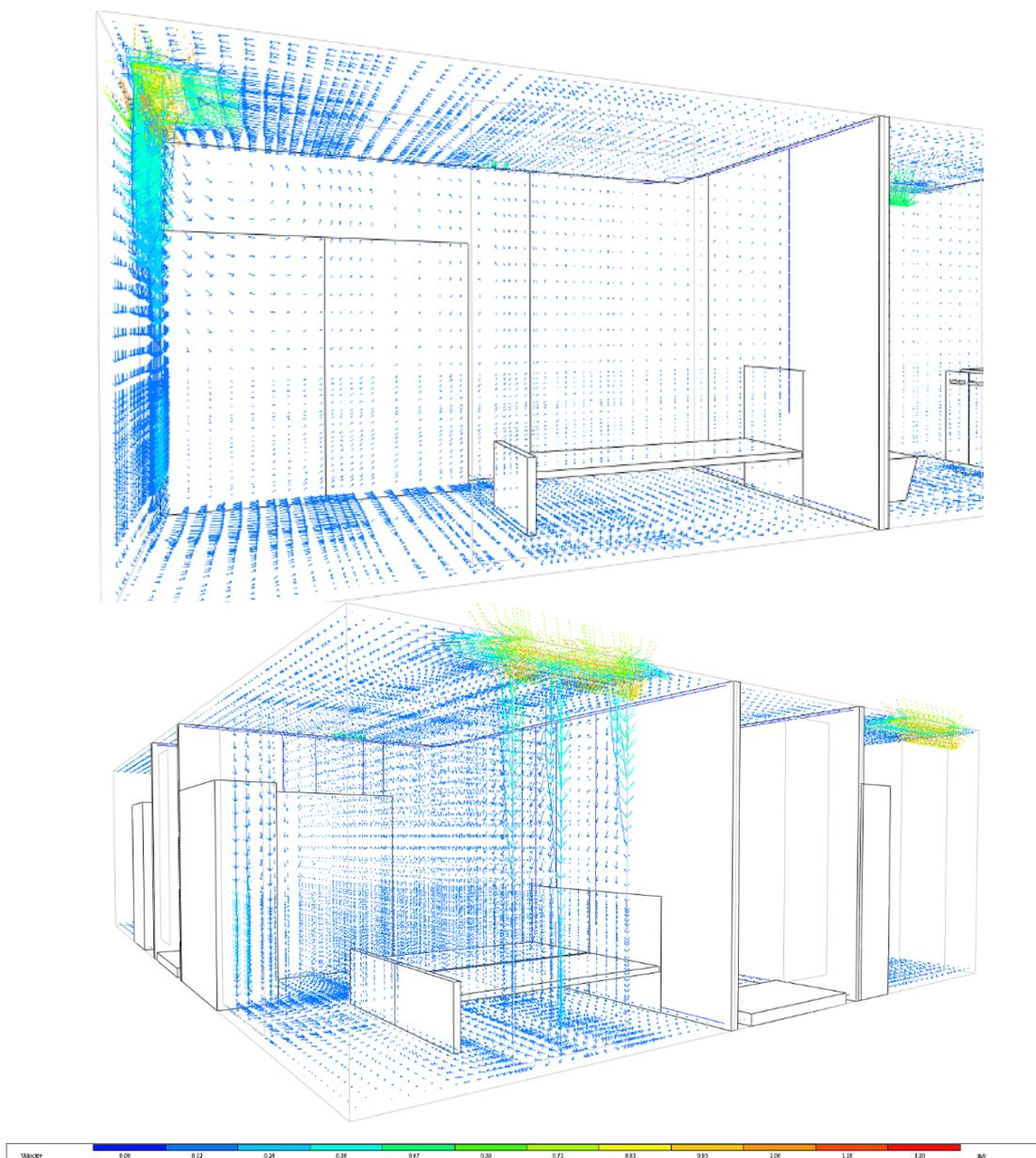


Figura 104- ventilconvettori a soffitto: campo di velocità in ambienti di dimensioni ridotte; da sopra a sotto: 9A3

Partendo dalla camera 2 dell'alloggio 9.A3, è bene sottolineare come questa sia esposta all'ambiente esterno solo su un lato, dotato tra l'altro di finestra stretta ma alta. Le caratteristiche di dimensione ridotta, singola esposizione, la rendono un ambiente facile da trattare.

Il terminale è installato sulla finestra che affaccia a nord, situazione ottimale per questa tipologia di terminale. I moti aerei sono molto marcati nei pressi del terminale e nelle immediate vicinanze della finestra, ma il loro trascinarsi in ambiente non è eccessivo.

Per quanto riguarda la camera 1, si tratta di una camera con doppia esposizione e doppia finestra. Il terminale è installato sulla parete esterna che volge a nord. I moti che vengono indotti a ridosso della parete a nord sono comparabili con quelli della camera 2, mentre, essendo la parete a est esposta all'esterno e a una temperatura minore dell'altra, vi sono più moti interni all'ambiente.

Complessivamente il risultato è molto buono, complici le basse velocità dell'aria erogata dal terminale per la componente forzata, e la posa strategica dei terminali in ambiente. L'assenza di componente radiativa si fa sentire nelle situazioni in cui vi è doppia esposizione finestrata ma solo una delle due finestre è servita dal terminale, con conseguente creazione di moti convettivi che si aggiungono a quelli forzati.

Si procede ora con l'analisi della tipologia di posa a pavimento.

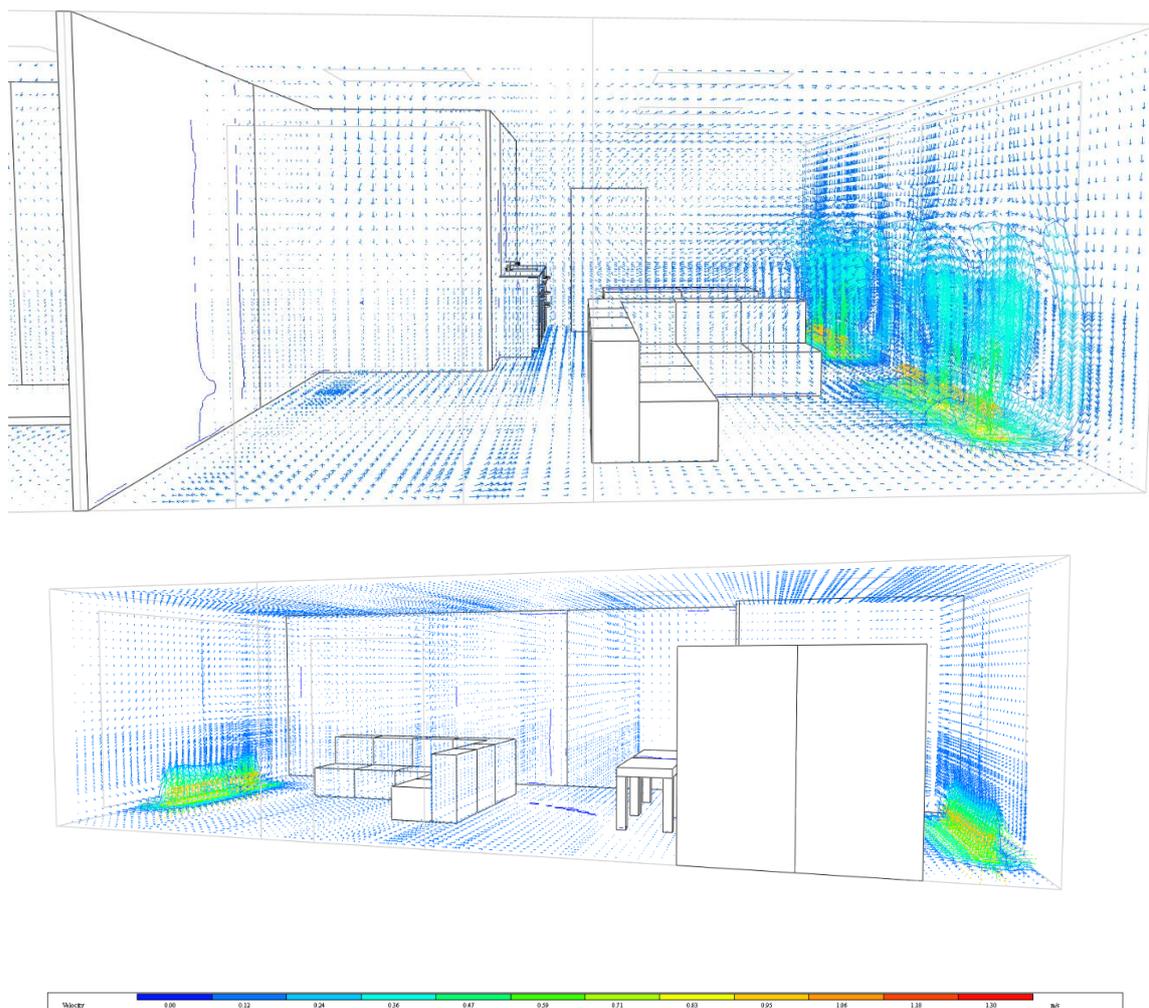


Figura 105- ventilconvettori a pavimento: campo di velocità in ambienti di grandi dimensioni; 9A3 sopra, 12A1 sotto

In entrambi gli alloggi presenti in figura è evidente come anche questa strategia di climatizzazione a pavimento crei molto più disturbo in ambiente rispetto ai terminali analizzati in precedenza.

Nel caso della zona giorno dell'alloggio 9.A3, si ha un ambiente di ampia metratura caratterizzato da una pianta quasi quadrata. Sono indotti moti molto marcati sulle superfici delle finestre a sud, che poi inevitabilmente si trascinano anche nella zona di fronte.

Questo campo di velocità dell'aria è dovuto alla diversa posizione del terminale: in questa seconda tipologia di posa, le due portate d'aria calda, erogata dal terminale e ascendente, e fredda, indotta dalla temperatura delle superfici e discendente, non viaggiano nello stesso verso bensì si scontrano e creano turbolenza.

Spostandoci sull'alloggio 12.A1, si cambia tipologia di ambiente poiché questo risulta al contrario a pianta rettangolare in cui un lato è fortemente più corto dell'altro. La presenza di due finestre, una a nord e una a sud, lungo i lati corti permette all'ambiente di essere molto riparato e poco influenzato dalle condizioni esterne. In questo caso i moti aerei si sviluppano meno nella zona occupata.

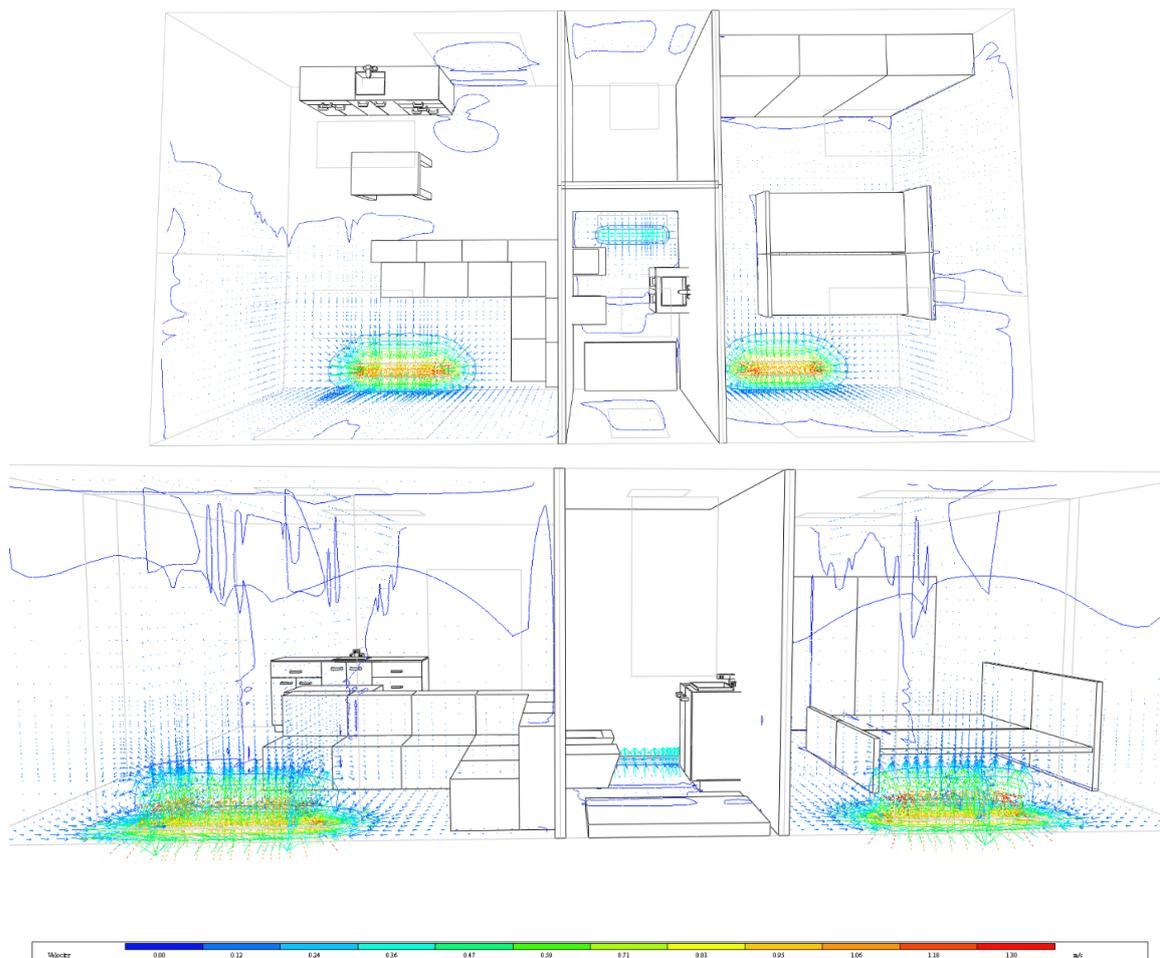


Figura 106-ventilconvettori a pavimento: campo di velocità in ambienti di grandi dimensioni; 4A2

In questa seconda tipologia di alloggio, abbiamo ambienti piccoli, esposti su un solo lato, riparati dal balcone a sud. I ventilconvettori sono installati a pavimento al di sotto delle due finestre principali.

Si evidenzia una velocità minore dell'aria sulla superficie degli elementi finestrati, anche in ragione dello scontro tra le due portate d'aria contrapposte. Complessivamente, non vi è grande disturbo nella zona occupata seppur l'influenza del terminale sia netta e pienamente riconoscibile.

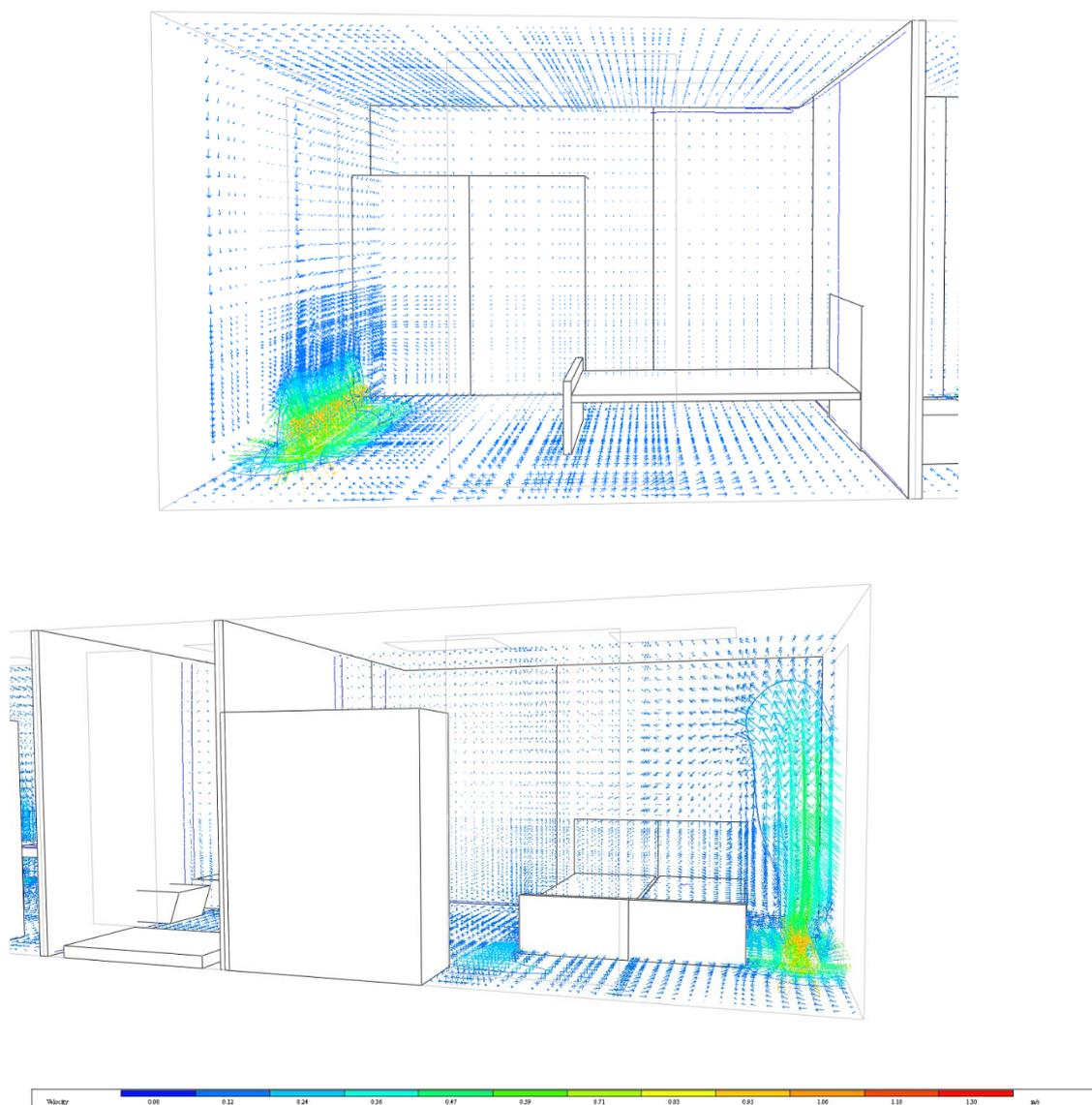


Figura 107- ventilconvettori a pavimento: campo di velocità in ambienti di dimensioni ridotte; da sopra a sotto: 12A1, 9A3

Partendo dalla camera 2 dell'alloggio 9.A3, è bene sottolineare come questa sia esposta all'ambiente esterno solo su un lato, dotato tra l'altro di finestra stretta ma alta. Le caratteristiche di dimensione ridotta, singola esposizione, la rendono un ambiente facile da trattare.

Il terminale è installato sulla finestra che affaccia a nord, situazione ottimale per questa tipologia di terminale. I moti aerei sono molto marcati nei pressi del terminale e nelle immediate vicinanze della finestra, ma il loro trascinarsi in ambiente non è eccessivo.

Per quanto riguarda la camera 1 dell'alloggio 12.A1 invece, si tratta di una camera con doppia esposizione e doppia finestra. Il terminale è installato sulla parete esterna che volge a

nord. I moti che vengono indotti a ridosso della parete a nord sono comparabili con quelli della camera 2, mentre, essendo la parete a est esposta all'esterno e a una temperatura minore dell'altra, vi sono più moti interni all'ambiente.

Complessivamente il risultato è molto buono, complici le basse velocità dell'aria erogata dal terminale per la componente forzata, e la posa strategica dei terminali in ambiente. L'assenza di componente radiativa si fa sentire nelle situazioni in cui vi è doppia esposizione finestrata ma solo una delle due finestre è servita dal terminale, con conseguente creazione di moti convettivi che si aggiungono a quelli forzati.

5.2. Caso estivo

5.2.1. Pannelli radianti

I pannelli radianti sono una di quelle tipologie di terminali che consentono il duplice assetto da riscaldamento e raffrescamento. Come descritto al Capitolo 2, la strategia di lavoro delle due diverse tipologie di posa analizzate differiscono sensibilmente.

Nelle figure che seguono si è impostato come valore massimo del campo di moto dell'aria in ambiente 0.3 m/s, valore che deve necessariamente essere rispettato soprattutto nelle zone indisturbate dell'alloggio in quanto i pannelli radianti non sono una tipologia di terminale caratterizzata da spostamenti d'aria di rilevanza.

Si comincia ad analizzare la tipologia di posa a soffitto.

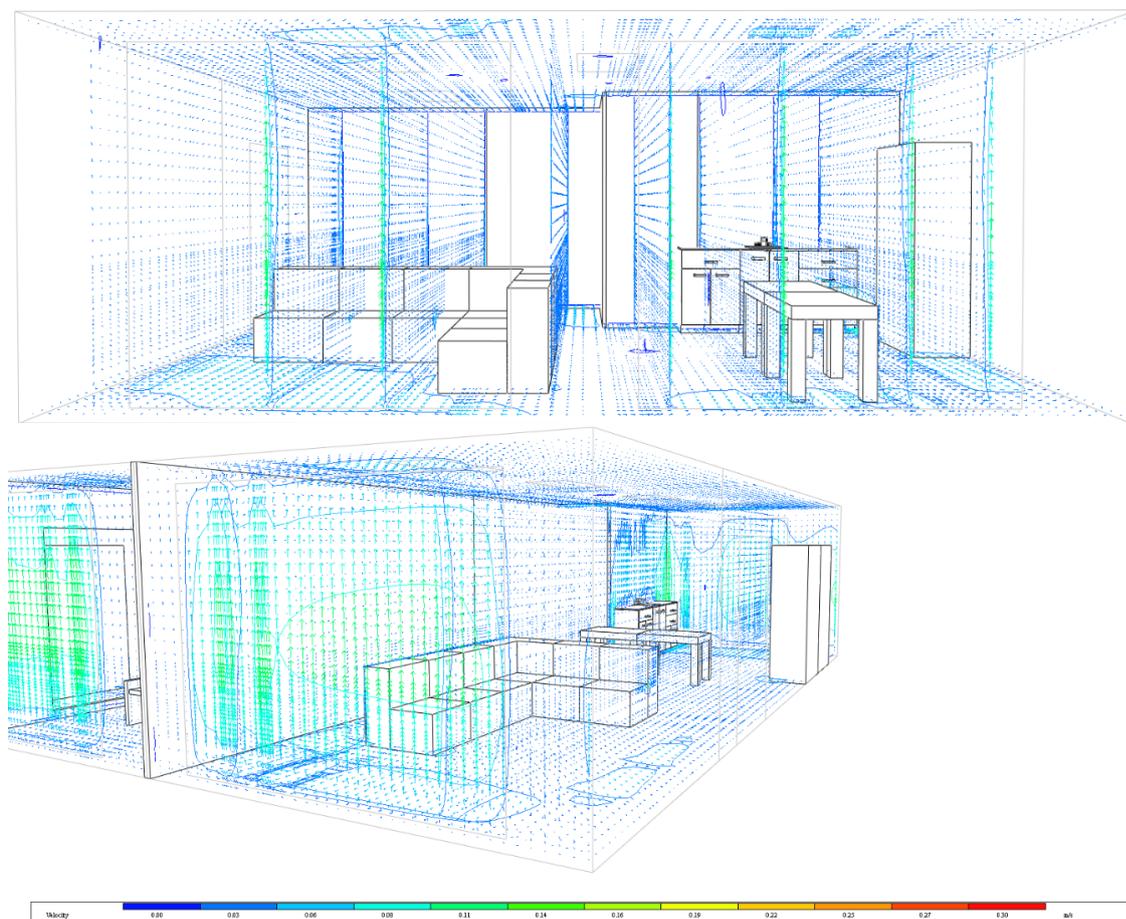


Figura 108- Pannelli radianti a soffitto: campo di velocità in ambienti di grandi dimensioni; 9A3 sopra, 12A1 sotto

In entrambi gli alloggi presenti nella figura di riferimento, è evidente come vi sia un'eccellente strategia di climatizzazione che non crea alcun disturbo all'ambiente.

Nel caso della zona giorno dell'alloggio 9.A3, si ha un ambiente di ampia metratura caratterizzato da una pianta quasi quadrata. Sono indotti moti di bassissima intensità sulle sole superfici delle finestre a sud e sulla parete perimetrale ad est, ma l'aria nella zona occupata è pressoché ferma.

Spostandoci sull'alloggio 12.A1, si cambia tipologia di ambiente poiché questo risulta al contrario a pianta rettangolare in cui un lato è fortemente più corto dell'altro. La presenza di due finestre, una a nord e una a sud, lungo i lati corti permette all'ambiente di essere molto riparato e poco influenzato dalle condizioni esterne.

Neanche in questo caso si sviluppano nella zona occupata moti aerei degni di nota, seppur sulle superfici vetrate e, in generale, sulle superfici confinanti con l'esterno si creano moti convettivi.

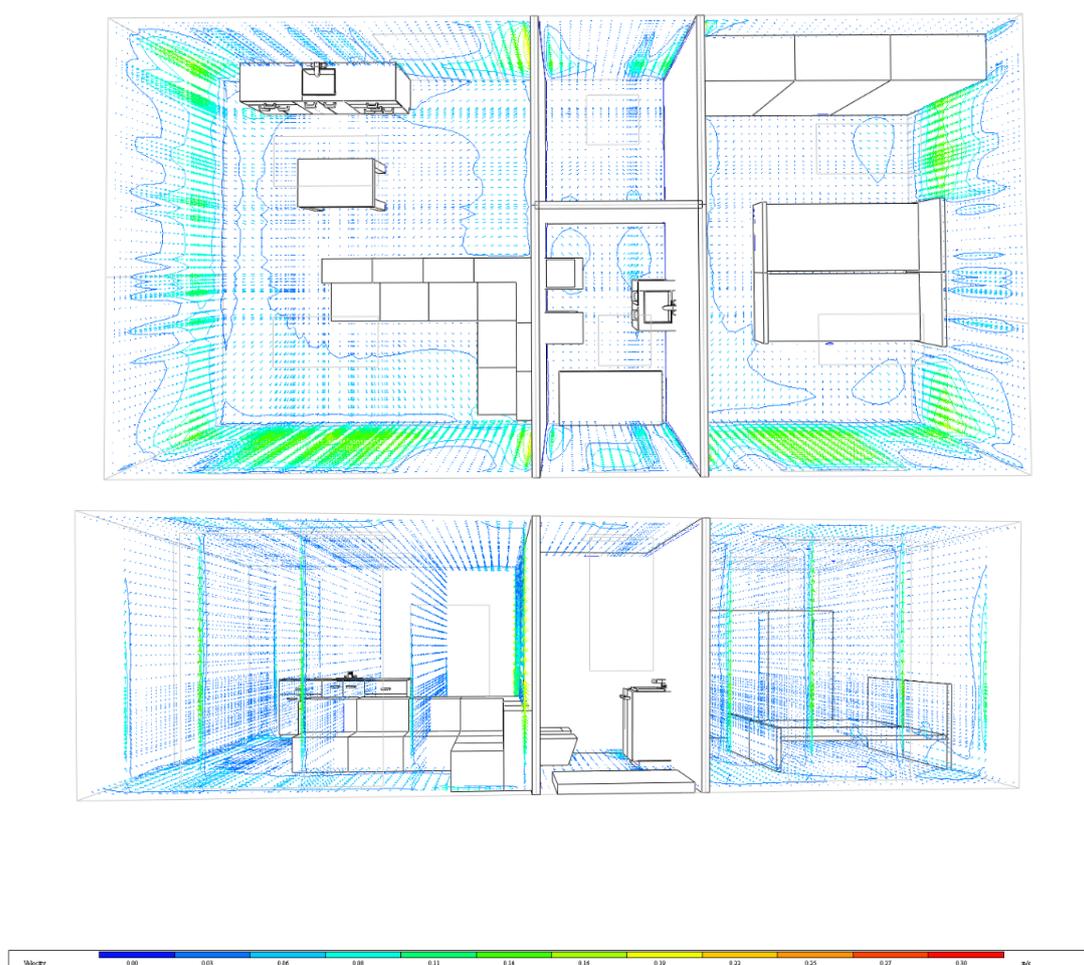


Figura 109-Pannelli radianti a soffitto: campo di velocità in ambienti di grandi dimensioni; 4A2

Per quanto riguarda gli ambienti piccoli e riparati dell'alloggio 4.A2, essendo le temperature delle superfici interne molto prossime a quella ambiente, non si evidenziano moti dell'aria indotti rilevanti.

Soprattutto all'interno della zona occupata, l'aria risulta essere quasi ferma. Anche lungo le pareti finestrate esterne, e in generale tutte pareti che non sono da considerarsi interne, la velocità dell'aria è di molto minore rispetto ad altre casistiche.

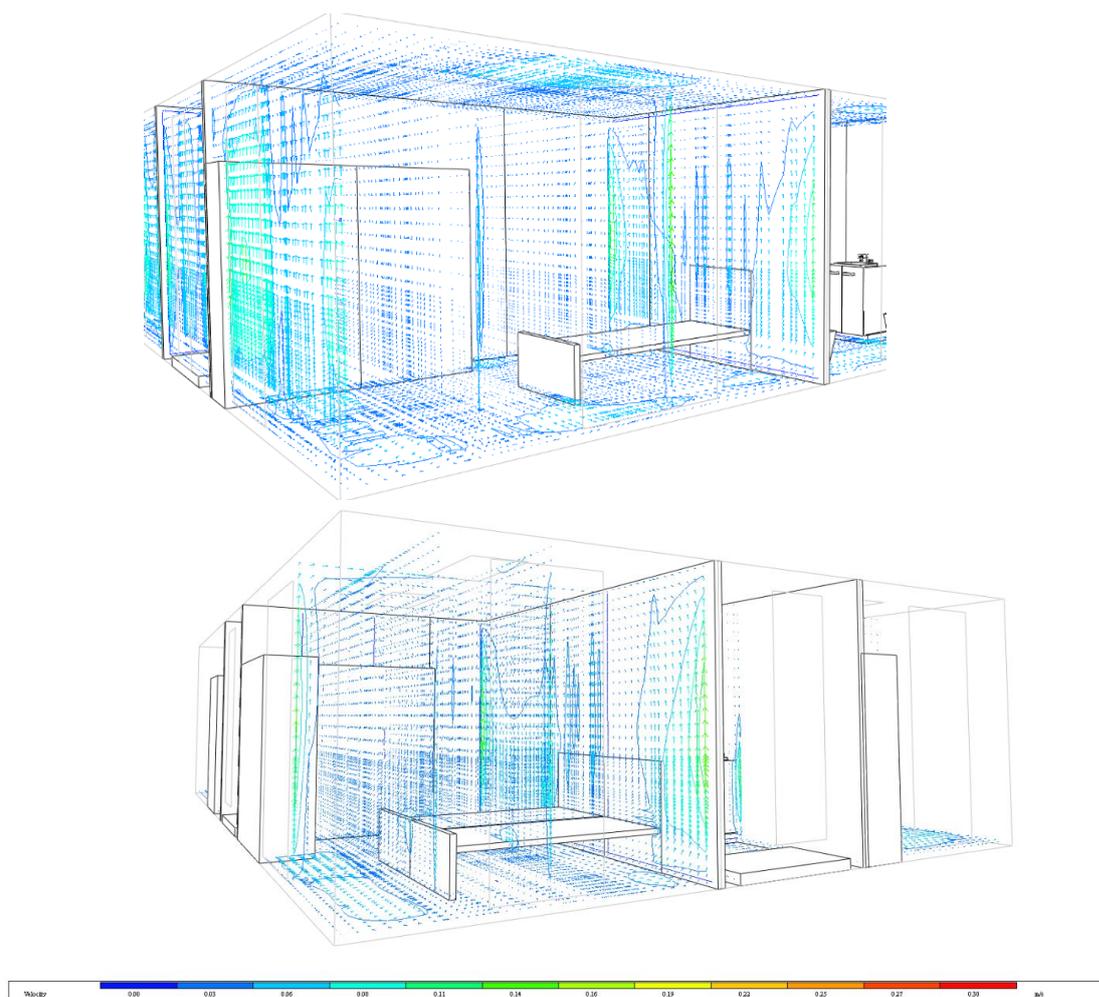


Figura 110- Pannelli radianti a soffitto: campo di velocità in ambienti di dimensioni ridotte; da sopra a sotto: 12A1, 9A3

Stessa situazione si ripresenta per gli ambienti di piccola dimensione degli alloggi 12.A1 e 9.A3, in cui l'elevata esposizione è efficacemente contrastata dalla quota radiativa che agisce direttamente sulla temperatura delle superfici. Nuovamente, non si evidenziano moti dell'aria indotti rilevanti. Soprattutto all'interno della zona occupata, l'aria risulta essere quasi ferma.

Si procede ora con l'analisi della tipologia di posa a pavimento.

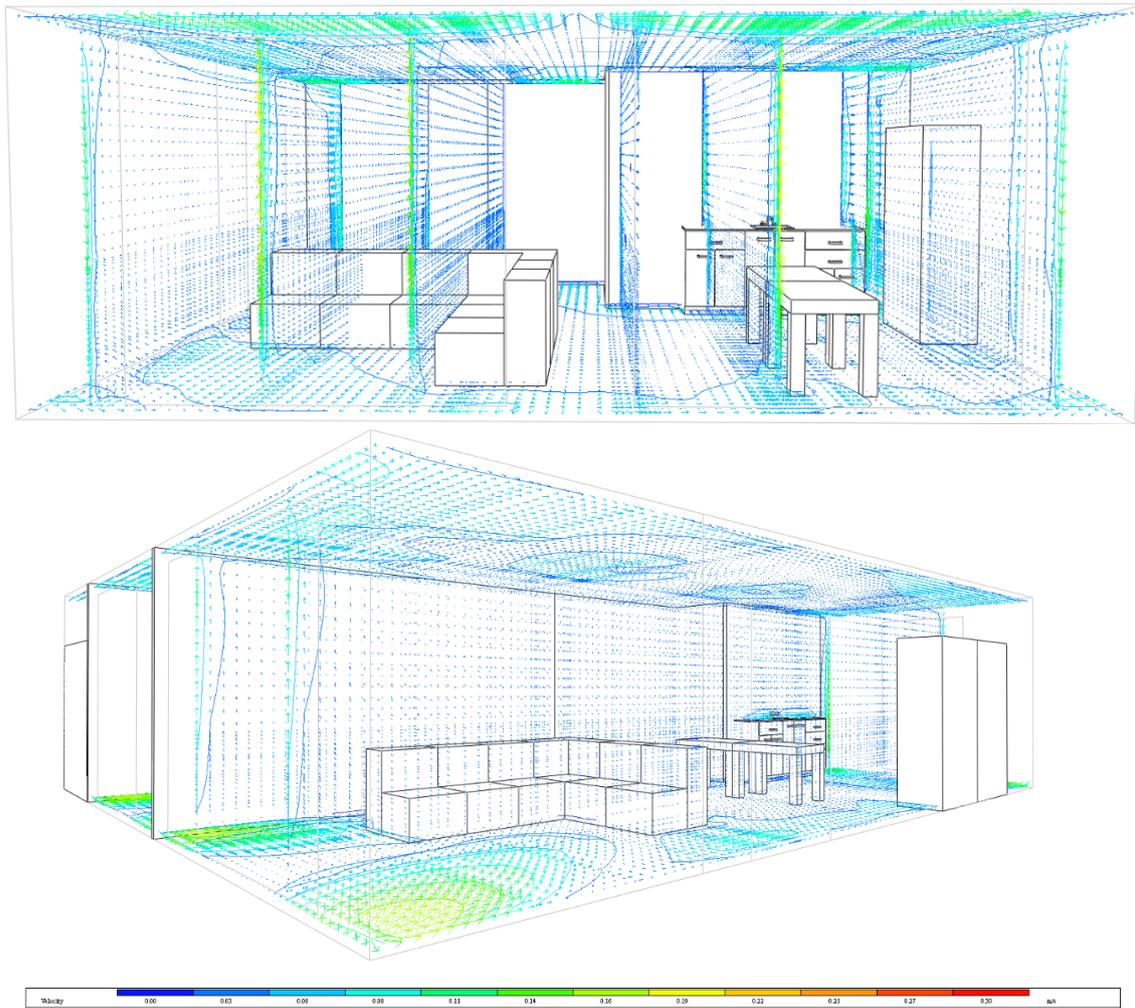


Figura 111- Pannelli radianti a pavimento: campo di velocità in ambienti di grandi dimensioni; 9A3 sopra, 12A1 sotto

Situazione leggermente diversa si prospetta con la tecnologia di posa a pavimento.

In questa seconda modalità di installazione dei terminali, i normali moti che si instaurano all'interno di un ambiente per effetto della diversa densità dell'aria calda, che tenderà a salire, e fredda, che tenderà a scendere, non vengono assolutamente accentuati dai terminali.

Nonostante questa diversa modalità di interazione tra terminali e ambiente, non vi è uno stato di velocità per cui questi moti possano essere percepiti e risultare quindi fastidiosi per gli occupanti.

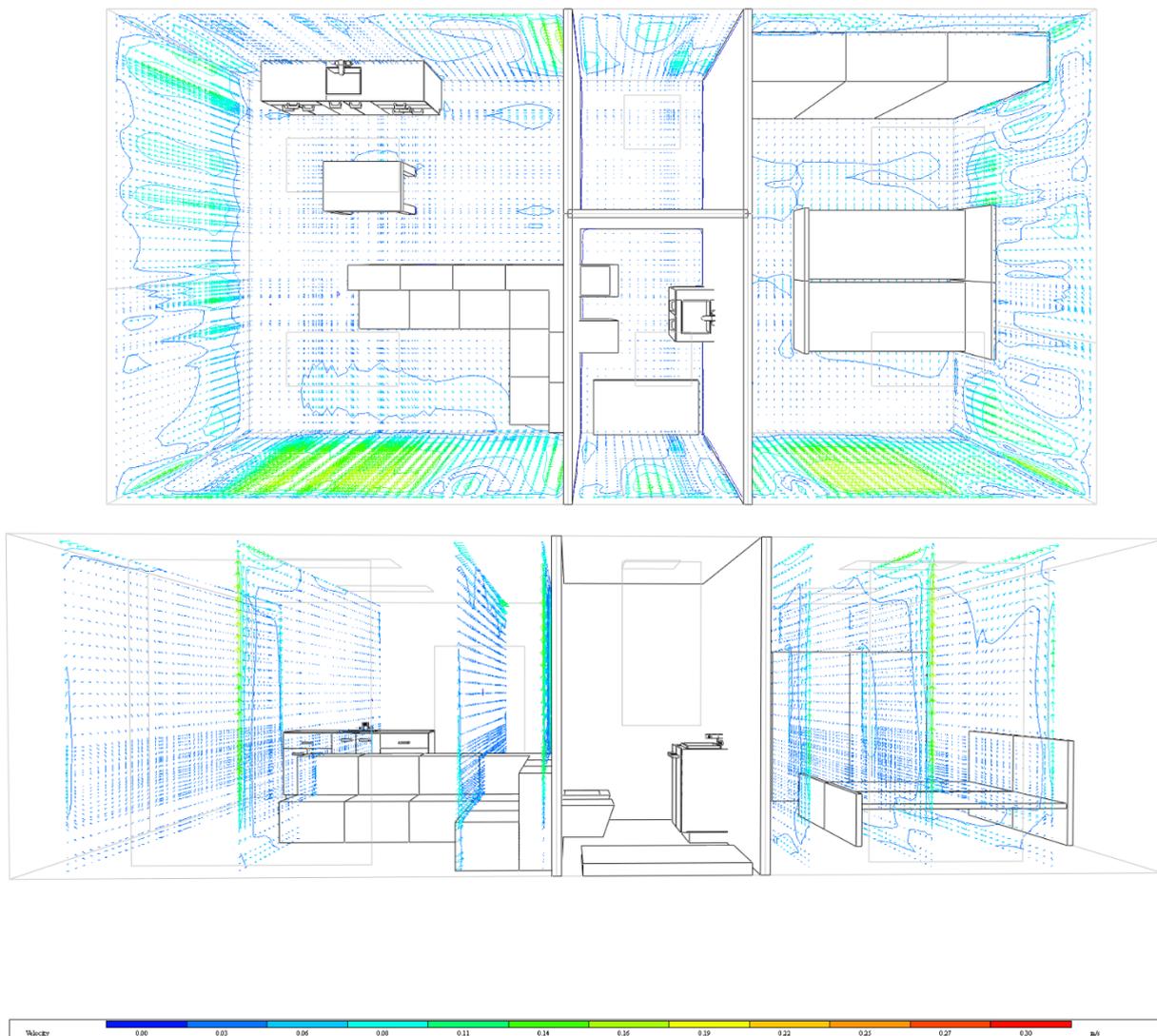


Figura 112-Pannelli radianti a pavimento: campo di velocità in ambienti di grandi dimensioni; 4A2

La performance in un alloggio poco esposto e molto riparato come il 4.A2 è eccellente, in quanto le temperature interne delle superfici sono già ad un ottimo punto di partenza.

Nella prima immagine è possibile vedere come i moti dell'aria siano quasi completamente assenti, eccezione fatta per le superfici delle finestre, che comunque non superano mai il valore di 0.2 m/s.

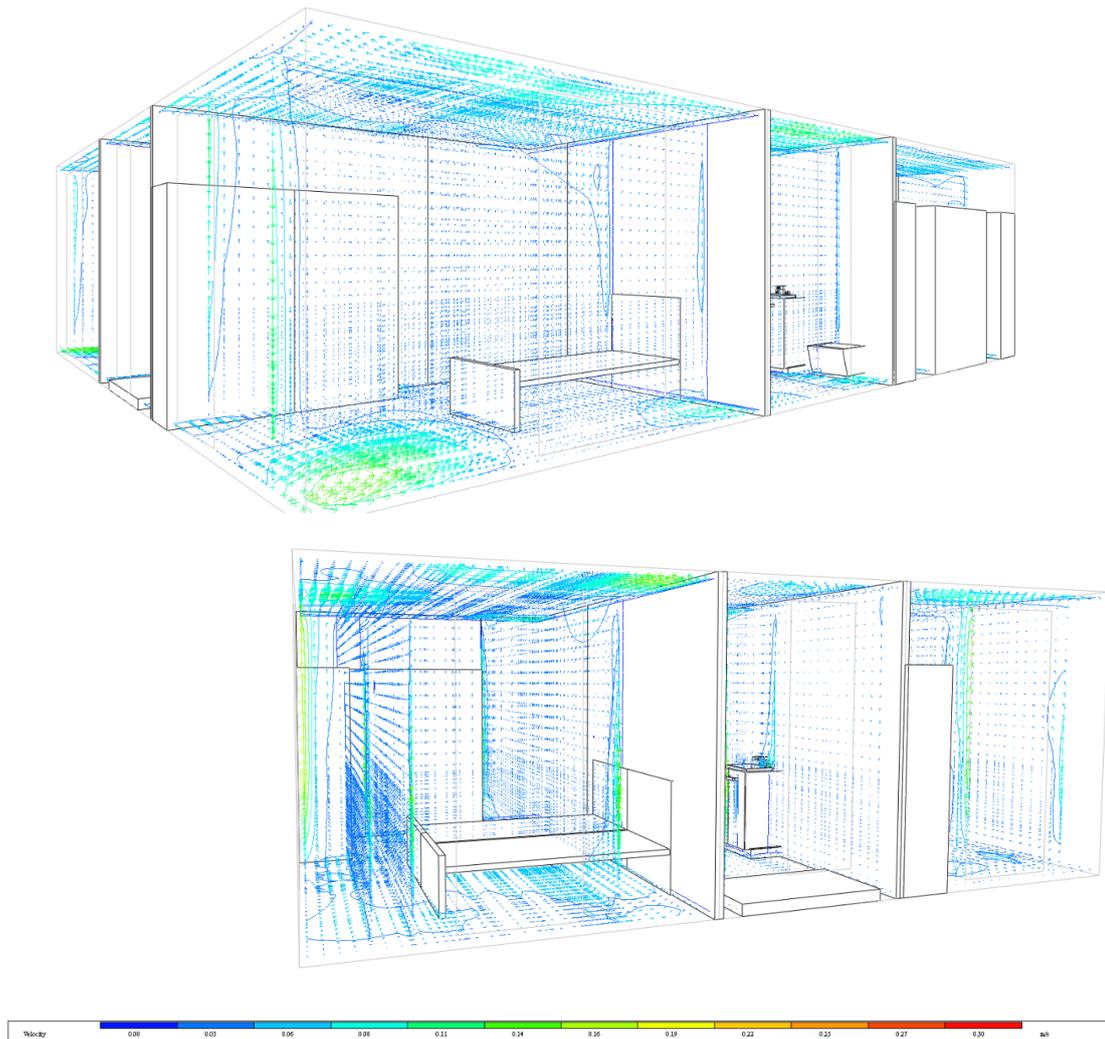


Figura 113- Pannelli radianti a pavimento: campo di velocità in ambienti di dimensioni ridotte; da sopra a sotto: 12A1, 9A3

Stessa situazione si ripresenta per gli ambienti di piccola dimensione degli alloggi 12.A1 e 9.A3, in cui l'elevata esposizione è efficacemente contrastata dalla quota radiativa che agisce direttamente sulla temperatura delle superfici.

Complessivamente, la performance è eccellente.

5.2.2. Terminali ibridi

I terminali ibridi hanno una doppia natura: radiante, grazie alla piastra posta frontalmente, e convettiva, dovuta alla ventilazione forzata di aria che lambisce lo scambiatore di calore interno.

Il loro ingombro rende proibitivo il loro utilizzo in ambienti con ristrette metrature, come ad esempio i servizi igienici, e crea comunque problemi anche in ambienti di medie dimensioni. Sono caratterizzati dall'aver una piastra radiante e un meccanismo di scambio termico a convezione forzata.

Nelle figure che seguono si è impostato come valore massimo del range di valutazione del campo di moto dell'aria in ambiente 1.30 m/s.

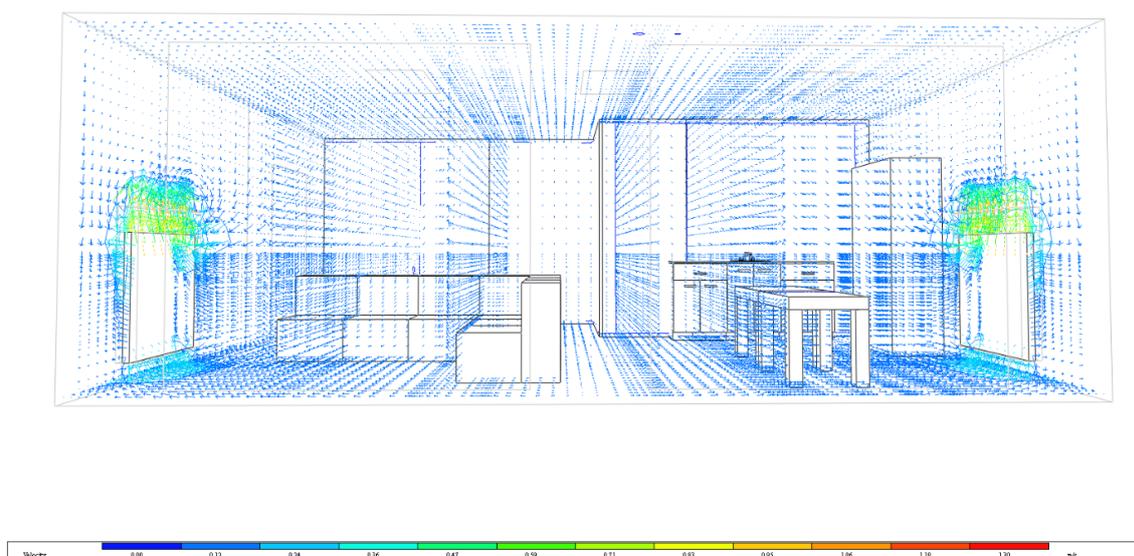


Figura 114- Terminali ibridi: campo di velocità in ambienti di grandi dimensioni; 9A3

Partendo dall'alloggio 9.A3, si nota come, a differenza del caso dei radiatori, il terminale posto contro la parete interna, quello di sinistra, induce moti dell'aria assolutamente comparabili con quello posto a contatto con la superficie esterna, più calda: ciò accade per la natura forzata della convezione.

Entrambi i terminali, comunque, inducono moti a ridosso delle zone perimetrali della stanza, come si può osservare, ma all'interno della zona occupata, nonostante la presenza di ingombri, l'aria è pressoché ferma.

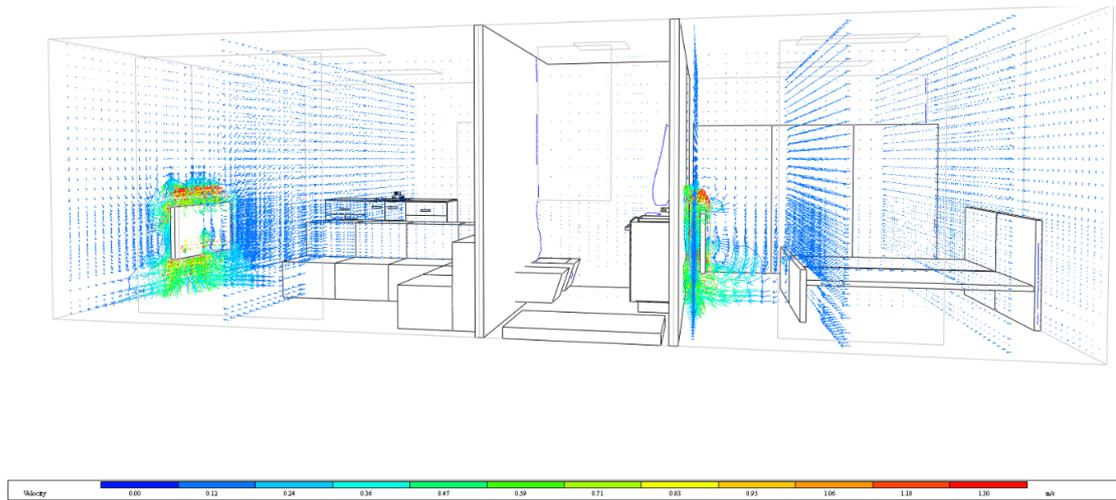


Figura 115- Terminali ibridi: campo di velocità in ambienti di grandi dimensioni; 4A2

In questa seconda tipologia di alloggio, abbiamo ambienti piccoli, esposti su un solo lato, riparati dal balcone a sud. I terminali sono installati sui due muri non esterni, di cui uno interno ed uno che confina con un altro alloggio.

Complessivamente il risultato è molto buono, anche se gli effetti dei terminali in ambiente sono molto più visibili in questo caso rispetto ai due precedenti.

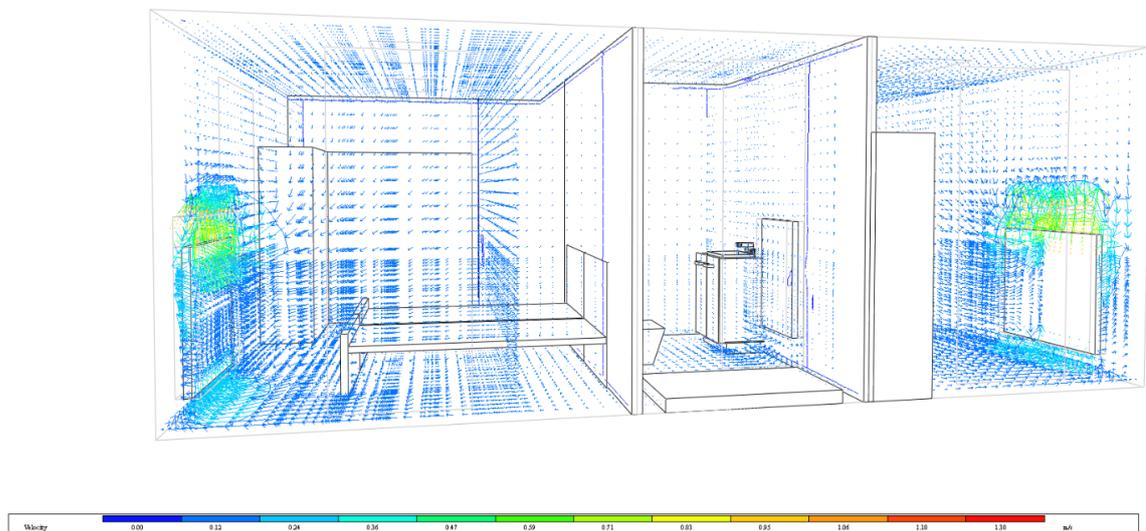


Figura 116- Terminali ibridi: campo di velocità in ambienti di dimensioni ridotte; 9A3

Partendo dalla camera 2 dell'alloggio 9.A3, è bene sottolineare come questa sia esposta all'ambiente esterno solo su un lato, dotato tra l'altro di finestra stretta ma alta. Le caratteristiche di dimensione ridotta, singola esposizione, la rendono un ambiente facile da trattare.

Il terminale è installato sulla parete che affaccia sul vano scale, situazione buona ma non ottimale per questa tipologia di terminale, che subisce il vincolo dell'ingombro. I moti aerei sono i medesimi dei casi precedenti, in quanto la convezione è forzata e la potenza termica installata è ridotta e non in grado di creare grandi moti indotti.

Per quanto riguarda la camera 1, si tratta di una camera con doppia esposizione e doppia finestra. Il terminale è installato sulla parete esterna che volge ad est. I moti che vengono indotti a ridosso della parete sono comparabili con quelli della camera 2.

Complessivamente il risultato è molto buono, complici le basse velocità dell'aria erogata dal terminale per la componente forzata.

5.2.3. Ventilconvettori

I ventilconvettori sono i terminali che più di tutti creano moti dell'aria in ambiente, e di conseguenza maggiore mescolamento. Anche in questo caso, come per i terminali ibridi, risultano inadeguati per la posa in ambienti di dimensioni contenute.

Nelle figure che seguono si è impostato come valore massimo del range di valutazione del campo di moto dell'aria in ambiente 1.30 m/s.

Si comincia ad analizzare la tipologia di posa a soffitto.

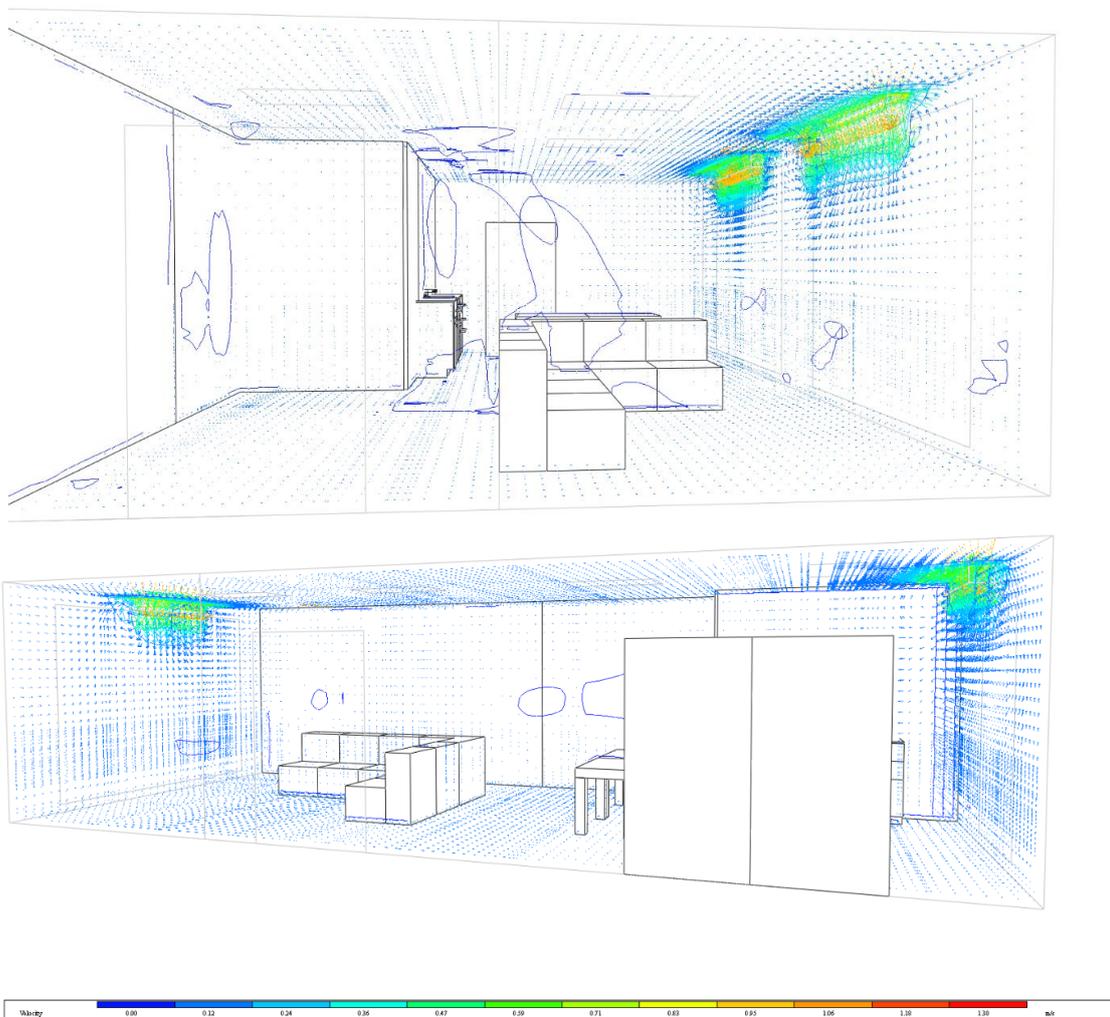


Figura 117- ventilconvettori a soffitto: campo di velocità in ambienti di grandi dimensioni; 9A3 sopra, 12A1 sotto

È subito visibile come il caso a soffitto estivo influenzi in maniera molto minore i moti dell'aria ambiente rispetto al caso invernale.

Nel caso della zona giorno dell'alloggio 9.A3, si ha un ambiente di ampia metratura caratterizzato da una pianta quasi quadrata. Spostandoci sull'alloggio 12.A1, si cambia tipologia di ambiente poiché questo risulta al contrario a pianta rettangolare in cui un lato è fortemente più corto dell'altro. La presenza di due finestre, una a nord e una a sud, lungo i lati corti permette all'ambiente di essere molto riparato e poco influenzato dalle condizioni esterne.

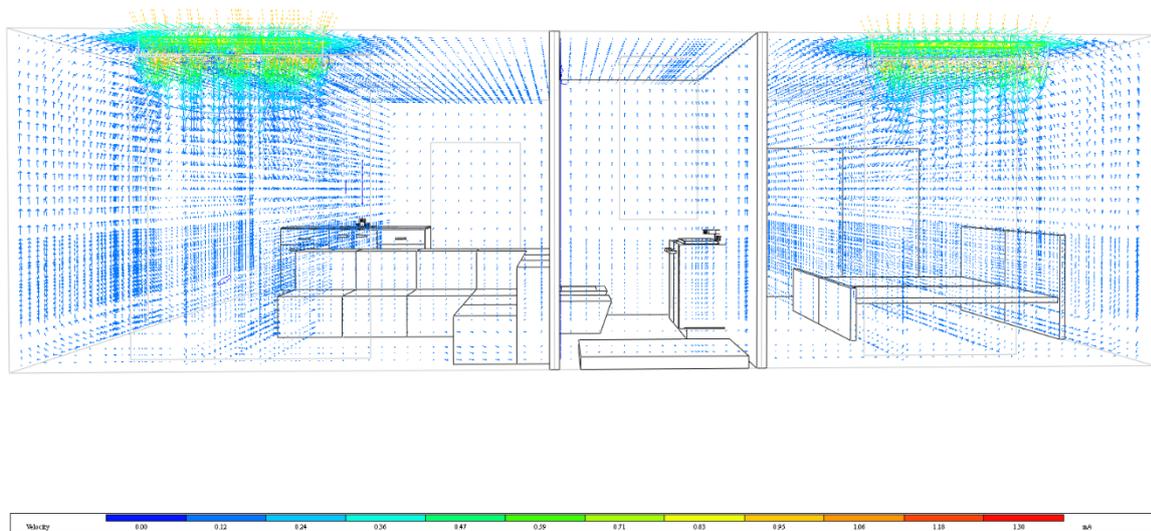


Figura 118-ventilconvettori a soffitto: campo di velocità in ambienti di grandi dimensioni; 4A2

In questa seconda tipologia di alloggio, abbiamo ambienti piccoli, esposti su un solo lato, riparati dal balcone a sud. I ventilconvettori sono installati a soffitto sopra le due finestre principali.

Ancora una volta, le performance sono migliori rispetto al caso invernale.

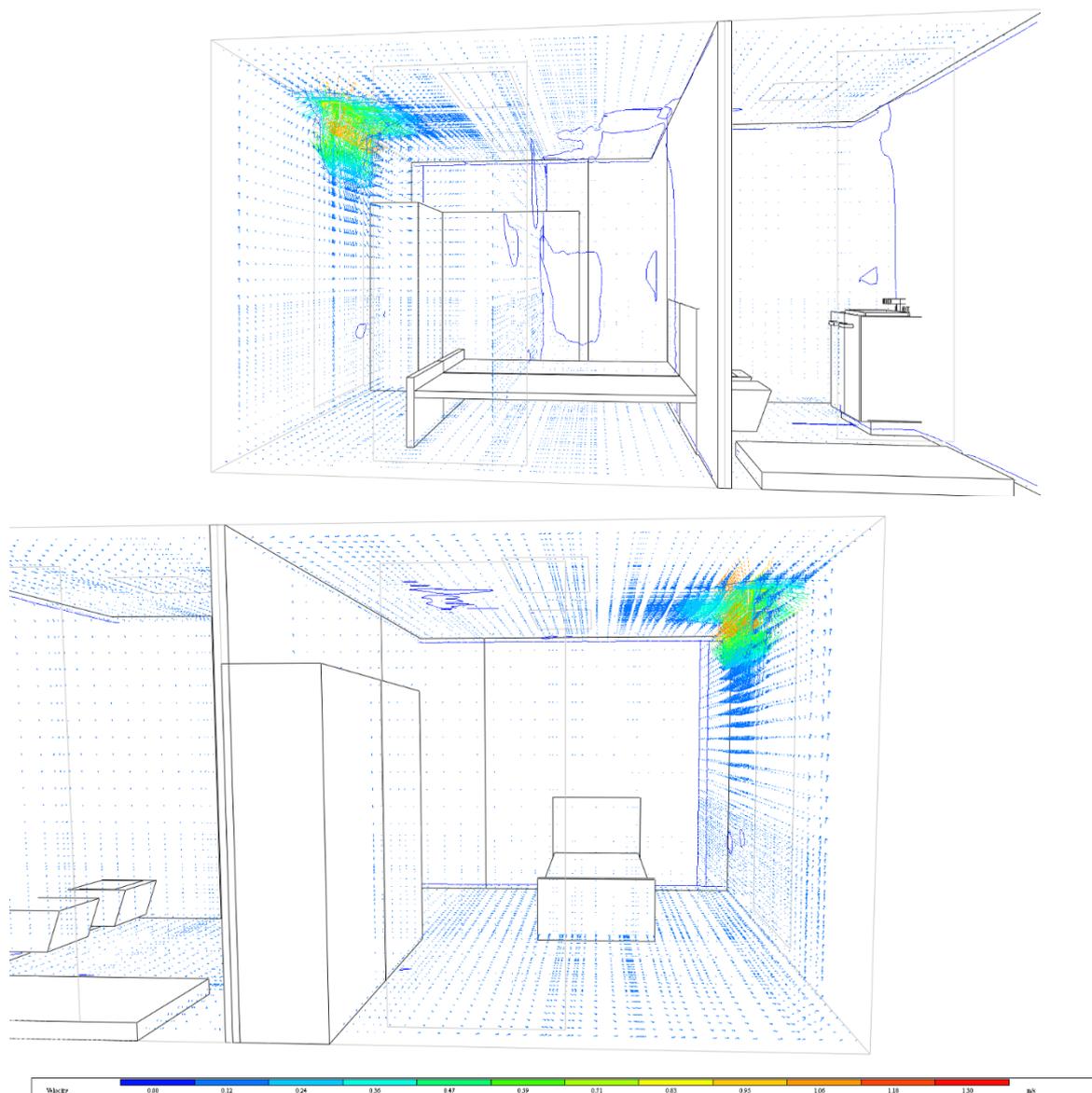


Figura 119- ventilconvettori a soffitto: campo di velocità in ambienti di dimensioni ridotte; da sopra a sotto: 12A1, 9A3

Partendo dalla camera 2 dell'alloggio 12.A1, questa è esposta all'ambiente esterno su due lati, dotati entrambi di una finestra ciascuno.

Il terminale è installato sulla finestra che affaccia a ovest, situazione ottimale per questa tipologia di terminale. I moti aerei sono molto marcati nei pressi del terminale ma quasi impercettibili nel resto dell'ambiente.

Per quanto riguarda la camera 1 dell'alloggio 9.A3, si tratta di una camera con doppia esposizione e doppia finestra. Il terminale è installato sulla parete esterna che volge a est. I moti che vengono indotti sono assolutamente comparabili con il caso precedente.

Complessivamente il risultato è molto buono, complici le basse velocità dell'aria erogata dal terminale per la componente forzata, e la posa strategica dei terminali in ambiente. L'assenza di componente radiativa si fa sentire nelle situazioni in cui vi è doppia esposizione finestrata ma solo una delle due finestre è servita dal terminale, con conseguente creazione di moti convettivi che si aggiungono a quelli forzati.

Si procede ora con l'analisi della tipologia di posa a pavimento.

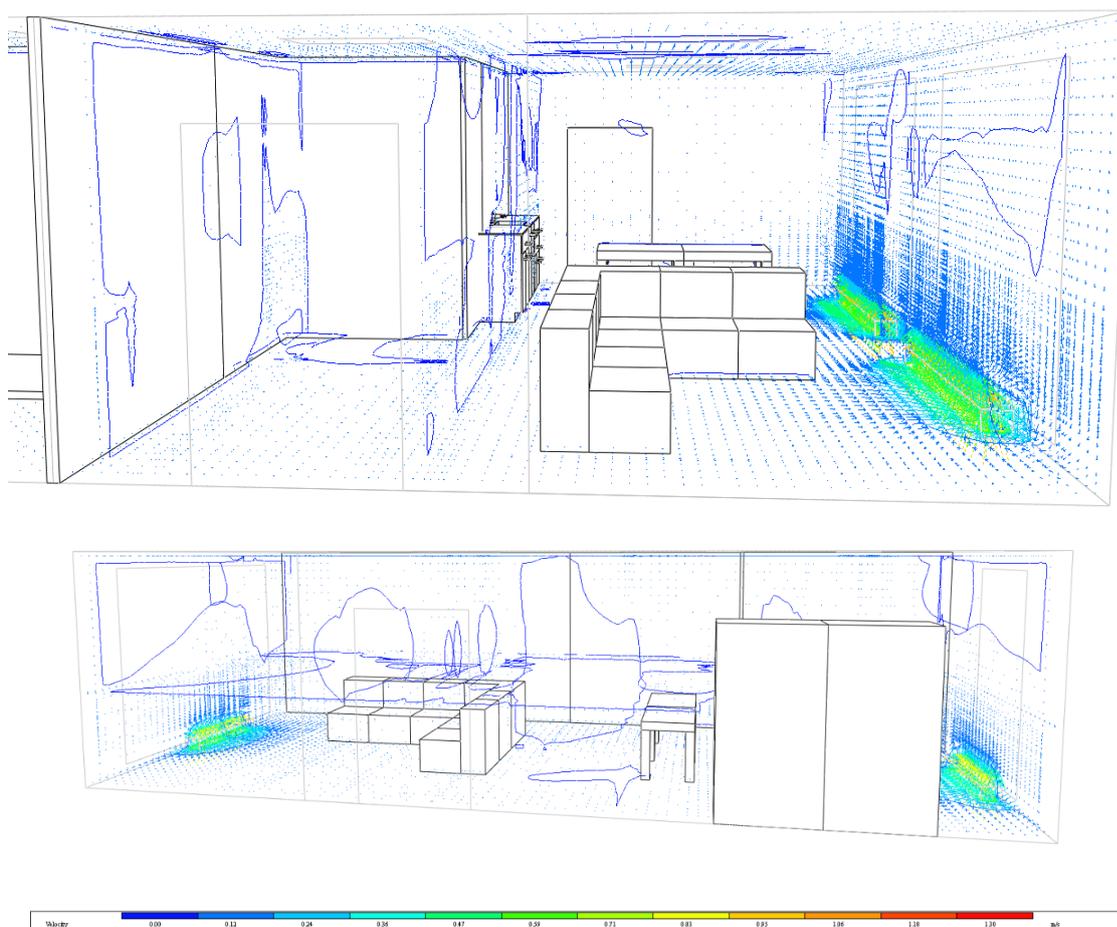


Figura 120- ventilconvettori a pavimento: campo di velocità in ambienti di grandi dimensioni; 9A3 sopra, 12A1 sotto

In entrambi gli alloggi presenti in figura è evidente come il caso estivo crei molte meno interferenze dell'invernale.

Nel caso della zona giorno dell'alloggio 9.A3, si ha un ambiente di ampia metratura caratterizzato da una pianta quasi quadrata. Sono indotti moti molto marcati sulle superfici delle finestre a sud, che però restano localizzati.

Spostandoci sull'alloggio 12.A1, si cambia tipologia di ambiente poiché questo risulta al contrario a pianta rettangolare in cui un lato è fortemente più corto dell'altro. La presenza di due finestre, una a nord e una a sud, lungo i lati corti permette all'ambiente di essere molto riparato e poco influenzato dalle condizioni esterne. Anche in questo secondo caso le performance sono ottime.

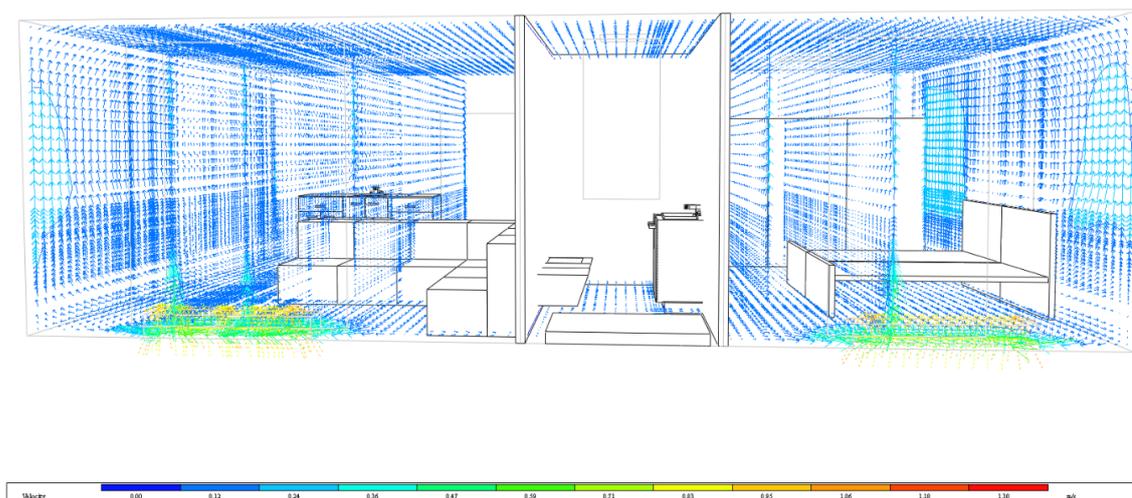


Figura 121-ventilconvettori a pavimento: campo di velocità in ambienti di grandi dimensioni; 4A2

In questa seconda tipologia di alloggio, abbiamo ambienti piccoli, esposti su un solo lato, riparati dal balcone a sud. I ventilconvettori sono installati a pavimento al di sotto delle due finestre principali.

Si evidenzia una velocità minore dell'aria, soprattutto sulla superficie degli elementi finestrati, anche in ragione dello scontro tra le due portate d'aria contrapposte. Complessivamente, non vi è grande disturbo nella zona occupata seppur l'influenza del terminale localmente sia ben evidente.

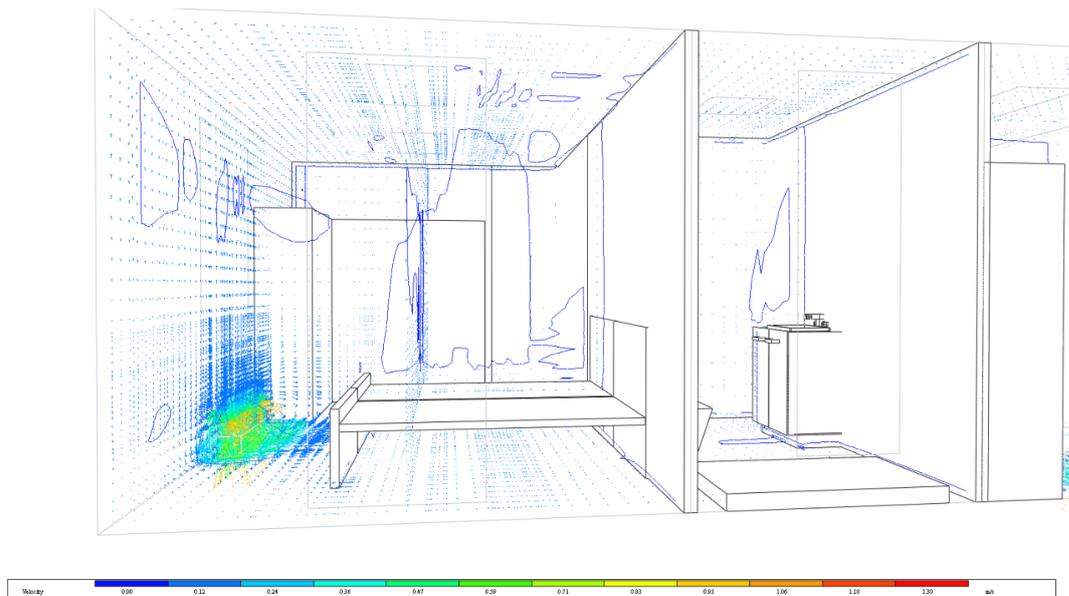


Figura 122- ventilconvettori a pavimento: campo di velocità in ambienti di dimensioni ridotte; 9A3

Per quanto riguarda la camera 1 dell'alloggio 9.A3 invece, si tratta di una camera con doppia esposizione e doppia finestra. Il terminale è installato sulla parete esterna che volge a est.

Complessivamente il risultato è molto buono, come negli altri casi estivi con posa a pavimento, complici le basse velocità dell'aria erogata dal terminale per la componente forzata, e la posa strategica dei terminali in ambiente.

Capitolo 6: Comparazione risultati dell'analisi CFD– Parametri di comfort

6.1. Introduzione e definizione delle variabili

In questo ultimo capitolo si tratteranno gli indici di comfort utilizzati per valutare lo stato dei singoli alloggi. Questi sono:

- PMV, Predicted Mean Vote;
- PPD, Predicted Percentage of Dissatisfied;
- Comfort, parametro del sistema che in maniera sintetica e approssimativa, attraverso un valore numerico, che può andare da 1 (pericoloso, troppo freddo) a 15 (pericoloso, troppo caldo), descrive l'ambiente;

I range che questi indici devono rispettare sono riassunti nella tabella seguente:

Tabella 9- Range degli indici di comfort

	Valori Ottimali per Comfort
PPD	$\leq 10\%$
PMV	$\leq 0.5 $
Comfort Key	$[6 \div 8]$

Per l'analisi in ognuna delle due stagioni climatiche, andranno definiti nello specifico variabili che descrivono nel dettaglio lo stato degli occupanti in quanto a vestiario ed attività svolta, e quello dell'ambiente per il lato igrometrico.

Per ogni terminale, si ricercheranno non solo lo stato generale degli ambienti e degli alloggi ma si valuteranno anche eventuali situazioni di discomfort locale.

6.2. Caso Invernale

Per il caso invernale, si sono definiti i seguenti parametri fisici:

Tabella 10- Parametri comfort invernale

Activity	Very light work	93.1 W/m ²
Clothing index	Male office, medium	1 clo
Relative Humidity	-	50 %

C'è da sottolineare che le velocità di erogazione dell'aria dai ventilconvettori e dai terminali ibridi sono state assegnate in modo da rappresentare le condizioni di regime del sistema: seppur sia stato scelto uno tra i più rigidi momenti dell'anno, c'è da considerare la presenza in alloggio sia di apporti gratuiti che di continuità del sistema di riscaldamento per tutto il giorno.

In altre parole, all'avviamento del sistema di riscaldamento, le influenze dei terminali sull'ambiente sarebbero state molto diverse, e le criticità dei singoli terminali sarebbero sicuramente risultate più evidenti.

6.2.1. Radiatori

I radiatori sono il terminale per impianto di riscaldamento più diffuso. La tipologia di radiatori considerata e modellata, come detto nel capitolo precedente, è quella *a bassa temperatura*.

La loro performance invernale dal punto di vista degli indici è molto buona, seppur negli ambienti di ridotte dimensioni la loro influenza risulta essere motivo di creazione di zona a temperatura maggiore.

Nel complesso, seppur hanno i valori di pmv più elevati tra i vari terminali analizzati, i valori di tutte e tre le variabili del comfort analizzate sono perfettamente all'interno dei range di accettabilità, dimostrando inoltre una grande omogeneità spaziale.

Procedendo dall'alloggio posto più in basso e più riparato a salire, si nota come nell'esempio dell'appartamento 12.A1 vi sia più disomogeneità che nel 4.A2, come era lecito aspettarsi, e come inoltre l'influenza degli elementi finestrati diventi più importante.

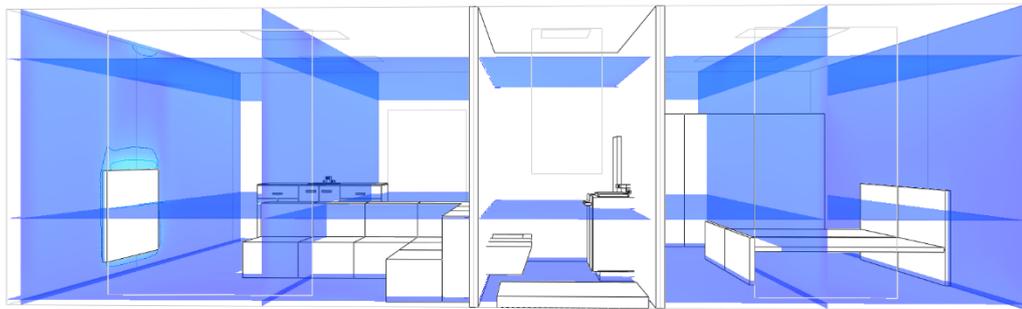
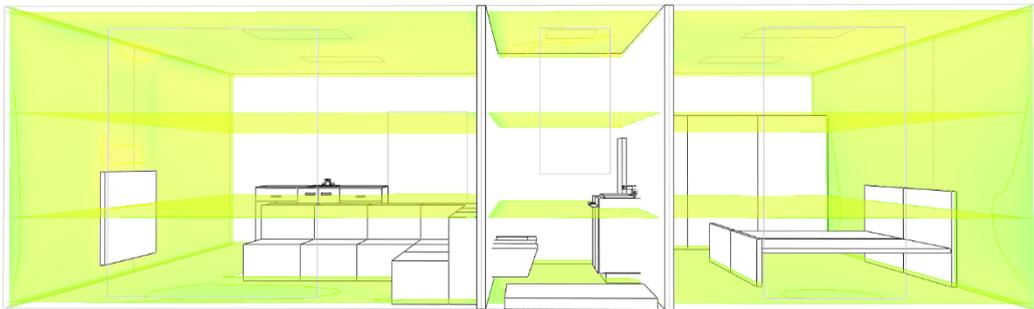
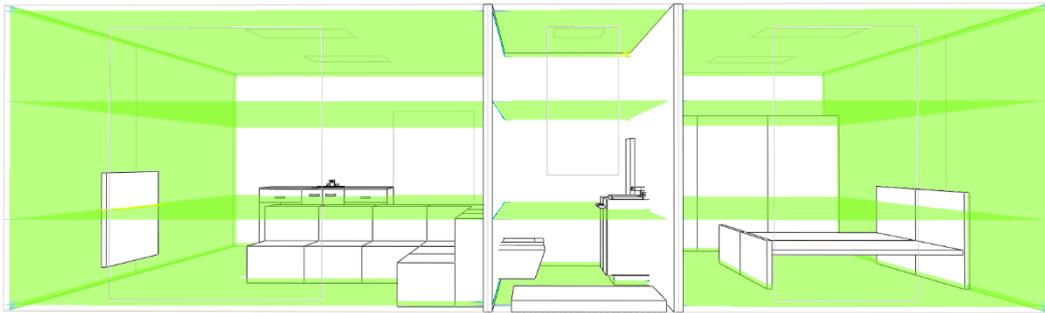


Figura 123- Radiatori: Indici di comfort nell'alloggio 4a2

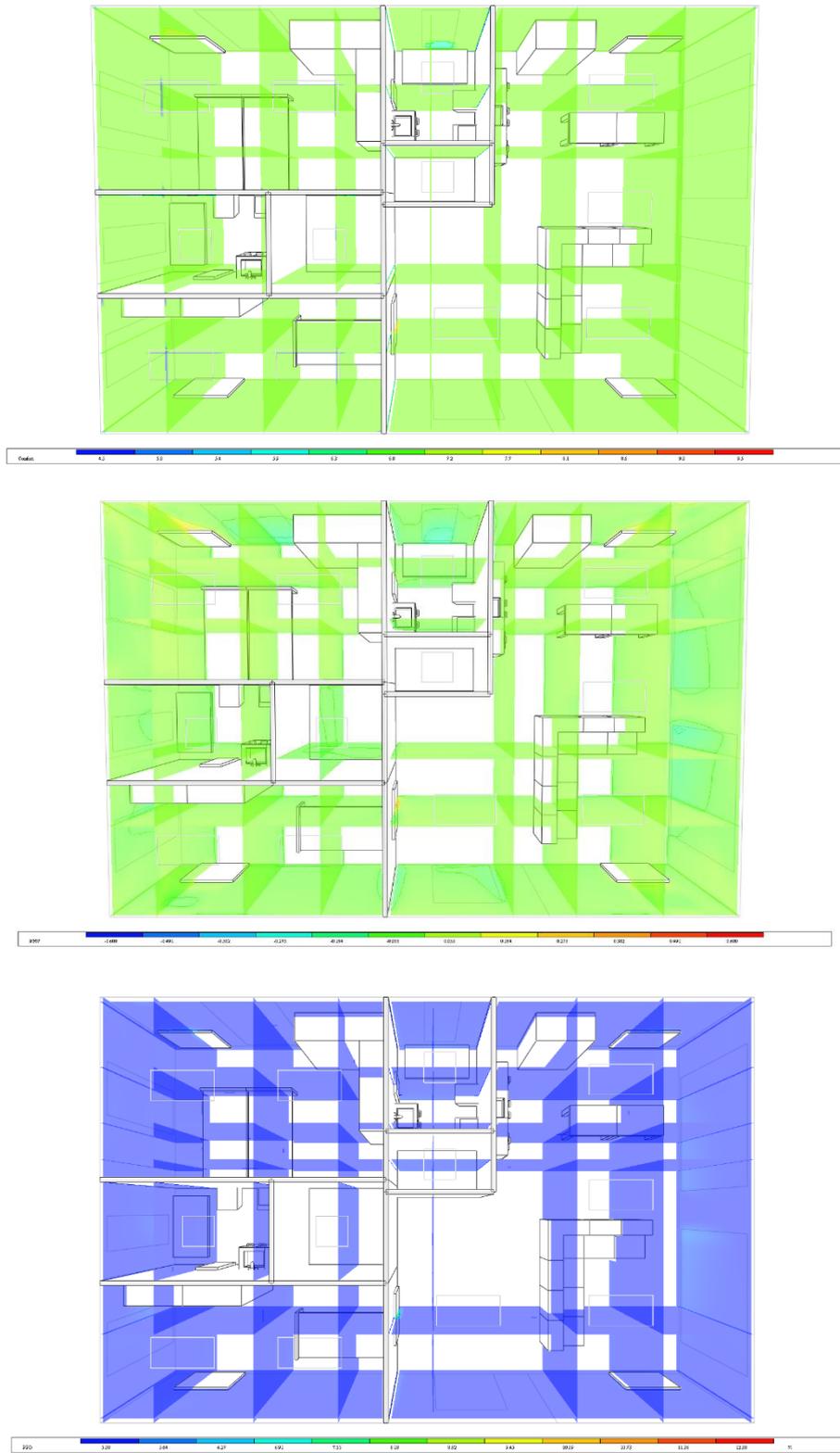


Figura 124- Radiatori: Indici di comfort nell'alloggio 9a3

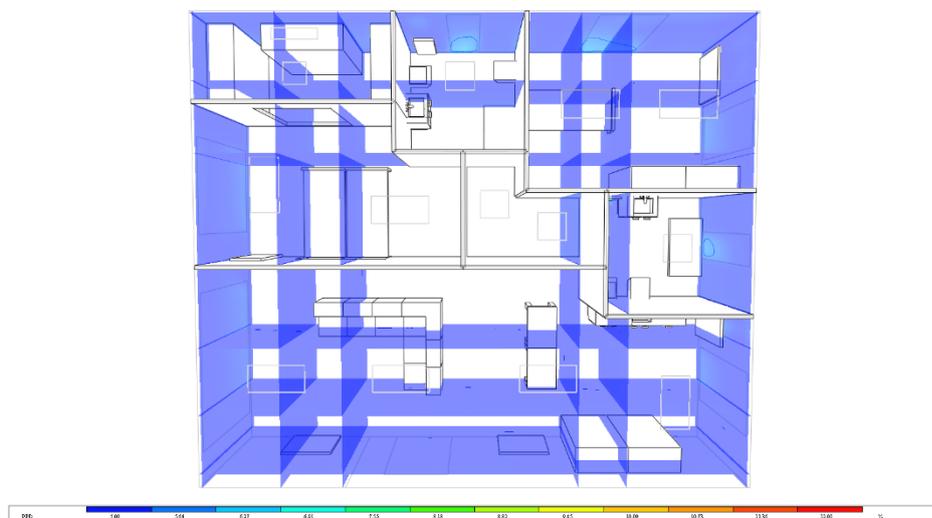
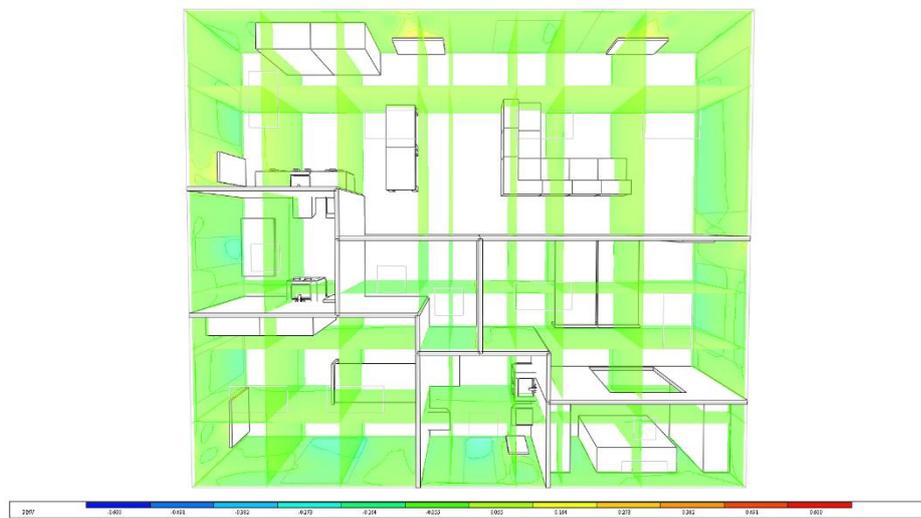


Figura 125- Radiatori: Indici di comfort nell'alloggio 12a1

6.2.2. Pannelli radianti

I pannelli radianti sono una di quelle tipologie di terminali che consentono il duplice assetto da riscaldamento e raffrescamento. La tipologia analizzata è quella a bassa temperatura. La loro performance invernale dal punto di vista degli indici è ottima, ma vanno fatte distinzioni tra le due tipologie di posa.

Il caso a pavimento è contraddistinto da ottimi valori delle variabili di comfort e da omogeneità ambientale, mentre la posa a soffitto crea inevitabilmente zone di accumulo di calore a soffitto.

Nel complesso i valori di tutte e tre le variabili del comfort analizzate sono perfettamente all'interno dei range di accettabilità.

Procedendo dall'alloggio posto più in basso e più riparato a salire, si nota come nell'esempio dell'appartamento 12.A1 vi sia più disomogeneità che nel 4.A2, come era lecito aspettarsi, e come inoltre l'influenza degli elementi finestrati diventi più importante.

Si ricordano inoltre i limiti con cui sono stati modellati i terminali in ambiente, il che porta inevitabilmente ad imprecisioni seppur piccole.

Si tratta prima il caso a pavimento poi quello a soffitto.

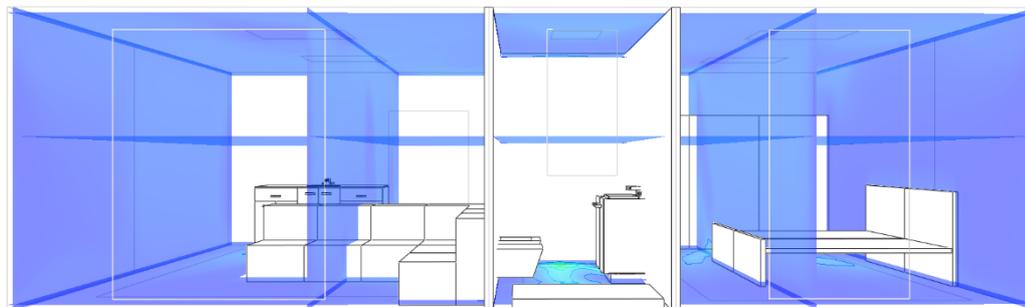
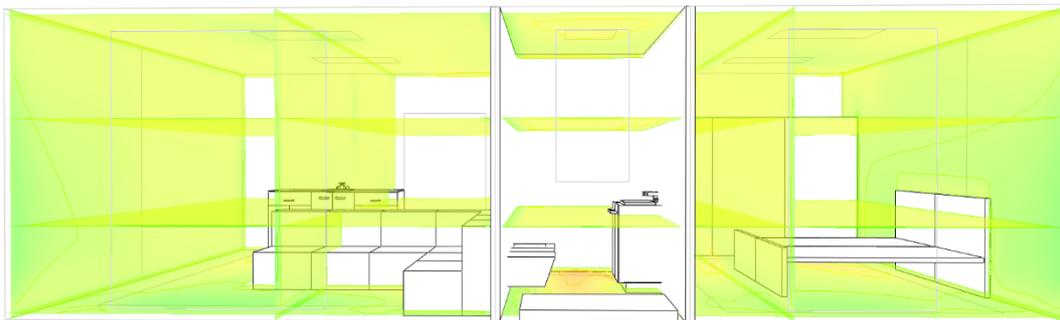


Figura 126- Pannelli radianti pavimento: Indici di comfort nell'alloggio 4a2

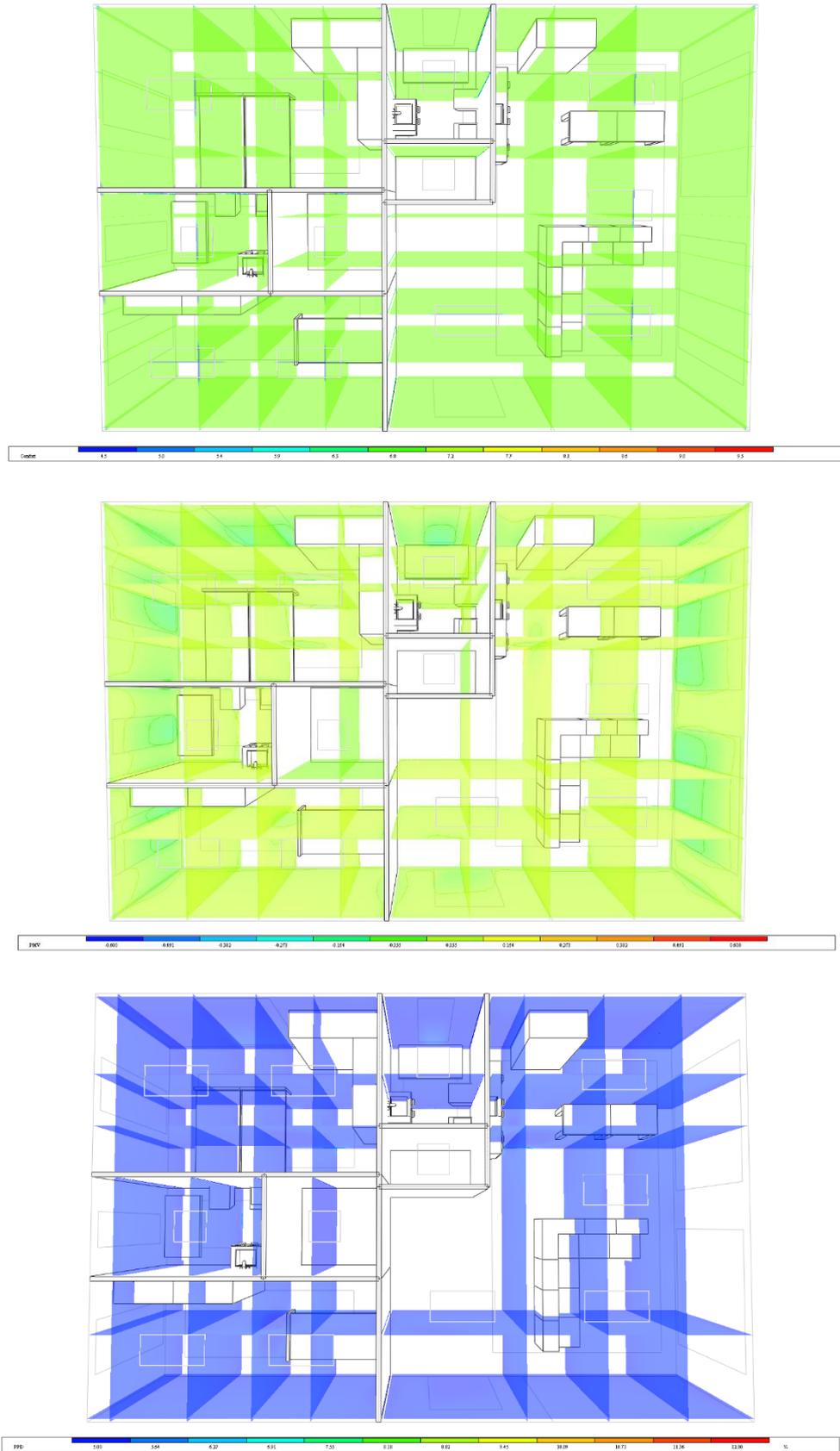


Figura 127- Pannelli radianti pavimento: Indici di comfort nell'alloggio 9a3

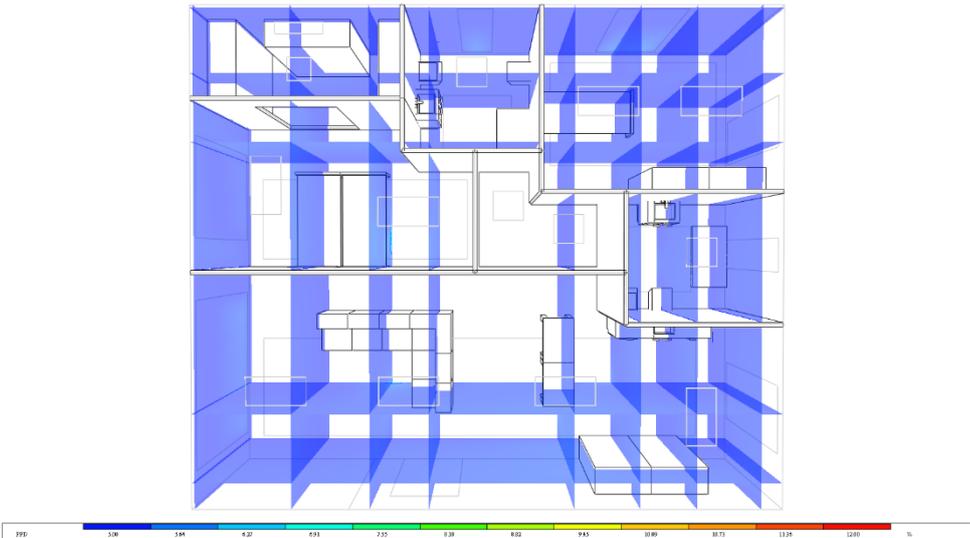
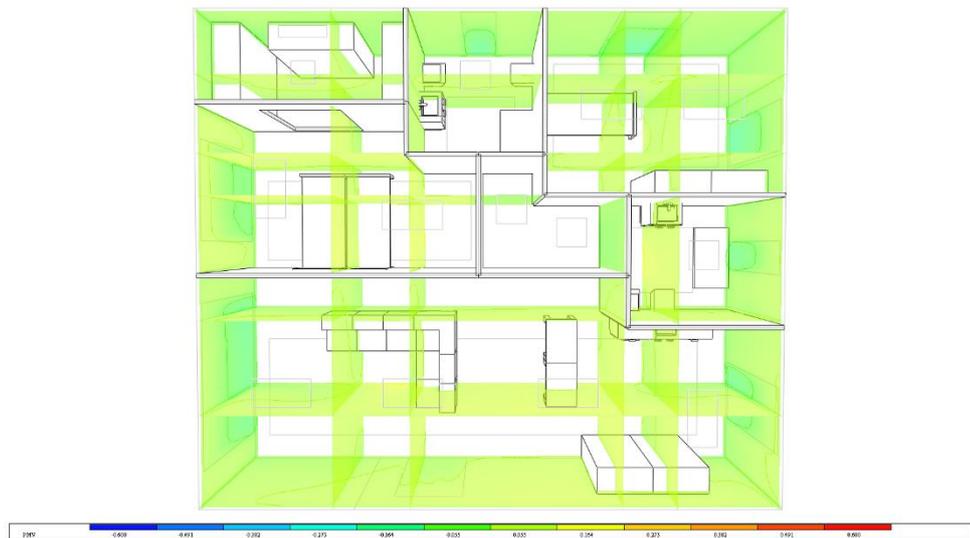
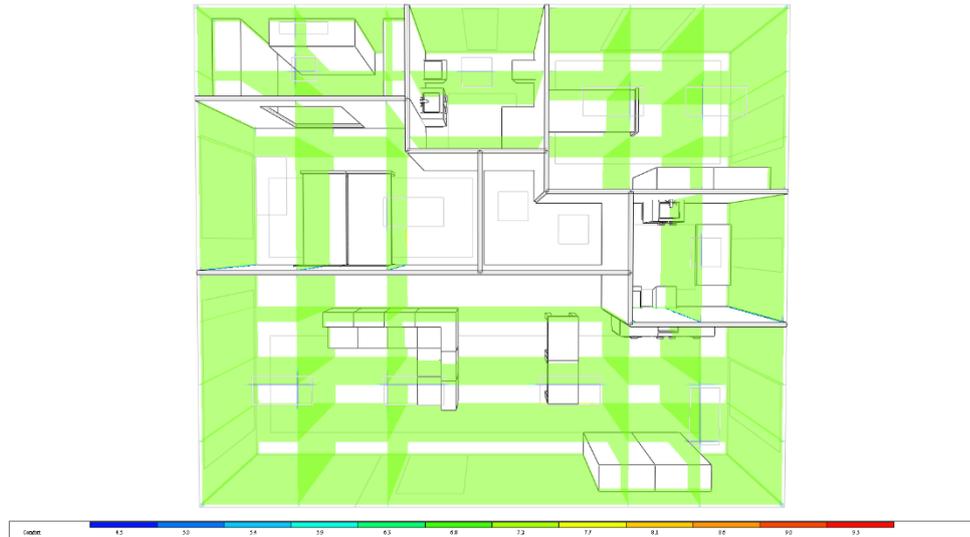


Figura 128- Pannelli radianti pavimento: Indici di comfort nell'alloggio 12a1

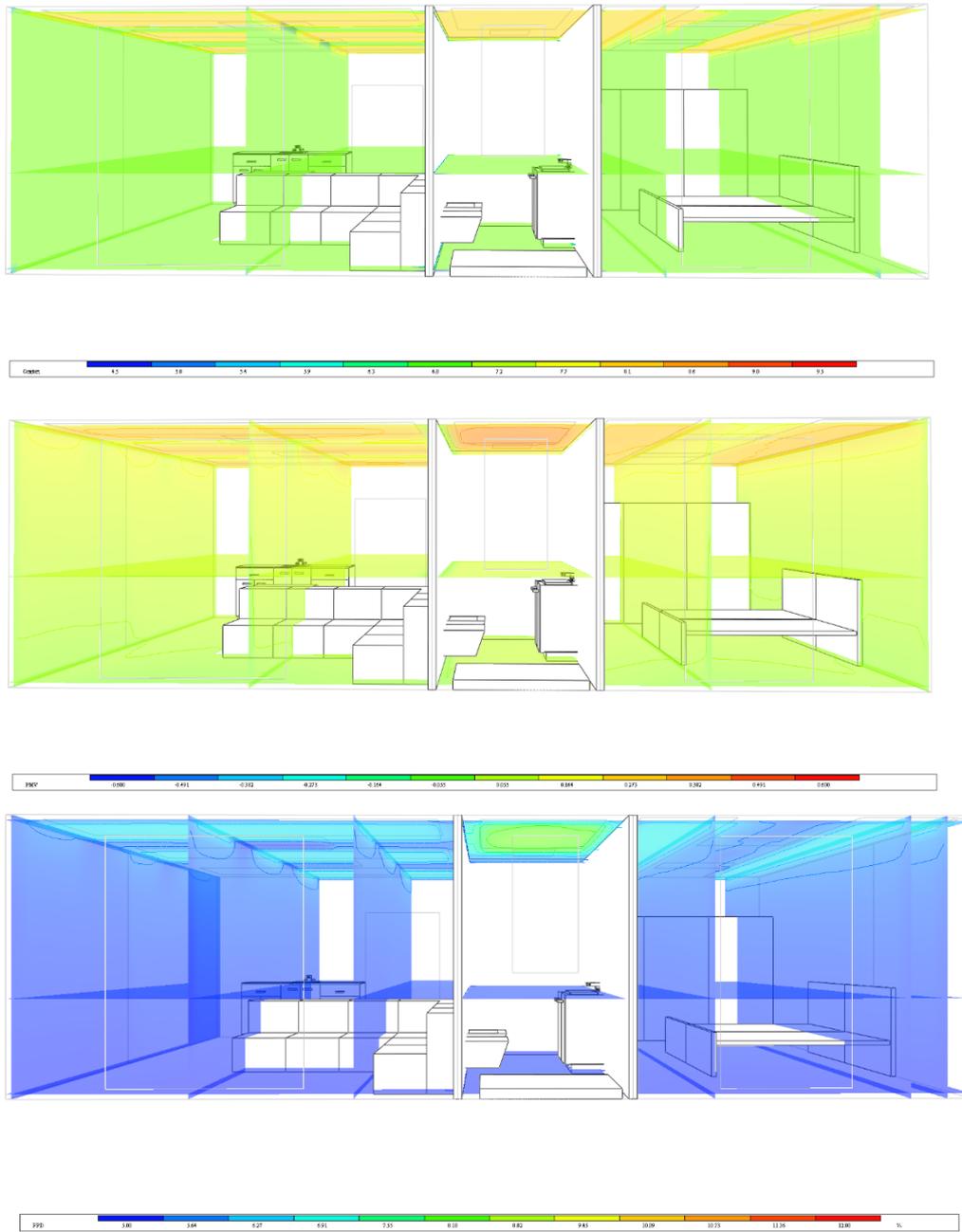


Figura 129- Pannelli radianti soffitto: Indici di comfort nell'alloggio 4a2

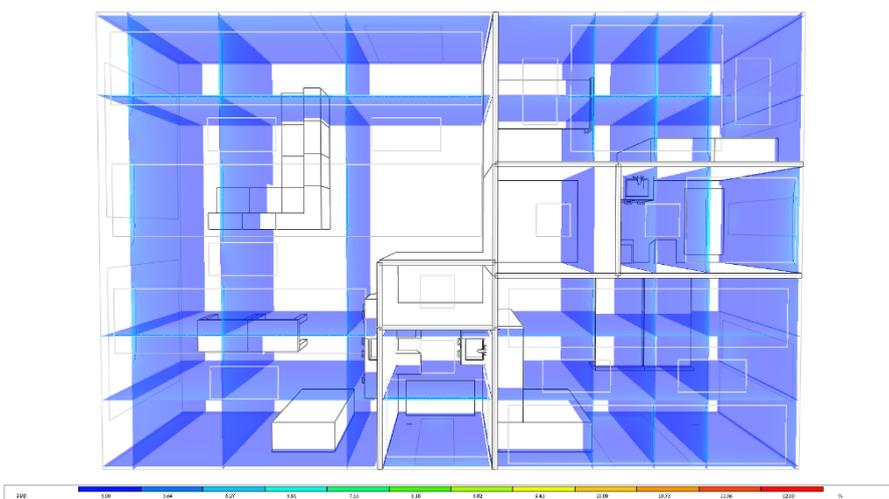
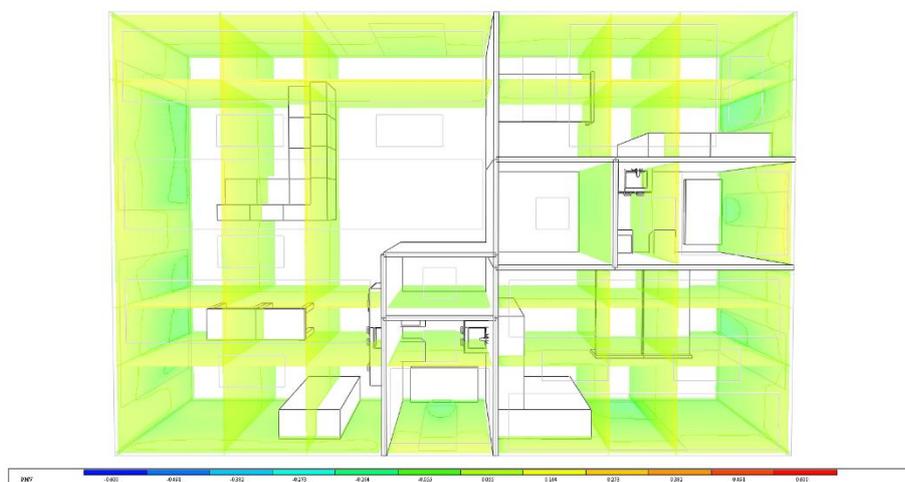
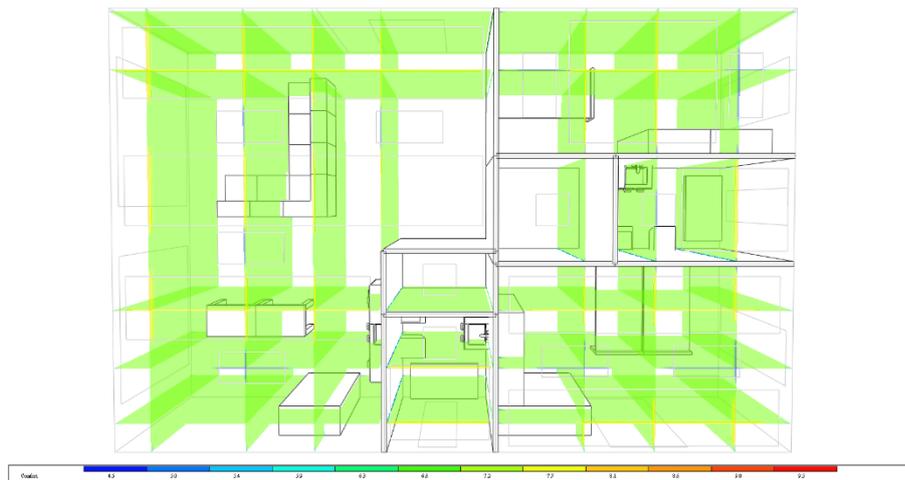


Figura 130- Pannelli radianti soffitto: Indici di comfort nell'alloggio 9a3

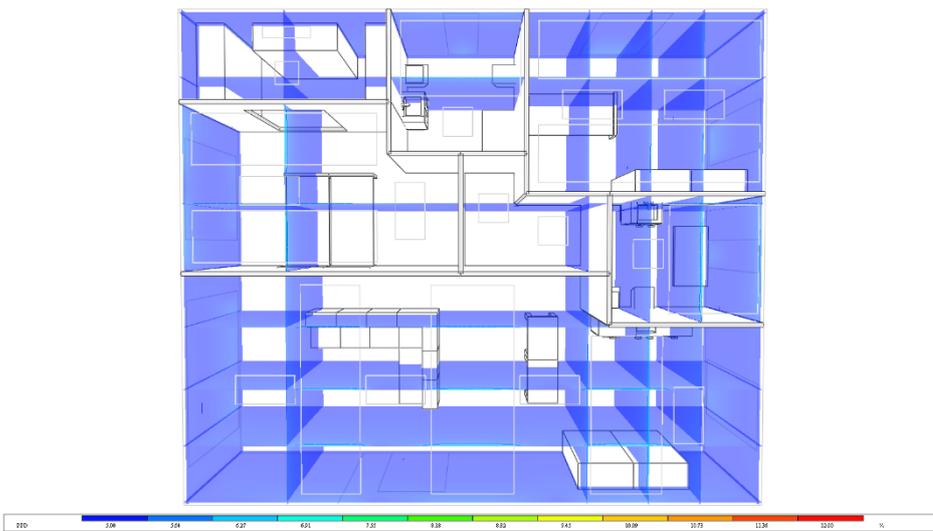
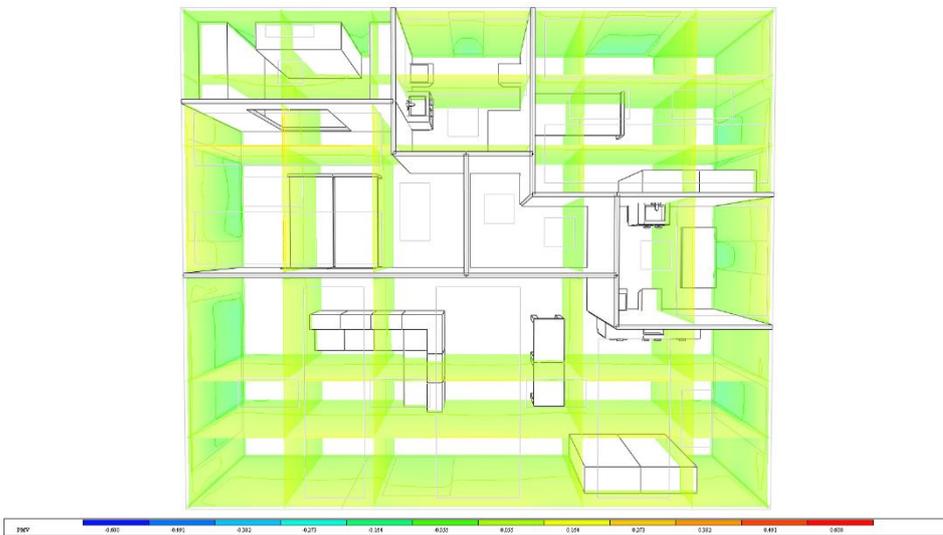
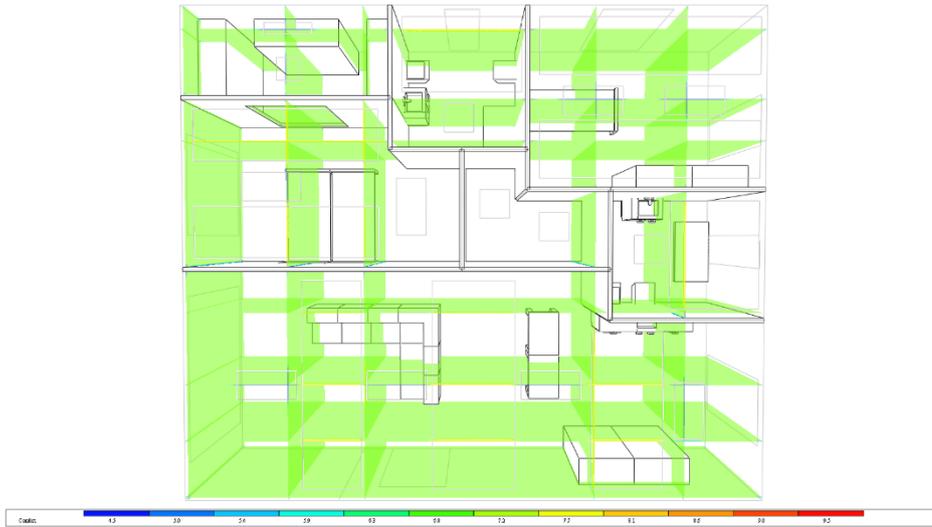


Figura 131- Pannelli radianti soffitto: Indici di comfort nell'alloggio 12a1

6.2.3. Terminali ibridi

I terminali ibridi hanno una doppia natura: radiante, grazie alla piastra posta frontalmente, e convettiva, dovuta alla ventilazione forzata di aria che lambisce lo scambiatore di calore interno.

La loro performance invernale dal punto di vista degli indici è buona, seppur non si riesano sempre ad ottenere le condizioni termiche di set point imposte in ogni punto dell'alloggio; l'omogeneità spaziale, difatti, non appartiene a questa tipologia di terminale.

Nel complesso, seppur i valori di pmv siano tra i più bassi registrati tra i vari terminali, i valori di tutte e tre le variabili del comfort analizzate sono perfettamente all'interno dei range di accettabilità.

Procedendo dall'alloggio posto più in basso e più riparato a salire, si nota come nell'esempio dell'appartamento 12.A1 vi sia più disomogeneità che nel 4.A2, come era lecito aspettarsi, e come inoltre l'influenza degli elementi finestrati diventi più importante.

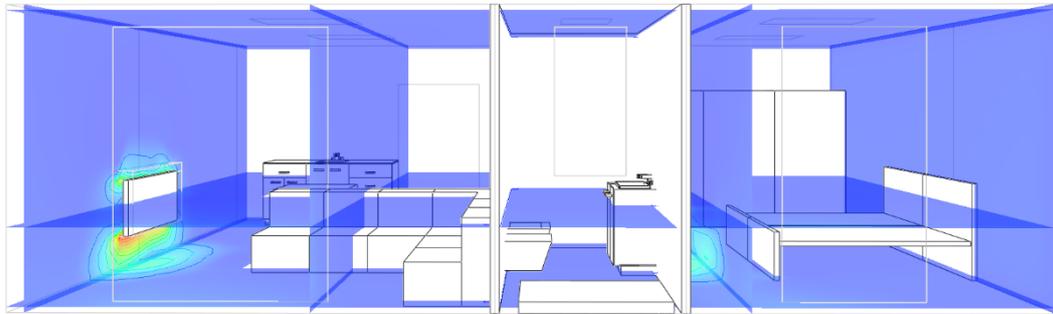
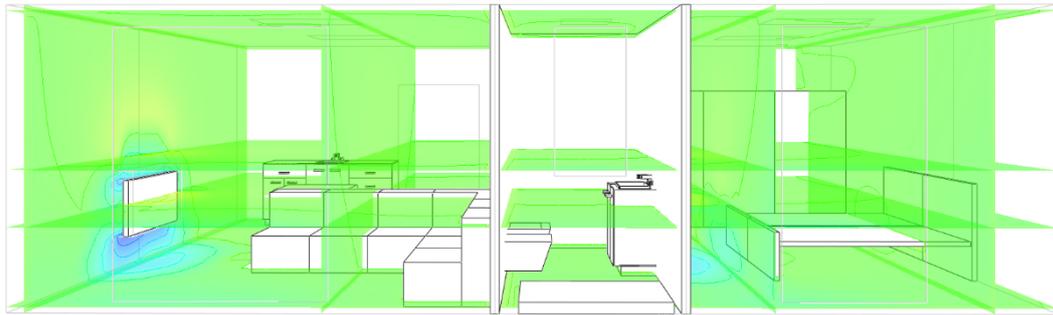
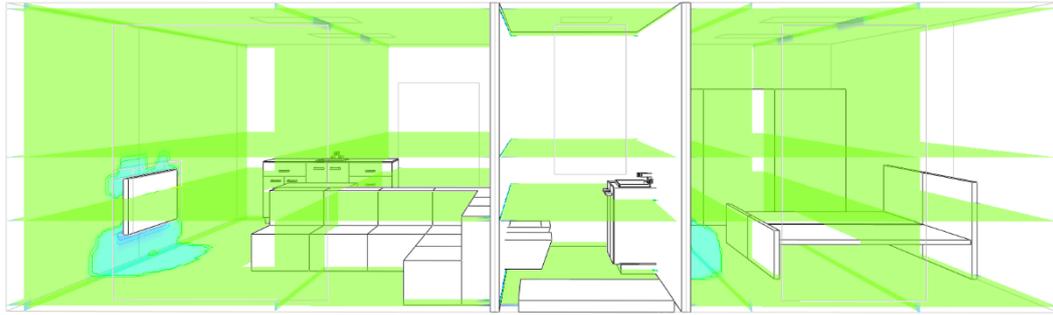


Figura 132- Terminali ibridi: Indici di comfort nell'alloggio 4a2

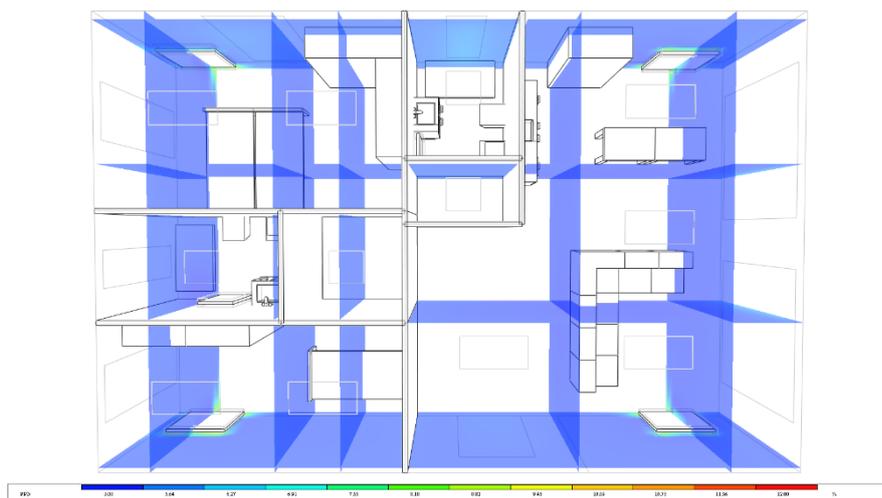
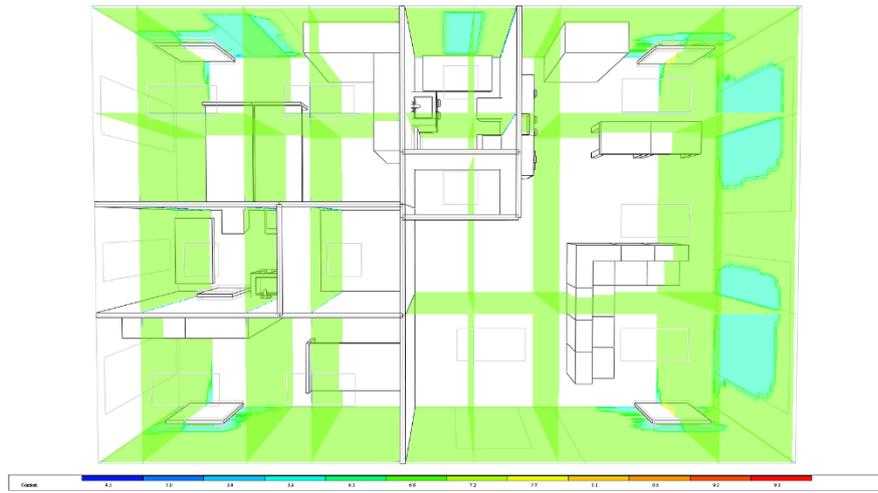


Figura 133- Terminali ibridi: Indici di comfort nell'alloggio 9a3

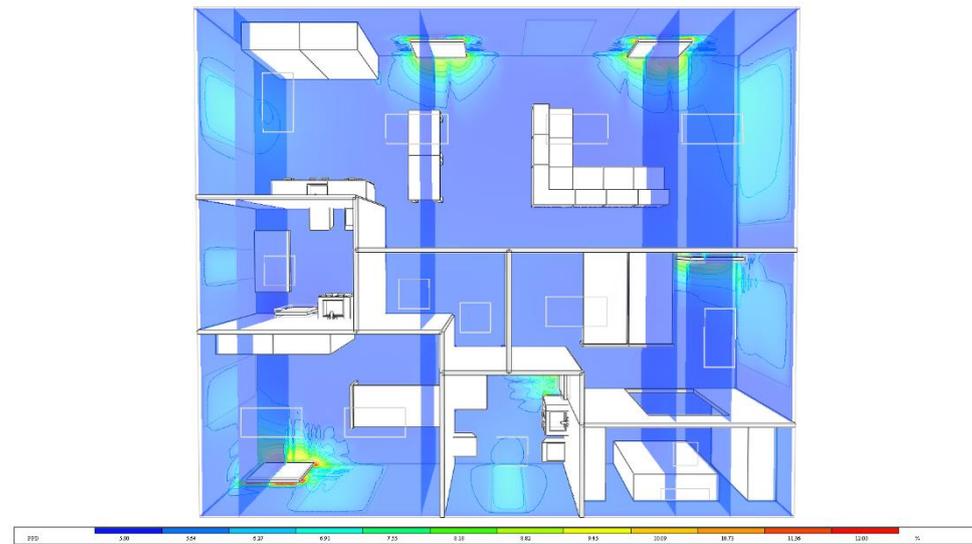
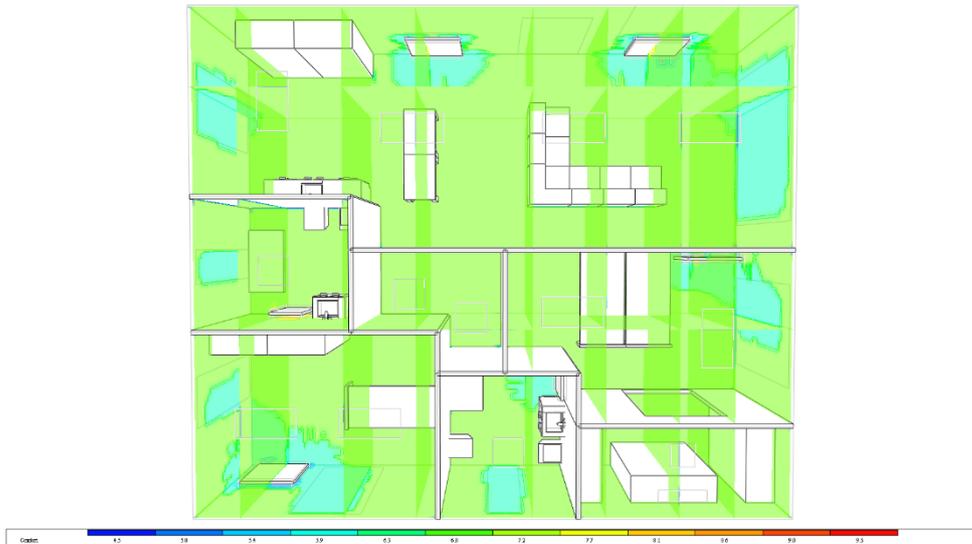


Figura 134- Terminali ibridi: Indici di comfort nell'alloggio 12a1

6.2.4. Ventilconvettori

I risultati ottenuti in queste simulazioni per quanto riguarda l'utilizzo dei ventilconvettori a pavimento e soffitto per il riscaldamento sono molto buoni, occorre ricordare però che questi terminali possono creare non solo rumore ma anche fastidio se le velocità si alzano.

Inoltre, per il caso a pavimento, non bisogna dimenticare le considerazioni legate alla pulizia e manutenzione dei terminali. Si riporta per la posa a pavimento l'alloggio 12a1 sia in condizioni di velocità dell'aria in uscita dai terminali pari a 1.2m/s che 2 m/s, tenendo presente che potenzialmente le velocità possono essere anche maggiori in condizioni di bisogno.

Il caso a pavimento risponde in modo migliore ai carichi a cui sono sottoposti i terminali. Si tratta prima il caso a pavimento poi il soffitto.

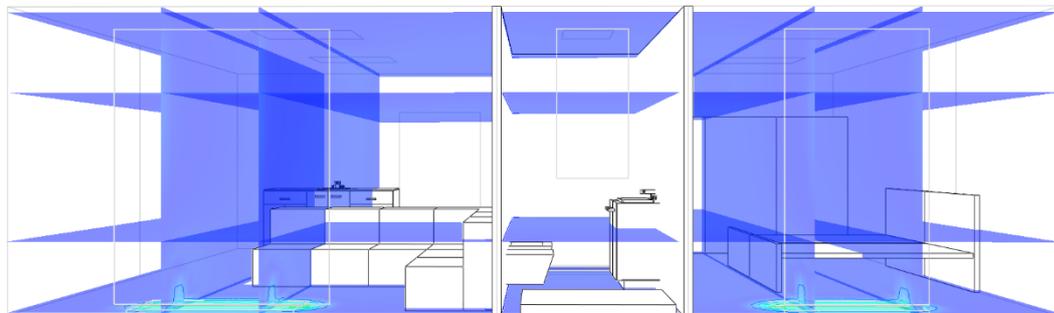
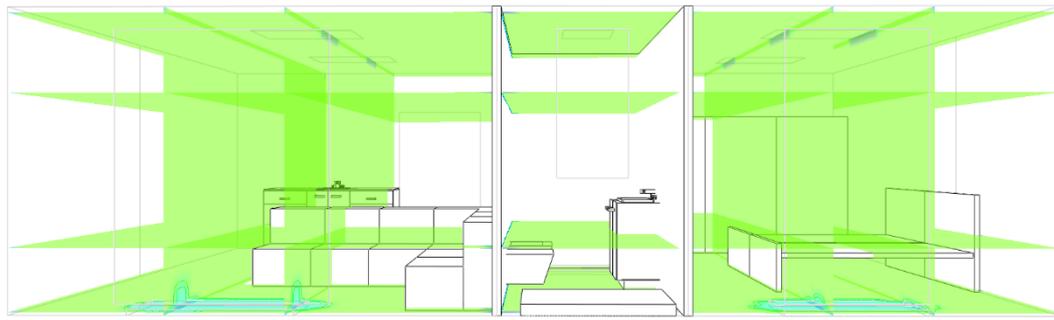


Figura 135- Ventilconvettori pavimento: Indici di comfort nell'alloggio 4a2

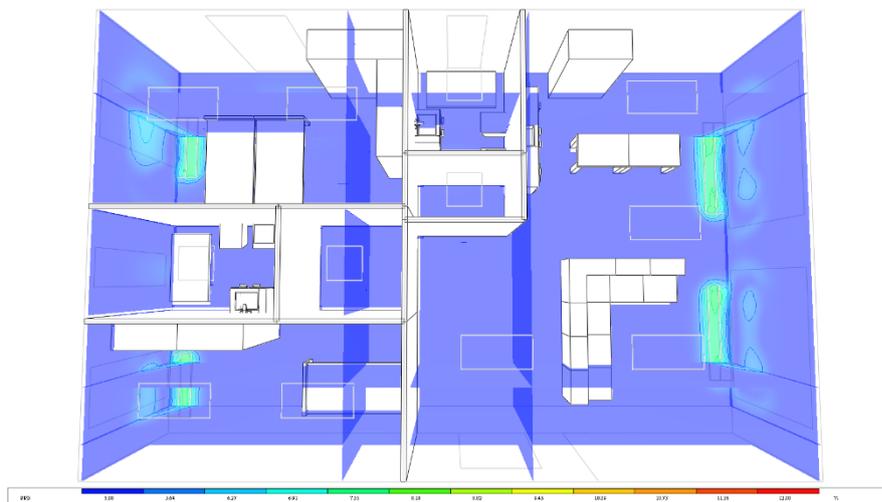
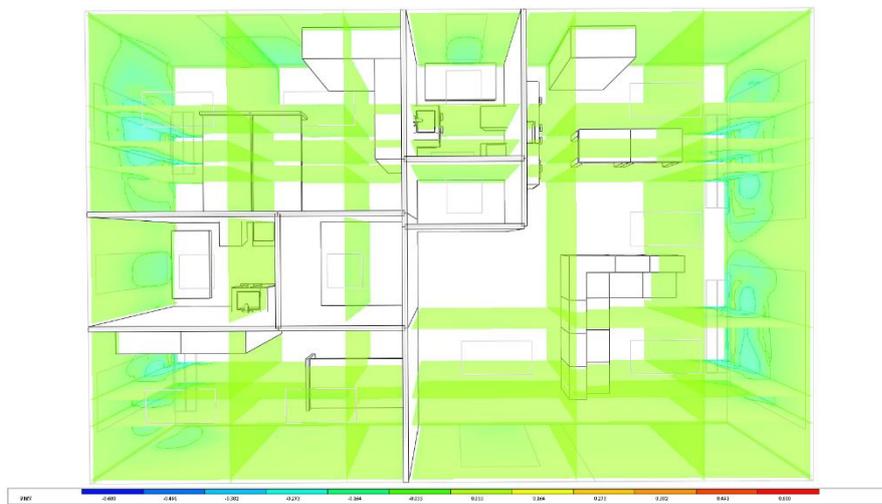
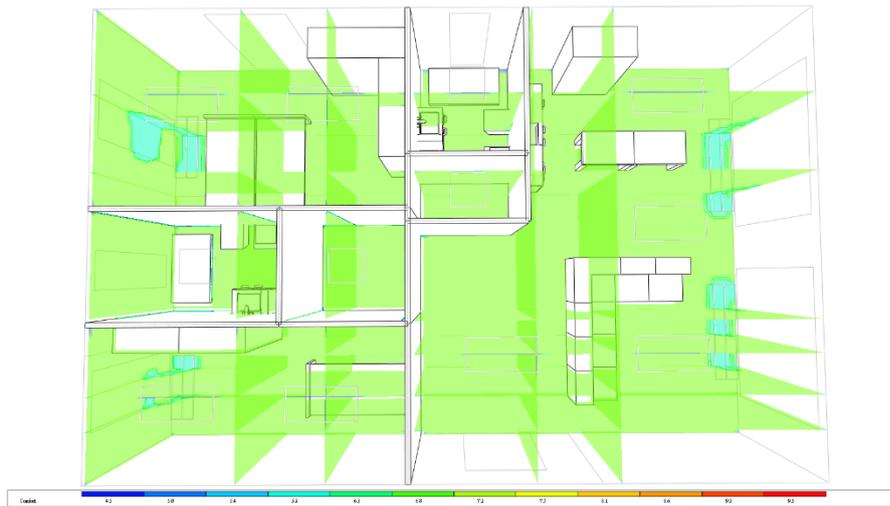


Figura 136- Ventilconvettori pavimento: Indici di comfort nell'alloggio 9a3

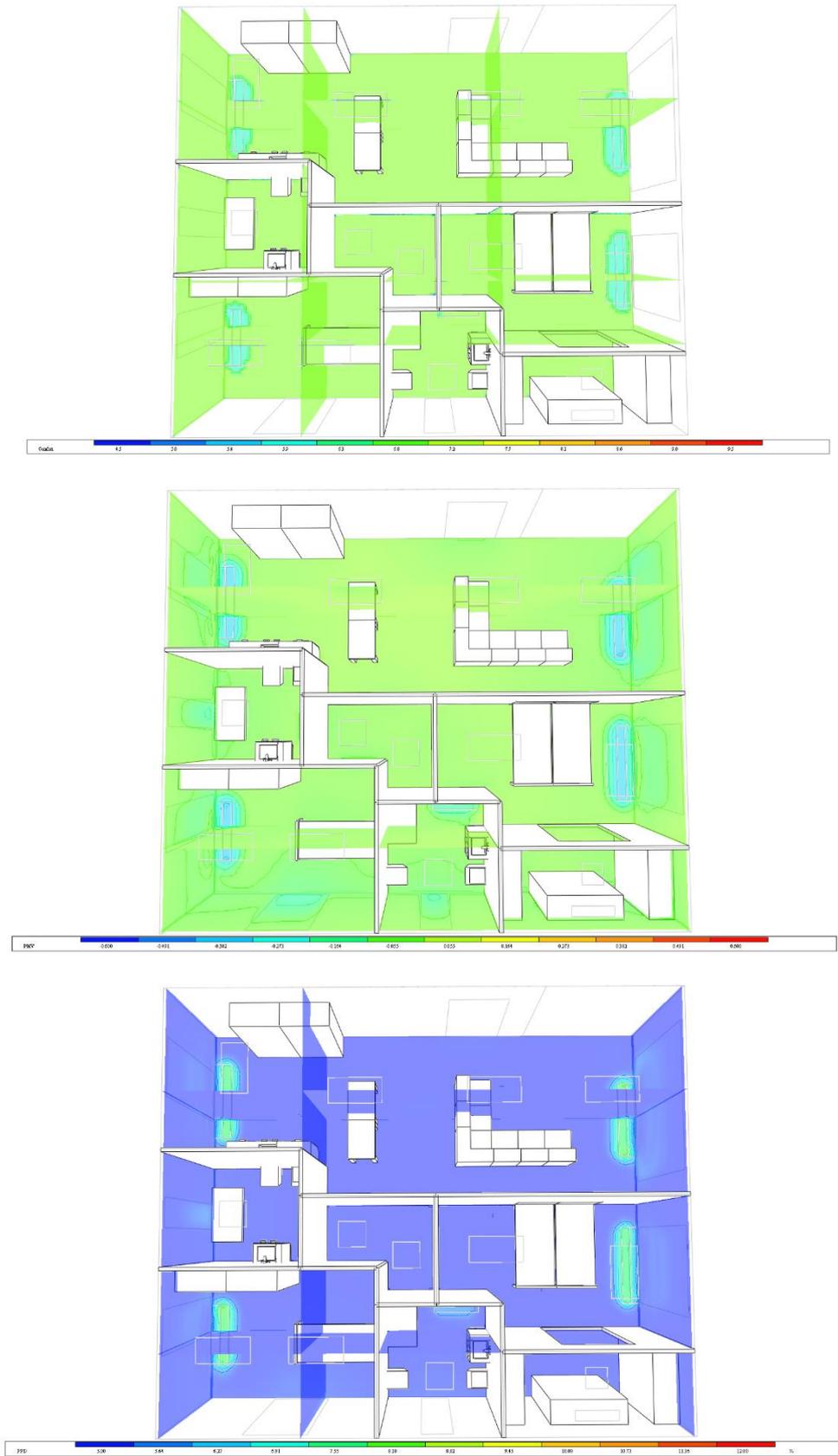


Figura 137- Ventilconvettori pavimento: Indici di comfort nell'alloggio 12a1



Figura 138- Ventilconvettori pavimento: Indici di comfort nell'alloggio 12a1 - caso con velocità dell'aria più elevata (2 m/s)

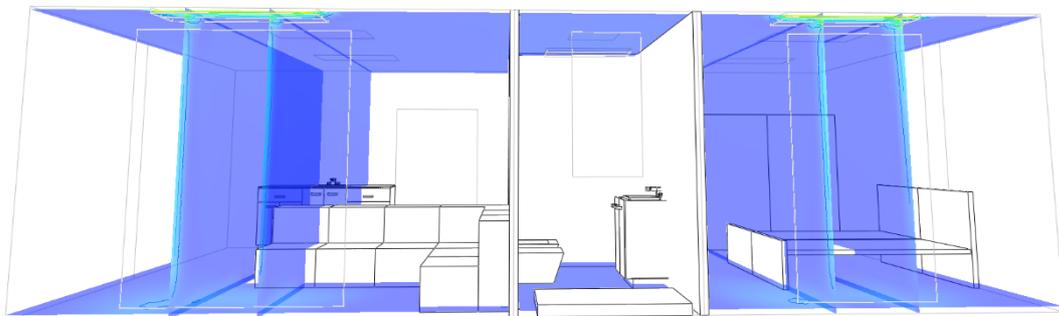
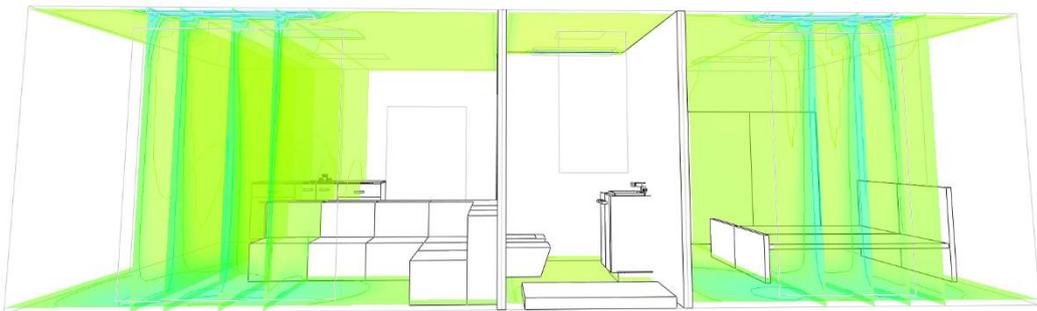
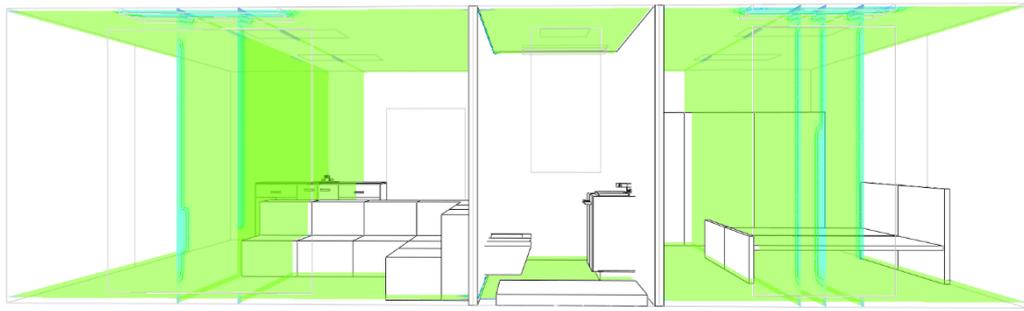


Figura 139- Ventilconvettori soffitto: Indici di comfort nell'alloggio 4a2



Figura 140- Ventilconvettori soffitto: Indici di comfort nell'alloggio 9a3

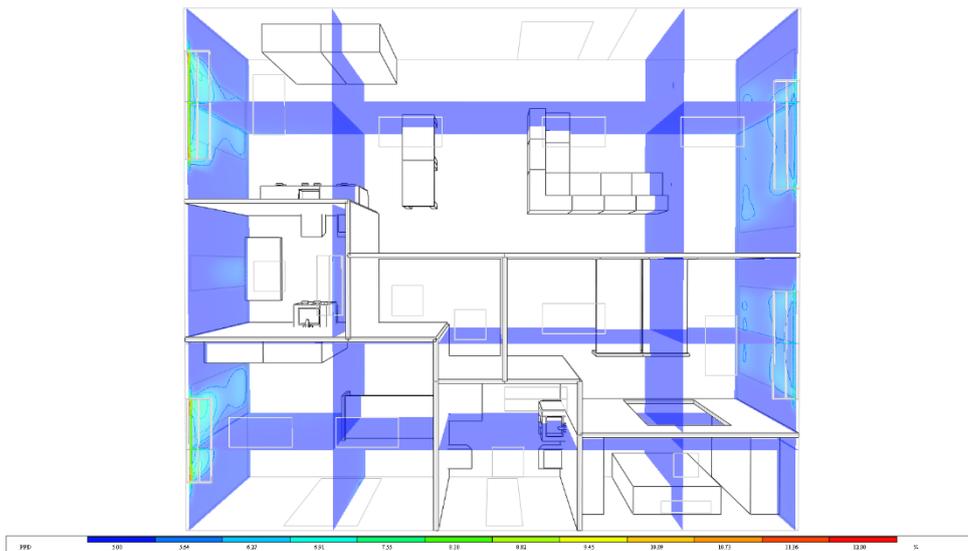


Figura 141- Ventilconvettori soffitto: Indici di comfort nell'alloggio 12a1

6.3. Caso Estivo

Per il caso estivo, si sono definiti i seguenti parametri fisici:

Tabella 11- Parametri comfort invernale

Activity	Very light work	93.1 W/m^2
Clothing index	Male office, light	0.6 clo
Relative Humidity	-	50 %

C'è da sottolineare che le velocità di erogazione dell'aria dai ventilconvettori e dai terminali ibridi sono state assegnate in modo da rappresentare le condizioni di regime del sistema: seppur sia stato scelto uno tra i più rigidi momenti dell'anno, c'è da considerare la presenza in alloggio sia di apporti gratuiti che di continuità del sistema di raffrescamento per tutto il giorno.

In altre parole, all'avviamento del sistema di climatizzazione, le influenze dei terminali sull'ambiente sarebbero state molto diverse, e le criticità dei singoli terminali sarebbero sicuramente risultate più evidenti.

A differenza del caso invernale, il caso estivo è caratterizzato da velocità dell'aria dei terminali caratterizzati da convezione forzata più elevate, di conseguenza i range cromatici varieranno di caso in caso.

6.3.1. Pannelli radianti

I pannelli radianti sono una di quelle tipologie di terminali che consentono il duplice assetto da riscaldamento e raffrescamento. La tipologia analizzata è quella a bassa temperatura. La loro performance estiva dal punto di vista degli indici è ottima per entrambe le tipologie di posa.

I valori di tutte e tre le variabili del comfort analizzate sono perfettamente all'interno dei range di accettabilità.

Procedendo dall'alloggio posto più in basso e più riparato a salire, si nota come nell'esempio dell'appartamento 12.A1 vi sia più disomogeneità che nel 4.A2, come era lecito aspettarsi, e come inoltre l'influenza degli elementi finestrati diventi più importante.

Si ricordano inoltre i limiti con cui sono stati modellati i terminali in ambiente, il che porta inevitabilmente ad imprecisioni seppur piccole.

Si tratta prima il caso a pavimento poi quello a soffitto.

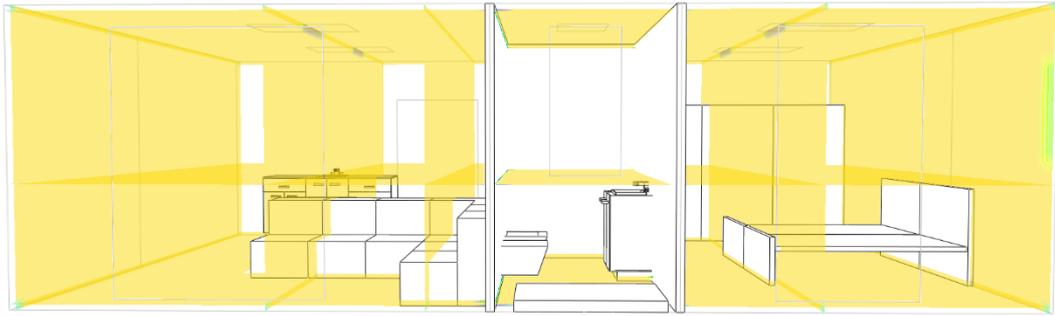


Figura 142- Pannelli radianti pavimento: Indici di comfort nell'alloggio 4a2

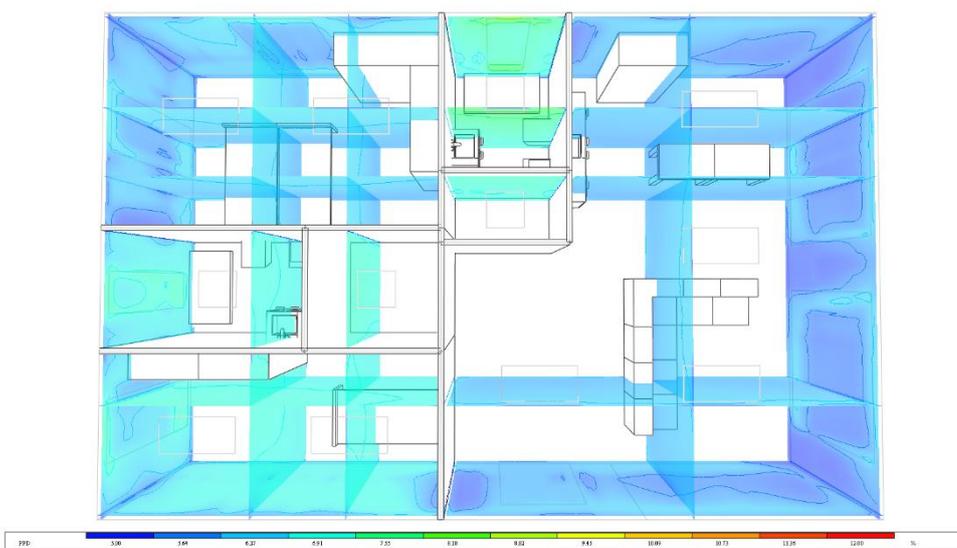
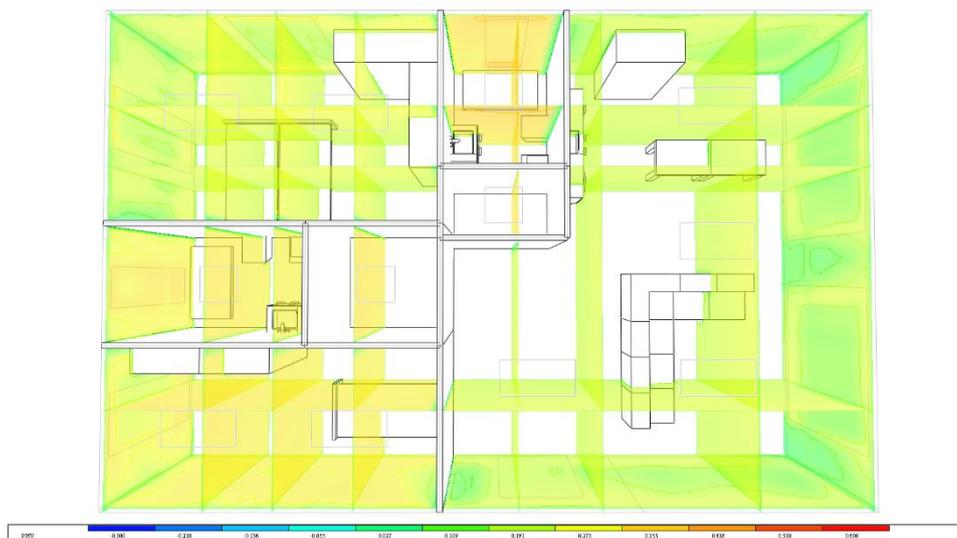
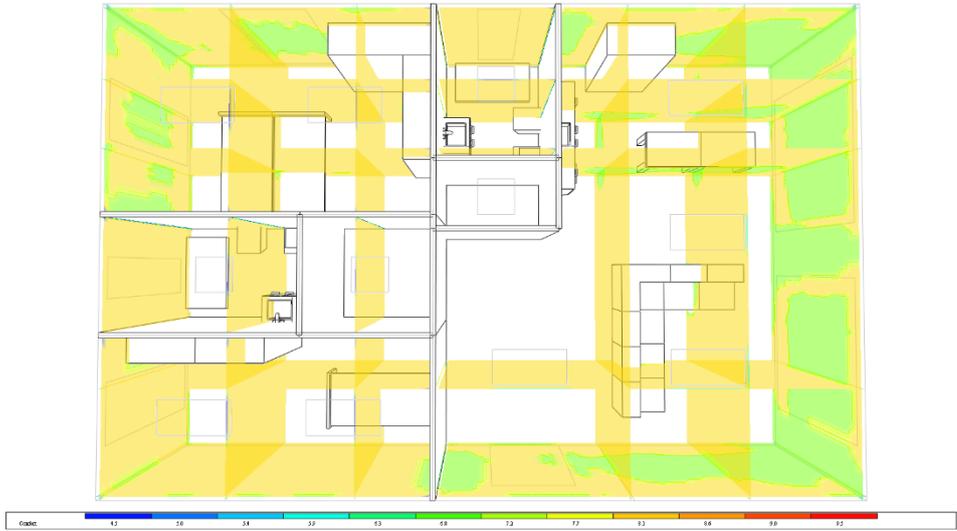


Figura 143- Pannelli radianti pavimento: Indici di comfort nell'alloggio 9a3

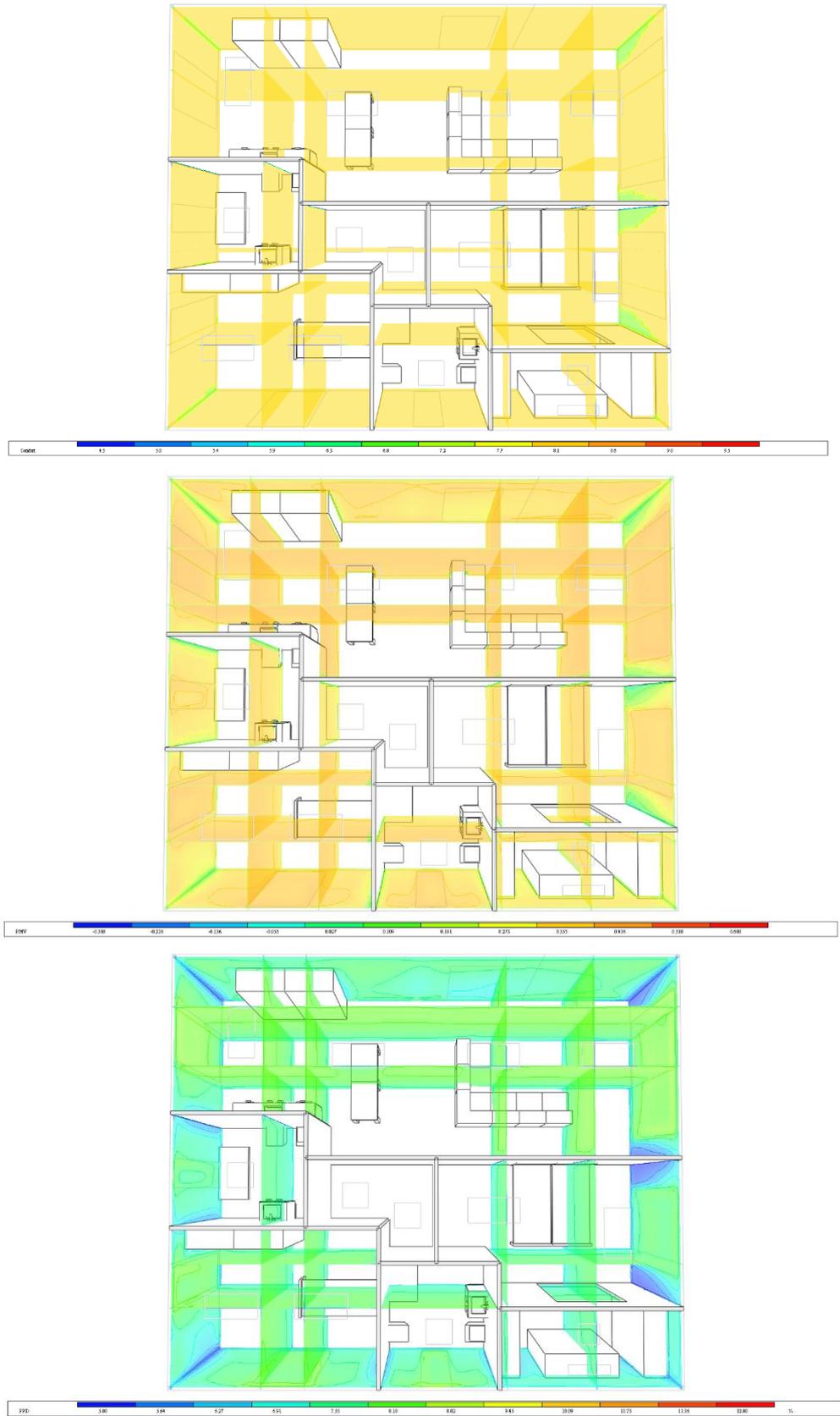


Figura 144- Pannelli radianti pavimento: Indici di comfort nell'alloggio 12a1

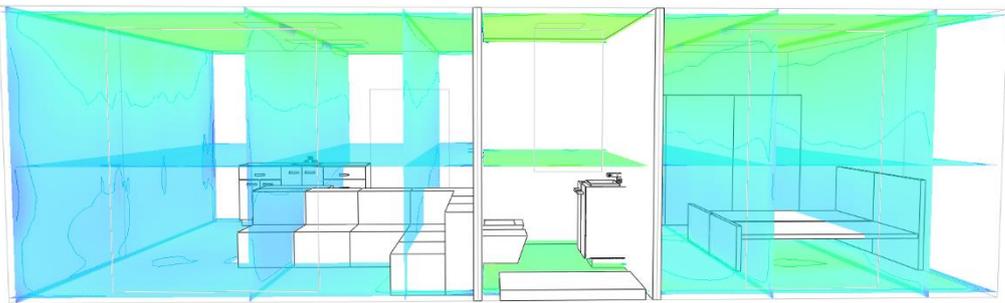
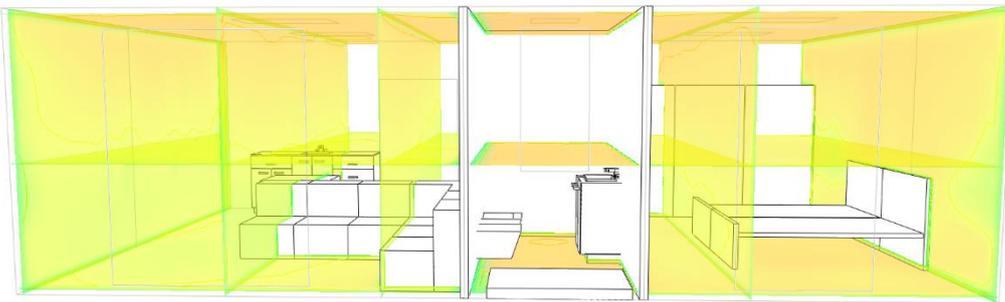
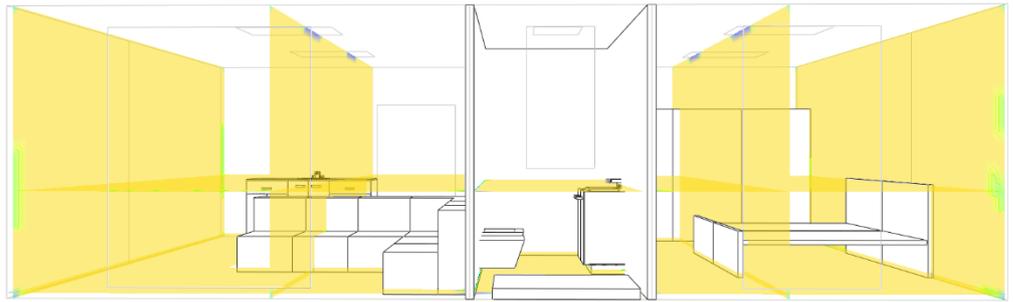


Figura 145- Pannelli radianti soffitto: Indici di comfort nell'alloggio 4a2

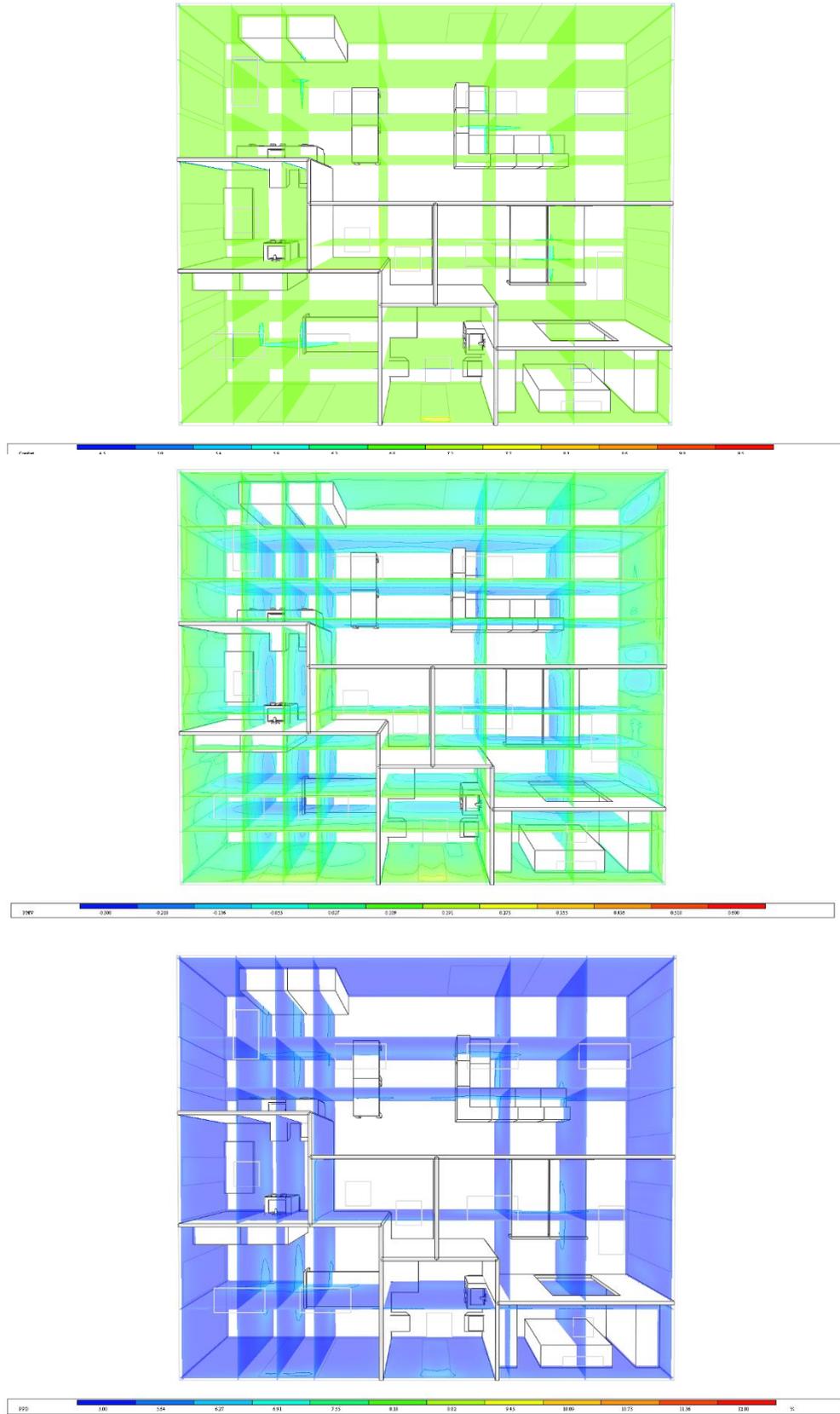


Figura 147- Pannelli radianti soffitto: Indici di comfort nell'alloggio 12a1

6.3.2. Terminali ibridi

I terminali ibridi nella configurazione estiva scambiano calore per sola convezione forzata. La loro performance dal punto di vista degli indici non è ottima, seppur si riesano ad ottenere localmente buone condizioni termiche; l'omogeneità spaziale, difatti, esattamente come il caso invernale non appartiene a questa tipologia di terminale.

Che si tratti dell'appartamento 12.A1 o del 4.A2, la disomogeneità è importante e l'influenza degli elementi finestrati resta centrale.

In particolare, c'è da segnalare che c'è una differenza sostanziale tra ambienti piccoli e grandi, in quanto nelle ampie metrature i carichi sono meglio gestiti; al contrario, citando come esempio il PPD nel caso delle camere del 12a1 (entrambe camere esposte alla radiazione diretta del sole) si arriva ad una situazione di discomfort locale all'interno della zona abitata.

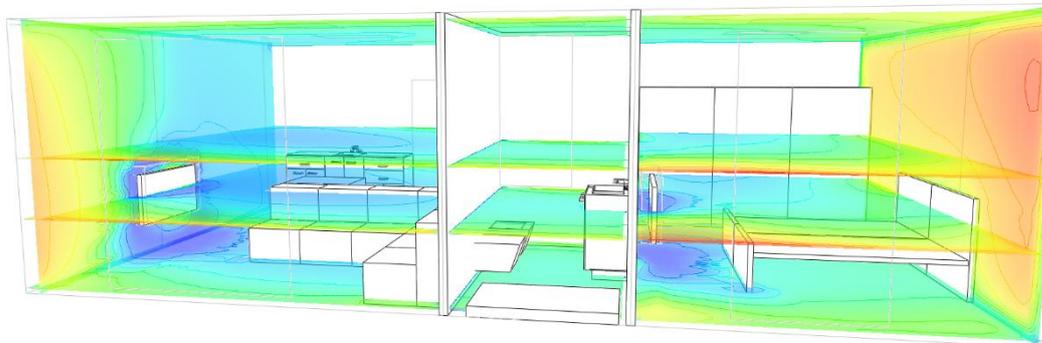
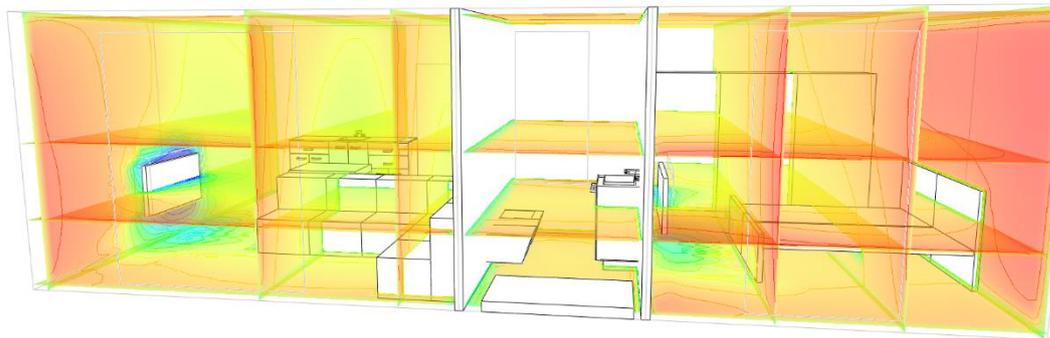
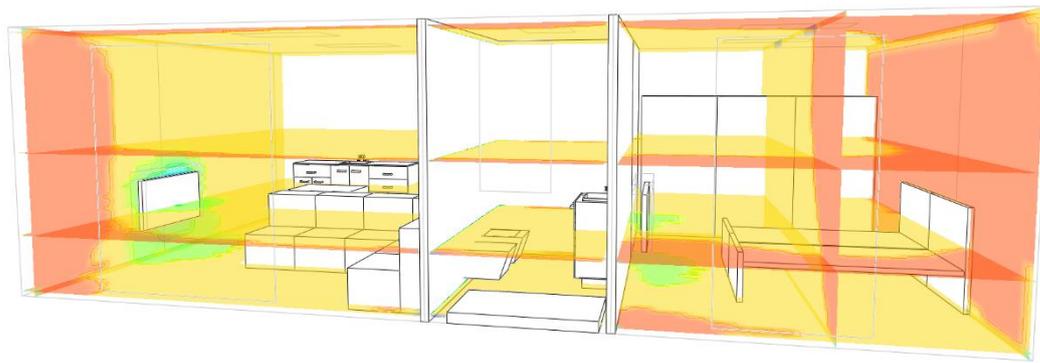


Figura 148- Terminali ibridi: Indici di comfort nell'alloggio 4a2

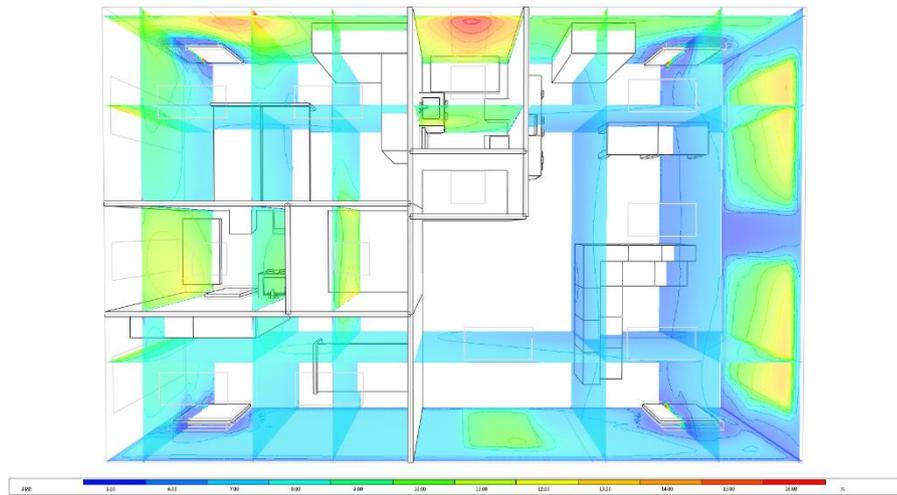
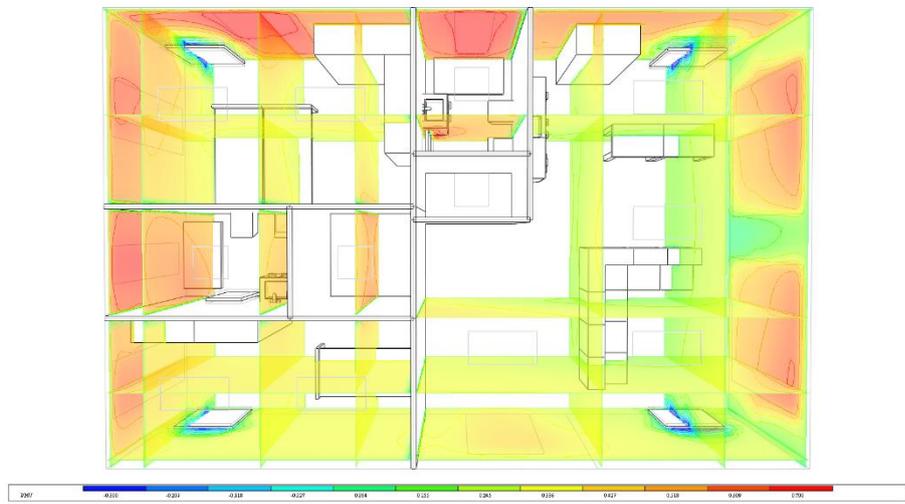
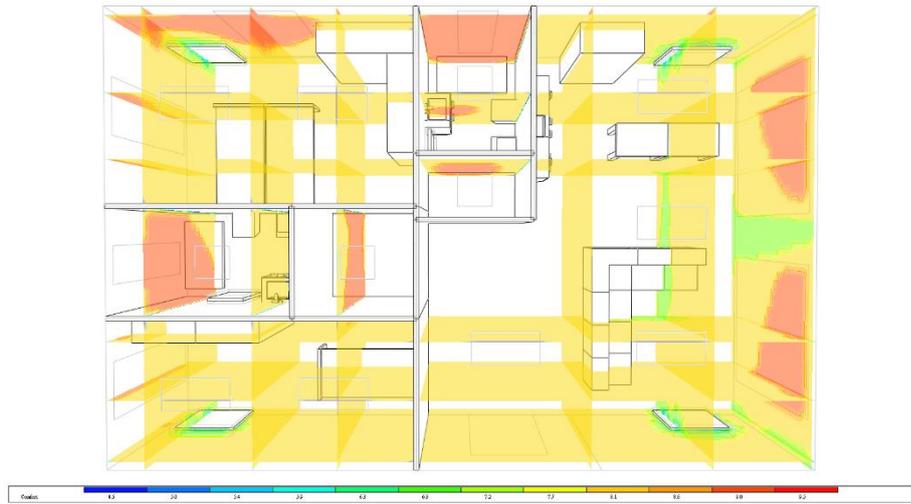


Figura 149- Terminali ibridi: Indici di comfort nell'alloggio 9a3

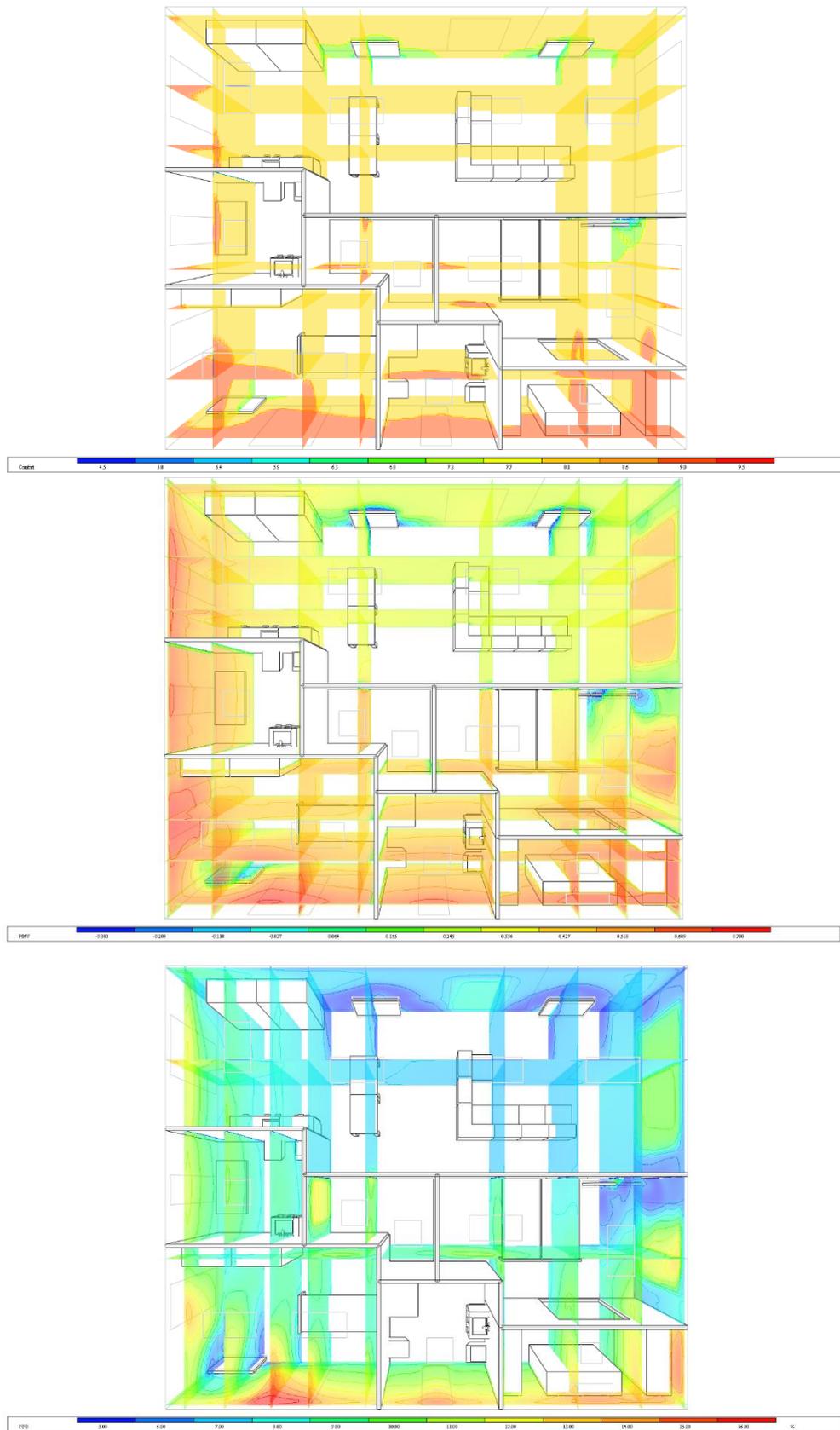


Figura 150- Terminali ibridi: Indici di comfort nell'alloggio 12a1

6.3.3. Ventilconvettori

I risultati ottenuti in queste simulazioni per quanto riguarda l'utilizzo dei ventilconvettori a pavimento e soffitto per il raffrescamento sono molto buoni, occorre ricordare però che questi terminali possono creare non solo rumore ma anche fastidio se le velocità si alzano.

Per il caso a pavimento, non bisogna dimenticare le considerazioni legate alla pulizia e manutenzione dei terminali. Questa tipologia di posa porta negli ambienti di ridotte dimensioni grandissime disomogeneità, con conseguenti passaggi, anche repentini, da zone a valori dell'indice di comfort troppo caldi a valori troppo freddi.

Negli ambienti più grandi le performance migliorano in entrambe le condizioni, anche se comunque si hanno condizioni di discomfort locale.

Si tratta prima il caso a pavimento poi il soffitto.

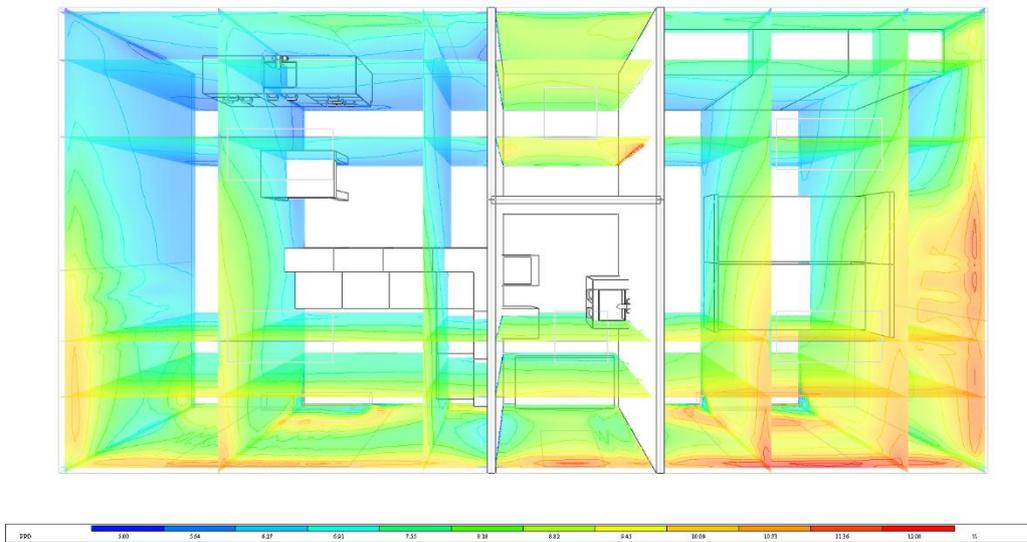
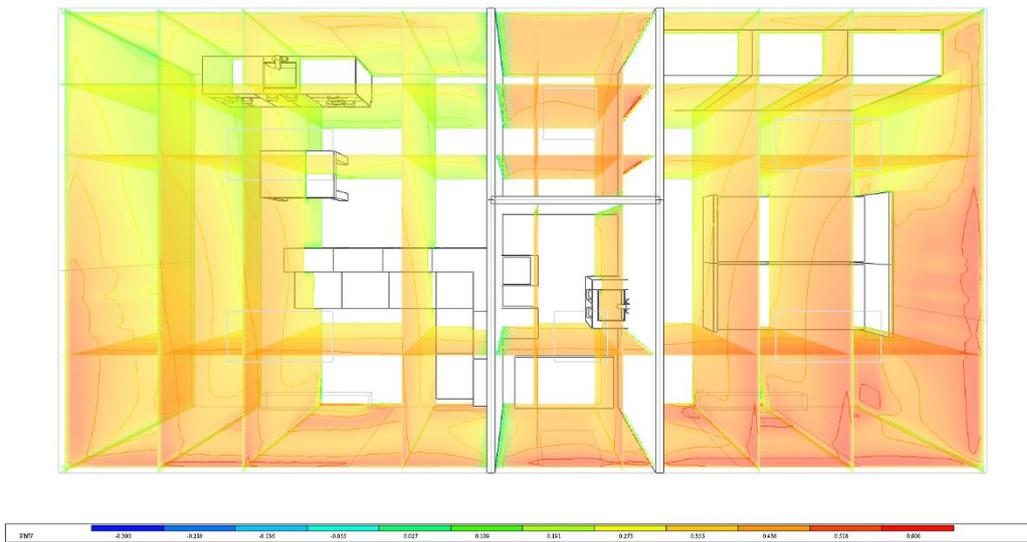
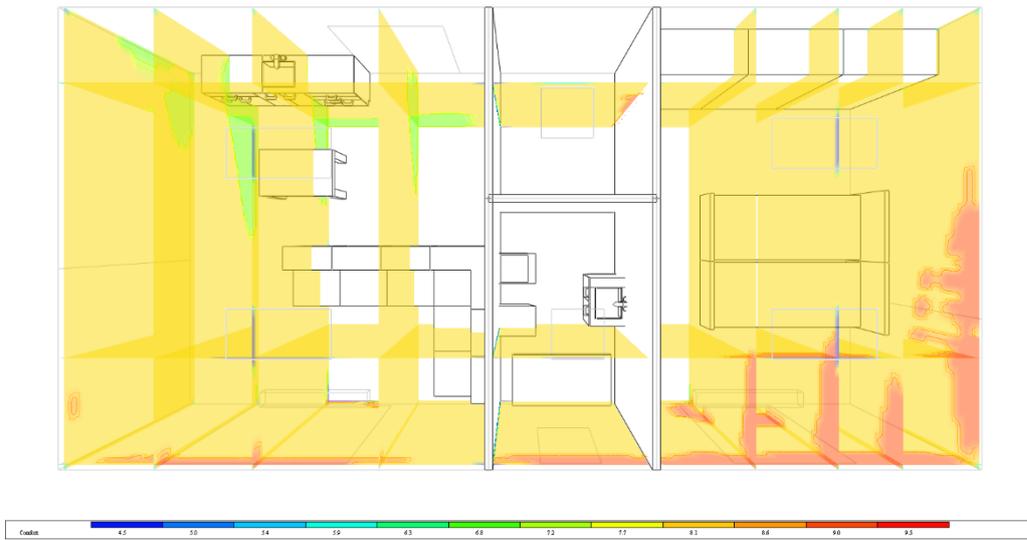
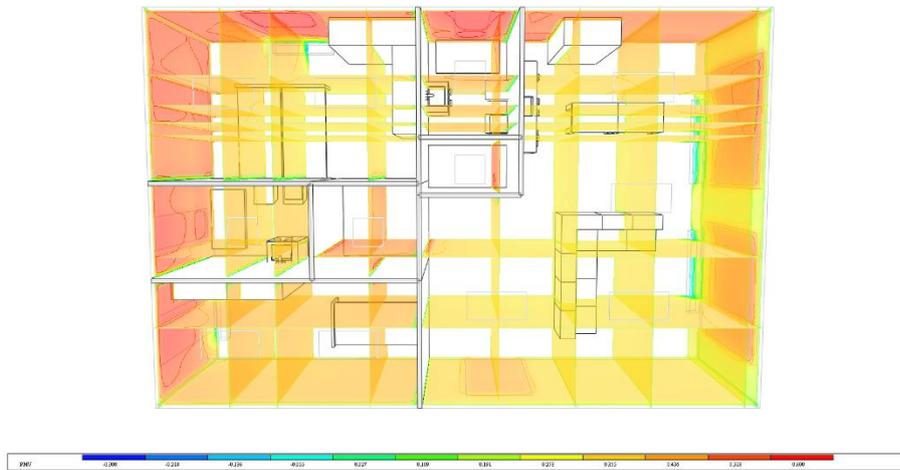
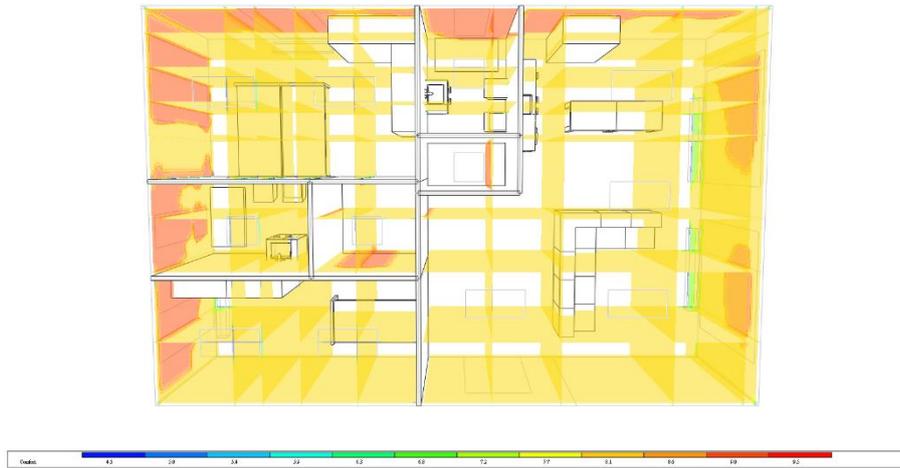


Figura 151- Ventilconvettori pavimento: Indici di comfort nell'alloggio 4a2



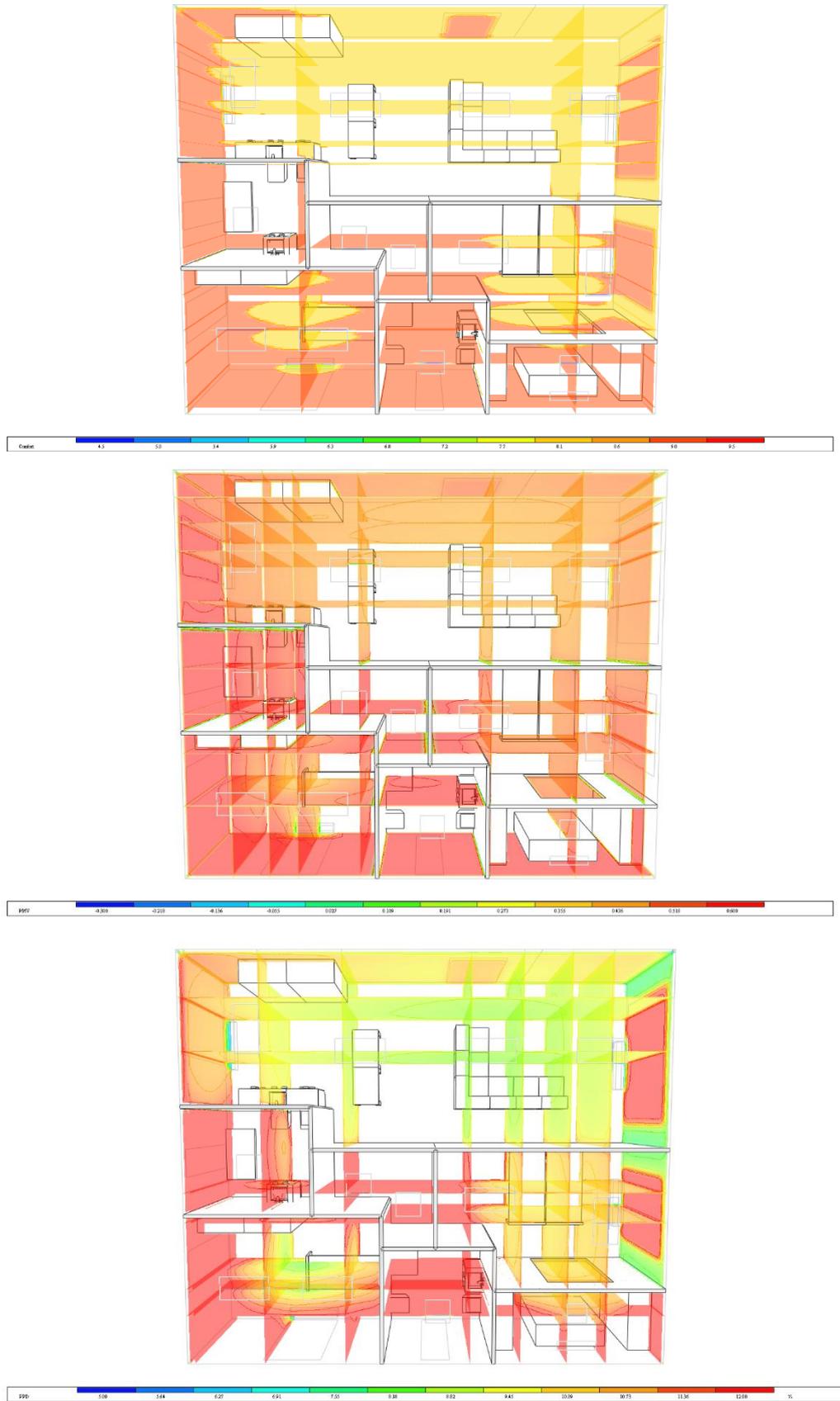


Figura 153- Ventilconvettori pavimento: Indici di comfort nell'alloggio 12a1

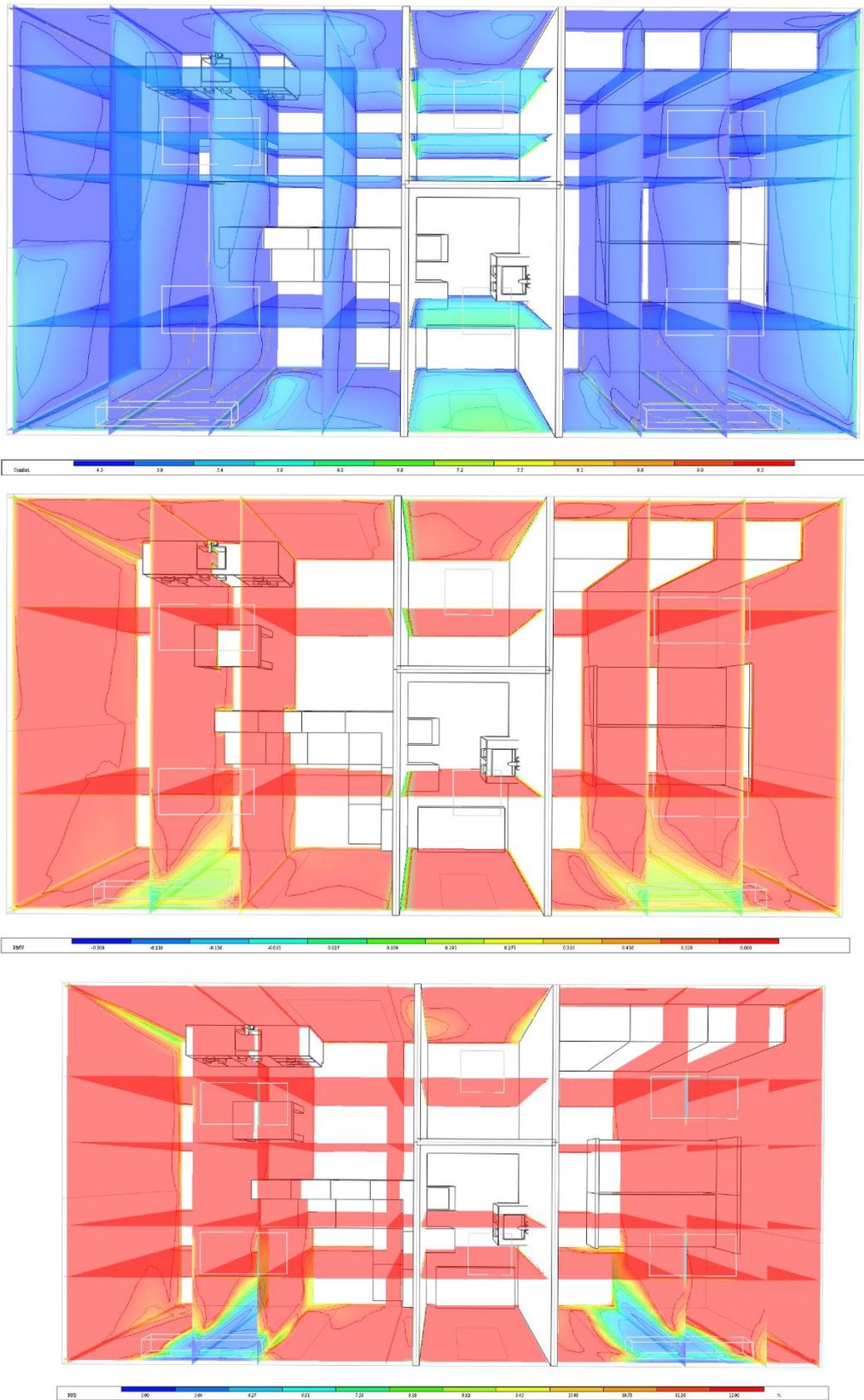


Figura 154- Ventilconvettori soffitto: Indici di comfort nell'alloggio 4a2

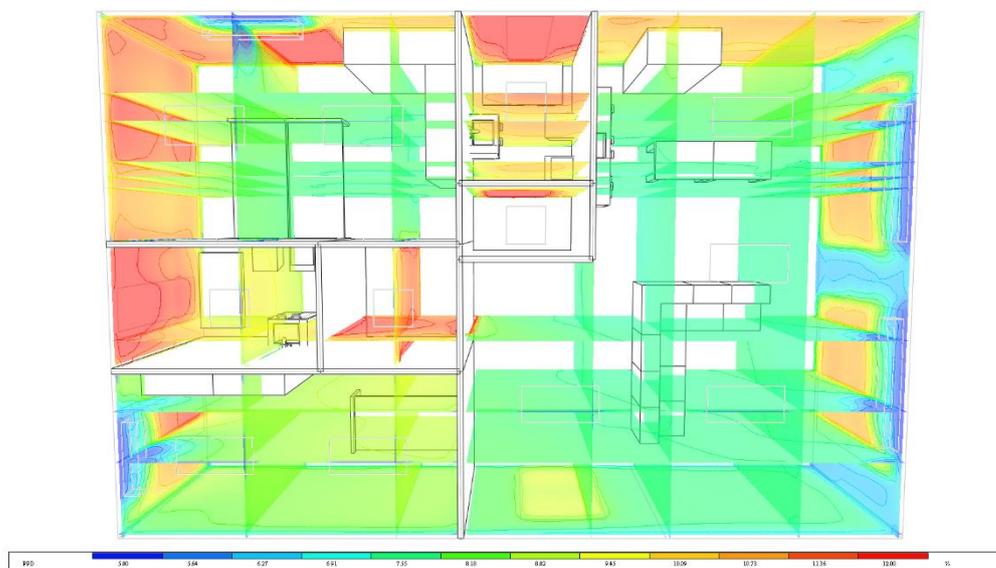
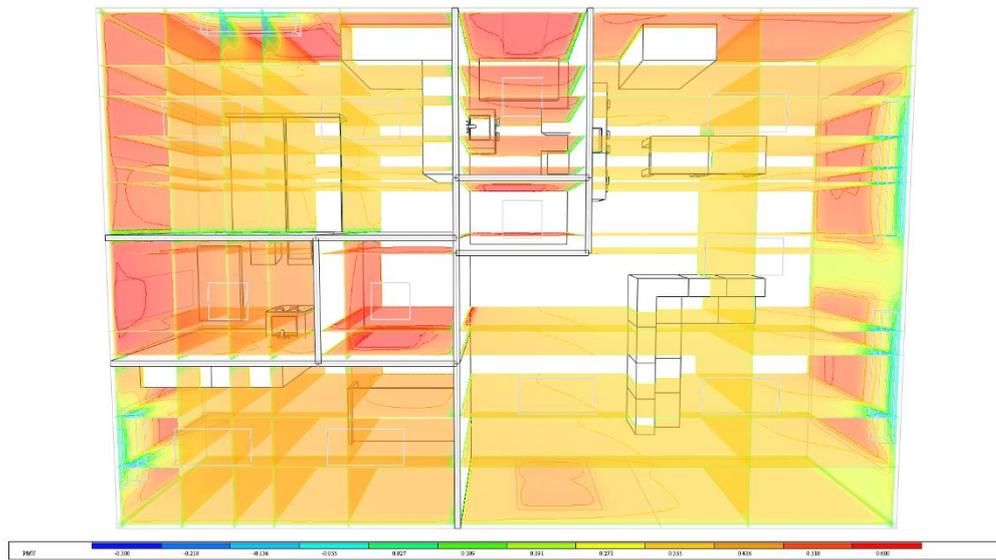
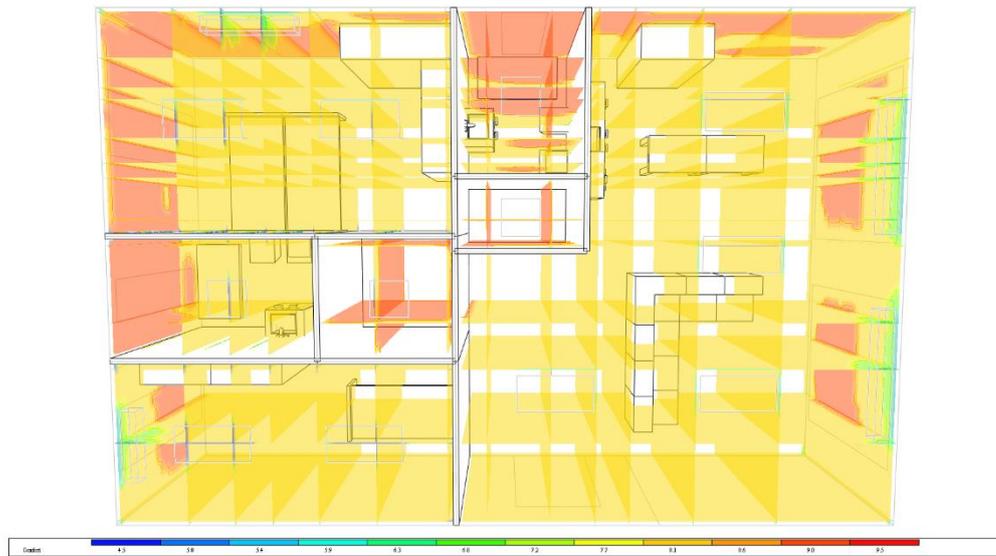


Figura 155- Ventilconvettori soffitto: Indici di comfort nell'alloggio 9a3

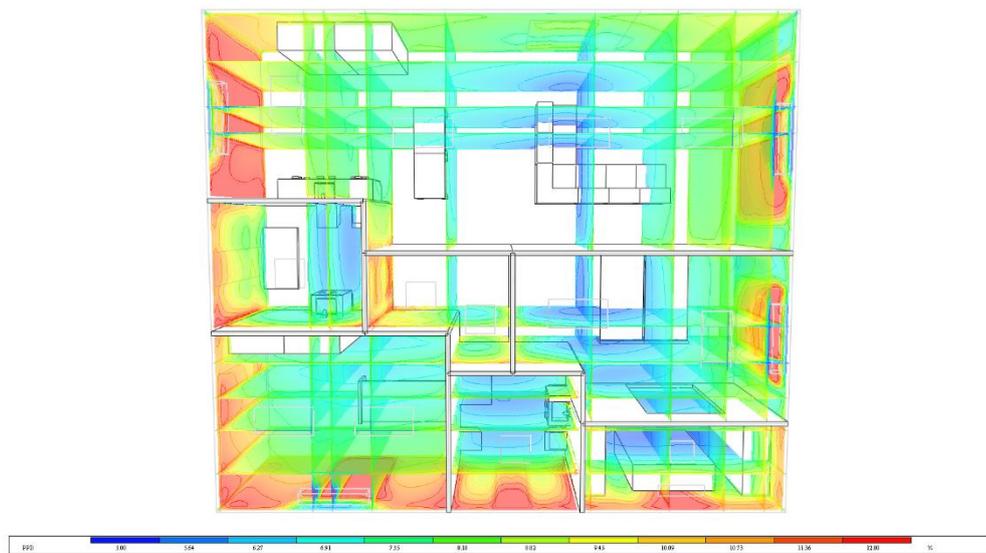
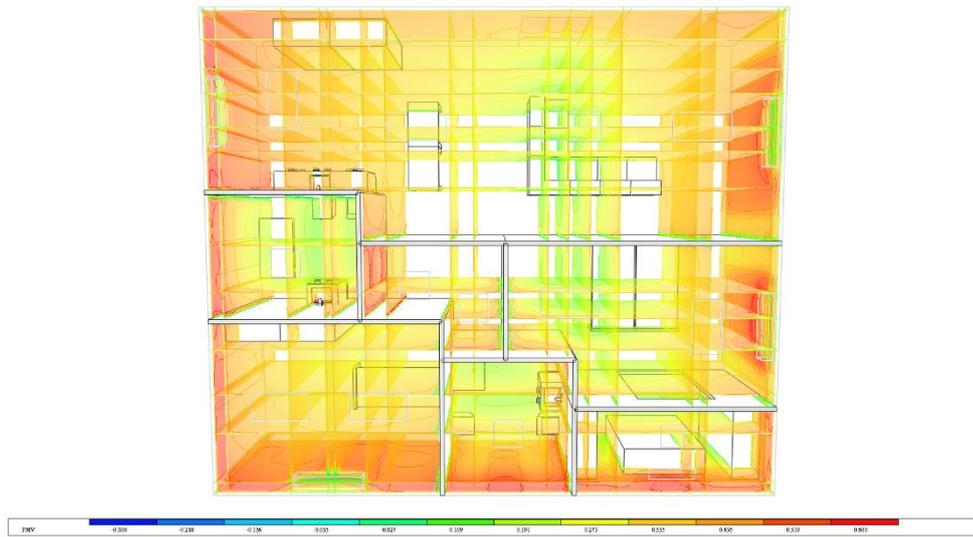
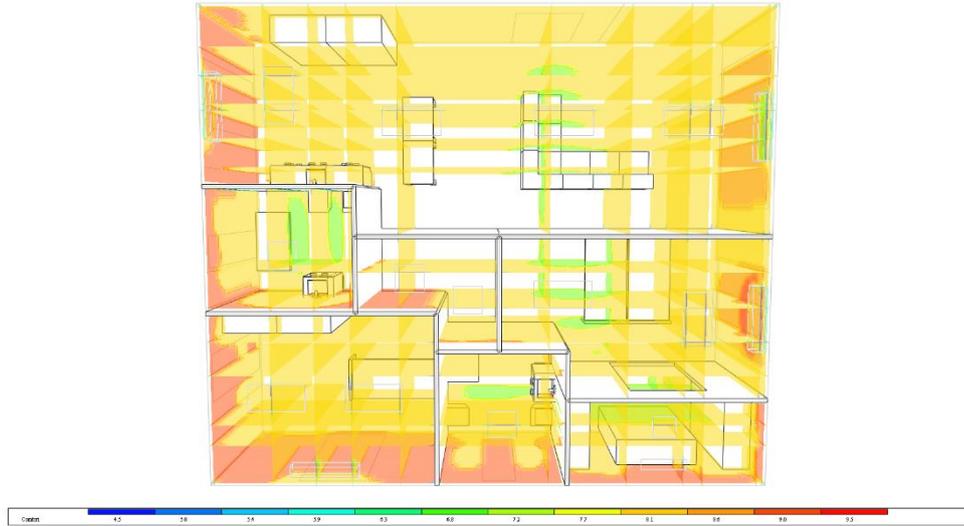


Figura 156- Ventilconvettori soffitto: Indici di comfort nell'alloggio 12a1

Capitolo 7: Valutazioni finali e conclusioni

Nei tre capitoli precedenti, le riflessioni sul comportamento dei terminali nelle due stagioni di riferimento è stato trattato solamente dal punto di vista delle variabili fisiche e di comfort locali, senza menzionare l'impatto energetico che questi hanno sulla centrale di generazione energetica del condominio.

Risulta dunque necessario affiancare una valutazione della potenza media impiegata. In particolare, considerando la potenza complessiva dei tre alloggi 4.Aa, 9.A3, 12.A1 nell'ora di riferimento, si vanno a comparare i comportamenti degli oggetti. Di seguito, il risultato in forma grafica della comparazione, nella modalità di visualizzazione a colonne.

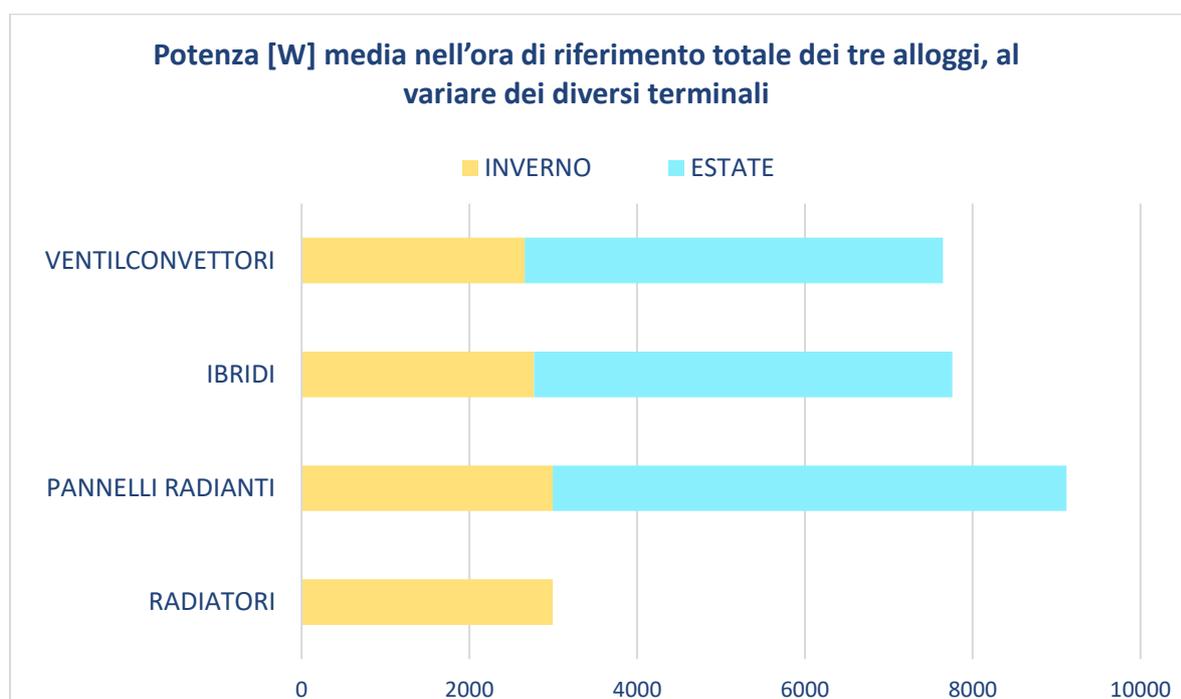


Figura 157- Potenza [W] media nell'ora di riferimento complessiva dei tre alloggi, al variare dei terminali utilizzati

A primo impatto, la prima informazione che si apprende è quella riguardo i pannelli radianti, i quali sono caratterizzati dal dispendio di potenza maggiore, sia nel caso invernale che in quello estivo.

Spostandoci su una visione più complessiva e di insieme, la tendenza che lega l'incremento della quota radiante dei terminali all'incremento della potenza richiesta, rimane verificato anche nei radiatori e nei terminali ibridi:

- radiatori e i pannelli radianti, a causa delle ipotesi discusse nei capitoli precedenti, sono difatti caratterizzati dallo stesso valore di potenza invernale, seguiti da terminali ibridi e ventilconvettori;
- d'estate il divario tra il consumo del terminale a quota 100% radiante e quelli in cui è presente solamente scambio termico per convezione forzata è altrettanto marcato;

Ricollegandoci con l'introduzione ed il capitolo 1, si ricorda che lo scopo e il fine ultimo dello studio risiede nel ricercare il o i terminali che assicurano le migliori condizioni di comfort, al fine di progettare futuri edifici residenziali in modo migliore possibile.

In riferimento ai capitoli 4 e 5, in determinate condizioni e tipologie di ambienti, ogni terminale può fornire ottime performance e risultare il migliore: un esempio sono i ventilconvettori in estate in grado di fornire un'ottima gestione del carico derivante dalle superfici vetrate esposte alla radiazione diretta del sole, oppure i radiatori in inverno che permettono un eccellente riscaldamento dei carichi in ambienti di dimensioni ridotte.

Volendo identificare però un singolo terminale, migliore sia dal punto di vista delle performance estive che invernali, si è scelto il pannello radiante con installazione a soffitto. Nonostante i dispendi siano maggiori, tenendo conto della scarsissima manutenzione e dei quasi inesistenti limiti imposti sull'arredamento o sugli ingombri, si è concluso che questa tipologia sia quella con le potenzialità maggiori.

Questo risultato risulta in contrasto con quanto operato fino ad ora dall'azienda con cui è stato svolto il lavoro in collaborazione, la quale si affidava per il raffrescamento estivo principalmente a ventilconvettori canalizzati a soffitto, mentre in inverno si optava quasi esclusivamente per l'installazione di pannelli radianti a pavimento, scelte che comunque rimangono valide ma comportano non solo l'installazione di due terminali diversi per la climatizzazione, ma anche performance che possono essere migliorate.

Bibliografia

- [1]. GEA : Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future (2012), Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria;
- [2]. BP Statistical Review of World Energy (2019), 68th edition;
- [3]. IEA : International Energy Agency - World Energy Outlook;
- [4]. Overview of Greenhouse Gases, Carbon Dioxide Emissions (2019), United States Environmental Protection Agency (EPA);
- [5]. Il fabbisogno energetico globale degli edifici, Michele De Carli, Antonino Di Bella, Dipartimento di Fisica Tecnica, Università degli Studi di Padova;
- [6]. Città sostenibili: buone pratiche nel mondo (2018), GSE;
- [7]. La situazione energetica nazionale nel 2018 (Giugno 2019), MISE;
- [8]. “Energy consumption in households by type of end-use”, Ufficio statistico dell'Unione europea (Eurostat), 2018;
- [9]. Il comfort termico, Airnova- Air Tech Instruments;
- [10]. Comfort termoigrometrico (2012-2013), Ing. G. Bovesecchi, Facoltà di Ingegneria, Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università di Roma Tor Vergata;
- [11]. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy (2017), ANSI/ASHRAE Standard 55;
- [12]. New Working Environments: The Need For Personal Space, Ronnie Heiner;
- [13]. Study links workplace daylight exposure to sleep, activity and quality of life (2013), Lynn Celmer;
- [14]. Study links warm offices to fewer typing errors and higher productivity (2004), Susan S. Lang;
- [15]. The relative benefits of green versus lean office space: Three field experiments (2014), Nieuwenhuis, M., Knight, C., Postmes, T., Haslam, S. A.;
- [16]. UNI EN ISO 7730;

- [17]. Studio deDear & Brager, Energy & Buildings CERCA
- [18]. Quaderni Caleffi, il particolare n2 e n4;
- [19]. Climatizzazione con sistemi radianti: guida alla progettazione, Michele Vio, Collana AICARR #13;
- [20]. Raffrescamento e riscaldamento mediante superfici radianti, J. Babiak, B. W. Olesen, D. Petras, Collana AICARR #18;
- [21]. Aermec, <https://global.aermec.com/it/>;
- [22]. Olimpia splendid, <https://www.olimpiasplendid.it/>;
- [23]. On the heat transfer coefficients between heated/cooled radiant floor and room (Energy and Buildings, 2013), T. Cholewa, M. Rosiński, Z. Spik, M. R. Dudzińska, A. Siuta-Olcha;
- [24]. On the heat transfer coefficients between heated/cooled radiant ceiling and room (Applied Thermal Engineering, 2016), T. Cholewa, R. Anasiewicz, A. Siuta-Olcha, M. A. Skwarczynski;