



Università Politecnica delle Marche

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile
Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche

Analisi termofluidodinamica di un'aula scolastica
Thermo-fluid dynamics analysis of a school classroom

Relatore:
Prof. Costanzo Di Perna

Tesi di Laurea di:
Nicola Francioni

Anno Accademico 2021/2022

Indice

Indice delle figure.....	VII
Indice delle tabelle.....	XII
Indice dei grafici.....	XV
Introduzione.....	1
1 Stato dell'arte.....	3
1.1 I.A.Q. – Qualità dell'aria interna.....	3
1.1.1 Importanza della I.A.Q.....	3
1.1.1.1 Influenza della I.A.Q. sulla salute.....	3
1.1.1.2 Influenza della I.A.Q. sulle prestazioni degli studenti.....	6
1.1.2 Agenti inquinanti.....	7
1.1.2.1 Agenti inquinanti esterni.....	7
1.1.2.2 Agenti inquinanti interni.....	12
1.1.3 Strategie di gestione e controllo della I.A.Q.....	16
1.1.3.1 Controllo delle fonti inquinanti.....	16
1.1.3.2 Controllo delle concentrazioni degli inquinanti.....	18
1.2 COVID-19: caratteristiche e strategie per contrastarne la trasmissione.....	19
1.2.1 Persistenza e trasmissione del virus.....	19
1.2.2 Misure da attuare per limitare la diffusione del virus indoor.....	22
1.3 Fluidodinamica computazionale.....	25
1.3.1 Introduzione alla CFD.....	25
1.3.1.1 Pre-processing.....	26
1.3.1.2 Solving.....	28
1.3.1.3 Post-processing.....	29
1.3.1.4 Turbolenza.....	29
1.3.2 L'analisi CFD applicata agli impianti di ventilazione.....	30
2 Quadro normativo e legislativo.....	37
2.1 Norme UNI EN 16798.....	37
2.1.1 UNI EN 16798-1.....	37
2.1.1.1 Ambiente termico.....	39
2.1.1.2 Qualità dell'aria interna.....	42
2.1.2 UNI EN 16798-3.....	46

2.1.2.1 Efficacia della ventilazione.....	46
2.1.2.2 Filtrazione dell'aria.....	47
2.2 Norma UNI 10339.....	50
2.3 D.M. 18/12/1975.....	53
2.4 I tre metodi a confronto: calcolo delle portate di ricambio d'aria.....	54
2.4.1 Calcolo della portata con la UNI EN 16798-1.....	55
2.4.2 Calcolo della portata con la UNI 10339.....	57
2.4.3 Calcolo della portata con il D.M. 18/12/1975.....	58

3 Misurazioni sperimentali.....59

3.1 Premessa.....	59
3.2 Prove termiche e qualità dell'aria.....	59
3.2.1 Introduzione.....	59
3.2.2 Riferimenti normativi.....	60
3.2.3 Strumenti di misura.....	60
3.3 Prove fluidodinamiche.....	61
3.3.1 Misurazione portata unità VMC.....	61
3.3.1.1 Introduzione.....	61
3.3.1.2 Riferimenti normativi.....	61
3.3.1.3 Strumenti di misura.....	62
3.3.2 Prove con generatore di fumo.....	63
3.3.2.1 Introduzione.....	63
3.3.2.2 Strumenti di misura.....	63
3.3.3 Blower Door Test.....	65
3.3.3.1 Introduzione.....	65
3.3.3.2 Riferimenti normativi.....	65
3.3.3.3 Strumenti di misura.....	65
3.4 Prove acustiche.....	67
3.4.1 Riferimenti normativi.....	67
3.4.2 Strumenti di misura.....	70
3.4.3 Metodologia dei rilievi.....	70
3.5 Scuola secondaria di I grado G. Ferraris.....	71
3.5.1 Dati della scuola e dell'unità VMC.....	71
3.5.2 Prove termiche e qualità dell'aria.....	74
3.5.2.1 Metodologia dei rilievi.....	74
3.5.2.2 Geometria del locale.....	74
3.5.2.3 Valori di temperatura, umidità relativa e CO ₂ ottenuti.....	76
3.5.2.4 Valutazioni sperimentali.....	79
3.5.3 Prove fluidodinamiche.....	80
3.5.3.1 Misurazione portata unità VMC.....	80
3.5.3.1.1 Metodologia dei rilievi.....	80

3.5.3.1.2	Geometria del locale.....	81
3.5.3.1.3	Valori di portata d'aria e velocità ottenuti.....	82
3.5.3.1.4	Valutazioni sperimentali.....	84
3.5.3.2	Prove con generatore di fumo.....	84
3.5.3.2.1	Metodologia dei rilievi.....	84
3.5.3.2.2	Geometria del locale.....	86
3.5.3.2.3	Valori e andamento delle particelle ottenuti.....	86
3.5.3.2.4	Valutazioni sperimentali.....	87
3.5.3.3	Blower Door Test.....	88
3.5.3.3.1	Metodologia dei rilievi.....	88
3.5.3.3.2	Geometria del locale.....	89
3.5.3.3.3	Risultati Blower Door Test.....	91
3.5.4	Prove acustiche.....	91
3.5.4.1	Geometria del locale.....	91
3.5.4.2	Report delle misure.....	92
3.6	Scuola primaria I.C. Luca Della Robbia.....	98
3.6.1	Dati della scuola e dell'unità VMC.....	98
3.6.2	Prove termiche e qualità dell'aria.....	101
3.6.2.1	Metodologia dei rilievi.....	101
3.6.2.2	Geometria del locale.....	109
3.6.2.3	Valori di temperatura, umidità relativa e CO ₂ ottenuti.....	132
3.6.2.4	Valutazioni sperimentali.....	141
3.6.3	Prove fluidodinamiche.....	142
3.6.3.1	Misurazione portata unità VMC.....	142
3.6.3.1.1	Metodologia dei rilievi.....	143
3.6.3.1.2	Geometria del locale.....	143
3.6.3.1.3	Valori di portata d'aria e velocità ottenuti.....	143
3.6.3.1.4	Valutazioni sperimentali.....	144
3.6.3.2	Prove con generatore di fumo.....	145
3.6.3.2.1	Metodologia dei rilievi.....	145
3.6.3.2.2	Geometria del locale.....	146
3.6.3.2.3	Valori e andamento delle particelle ottenuti.....	147
3.6.3.2.4	Valutazioni sperimentali.....	147
3.6.3.3	Blower Door Test.....	148
3.6.3.3.1	Metodologia dei rilievi.....	148
3.6.3.3.2	Geometria del locale.....	149
3.6.3.3.3	Risultati Blower Door Test.....	150
3.6.4	Prove acustiche.....	151
3.6.4.1	Geometria del locale.....	151
3.6.4.2	Report delle misure.....	152

4	Analisi fluidodinamica computazionale dell'aula.....	157
4.1	Premessa.....	157
4.2	Modellazione geometrica.....	158
4.2.1	Descrizione dell'aula.....	158
4.2.2	Modellazione con ANSYS DesignModeler.....	160
4.3	Studio della convergenza della griglia.....	165
4.3.1	Generazione delle mesh.....	165
4.3.2	Setup di simulazione.....	166
4.3.3	Risultati e scelta della mesh.....	173
4.3.4	Qualità della mesh scelta.....	183
4.4	Analisi unità VMC – Configurazione installata.....	186
4.4.1	Setup di simulazione.....	186
4.4.2	Analisi dei risultati.....	188
4.5	Analisi unità VMC – Configurazione 2: angolo di mandata dell'aria a 10°.....	198
4.5.1	Setup di simulazione.....	198
4.5.2	Analisi dei risultati.....	199
4.6	Analisi unità VMC – Configurazione 3: angolo di mandata dell'aria a 20°.....	208
4.6.1	Setup di simulazione.....	208
4.6.2	Analisi dei risultati.....	209
4.7	Confronto e scelta della configurazione migliore dell'unità VMC.....	218
4.8	Analisi unità VMC – Miglioramento della configurazione 2.....	219
4.8.1	Setup di simulazione.....	220
4.8.2	Analisi dei risultati.....	222
5	Conclusioni.....	229
	Bibliografia.....	233

Indice delle figure

Figura 1.1: Percentuale di bambini con sintomi specifici per densità di occupazione della classe [4].....	5
Figura 1.2: Percentuale di bambini con malattie respiratorie croniche in classi ben ventilate e poco ventilate [4].....	5
Figura 1.3: Schematizzazione delle vie di trasmissione del virus.....	20
Figura 1.4: Schema semplificato del sistema locale-impianto.....	23
Figura 1.5: Rappresentazione del profilo di concentrazione nei casi descritti.....	24
Figura 1.6: Esempio di griglia strutturata.....	27
Figura 1.7: Esempio di griglia non strutturata.....	27
Figura 1.8: Esempio di griglia ibrida.....	28
Figura 2.1: Percentuale prevista di insoddisfatti (PPD) in funzione del voto medio previsto (PMV).....	40
Figura 3.1: Foto dell'acquisitore utilizzato (HOBO MX CO ₂ Logger).....	61
Figura 3.2: Foto dell'anemometro utilizzato (TESTO 417).....	62
Figura 3.3: Foto del balometro utilizzato (ALNOR EBT721).....	63
Figura 3.4: Foto del conta-particelle utilizzato (Fluke 983).....	64
Figura 3.5: Foto del generatore di fumo utilizzato (Colt4 Basic).....	65
Figura 3.6: Foto strumenti utilizzati (Infiltec E3 Blower Door).....	66
Figura 3.7: Foto del sensore utilizzato (Vaisala HM 70).....	67
Figura 3.8: Planimetria della scuola secondaria di I grado G. Ferraris con indicazione delle aule oggetto di prove.....	72
Figura 3.9: Unità VMC SCOLARIA 800.....	73
Figura 3.10: Dimensioni unità VMC SCOLARIA 800.....	73
Figura 3.11: Dimensioni aperture di immissione ed estrazione unità VMC SCOLARIA 800.....	73
Figura 3.12: Posizione acquisitore in pianta (a) e in foto (b).....	74
Figura 3.13: Planimetria dell'aula 3°B oggetto di misurazioni.....	75
Figura 3.14: Foto parete 1 (a), parete 2 (b), parete 3 (c), parete 4 (d).....	76
Figura 3.15: Unità VMC con evidenziati i punti dove è stato utilizzato lo strumento.....	81
Figura 3.16: Posizione conta-particelle.....	85
Figura 3.17: Foto installazione conta-particelle.....	85
Figura 3.18: Posizione della presa dell'aria esterna (sezione circolare) e della presa dell'aria estratta (sezione con lamiera) dell'unità VMC.....	88
Figura 3.19: Installazione del sistema per il blower door test.....	89
Figura 3.20: Planimetria dell'aula 3°D oggetto di misurazioni.....	90
Figura 3.21: Foto parete 1 (a), parete 2 (b), parete 3 (c), parete 4 (d).....	91
Figura 3.22: Planimetria dell'aula 3°B oggetto di misurazioni.....	92
Figura 3.23: Punti di misura utilizzati.....	93

Figura 3.24: <i>Planimetria della scuola primaria I.C. Luca Della Robbia con l'indicazione delle macchine VMC installate</i>	99
Figura 3.25: <i>Unità VMC 2.0 RINNOVA verticale 30</i>	100
Figura 3.26: <i>Dimensioni unità VMC 2.0 RINNOVA verticale 30</i>	101
Figura 3.27: <i>Posizione acquisitore in pianta (a) e in foto (b) Aula 1 (3°B)</i>	102
Figura 3.28: <i>Posizione acquisitore in pianta (a) e in foto (b) Aula 2 (3°A)</i>	103
Figura 3.29: <i>Posizione acquisitore in pianta (a) e in foto (b) Aula 3 (2°B)</i>	103
Figura 3.30: <i>Posizione acquisitore in pianta (a) e in foto (b) Aula 4 (2°A)</i>	104
Figura 3.31: <i>Posizione acquisitore in pianta (a) e in foto (b) Aula 5 (4°B)</i>	104
Figura 3.32: <i>Posizione acquisitore in pianta (a) e in foto (b) Aula 6 (4°A)</i>	105
Figura 3.33: <i>Posizione acquisitore in pianta (a) e in foto (b) Aula 8-16 (Mensa)</i>	105
Figura 3.34: <i>Posizione acquisitore in pianta (a) e in foto (b) Aula 9 (1°B)</i>	106
Figura 3.35: <i>Posizione acquisitore in pianta (a) e in foto (b) Aula 10 (5°B)</i>	106
Figura 3.36: <i>Posizione acquisitore in pianta (a) e in foto (b) Aula 11 (1°A)</i>	107
Figura 3.37: <i>Posizione acquisitore in pianta (a) e in foto (b) Aula 12 (5°A)</i>	107
Figura 3.38: <i>Posizione acquisitore in pianta (a) e in foto (b) Aula 13 (Biblioteca)</i>	108
Figura 3.39: <i>Posizione acquisitore in pianta (a) e in foto (b) Aula 14 (Laboratorio Ceramica)</i>	108
Figura 3.40: <i>Posizione acquisitore in pianta (a) e in foto (b) Aula 15 (Aula Informatica)</i>	109
Figura 3.41: <i>Posizione acquisitore in pianta (a) e in foto (b) Aula Sostegno</i>	109
Figura 3.42: <i>Planimetria dell'Aula 1 (3°B) oggetto di misurazioni</i>	110
Figura 3.43: <i>Foto parete 1 (a), parete 2 (b), parete 3 (c), parete 4 (d) Aula 1 (3°B)</i>	111
Figura 3.44: <i>Planimetria dell'Aula 2 (3°A) oggetto di misurazioni</i>	112
Figura 3.45: <i>Foto parete 1 (a), parete 2 (b), parete 3 (c), parete 4 (d) Aula 2 (3°A)</i>	112
Figura 3.46: <i>Planimetria dell'Aula 3 (2°B) oggetto di misurazioni</i>	113
Figura 3.47: <i>Foto parete 1 (a), parete 2 (b), parete 3 (c), parete 4 (d) Aula 3 (2°B)</i>	114
Figura 3.48: <i>Planimetria dell'Aula 4 (2°A) oggetto di misurazioni</i>	115
Figura 3.49: <i>Foto parete 1 (a), parete 2 (b), parete 3 (c), parete 4 (d) Aula 4 (2°A)</i>	115
Figura 3.50: <i>Planimetria dell'Aula 5 (4°B) oggetto di misurazioni</i>	116
Figura 3.51: <i>Foto parete 1 (a), parete 2 (b), parete 3 (c), parete 4 (d) Aula 5 (4°B)</i>	117
Figura 3.52: <i>Planimetria dell'Aula 6 (4°A) oggetto di misurazioni</i>	118
Figura 3.53: <i>Foto parete 1 (a), parete 2 (b), parete 3 (c), parete 4 (d) Aula 6 (4°A)</i>	118
Figura 3.54: <i>Planimetria dell'Aula 8-16 (Mensa) oggetto di misurazioni</i>	119
Figura 3.55: <i>Foto parete 1 (a), parete 2 (b), parete 3 (c), parete 4 (d) Aula 8-16 (Mensa)</i>	120
Figura 3.56: <i>Planimetria dell'Aula 9 (1°B) oggetto di misurazioni</i>	121
Figura 3.57: <i>Foto parete 1 (a), parete 2 (b), parete 3 (c), parete 4 (d) Aula 9 (1°B)</i>	121
Figura 3.58: <i>Planimetria dell'Aula 10 (5°B) oggetto di misurazioni</i>	122
Figura 3.59: <i>Foto parete 1 (a), parete 2 (b), parete 3 (c), parete 4 (d) Aula 10 (5°B)</i>	123
Figura 3.60: <i>Planimetria dell'Aula 11 (1°A) oggetto di misurazioni</i>	124
Figura 3.61: <i>Foto parete 1 (a), parete 2 (b), parete 3 (c), parete 4 (d) Aula 11 (1°A)</i>	124
Figura 3.62: <i>Planimetria dell'Aula 12 (5°A) oggetto di misurazioni</i>	125
Figura 3.63: <i>Foto parete 1 (a), parete 2 (b), parete 3 (c), parete 4 (d) Aula 12 (5°A)</i>	126

Figura 3.64: <i>Planimetria dell'Aula 13 (Biblioteca) oggetto di misurazioni</i>	127
Figura 3.65: <i>Foto parete 1 (a), parete 2 (b), parete 3 (c), parete 4 (d) Aula 13 (Biblioteca)</i>	127
Figura 3.66: <i>Planimetria dell'Aula 14 (Laboratorio Ceramica) oggetto di misurazioni</i>	128
Figura 3.67: <i>Foto parete 1 (a), parete 2 (b), parete 3 (c), parete 4 (d) Aula 14 (Laboratorio Ceramica)</i>	128
Figura 3.68: <i>Planimetria dell'Aula 15 (Aula Informatica) oggetto di misurazioni</i>	129
Figura 3.69: <i>Foto parete 1 (a), parete 2 (b), parete 3 (c), parete 4 (d) Aula 15 (Aula Informatica)</i>	130
Figura 3.70: <i>Planimetria dell'Aula Sostegno oggetto di misurazioni</i>	131
Figura 3.71: <i>Foto parete 1 (a), parete 2 (b), parete 3 (c), parete 4 (d) Aula Sostegno</i>	131
Figura 3.72: <i>Posizione conta-particelle</i>	145
Figura 3.73: <i>Foto installazione conta-particelle</i>	146
Figura 3.74: <i>Posizione della presa dell'aria esterna (in alto) e della presa dell'aria estratta (in basso) dell'unità VMC</i>	147
Figura 3.75: <i>Installazione del sistema per il blower door test</i>	149
Figura 3.76: <i>Planimetria dell'Aula 4 (2°A) oggetto di misurazioni</i>	151
Figura 3.77: <i>Punti di misura utilizzati</i>	152
Figura 4.1: <i>Schermata iniziale del software</i>	158
Figura 4.2: <i>Planimetria dell'aula 3°B oggetto di simulazioni</i>	159
Figura 4.3: <i>Foto parete 1 (a), parete 2 (b), parete 3 (c), parete 4 (d)</i>	159
Figura 4.4: <i>Dimensioni unità VMC SCOLARIA 800</i>	160
Figura 4.5: <i>Dimensioni aperture di immissione ed estrazione unità VMC SCOLARIA 800</i>	160
Figura 4.6: <i>Geometria dell'aula 3°B – ANSYS DesignModeler</i>	161
Figura 4.7: <i>Volume Aula – ANSYS DesignModeler</i>	162
Figura 4.8: <i>Caratteristiche volume Aula – ANSYS DesignModeler</i>	162
Figura 4.9: <i>Volume Studenti – ANSYS DesignModeler</i>	163
Figura 4.10: <i>Caratteristiche volume Studenti – ANSYS DesignModeler</i>	163
Figura 4.11: <i>Volume Plenum VMC – ANSYS DesignModeler</i>	164
Figura 4.12: <i>Caratteristiche volume Plenum VMC – ANSYS DesignModeler</i>	164
Figura 4.13: <i>Superfici di immissione ed estrazione – ANSYS DesignModeler</i>	164
Figura 4.14: <i>Setup del Solver</i>	166
Figura 4.15: <i>Setup del modello viscoso</i>	167
Figura 4.16: <i>Proprietà dell'aria</i>	168
Figura 4.17: <i>Proprietà del gesso</i>	168
Figura 4.18: <i>Proprietà dell'alluminio</i>	169
Figura 4.19: <i>Condizioni operative</i>	169
Figura 4.20: <i>Condizione al contorno immissione-Momentum</i>	170
Figura 4.21: <i>Condizione al contorno immissione-Thermal</i>	171
Figura 4.22: <i>Condizione al contorno estrazione-Momentum</i>	171

Figura 4.23: <i>Condizione al contorno superficie dell'aula-Thermal</i>	172
Figura 4.24: <i>Condizione al contorno del volume di controllo degli studenti-Thermal</i>	172
Figura 4.25: <i>Condizione al contorno superficie del plenum VMC-Thermal</i>	173
Figura 4.26: <i>Temperatura media dell'aria nel volume di controllo degli studenti - Mesh A</i>	174
Figura 4.27: <i>Velocità media dell'aria nel volume di controllo degli studenti - Mesh A</i>	174
Figura 4.28: <i>Temperatura media dell'aria nel volume di controllo degli studenti - Mesh B</i>	175
Figura 4.29: <i>Velocità media dell'aria nel volume di controllo degli studenti - Mesh B</i>	175
Figura 4.30: <i>Confronto del profilo di velocità sul piano verticale</i>	179
Figura 4.31: <i>Confronto del profilo di temperatura sul piano verticale</i>	180
Figura 4.32: <i>Confronto del profilo di velocità sul piano orizzontale</i>	181
Figura 4.33: <i>Confronto del profilo di temperatura sul piano orizzontale</i>	182
Figura 4.34: <i>Illustrazione della mesh I in un piano di taglio</i>	185
Figura 4.35: <i>Illustrazione della mesh I in un angolo del piano di taglio</i>	185
Figura 4.36: <i>Proprietà dell'aria</i>	187
Figura 4.37: <i>Origine di riferimento per la creazione dei piani</i>	188
Figura 4.38: <i>Contour di temperatura dell'aria: piano x-y, z = 3,6 m</i>	189
Figura 4.39: <i>Contour di temperatura dell'aria: piano x-y, z = 4,6 m</i>	189
Figura 4.40: <i>Contour di temperatura dell'aria: piano x-y, z = 5,6 m</i>	190
Figura 4.41: <i>Contour di temperatura dell'aria: piano z-y, x = 2,0 m</i>	190
Figura 4.42: <i>Contour di temperatura dell'aria: piano z-y, x = 3,5 m</i>	190
Figura 4.43: <i>Contour di temperatura dell'aria: piano z-y, x = 5,0 m</i>	191
Figura 4.44: <i>Contour di temperatura dell'aria: piano x-z, y = 1,0 m</i>	191
Figura 4.45: <i>Contour di temperatura dell'aria: piano x-z, y = 1,7 m</i>	192
Figura 4.46: <i>Contour di temperatura dell'aria: piano x-z, y = 3,3 m</i>	192
Figura 4.47: <i>Contour di velocità dell'aria: piano x-y, z = 4,6 m</i>	193
Figura 4.48: <i>Contour di velocità dell'aria: piano z-y, x = 5,0 m</i>	193
Figura 4.49: <i>Contour di velocità dell'aria: piano x-z, y = 1,7 m</i>	194
Figura 4.50: <i>Contour di temperatura dell'aria con scala locale: piano x-z, y = 1,7 m</i>	195
Figura 4.51: <i>Contour di velocità dell'aria con scala locale: piano x-z, y = 1,7 m</i>	195
Figura 4.52: <i>Vectors di velocità dell'aria: piano x-y, z = 4,6 m</i>	196
Figura 4.53: <i>Pathline di velocità dell'aria</i>	197
Figura 4.54: <i>Pathline di velocità dell'aria – vista dall'alto</i>	197
Figura 4.55: <i>Pathline di velocità dell'aria – vista frontale</i>	198
Figura 4.56: <i>Condizione al contorno immissione-Momentum</i>	199
Figura 4.57: <i>Contour di temperatura dell'aria: piano x-y, z = 4,6 m</i>	200
Figura 4.58: <i>Contour di temperatura dell'aria: piano z-y, x = 2,0 m</i>	200
Figura 4.59: <i>Contour di temperatura dell'aria: piano z-y, x = 3,5 m</i>	201
Figura 4.60: <i>Contour di temperatura dell'aria: piano z-y, x = 5,0 m</i>	201
Figura 4.61: <i>Contour di temperatura dell'aria: piano x-z, y = 1,7 m</i>	202
Figura 4.62: <i>Contour di velocità dell'aria: piano x-y, z = 4,6 m</i>	203
Figura 4.63: <i>Contour di velocità dell'aria: piano z-y, x = 5,0 m</i>	203
Figura 4.64: <i>Contour di velocità dell'aria: piano x-z, y = 1,7 m</i>	204

Figura 4.65: <i>Contour di temperatura dell'aria con scala locale: piano x-z, y = 1,7 m</i>	205
Figura 4.66: <i>Contour di velocità dell'aria con scala locale: piano x-z, y = 1,7 m</i>	205
Figura 4.67: <i>Vectors di velocità dell'aria: piano x-y, z = 4,6 m</i>	206
Figura 4.68: <i>Pathline di velocità dell'aria</i>	207
Figura 4.69: <i>Pathline di velocità dell'aria – vista dall'alto</i>	207
Figura 4.70: <i>Pathline di velocità dell'aria – vista frontale</i>	208
Figura 4.71: <i>Condizione al contorno immissione-Momentum</i>	209
Figura 4.72: <i>Contour di temperatura dell'aria: piano x-y, z = 4,6 m</i>	210
Figura 4.73: <i>Contour di temperatura dell'aria: piano z-y, x = 2,0 m</i>	210
Figura 4.74: <i>Contour di temperatura dell'aria: piano z-y, x = 3,5 m</i>	211
Figura 4.75: <i>Contour di temperatura dell'aria: piano z-y, x = 5,0 m</i>	211
Figura 4.76: <i>Contour di temperatura dell'aria: piano x-z, y = 1,7 m</i>	212
Figura 4.77: <i>Contour di velocità dell'aria: piano x-y, z = 4,6 m</i>	213
Figura 4.78: <i>Contour di velocità dell'aria: piano z-y, x = 5,0 m</i>	213
Figura 4.79: <i>Contour di velocità dell'aria: piano x-z, y = 1,7 m</i>	214
Figura 4.80: <i>Contour di temperatura dell'aria con scala locale: piano x-z, y = 1,7 m</i>	215
Figura 4.81: <i>Contour di velocità dell'aria con scala locale: piano x-z, y = 1,7 m</i>	215
Figura 4.82: <i>Vectors di velocità dell'aria: piano x-y, z = 4,6 m</i>	216
Figura 4.83: <i>Pathline di velocità dell'aria</i>	217
Figura 4.84: <i>Pathline di velocità dell'aria – vista dall'alto</i>	217
Figura 4.85: <i>Pathline di velocità dell'aria – vista frontale</i>	218
Figura 4.86: <i>Griglia di immissione regolabile a doppio filare</i>	220
Figura 4.87: <i>Condizione al contorno immissione_1-Momentum</i>	221
Figura 4.88: <i>Condizione al contorno immissione_2-Momentum</i>	221
Figura 4.89: <i>Contour di velocità dell'aria: piano z-y, x = 2,0 m</i>	222
Figura 4.90: <i>Contour di velocità dell'aria: piano z-y, x = 3,5 m</i>	223
Figura 4.91: <i>Contour di velocità dell'aria: piano z-y, x = 5,0 m</i>	223
Figura 4.92: <i>Contour di temperatura dell'aria: piano x-z, y = 1,7 m</i>	224
Figura 4.93: <i>Contour di velocità dell'aria: piano x-z, y = 1,7 m</i>	224
Figura 4.94: <i>Contour di temperatura dell'aria con scala locale: piano x-z, y = 1,7 m</i>	225
Figura 4.95: <i>Contour di velocità dell'aria con scala locale: piano x-z, y = 1,7 m</i>	226
Figura 4.96: <i>Pathline di velocità dell'aria</i>	227
Figura 4.97: <i>Pathline di velocità dell'aria – vista dall'alto</i>	227
Figura 4.98: <i>Pathline di velocità dell'aria – vista frontale</i>	228

Indice delle tabelle

Tabella 1.1: <i>Emissioni tipiche di sostanze chimiche da parte dell'uomo</i>	12
Tabella 1.2: <i>Destino delle goccioline emesse durante la respirazione, la tosse, lo starnuto o attività similari [22]</i>	21
Tabella 2.1: <i>Categorie di qualità ambientale interna</i>	38
Tabella 2.2: <i>Voti della sensazione termica</i>	39
Tabella 2.3: <i>Categorie di default per la progettazione di edifici riscaldati e raffrescati meccanicamente</i>	40
Tabella 2.4: <i>Valori default di progetto della temperatura operativa interna in inverno ed estate per edifici con sistemi di riscaldamento/raffrescamento meccanici</i>	40
Tabella 2.5: <i>Criteri di progettazione del disagio termico</i>	41
Tabella 2.6: <i>Criteri per differenti tipologie edilizie</i>	42
Tabella 2.7: <i>Tassi di ventilazione di progetto per persone sedentarie, adulte, non adattabili per diluire le emissioni (bio effluenti) di persone per diverse categorie</i>	43
Tabella 2.8: <i>Tassi di ventilazione di progetto per diluire le emissioni di diverse tipologie di edifici</i>	44
Tabella 2.9: <i>Concentrazioni di default di CO₂ di progetto al di sopra della concentrazione esterna assumendo una emissione standard di CO₂ di 20 l/h per persona</i>	44
Tabella 2.10: <i>Classificazione dell'aria esterna (ODA, classification of outdoor air)</i>	47
Tabella 2.11: <i>Classificazione dell'aria di mandata (SUP, supply air classification)</i>	48
Tabella 2.12: <i>Efficienza minima di filtrazione basata sulla qualità dell'aria esterna e su quella di mandata</i>	49
Tabella 2.13: <i>Classi minime di filtro consigliate (definizione delle classi di filtro in accordo con la EN 779)</i>	49
Tabella 2.14: <i>Portate di aria esterna in edifici adibiti ad uso scolastico</i>	50
Tabella 2.15: <i>Indici di affollamento n_s per ogni metro quadrato di superficie</i>	51
Tabella 2.16: <i>Coefficiente correttivo in funzione dell'altitudine H sul livello medio del mare</i>	51
Tabella 2.17: <i>Classificazione dei filtri</i>	52
Tabella 2.18: <i>Classe di filtri e efficienza di filtrazione richiesti in edifici adibiti ad uso scolastico</i>	53
Tabella 2.19: <i>Coefficienti di ricambio d'aria – D.M. 18/12/1975</i>	53
Tabella 2.20: <i>Dati per il calcolo della portata d'aria di ventilazione – UNI EN 16798-1, Metodo 1</i>	55
Tabella 2.21: <i>Calcolo del tasso di ventilazione inerente agli occupanti – UNI EN 16798-1, Metodo 1</i>	55
Tabella 2.22: <i>Calcolo del tasso di ventilazione inerente al tipo di edificio – UNI EN 16798-1, Metodo 1</i>	56
Tabella 2.23: <i>Calcolo del tasso di ventilazione totale – UNI EN 16798-1, Metodo 1</i>	56

Tabella 2.24: <i>Dati per il calcolo della portata d'aria di ventilazione – UNI EN 16798-1, Metodo 2</i>	56
Tabella 2.25: <i>Calcolo del tasso di ventilazione necessario per la diluizione – UNI EN 16798-1, Metodo 2</i>	57
Tabella 2.26: <i>Dati per il calcolo della portata d'aria di ventilazione – UNI 10339</i>	57
Tabella 2.27: <i>Calcolo del tasso di ventilazione totale – UNI 10339</i>	58
Tabella 2.28: <i>Dati per il calcolo della portata d'aria di ventilazione – D.M. 18/12/1975</i>	58
Tabella 2.29: <i>Calcolo del tasso di ventilazione totale – D.M. 18/12/1975</i>	58
Tabella 3.1: <i>Prospetto 1 della UNI 11532-2</i>	68
Tabella 3.2: <i>Prospetto 6 della UNI 11532-2. (*1 Ambiente arredato e occupato all'80%, *2 Ambiente arredato e non occupato)</i>	68
Tabella 3.3: <i>Prospetto 4 della UNI 11532-2</i>	69
Tabella 3.4: <i>Prospetto 8 e 10 della UNI 11532-2: valori di riferimento dovuto agli impianti a funzionamento continuo (Lic,int e NC) e al livello di rumore ambiente (Lamb)</i>	70
Tabella 3.5: <i>Valori di portata e velocità ottenuti durante le misurazioni nelle posizioni definite</i>	82
Tabella 3.6: <i>Portate medie di immissione ed estrazione con variazione percentuale tra le due</i>	83
Tabella 3.7: <i>Valori massimi e minimi per ogni dimensione di particella considerata</i>	87
Tabella 3.8: <i>Risultati delle misure per il calcolo dello STI</i>	93
Tabella 3.9: <i>Risultati delle misure per il calcolo dello C50</i>	93
Tabella 3.10: <i>Tempo di riverbero T30 misurato in 3 posizioni utente e 2 posizioni di sorgente</i>	94
Tabella 3.11: <i>Calcolo del valore della superficie aggiuntiva equivalente di assorbimento acustico delle persone totale</i>	94
Tabella 3.12: <i>Verifica del tempo di riverbero</i>	95
Tabella 3.13: <i>Calcolo del termine di normalizzazione rispetto al tempo di riverberazione</i>	96
Tabella 3.14: <i>Misura del livello di pressione sonora residuo</i>	96
Tabella 3.15: <i>Risultati delle misurazioni per la determinazione del livello di rumore degli impianti</i>	96
Tabella 3.16: <i>Prestazioni in riscaldamento e in raffrescamento dell'unità VMC 2.0 RINNOVA 30</i>	100
Tabella 3.17: <i>Valori di temperatura, umidità relativa e CO₂ nelle aule monitorate</i>	141
Tabella 3.18: <i>Valori di portata ottenuti durante le misurazioni</i>	144
Tabella 3.19: <i>Portate di immissione ed estrazione con variazione percentuale tra le due</i>	144
Tabella 3.20: <i>Valori massimi e minimi per ogni dimensione di particella considerata</i>	147
Tabella 3.21: <i>Tempo di riverbero T30 misurato in 3 posizioni utente e 2 posizioni di sorgente</i>	152
Tabella 3.22: <i>Calcolo del valore della superficie aggiuntiva equivalente di assorbimento acustico delle persone totale</i>	153

Tabella 3.23: <i>Verifica del tempo di riverbero</i>	153
Tabella 3.24: <i>Calcolo del termine di normalizzazione rispetto al tempo di riverberazione</i>	154
Tabella 3.25: <i>Misura del livello di pressione sonora residuo</i>	155
Tabella 3.26: <i>Risultati delle misurazioni per la determinazione del livello di rumore degli impianti</i>	155
Tabella 4.1: <i>Caratteristiche delle mesh create</i>	165

Indice dei grafici

Grafico 3.1: Intervallo di conformità del valore del tempo di riverberazione di progetto.....	68
Grafico 3.2: Andamento della temperatura dell'aria interna nell'aula 3°B dal 15 febbraio al 3 marzo.....	76
Grafico 3.3: Andamento dell'umidità relativa nell'aula 3°B dal 15 febbraio al 3 marzo.....	77
Grafico 3.4: Andamento della concentrazione di CO ₂ nell'aula 3°B dal 15 febbraio al 3 marzo.....	77
Grafico 3.5: Andamento della temperatura dell'aria interna nell'aula 3°B il giorno 18 febbraio.....	78
Grafico 3.6: Andamento dell'umidità relativa nell'aula 3°B il giorno 18 febbraio.....	78
Grafico 3.7: Andamento della concentrazione di CO ₂ nell'aula 3°B il giorno 18 febbraio.....	79
Grafico 3.8: Andamento della portata per le cinque posizioni definite alle tre impostazioni di velocità.....	82
Grafico 3.9: Andamento della velocità per le cinque posizioni definite alle tre impostazioni di velocità.....	83
Grafico 3.10: Andamento nel tempo del numero di particelle misurate per ogni dimensione considerata.....	86
Grafico 3.11: Retta costruita attraverso i valori di pressione e portata ricavati durante il blower door test.....	91
Grafico 3.12: Verifica del tempo di riverbero.....	95
Grafico 3.13: Andamento della temperatura dell'aria interna, dell'umidità relativa e della CO ₂ nell'Aula 1 (3°B) dal 16 gennaio al 23 gennaio.....	132
Grafico 3.14: Andamento della temperatura dell'aria interna, dell'umidità relativa e della CO ₂ nell'Aula 2 (3°A) dal 16 gennaio al 23 gennaio.....	132
Grafico 3.15: Andamento della temperatura dell'aria interna, dell'umidità relativa e della CO ₂ nell'Aula 3 (2°B) dal 16 gennaio al 23 gennaio.....	133
Grafico 3.16: Andamento della temperatura dell'aria interna, dell'umidità relativa e della CO ₂ nell'Aula 4 (2°A) dal 16 gennaio al 23 gennaio.....	133
Grafico 3.17: Andamento della temperatura dell'aria interna, dell'umidità relativa e della CO ₂ nell'Aula 5 (4°B) dal 16 gennaio al 23 gennaio.....	134
Grafico 3.18: Andamento della temperatura dell'aria interna, dell'umidità relativa e della CO ₂ nell'Aula 6 (4°A) dal 16 gennaio al 23 gennaio.....	135
Grafico 3.19: Andamento della temperatura dell'aria interna, dell'umidità relativa e della CO ₂ nell'Aula 8-16 (Mensa) dal 16 gennaio al 23 gennaio.....	135
Grafico 3.20: Andamento della temperatura dell'aria interna, dell'umidità relativa e della CO ₂ nell'Aula 9 (1°B) dal 16 gennaio al 23 gennaio.....	136
Grafico 3.21: Andamento della temperatura dell'aria interna, dell'umidità relativa e della CO ₂ nell'Aula 10 (5°B) dal 16 gennaio al 23 gennaio.....	136

Grafico 3.22: <i>Andamento della temperatura dell'aria interna, dell'umidità relativa e della CO₂ nell'Aula 11 (1°A) dal 16 gennaio al 23 gennaio</i>	137
Grafico 3.23: <i>Andamento della temperatura dell'aria interna, dell'umidità relativa e della CO₂ nell'Aula 12 (5°A) dal 16 gennaio al 23 gennaio</i>	137
Grafico 3.24: <i>Andamento della temperatura dell'aria interna, dell'umidità relativa e della CO₂ nell'Aula 13 (Biblioteca) dal 16 gennaio al 23 gennaio</i>	138
Grafico 3.25: <i>Andamento della temperatura dell'aria interna, dell'umidità relativa e della CO₂ nell'Aula 14 (Laboratorio Ceramica) dal 16 gennaio al 23 gennaio</i>	138
Grafico 3.26: <i>Andamento della temperatura dell'aria interna, dell'umidità relativa e della CO₂ nell'Aula 15 (Aula Informatica) dal 16 gennaio al 23 gennaio</i>	139
Grafico 3.27: <i>Andamento della temperatura dell'aria interna, dell'umidità relativa e della CO₂ nell'Aula Sostegno dal 16 gennaio al 23 gennaio</i>	139
Grafico 3.28: <i>Andamento della temperatura dell'aria interna nell'Aula 2 (3°A) del 18 gennaio</i>	140
Grafico 3.29: <i>Andamento dell'umidità relativa nell'Aula 2 (3°A) del 18 gennaio</i>	140
Grafico 3.30: <i>Andamento della CO₂ nell'Aula 2 (3°A) del 18 gennaio</i>	141
Grafico 3.31: <i>Andamento della portata alle tre impostazioni di velocità</i>	144
Grafico 3.32: <i>Andamento nel tempo del numero di particelle misurate per ogni dimensione considerata</i>	147
Grafico 3.33: <i>Retta costruita attraverso i valori di pressione e portata ricavati durante il blower door test</i>	150
Grafico 3.34: <i>Verifica del tempo di riverbero</i>	153
Grafico 4.1: <i>Valori di temperatura media dell'aria nel volume di controllo degli studenti per ogni simulazione</i>	176
Grafico 4.2: <i>Errore relativo dei valori di temperatura media dell'aria nel volume di controllo degli studenti per ogni simulazione</i>	176
Grafico 4.3: <i>Valori di velocità media dell'aria nel volume di controllo degli studenti per ogni simulazione</i>	177
Grafico 4.4: <i>Errore relativo dei valori di velocità media dell'aria nel volume di controllo degli studenti per ogni simulazione</i>	177
Grafico 4.5: <i>Valori di Skewness della mesh I</i>	183
Grafico 4.6: <i>Valori di Aspect Ratio della mesh I</i>	184
Grafico 4.7: <i>Valori di Orthogonal Quality della mesh I</i>	184

Introduzione

In questo lavoro di tesi viene trattato il problema della qualità dell'aria e del comfort termometrico all'interno delle aule scolastiche, luoghi in cui, a causa della maggiore suscettibilità degli occupanti dovuta alla loro giovane età, tale problematica risulta sempre più centrale e di fondamentale importanza in fase di progettazione e gestione degli edifici.

Nel primo capitolo viene introdotto il tema della qualità dell'aria indoor descrivendone l'importanza e la sua influenza sulla salute e sulle prestazioni cognitive degli studenti, riferendosi ai risultati riscontrati da studi effettuati in merito. Viene successivamente fatta una rassegna dei principali agenti inquinanti che si possono ritrovare all'interno degli ambienti, descrivendone le caratteristiche, la provenienza ed i valori limite riguardanti l'esposizione e la concentrazione. Infine, vengono descritte le strategie di controllo e gestione della I.A.Q, attuabili mediante il controllo delle fonti inquinanti e/o il controllo della concentrazione degli inquinanti.

In seguito viene affrontato il tema della malattia da coronavirus (COVID-19), provocata dal virus SARS-CoV-2, argomento di attuale e centrale importanza soprattutto nell'ambito della qualità dell'aria all'interno degli ambienti scolastici; dapprima si analizzano le caratteristiche di persistenza in aria e di trasmissione del virus, per poi passare alla descrizione delle misure e delle strategie da attuare per fronteggiarne la diffusione indoor.

Viene poi introdotta la fluidodinamica computazionale (CFD, Computational Fluid Dynamics) come strumento di analisi e studio dei flussi d'aria e degli aspetti da essi derivanti, come la qualità dell'aria interna ed il comfort termometrico, all'interno degli edifici. Inizialmente vengono descritte le varie fasi da seguire per svolgere una simulazione di fluidodinamica computazionale, per poi argomentare, mediante una rassegna dei recenti lavori di ricerca, la tesi a sostegno dei vantaggi dello studio CFD come supporto alla progettazione degli impianti di ventilazione.

Nel secondo capitolo vengono trattati i principali riferimenti normativi e legislativi in merito alla ventilazione meccanica controllata, concentrando il discorso sui requisiti previsti per la qualità dell'ambiente interno. Vengono quindi esaminati i parametri richiesti per il comfort termometrico e la qualità dell'aria interna trattati nelle normative UNI EN 16798-1:2019, UNI EN 16798-3:2018 e UNI 10339:1995 e nel D.M. 18/12/1975.

Si esegue anche un calcolo della portata di ventilazione minima, richiesta per un'aula scolastica, tramite l'impiego dei tre riferimenti descritti, così da poter confrontare i risultati.

Nel terzo capitolo vengono riportate le misurazioni sperimentali effettuate nelle aule scolastiche della scuola secondaria di I grado G. Ferraris e della scuola primaria I.C. Luca Della Robbia. Si descrivono prima le misurazioni effettuate, ovvero le prove termiche e di qualità dell'aria, le prove fluidodinamiche, comprendenti la misurazione della portata dell'unità VMC, la prova con generatore di fumo ed il blower door test e le prove acustiche, per poi riportare la geometria delle aule monitorate ed i risultati sperimentali ottenuti.

Nel quarto capitolo viene eseguita l'analisi fluidodinamica computazionale di un'aula della scuola secondaria di I grado G. Ferraris mediante l'utilizzo del software ANSYS Fluent. In prima fase viene creata la geometria dell'aula. Successivamente si passa allo studio della convergenza della griglia di calcolo, necessaria per individuare la mesh con cui effettuare le successive simulazioni. Si analizza poi l'unità VMC installata valutandone le prestazioni mediante l'analisi, sia numerica che grafica, dell'aspetto termico e fluidodinamico dell'aula. In seguito si cerca di migliorare le prestazioni della macchina VMC modificandone la geometria della griglia di immissione dell'aria.

Nel quinto capitolo sono riportate le conclusioni sulle misure sperimentali effettuate e sull'analisi fluidodinamica computazionale svolta.

1 Stato dell'arte

1.1 I.A.Q. – Qualità dell'aria interna

1.1.1 Importanza della I.A.Q.

Per qualità dell'aria interna si intende la qualità dell'aria all'interno e intorno a edifici e strutture, con particolare riferimento alla salute ed al comfort degli occupanti; al fine di ottenere una qualità dell'aria indoor accettabile è importante che essa non sia inquinata.

Il Ministero della Salute, in una pubblicazione del 16/12/2015, definì l'inquinamento indoor come *«la modificazione della normale composizione o stato fisico dell'aria atmosferica interna, dovuta alla presenza nella stessa di una o più sostanze in quantità e con caratteristiche tali da alterare le normali condizioni ambientali e di salubrità dell'aria stessa e tali da costituire un pericolo ovvero un pregiudizio diretto o indiretto per la salute dell'uomo»* [1].

Controllare e limitare la presenza di inquinanti negli edifici aiuta a ridurre il rischio di problemi di salute, specialmente nelle strutture scolastiche dove i bambini, più vulnerabili degli adulti, trascorrono dalle 4 alle 8 ore al giorno per almeno 10 anni.

Inoltre è stata riscontrata da diversi studi la correlazione tra una scarsa qualità dell'aria e la diminuzione del rendimento degli alunni, sfavorendo l'apprendimento degli argomenti trattati in classe.

Gli inquinanti dannosi per la salute possono provenire dall'ambiente esterno oppure possono essere emessi da elementi o persone all'interno degli edifici. E' dunque evidente che bisogna tenere sotto controllo la quantità degli agenti inquinanti presenti negli ambienti interni al fine di non recare danni o disturbi agli occupanti.

La qualità dell'aria all'interno delle scuole, oltre che dipendere dalla quantità degli inquinanti che penetrano dall'esterno e di quelli che sono rilasciati all'interno, è determinata da altri fattori come le caratteristiche architettoniche, edilizie ed impiantistiche dell'edificio che influenzano direttamente il microclima ed, indirettamente, le potenziali fonti di inquinamento indoor ed il microclima (temperatura, umidità, ventilazione e ricambi d'aria) [2].

1.1.1.1 Influenza della I.A.Q. sulla salute

Tenere sotto stretta osservazione la qualità dell'aria nelle strutture scolastiche è di fondamentale importanza, in quanto i bambini sono particolarmente suscettibili all'inquinamento dell'aria interna, rispetto agli adulti, a causa del loro sistema immunitario e dei loro polmoni non ancora pienamente sviluppati e degli alti tassi di inalazione per massa corporea (respirano più aria per unità di peso).

Gli effetti delle sostanze inquinanti presenti nelle aule scolastiche possono comportare disturbi sugli alunni nel medio-lungo periodo o anche permanenti, causando delle malattie croniche ai soggetti interessati.

Nel corso degli ultimi decenni sono stati condotti studi in diversi Paesi del mondo sull'inquinamento dell'aria negli ambienti scolastici ed effetti sulla salute dei bambini, evidenziando connessioni significative delle esposizioni ad agenti inquinanti, quali muffe, CO₂, VOC, polvere, PM ed altri, con gli esiti respiratori come fischi, difficoltà di respiro, asma, tosse persistenze ed allergie.

Tra le varie indagini troviamo lo studio HESE (Health Effects of School Environment) [3] del 2006, finanziato dall'Unione Europea, a cui hanno partecipato Norvegia, Svezia, Danimarca, Francia e Italia con lo scopo di valutare gli effetti dell'inquinamento indoor sulla salute degli studenti monitorando 46 aule per un totale di 21 scuole elementari.

Lo studio ha evidenziato che gli alunni esposti a concentrazioni di CO₂ > 1000 ppm, standard per una buona I.A.Q. proposto dall'American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), hanno un rischio più elevato, di due o tre volte, di tosse secca notturna e rinite; inoltre la pervietà nasale (aria delle narici) era significativamente inferiore negli alunni esposti a PM₁₀ > 50 µg/m³, limite proposto dall'Environmental Protection Agency (EPA) per le esposizioni a lungo termine. E' stato riscontrato anche che gli scolari esposti a livelli di muffe superiori a 300 cfu/m³ (limite massimo suggerito dall'ASHRAE) hanno un maggior rischio di riportare tosse secca notturna, rinite e tosse persistente.

Altro studio internazionale importante è il progetto SEARCH (School Environment And Respiratory Health of Children) [4], promosso dal Regional Environmental Center for Central and Eastern Europe (REC) e sviluppato in tre fasi tra il 2010 e il 2016; lo studio ha coinvolto 60 scuole per un totale di 243 classi nel progetto SEARCH I e 101 scuole nel progetto SEARCH II, con lo scopo di promuovere il miglioramento della qualità dell'aria indoor nelle scuole per ridurre i rischi sulla salute dei bambini che ne conseguono.

I risultati del progetto denotano la correlazione tra il sovraffollamento, che è a sua volta legato a maggiori concentrazioni di CO₂ e PM, e l'aumento di prevalenza di sintomi respiratori nei bambini, come illustrato dalla seguente immagine.

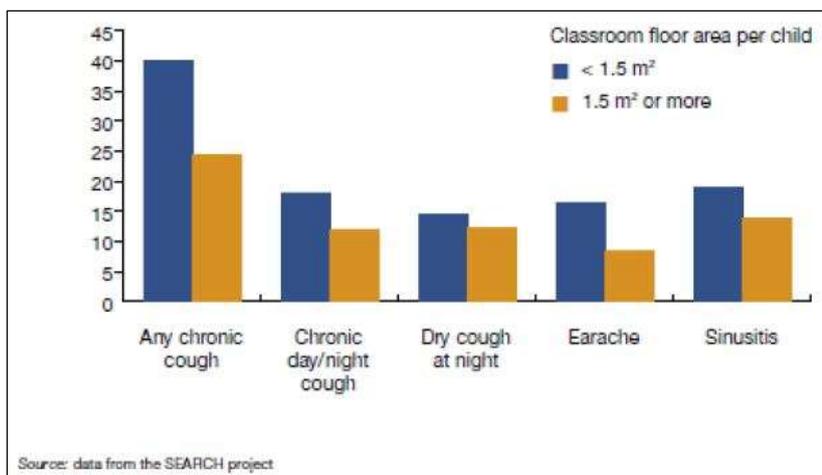


Figura 1.1 - Percentuale di bambini con sintomi specifici per densità di occupazione della classe [4]

Altro risultato è la correlazione tra una scarsa ventilazione nelle aule scolastiche e la manifestazione di tosse cronica.

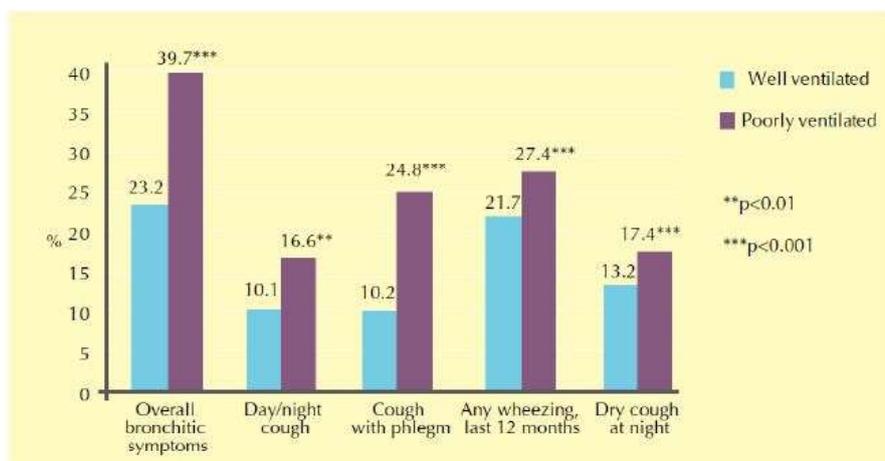


Figura 1.2 - Percentuale di bambini con malattie respiratorie croniche in classi ben ventilate e poco ventilate [4]

Oltre a questi progetti internazionali ci sono diversi studi epidemiologici condotti sulla qualità dell'aria interna nelle scuole.

Uno studio di Smedje et al, 2001 [5] ha riscontrato che l'asma nei bambini e negli adolescenti è associata a molti fattori presenti nelle aule scolastiche come umidità, VOC (inclusa la formaldeide), muffe, batteri e allergeni.

Lo studio di Kim JI et al, 2007 [6] ha associato la concentrazione di composti organici volatili di origine microbica (MVOC) a difficoltà respiratorie e a diagnosi di asma.

Alla luce dell'analisi della letteratura sull'influenza della qualità dell'aria interna negli edifici scolastici è chiaro che si devono considerare le problematiche di salute che scaturiscono da un'aria malsana, adottando, in fase di progetto o in interventi di retrofit su edifici già esistenti, delle corrette scelte progettuali in ambito architettonico, edilizio ed impiantistico.

1.1.1.2 Influenza della I.A.Q. sulle prestazioni degli studenti

Lo scopo principale di una scuola è quello di fornire agli studenti l'ambiente ottimale per il loro apprendimento e sviluppo; al fine di garantire delle condizioni ottimali nelle aule, oltre che considerare l'illuminazione delle postazioni e l'acustica negli ambienti, bisogna tenere in conto la qualità dell'aria indoor.

Questo aspetto è stato esaminato da diversi studi presenti in letteratura che valutano le prestazioni e le capacità cognitive degli studenti tramite dei test; quelli più comunemente utilizzati sono i test di matematica e di lettura, dove la performance viene espressa in termini di percentuale di errore, di tempo di risposta e/o di percentuale di studenti che superano positivamente il test.

A causa delle diverse metodologie di valutazione delle prestazioni usate (ad esempio tipologie di test, parametri di valutazione e condizioni di esposizione) non si ha a disposizione un risultato oggettivo, quantitativo, tra la variazione degli inquinanti, ottenuta modificando i tassi di ventilazione, e la variazione delle prestazioni.

Tuttavia è possibile analizzare qualitativamente i risultati ottenuti da vari studi in letteratura.

Ci sono degli studi che riscontrano un miglioramento delle prestazioni degli studenti al diminuire delle concentrazioni di CO₂ nelle aule.

In particolare lo studio di Dorizas et al., 2015 [7], riscontra che un aumento del 17,01 % nella concentrazione di CO₂ causa una riduzione della performance del 16,13 %; dallo studio di Twardella et al, 2012 [8], risulta che l'incremento della concentrazione di CO₂ nelle aule non ha effetto sulla concentrazione degli studenti, ma incrementa il tasso di errore nell'esecuzione del test.

Altri studi rilevano un miglioramento della performance al crescere del tasso di ventilazione, come quello effettuato da Ulla Haverinen-Shaughnessy, 2015 [9], che ha analizzato gli studenti con test di matematica e di lettura. Lo studio di BPIE, 2018 [10], tramite una meta-analisi dei dati ricavati dagli studi analizzati, riporta un incremento della performance pari all'1% per ogni litro al secondo per persona (l/s/p) aggiuntivo nel tasso di ventilazione (fino a 15 l/s/p).

In letteratura si trova anche lo studio di Mohai et al, 2011 [11], che conclude come le scuole situate in aree con alti livelli di inquinamento dell'aria esterna hanno percentuali inferiori di frequenza in aula e una maggiore percentuale di studenti che non supera test standardizzati di inglese e matematica.

1.1.2 Agenti inquinanti

Nell'aria è presente un numero elevato di sostanze inquinanti, ognuna delle quali possiede un grado di pericolosità per la salute delle persone.

I principali inquinanti per la valutazione della I.A.Q. sono biossido di zolfo (SO₂), monossido e biossido di azoto (NO e NO₂), monossido di carbonio (CO), fumo di tabacco (ETS), particolato (PM), ozono (O₃), radon (RN), composti organici volatili (VOCs), formaldeide (HCHO) che è un particolare tipo di VOC, contaminanti biologici tra cui batteri, funghi e allergeni e biossido di carbonio o anidride carbonica (CO₂).

Il loro impatto dipende da vari fattori, come ad esempio la quantità di inquinante dell'aria al quale si è esposti, la durata dell'esposizione e la pericolosità dell'inquinante stesso.

Le quantità degli inquinanti vengono espresse attraverso la loro concentrazione, ovvero la quantità di sostanza presente per unità di volume o di massa.

Per valutare la pericolosità di un inquinante, le istituzioni responsabili dello studio della qualità dell'aria interna, come l'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) o le americane Environmental Protection Agency (EPA) ed American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), hanno emanato delle linee guida in cui definiscono per ogni inquinante i valori di accettabilità, o soglie massime di concentrazione, in relazione al tempo di esposizione.

Vengono quindi introdotte due tipologie di tempi di esposizione:

- Alter (acceptable long time exposure range): indica il valore di concentrazione dell'inquinante al quale una persona può essere esposta durante la sua vita senza un eccessivo rischio per la sua salute (in genere si considera un anno);
- Aster (acceptable short time exposure range): indica il valore di concentrazione dell'inquinante accettabile per l'esposizione di una persona in un breve periodo specificato (ora, giorno, ecc.).

Gli agenti inquinanti presenti all'interno degli edifici possono provenire dall'ambiente esterno oppure essere emanati direttamente da elementi o persone presenti nella struttura.

Gli inquinanti presenti nell'aria esterna provengono da traffico veicolare, impianti di riscaldamento, attività produttive e industrie; mentre le fonti di inquinanti interne sono le persone, i materiali da costruzione e gli elementi di arredo.

Di seguito vengono esaminati nel dettaglio gli agenti inquinanti sopra citati, descrivendone le caratteristiche, la provenienza ed i valori limite riguardanti l'esposizione e la concentrazione.

1.1.2.1 Agenti inquinanti esterni

L'inquinamento indotto dall'esterno è determinato, oltre dalle condizioni climatiche locali, da diverse componenti in relazione alla collocazione urbana dell'edificio; tali agenti inquinanti possono quindi provenire dal traffico veicolare, da siti industriali con scarichi di tipo gassoso, da attività produttive di vario genere e dagli scarti gassosi degli impianti di riscaldamento.

Le sostanze inquinanti possono entrare negli edifici tramite l'apertura delle finestre, il sistema di ventilazione, se non vengono adottate delle misure adeguate come la filtrazione dell'aria in ingresso ed il posizionamento corretto delle prese di aria esterna, e per infiltrazione dovuto alla permeabilità dei vari componenti edilizi.

I principali agenti inquinanti esterni sono:

- Biossido di zolfo – SO₂

Caratteristiche: è un prodotto gassoso incolore, irritante e molto solubile in acqua di combustibili contenenti zolfo, come i combustibili fossili che alimentano le auto, quelli impiegati per la produzione di energia e quelli che venivano utilizzati in passato per il riscaldamento. È l'inquinante atmosferico più diffuso, uno dei più aggressivi e pericolosi e quello emesso in maggior quantità dalle sorgenti antropogeniche. A basse concentrazioni gli effetti del biossido di zolfo sono principalmente legati a patologie dell'apparato respiratorio come bronchiti, asma e tracheiti e ad irritazioni della pelle, degli occhi e delle mucose.

Fonti inquinanti: le emissioni naturali dell'anidride solforosa sono principalmente dovute all'attività vulcanica (circa 20 milioni di tonnellate l'anno).

Le emissioni antropogeniche sono dovute ai processi di combustione dei combustibili fossili e liquidi (carbone, petrolio, gasolio) come processi industriali e produzione di energia elettrica (centrali termoelettriche), al traffico veicolare (quantità trascurabili) e al riscaldamento domestico; oltre il 90% dello zolfo presente nei combustibili viene trasformato in biossido di zolfo.

Le attività dell'uomo immettono in atmosfera circa 150 milioni di tonnellate all'anno di SO₂.

Diffusione: la diffusione del gas è uniforme sia in aree rurali che urbane, con valori di concentrazione medi annui in diminuzione (0,004 – 0,015 ppm) nei Paesi sviluppati grazie ai regolamenti internazionali; nelle grandi città dei Paesi in via di sviluppo, dove i combustibili fossili sono ancora ampiamente utilizzati, la loro concentrazione risulta molto alta (5 – 10 µg/mc).

Concentrazioni indoor: a causa della grande reattività del biossido di zolfo, le concentrazioni negli ambienti interni sono generalmente molto basse (almeno la metà di quelle esterne); inoltre, negli spazi interni, i componenti edilizi ed i vestiti tendono ad assorbire il gas diminuendone ulteriormente la concentrazione.

Valori limite: il valore limite per esposizioni a breve termine di 10 minuti è di 500 µg/mc (0,188 ppm); per esposizioni a breve termine di 24 ore il limite massimo è di 125 µg/mc (0,047 ppm).

Il rispetto del limite di concentrazione a breve termine (24 ore) assicura il rispetto dei limiti medi annuali.

I valori limite delle concentrazioni fanno riferimento alle linee guida sulla qualità dell'aria interna OMS 2010.

- Monossido e biossido di azoto – NO e NO₂

Caratteristiche: l'ossido di azoto (NO) è un gas incolore, insapore ed inodore; è prodotto soprattutto nel corso dei processi di combustione ad alta temperatura assieme al biossido di azoto; la sua tossicità è limitata.

Il biossido di azoto è un gas tossico di colore giallo-rosso, dall'odore forte e pungente e con grande potere irritante; Rappresenta un inquinante secondario dato che deriva, per lo più, dall'ossidazione in atmosfera del monossido di azoto. Il biossido di azoto svolge un ruolo fondamentale nella formazione dello smog fotochimico in quanto costituisce l'intermedio di base per la produzione di tutta una serie di inquinanti secondari molto pericolosi come l'ozono, l'acido nitrico e l'acido nitroso. È

direttamente responsabile del riscaldamento globale e rappresenta un ottimo indicatore della presenza di inquinamento da traffico veicolare.

Fonti inquinanti: su scala globale si stima che le emissioni di ossidi di azoto naturali ed antropogeniche siano dello stesso ordine di grandezza (circa 200 milioni di tonnellate).

Le sorgenti naturali sono costituite essenzialmente dalle decomposizioni organiche anaerobiche che riducono i nitrati a nitriti.

La principale fonte antropogenica di ossido di azoto è data dalle combustioni ad alta temperatura, come quelle che avvengono nei motori degli autoveicoli. Altre importanti fonti di ossidi di azoto sono gli impianti termici e le centrali termoelettriche.

È un gas che viene rilasciato anche da possibili fonti indoor come il fumo di tabacco e l'utilizzo di apparecchi a gas.

Diffusione: nelle zone urbane i livelli medi annuali vanno dagli 0,01 agli 0,05 ppm, mentre il valore istantaneo varia durante il giorno in base al livello di traffico, alla stagione e a fattori meteorologici. Sempre a causa del traffico, il valore medio orario è molto più alto delle medie annuali (fino a 0,5 ppm).

La concentrazione di questo inquinante è in crescita, a causa dell'aumento della mobilità e della popolazione.

Concentrazioni indoor: i livelli interni possono essere maggiori di quelli esterni, soprattutto nelle residenze che impiegano stufe a gas per la cucina, portando a medie giornaliere anche di 0,1 ppm e medie orarie fino a 1,064 ppm; tuttavia tipicamente le medie nel lungo periodo rimangono basse.

Valori limite: il valore limite per esposizioni a breve termine di 1 ora è di 200 µg/mc (0,1064 ppm); per esposizioni a lungo termine (annuali) il limite massimo è di 40 µg/mc (0,0213 ppm).

I valori limite delle concentrazioni fanno riferimento alle linee guida sulla qualità dell'aria interna OMS 2010.

- **Monossido di carbonio – CO**

Caratteristiche: è un gas incolore, inodore, infiammabile, e molto tossico. Si forma durante le combustioni delle sostanze organiche, quando sono incomplete per difetto di aria (cioè per mancanza di ossigeno). Le maggiori concentrazioni si registrano in corrispondenza di aree trafficate, o in locali scarsamente ventilati con presenza di auto.

Fonti inquinanti: le principali emissioni naturali sono dovute agli incendi delle foreste, alle eruzioni dei vulcani, alle emissioni da oceani e paludi e all'ossidazione del metano e degli idrocarburi in genere emessi naturalmente in atmosfera.

La fonte principale di emissione da parte dell'uomo è costituita dall'utilizzo dei combustibili fossili per i motori a scoppio degli autoveicoli e per le attività industriali (soprattutto impianti siderurgici e raffinerie di petrolio). Un'altra fonte è il fumo di tabacco.

Diffusione: il gas ha una concentrazione maggiore nelle aree urbane, dove i livelli mediati su 8 ore si aggirano sui 17 ppm, con picchi di 50 ppm.

Concentrazioni indoor: i livelli di CO possono essere maggiori che in aria esterna, soprattutto nelle residenze che impiegano stufe a gas, a legna, ad olio combustibile e dai fornelli (fino a 100 ppm); il fumo di tabacco negli ambienti indoor è in ogni caso responsabile di un aumento di 20-40 ppm del valore di background.

Valori limite: l'OMS fornisce quattro livelli limite per esposizioni a breve termine: per 15 minuti è di 100 µg/mc (90 ppm), per 30 minuti è di 60 µg/mc (50 ppm), per 1 ora è di 30 µg/mc (25 ppm) e per 8 ore è di 10 µg/mc (10 ppm).

Il rispetto dei limiti annuali è assicurato dal rispetto di quelli a breve termine (8 ore). I valori limite delle concentrazioni fanno riferimento alle linee guida sulla qualità dell'aria interna OMS 2010.

- Particolato – PM

Caratteristiche: le particelle sospese sono sostanze allo stato solido o liquido, differenti per provenienza e caratteristiche chimico-fisiche, che, a causa delle loro piccole dimensioni, restano sospese in atmosfera per tempi più o meno lunghi. L'indicatore utilizzato per la distinzione è il diametro aerodinamico (diametro di una particella di densità unitaria che si comporta in modo analogo alla particella analizzata), determinante per le modalità di diffusione di tale inquinante e per gli effetti sulla salute; in base a tale indicatore si distinguono:

Particolato grosso – PM₁₀: diametro particelle < 10 µm;

Particolato fine – PM_{2,5}: diametro particelle < 2,5 µm;

Particolato ultrafine – PM_{0,1}: diametro particelle < 0,1 µm.

Le PM₁₀ può essere inalato; le PM_{2,5} può passare attraverso il tratto respiratorio superiore e raggiungere i polmoni; le PM_{0,1} passano attraverso gli alveoli, penetrando in profondità.

Si parla di particolato “primario” quando le particelle sono emesse direttamente. Le particelle “secondarie”, invece, hanno origine da processi di trasformazione chimica e di condensazione delle sostanze gassose primarie.

Il PM grossolano è costituito principalmente da particelle primarie, mentre il PM fine contiene principalmente particelle secondarie.

Fonti inquinanti: le principali fonti naturali di particolato primario sono le eruzioni vulcaniche, gli incendi boschivi, l'erosione e la disgregazione delle rocce, le piante (pollini e residui vegetali), le spore, lo spray marino e i resti degli insetti; il particolato naturale secondario è costituito da particelle fini che si originano in seguito alla ossidazione di varie sostanze.

Il particolato primario di origine antropica è invece dovuto all'utilizzo dei combustibili fossili (riscaldamento domestico, centrali termoelettriche, ecc.), alle emissioni degli autoveicoli, all'usura dei pneumatici, dei freni e del manto stradale, a vari processi industriali (fonderie, miniere, cementifici, ecc.) e a varie attività agricole.

Le polveri secondarie antropogeniche sono invece dovute essenzialmente all'ossidazione degli idrocarburi e degli ossidi di zolfo e di azoto emessi dalle varie attività umane.

Diffusione: il particolato ha diffusione locale, con concentrazioni maggiori nelle aree urbane (si arriva ai 61-100 µg/mc nelle grandi città), ma che risultano estremamente variabili con la stagione, il tempo meteorologico e l'ora del giorno. Il particolato ultrafine, invece, ha un'ampia variabilità spaziale ed è molto difficile stabilirne una concentrazione media su larga scala.

Concentrazioni indoor: le concentrazioni negli ambienti chiusi sono generalmente più alte delle concentrazioni esterne (quelle esterne sono circa il 40-70% di quelle interne).

I livelli di particolato indoor dipende estremamente dal ricambio d'aria dell'edificio che determina il grado di accumulo; anche il grado di pulizia influisce sulle concentrazioni, eliminando il particolato sedimentato ed evitandone la risospensione.

Valori limite: per le PM₁₀ si ha il limite di 20 µg/mc come media annuale e di 50 µg/mc come media giornaliera.

Per le PM_{2,5} si ha il limite di 10 µg/mc come media annuale e di 25 µg/mc come media giornaliera.

I valori limite delle concentrazioni fanno riferimento alle linee guida sulla qualità dell'aria interna OMS 2006.

- Ozono troposferico – O₃

Caratteristiche: è un gas di colore azzurro pallido, velenoso, instabile e dall'odore pungente. L'ozono presente negli strati alti dell'atmosfera (stratosfera, a 15-60 km di altezza) ha un effetto protettivo dalle radiazioni ultraviolette del sole; invece l'ozono presente nell'aria che respiriamo (troposfera) contribuisce all'inquinamento dell'aria ed è nocivo per l'uomo e per l'ambiente.

Fonti inquinanti: viene prodotto nel corso di varie reazioni chimiche in presenza della luce del sole (è un prodotto fotochimico) a partire dagli inquinanti primari, in modo particolare dal biossido di azoto e dai VOC.

Diffusione: l'ozono ha diffusione globale, ed ha una elevata variabilità spaziale; livelli di fondo di ozono in aria ambiente sono compresi tra gli 0,02 –0,04 ppm, con concentrazioni massime orarie fino a 0,15-0,18 ppm.

Concentrazioni indoor: come vedremo in seguito l'ozono può essere prodotto da alcune sorgenti interne; in assenza di queste sorgenti e nelle normali condizioni di ventilazione dell'edificio la principale sorgente di ozono indoor è rappresentata dall'aria esterna.

Valori limite: si ha il valore massimo di concentrazione di 100 µg/mc (0,05 ppm) per brevi esposizioni (8 ore); valore valido sia per l'ambiente interno che per quello esterno.

I valori limite delle concentrazioni fanno riferimento alle linee guida sulla qualità dell'aria interna OMS 2006.

- Radon – Rn

Caratteristiche: il radon è un elemento chimico naturale, radioattivo, appartenente alla famiglia dei cosiddetti gas nobili o inerti. È incolore, inodore e insapore e quindi non può essere avvertito dai sensi. Viene prodotto per decadimento nucleare dal radio che a sua volta proviene dall'uranio.

Durante tutto il processo vengono emesse ad ogni trasformazione nucleare radiazioni ionizzanti di diverso tipo, alfa, beta, gamma o combinazioni tra esse.

I prodotti di decadimento del radon sono a loro volta radioattivi ed emettono ancora radiazioni; in particolare oltre al radon-222, il polonio-218 e il polonio-214 emettono radiazioni alfa che sono vere e proprie particelle energetiche che producono un notevole danno durante il breve tratto di tessuto che eventualmente attraversano.

Fonti inquinanti: questi elementi sono presenti fin dalle origini della terra, in quantità molto variabile, in tutta la crosta terrestre e quindi anche nei materiali da costruzione che da questa derivano (cementi, tufi, laterizi, pozzolane, graniti, ecc.).

Il radon si trova ovunque nel suolo e nelle rocce, in particolare in quelle di origine vulcanica, nei graniti, nelle arenarie e nei tufi, che vengono impiegati come materiali da costruzione; il radon raggiunge la superficie terrestre e quindi l'atmosfera attraverso fessure e pori del terreno per diffusione molecolare e flussi convettivi.

Concentrazioni indoor: una volta prodotto è in grado di migrare attraverso il suolo e di diffondersi attraverso i materiali da costruzione.

L'interno degli edifici è generalmente in depressione rispetto all'esterno. Questa depressione produce dei moti convettivi nel suolo che fanno sì che il radon venga "aspirato" verso l'interno degli edifici stessi.

Una volta raggiunto l'edificio penetra attraverso le fessure dei pavimenti, le giunzioni solaio-parete e attraverso i passaggi degli impianti. Anche i materiali da costruzione

emettono radon, e possono, in alcuni casi, contribuire considerevolmente ad aumentare la concentrazione (es. materiali tufacei).

La concentrazione di radon è molto variabile sia da luogo a luogo che nel tempo, pertanto, per avere una misura significativa della concentrazione, si devono fare misure per un tempo sufficientemente lungo (almeno un anno).

L'Istituto Superiore della Sanità, con la collaborazione dell'ENEA, ha effettuato nel 1994 un'indagine campionaria in Italia su oltre 4000 abitazioni distribuite in 210 Comuni, rilevando una concentrazione media di radon di 77 Bq/m³ con picchi (1% dei casi) superiori ai 400 Bq/m³.

Valori limite: la Commissione Europea, con la raccomandazione 143 Euratom del 1990, ha fissato dei valori di riferimento della concentrazione di radon nelle abitazioni oltre i quali raccomandano interventi di bonifica; essi sono: 400 Bq/m³ per edifici esistenti e 200 Bq/m³ per edifici da costruire.

1.1.2.2 Agenti inquinanti interni

Le sostanze inquinanti endogene sono generate principalmente dal metabolismo degli occupanti attraverso la respirazione, la sudorazione e le secrezioni cutanee; sono quindi determinate in funzione della destinazione d'uso dell'edificio (attività svolta dagli occupanti) e dalla densità delle persone nei luoghi della struttura.

Nella seguente tabella vengono riportati i valori medi delle sostanze chimiche emesse dall'uomo.

Tabella 1.1 – Emissioni tipiche di sostanze chimiche da parte dell'uomo

Inquinante	Emissione tipica µg/h	Inquinante	Emissione tipica µg/h
Acetaldeide	35	Metano	1710
Acetone	475	Metanolo	6
Ammoniaca	15600	Cloruro di metilene	88
Benzene	16	Propano	1,3
2-Butanone	9700	Tetracloroetano	1,4
Biossido di carbonio	3200000	Tetracloroetilene	1
Monossido di carbonio	10.000	Toluene	23
Cloroformio	3	1,1,1 Tricloroetano	42
Dioxano	0,4	Cloruro di vinile	0,4
Solfuro di idrogeno	15	Xylene	0,003

Occorre considerare anche le sostanze inquinanti rilasciate dai materiali edilizi utilizzati nella costruzione dell'edificio (materiali da costruzione e materiali isolanti), dagli arredi interni e dalla tappezzeria, da eventuali macchinari ed apparecchiature (apparecchi a combustione, computer, stampanti) e dai prodotti per la casa (solventi, deodoranti, vernici).

I principali agenti inquinanti interni sono:

- Fumo di tabacco – ETS

Caratteristiche: è una miscela complessa e variabile in cui sono presenti oltre 4000 composti chimici diversi, in fase gassosa o nel particolato, che si liberano con la combustione.

Componenti del particolato sono la nicotina, il catrame, gli idrocarburi aromatici, il benzopirene; mentre il monossido di azoto, il monossido di carbonio, l'acido cianidrico, l'acetaldeide, la formaldeide sono contenuti nella parte gassosa. Molte delle sostanze contenute nel fumo sono tossiche, irritanti o cancerogene.

- Ozono interno – O₃

Caratteristiche: l'ozono prodotto dagli elettrodomestici o apparecchiature presenti all'interno dell'edificio ha le stesse caratteristiche dell'ozono proveniente dall'esterno, perciò rappresenta un agente inquinante allo stesso modo.

Fonti inquinanti: negli ambienti indoor le fonti di ozono sono rappresentate da apparecchiature funzionanti ad alta tensione o per mezzo di raggi ultravioletti, come fotocopiatrici, stampanti laser, lampade ultraviolette ed anche da alcuni tipi di depuratori d'aria.

Valori limite: i valori limite per le esposizioni a breve e lungo termine sono gli stessi descritti per l'ozono troposferico.

- Composti organici volatili – VOC

Caratteristiche: il termine indica una serie di composti chimici a base di carbonio che si trovano sotto forma di vapore o di liquido, in grado di evaporare a basse temperature (50-260 °C) alla pressione ambiente. Nei VOC rientrano un grande numero di sostanze (più di 300) che si differenziano per grado di nocività e impatto organolettico.

Tra le più comuni troviamo gli idrocarburi alifatici (dal n-esano al n-esadecano e metilesani), i terpeni, gli idrocarburi aromatici (benzene e derivati, toluene, o-xilene, stirene), gli idrocarburi alogenati (cloroformio, diclorometano, clorobenzene, ecc.), gli alcoli (etanolo, propanolo, butanolo e derivati), gli esteri, i chetoni e le aldeidi (tra cui la formaldeide).

Fonti inquinanti: le emissioni di VOC sono sempre presenti in ambienti chiusi e sono causate dalla diffusione delle sostanze volatili dall'interno alla superficie dei materiali e quindi dall'evaporazione delle stesse nell'aria. La maggior parte delle emissioni primarie di VOC è tipicamente originata da prodotti additivi del prodotto finito, colle e vernici per arredi a base di legno, pavimenti sintetici e isolanti, solventi, deodoranti, detersivi, insetticidi, fumo di tabacco. Si aggiungono inoltre come fonte di emissione secondaria i composti che si formano nel tempo per degradazione dovuta ad esempio all'umidità, all'ossigeno, all'ozono, ecc.; altra fonte di VOC secondari è data dai prodotti del metabolismo della flora microbologica che si può sviluppare in alcuni materiali.

Concentrazioni indoor: in genere la concentrazione indoor supera ampiamente quella esterna. Le emissioni di VOC primarie hanno tipicamente un profilo variabile nel tempo che prevede livelli iniziali più elevati, quando il prodotto è ancora nuovo, e livelli decrescenti con il passare del tempo a causa della progressiva eliminazione delle sostanze volatili contenute nel prodotto stesso.

Le emissioni secondarie possono invece avere profili differenti in dipendenza dalla modalità in cui si formano i nuovi VOC che le causano. Le dinamiche di emissione dipendono dalle caratteristiche del materiale e delle sostanze emesse.

Valori limite: attualmente non ci sono valori limite, ma la legislazione europea ed italiana mostrano un'attenzione crescente come dimostrato dalla Dir. 2004/42/CE recepita in Italia con il D. Lgs. n. 161/2006 relativa alle emissioni di VOC da solventi

organici presenti in pitture e vernici e in taluni prodotti per carrozzeria e recante modifica della direttiva 1999/13/CE; la direttiva è stata recepita in Italia con il D. Lgs. n. 161 del 27/3/2006.

- **Formaldeide – HCHO**

Caratteristiche: La formaldeide è un composto organico volatile che a temperatura ambiente si presenta come un gas incolore e dall'odore pungente; è un composto cancerogeno per l'uomo, ed è stata definita come tale dall'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro (IARC) nel 2004.

Fonti inquinanti: la formaldeide è da molti anni ampiamente utilizzata nella produzione di materiali per l'edilizia, mobili, prodotti per la pulizia, colle, vernici, disinfettanti, plastiche, coloranti, imballaggi, ecc.; può essere presente anche nell'abbigliamento e nella tappezzeria, in quanto viene spesso utilizzata nei trattamenti di stampa dei tessuti. È quindi un prodotto estremamente diffuso negli ambienti lavorativi e domestici.

Concentrazioni indoor: negli ambienti indoor la concentrazione di formaldeide è generalmente più alta di quella esterna, con valori tra 10 e 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; le maggiori concentrazioni si possono osservare in case prefabbricate, dopo interventi edilizi ed in locali con recente posa di mobili in truciolato, parquet o moquette.

Valori limite: il valore limite per esposizioni a breve termine (30 minuti) è di 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0,1 ppm); il rispetto dei limiti a breve termine assicura il rispetto di quelli a lungo termine.

I valori limite delle concentrazioni fanno riferimento alle linee guida sulla qualità dell'aria interna OMS 2010.

- **Contaminanti biologici**

Caratteristiche: I contaminanti biologici indoor rappresentano un'importante ed eterogenea categoria di inquinanti, tutti di origine biologica. Fra di essi vi sono virus, batteri, pollini, muffe, acari ed allergeni vari (come ad es. i residui degli organismi, le feci degli acari, i residui di pelle, la saliva, la forfora e l'urina degli animali domestici, ecc.).

I batteri sono organismi semplici e di dimensioni microscopiche, estremamente diffusi in ogni ambiente, aerodispersi o situati sulla superficie degli oggetti, degli organismi ed anche al loro interno; possono essere trasmessi da persone infettate, da animali o tramite l'aria degli ambienti indoor/outdoor. Vivono comunemente nel terreno e nell'acqua ma si sviluppano e crescono anche negli animali e nell'uomo. Rilasciano una sostanza infiammatoria associata con patologie tipiche dell'inquinamento indoor come la "sindrome dell'edificio malato" e la "malattia correlata all'edificio"; il batterio denominato scientificamente "Legionella pneumophila" rappresenta una specie molto aggressiva nei confronti dell'apparato polmonare umano. Solitamente la concentrazione dei batteri aerodispersi è relativamente alta negli ambienti più affollati.

Le muffe sono dei piccolissimi organismi appartenenti al regno dei Funghi; sono costituite da singole cellule, dette ife, che se si riproducono massicciamente originano quel caratteristico feltro che fa riconoscere le muffe ad occhio nudo. Nell'aria disperdono le spore, che sono un tipo di cellule riproduttive; quando le spore raggiungono una superficie umida attecchiscono e la muffa inizia a svilupparsi colonizzando un nuovo ambiente.

Gli allergeni degli animali domestici rilasciano nell'ambiente delle minuscole particelle di materiale organico in grado di scatenare delle allergie nei soggetti predisposti. Questi biocontaminanti vengono liberati da animali inferiori come gli

scarafaggi e gli acari, ma anche dagli animali domestici come gli uccellini, i cani, i gatti, i coniglietti, i criceti, ecc.; si tratta sostanzialmente di composti chimici in grado di scatenare una risposta allergica.

Fonti inquinanti: le fonti principali dei batteri sono generalmente le persone infette, gli animali, i materiali marcati, le deiezioni, le acque contaminate, gli impianti idrosanitari e spesso i sistemi di ventilazione, di condizionamento e di climatizzazione degli edifici.

Le condizioni di sviluppo delle muffe sono determinate dall'umidità dell'ambiente e dalla temperatura. Le spore fungine hanno dimensioni medie intorno a 10 micron e possono perciò raggiungere grandi distanze con le correnti aeree. Il rischio di germinazione delle muffe sulle strutture edili è maggiore quanto più bassa è la loro temperatura superficiale; questo fenomeno si verifica durante le variazioni climatiche con climi freddi, quando l'isolamento termico delle pareti o dei plafoni non è adeguato, quando le strutture sono sature d'umidità generata da una scarsa traspirazione o quando si sia in presenza di notevoli ponti termici. Anche l'aumento della pressione di vapore interna favorisce il formarsi di muffe, e ciò può essere provocato dalla presenza di eccessive sorgenti di vapore o da deficienza di ventilazione. La contaminazione degli impianti di condizionamento è invece in genere dovuta alla difficoltà di ispezione e la carenza di manutenzione dei componenti particolari, ove si ha presenza di acqua, quali le batterie di umidificazione e di raffreddamento o le torri evaporative.

Gli allergeni degli animali si concentrano particolarmente nella polvere, nei cuscini, materassi coperte e piumoni. Le particelle possono ritrovarsi anche in ambienti dove non vivono gli animali, in quanto trasportate dagli indumenti o dagli oggetti delle persone che sono in contatto con essi. Infatti, diverse ricerche hanno dimostrato che c'è una notevole presenza di allergeni provenienti dal gatto nelle aule scolastiche dovuta al trasporto tramite gli abiti di alunni ed insegnanti.

Concentrazioni indoor: la concentrazione dei contaminanti biologici si misura in CFU/cm³; la "colony forming units" è l'unità di misura del numero di organismi presenti in un dato campione, basata sulla proprietà di un singolo microorganismo di formare una colonia quando fatto crescere su un terreno di coltura. La concentrazione e il livello di esposizione ai batteri è un buon indicatore della qualità dell'aria indoor.

Valori limite: non ci sono dei valori limite definiti per le concentrazioni dei vari contaminanti biologici, ad eccezione degli ambienti di lavoro di tipo ospedaliero.

- Biossido di carbonio (anidride carbonica) – CO₂

Caratteristiche: i bioeffluenti umani sono un insieme eterogeneo di composti organici e inorganici che vengono prodotti nel corso dei vari processi metabolici come la respirazione, la sudorazione e la traspirazione; fra di essi vi sono vapore acqueo, anidride carbonica, esteri, alcoli, aldeidi, metano, composti solforati, acidi grassi, ecc. I bioeffluenti non hanno azione tossica ma, all'aumentare della loro concentrazione in locali affollati, si crea un senso di sgradevolezza e fastidio.

Si assume quindi la CO₂ come indicatore della qualità dell'aria interna in ambienti ad elevata densità occupazionale.

Fonti inquinanti: Il biossido di carbonio è il risultato della combustione di un composto organico in presenza di una quantità di ossigeno sufficiente a completarne l'ossidazione ma, per le analisi di valutazione della I.A.Q., si considera l'uomo come fonte di produzione di tale gas.

Concentrazioni indoor: Il biossido di carbonio nell'aria è presente in quantità dello 0,03% circa, mentre nell'aria esalata dopo un respiro è circa il 4,5%; la concentrazione indoor, quindi, varia principalmente in funzione di due parametri

come la densità di occupazione dell'edificio ed il tasso di ricambio d'aria (sia con ventilazione naturale che meccanica).

1.1.3 Strategie di gestione e controllo della I.A.Q.

È dunque ormai nota l'importanza di assicurare una buona qualità dell'aria interna, specialmente in luoghi frequentati da categorie di soggetti più vulnerabili come i bambini, al fine di evitare di recare danni alla loro salute e di non compromettere il rendimento degli alunni.

Per assicurare una buona qualità dell'aria nelle aule scolastiche si deve tenere sotto controllo la quantità degli inquinanti presenti, mantenendo le loro concentrazioni al di sotto di determinati livelli di sicurezza.

Ciò può essere garantito mediante l'adozione di due strategie principali:

- Controllo delle possibili fonti inquinanti, minimizzando l'apporto di agenti contaminanti in ambiente.
- Controllo delle concentrazioni degli inquinanti in ambiente mediante l'uso della ventilazione e della pulizia dei locali.

Di seguito vengono revisionate queste due strategie attuabili, prendendo come riferimento la legislazione e la normativa attualmente vigenti.

1.1.3.1 Controllo delle fonti inquinanti

Per il controllo dell'inquinamento indoor tramite la limitazione degli agenti contaminanti presenti negli ambienti si fa riferimento a provvedimenti legislativi o norme che agiscono sulle fonti attraverso la limitazione dei contaminanti, il divieto di esposizione a determinati agenti o il divieto esplicito di utilizzo di alcune sostanze.

In Italia, tranne che per alcuni contaminanti, non sono stati ancora emanati dei provvedimenti legislativi che pongano dei limiti ben definiti alle concentrazioni di inquinanti negli spazi interni; in assenza di tali leggi, si può far riferimento, per un'accettabile I.A.Q., ai valori limite stabiliti dall'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) nel "*WHO Guidelines for indoor air quality: selected pollutants (2010)*" [12].

Tra le disposizioni legislative e normative, a cui fare riferimento a livello nazionale, troviamo:

Regolamento UE n. 305/2011 – prodotti da costruzione [13]

Il regolamento sui materiali da costruzione è in vigore dal 1° luglio 2013 e sostituisce la Direttiva CEE 89/106 che in Italia era stata recepita col D.P.R. 246/93.

Il regolamento definisce sette requisiti di base per i materiali da costruzione tra i quali uno in particolare, il requisito "*igiene, salute e ambiente*", che comprende le emissioni interne di tali materiali; il requisito recita:

“Le opere di costruzione devono essere concepite e realizzate in modo da non rappresentare, durante il loro intero ciclo di vita, una minaccia per l'igiene o la salute e la sicurezza dei lavoratori, degli occupanti o dei vicini e da non esercitare un impatto eccessivo, per tutto il loro ciclo di vita, sulla qualità dell'ambiente o sul clima, durante la loro costruzione, uso e demolizione, in particolare a causa di uno dei seguenti eventi:

- a) sviluppo di gas tossici;*
- b) emissione di sostanze pericolose, composti organici volatili (VOC), gas a effetto serra o particolato pericoloso nell'aria interna o esterna;*
- c) emissioni di radiazioni pericolose;*
- d) dispersione di sostanze pericolose nelle falde acquifere, nelle acque marine, nelle acque di superficie o nel suolo;*
- e) dispersione di sostanze pericolose o di sostanze aventi un impatto negativo sull'acqua potabile;*
- f) scarico scorretto di acque reflue, emissione di gas di combustione o scorretta eliminazione di rifiuti solidi o liquidi;*
- g) umidità in parti o sulle superfici delle opere di costruzione.”*

Tale requisito si applica a tutti i prodotti da costruzione fabbricati al fine di essere incorporati o assemblati in modo permanente nell'edificio.

Circolare del Ministero della Sanità n. 57/83 – formaldeide [14]

Nella circolare “*Usi della formaldeide - Rischi connessi alle possibili modalità d'impiego*” viene riportato un limite massimo di esposizione di 0,1 ppm (124 µg/m³) negli ambienti interni contenenti compensati, pannelli truciolati e di conglomerati in sughero.

Tale limite si applica sia alla nuova edilizia che a quella esistente.

Legge n. 257/92 – amianto [15]

Con la presente legge si vieta l'utilizzo e la presenza di amianto nei fabbricati; si applica quindi sia alla nuova edilizia che a quella esistente.

Direttiva 2013/59/EURATOM – radon [16]

Per i limiti posti dalla direttiva si fa riferimento agli articoli n. 54 e 74, che fanno riferimento rispettivamente agli ambienti di lavoro e agli ambienti chiusi.

Articolo 54: “*gli Stati membri stabiliscono livelli di riferimento nazionali per le concentrazioni di radon nei luoghi di lavoro. Il livello di riferimento per la media annua della concentrazione di attività aerea non deve essere superiore a 300 Bq/m³, a meno che un livello superiore non sia giustificato dalle circostanze esistenti a livello nazionale.*”

Articolo 74: “*gli Stati membri stabiliscono livelli di riferimento nazionali per le concentrazioni di radon in ambienti chiusi. I livelli di riferimento per la media annua della concentrazione di attività in aria non devono essere superiori a 300 Bq/m³.*”

Decreto ministeriale n. 381/98 – campo elettromagnetico [17]

Il decreto emana delle norme per la determinazione dei tetti di radiofrequenza compatibili con la salute umana.

Circolare Ministero della Sanità n. 23/91 – fibre di vetro isolanti [18]

Con la presente circolare vengono emanate delle linee guida per il corretto uso delle fibre di vetro isolanti.

Legge n. 3/2003 – fumo passivo

Nell'articolo 51 della presente legge viene il divieto di fumo a tutti i locali chiusi, con le sole eccezioni dei locali riservati ai fumatori e gli ambiti strettamente privati.

Il divieto di fumo nelle aule scolastiche era stato già introdotto con la Legge n. 584/75 ed esteso successivamente ad ogni pertinenza scolastica aperta al pubblico con la direttiva P.C.M. 14/12/1995.

Ecolabel UE

Ecolabel UE è un marchio di qualità ecologica istituito nel 1992 dal Regolamento n. 880/92 ed oggi disciplinato dal Regolamento (CE) n. 66/2010 in vigore nei 28 Paesi dell'Unione Europea e nei Paesi appartenenti allo Spazio Economico Europeo – SEE (Norvegia, Islanda, Liechtenstein), applicato a tutti i beni destinati alla distribuzione, al consumo o all'uso sul mercato comunitario, ad eccezione dei medicinali (non ha valore legislativo).

Rappresenta uno strumento volontario di etichettatura dei prodotti che tiene conto degli impatti ambientali dei prodotti o servizi lungo l'intero ciclo di vita; indirizza il consumatore verso acquisti a basso impatto ambientale in quanto i marchi ecologici impongono degli standard ambientali superiori a quelli previsti dalla legge vigente.

I materiali certificabili con Ecolabel UE sono: rivestimenti del suolo a base di legno, sughero e bambù, vernici, mobili, prodotti tessili e per la pulizia di superfici dure.

1.1.3.2 Controllo delle concentrazioni degli inquinanti

La seconda strategia da attuare parallelamente a quella già descritta prevede il controllo delle concentrazioni degli inquinanti presenti all'interno mediante un'adeguata ventilazione degli ambienti, naturale o meccanica, e una pulizia e sanificazione dei locali.

L'utilizzo della ventilazione naturale, tramite l'apertura periodica di superfici aeranti (in genere le finestre) durante la giornata, favorisce un'areazione dei locali contribuendo a mantenere una buona qualità dell'aria ma presenta degli aspetti negativi non trascurabili.

La prima criticità della ventilazione naturale risiede nel fatto che, dovendo aprire delle superfici che implicano lo scambio diretto tra l'aria interna e quella esterna, i consumi energetici per la climatizzazione aumenterebbero in modo non irrilevante, oltre che causare degli sbalzi termici fastidiosi sugli occupanti.

Inoltre, arieggiando naturalmente i locali, non è possibile evitare l'ingresso degli agenti inquinanti dall'ambiente esterno; questo aspetto risulta critico per edifici situati nelle vicinanze di zone con alta concentrazioni di contaminanti come strade altamente trafficate, cantieri edili o insediamenti produttivi, che andrebbero ad aumentare le concentrazioni di inquinanti indoor, provocando l'effetto contrario di quello desiderato.

Un'ulteriore discomfort è rappresentato dai rumori dell'ambiente esterno che pregiudicherebbero le attività svolte all'interno.

Alla luce di quanto descritto è evidente che la ventilazione naturale non è la soluzione più appropriata per controllare la concentrazione degli inquinanti.

L'utilizzo della ventilazione meccanica controllata (VMC) permette di ovviare ai problemi riscontrabili con la ventilazione naturale.

La VMC permette di diluire la concentrazione interna degli inquinanti tramite l'immissione di aria esterna "pulita", ovvero filtrata in modo da ridurne al minimo la percentuale di inquinanti, e la contemporanea estrazione di aria viziata dal locale. L'utilizzo di questa tecnologia, dunque, garantisce portate d'aria continuative di immissione/estrazione in quantità prestabilite e permette di variare tali portate in funzione delle condizioni ambiente (variazione dell'umidità ambiente, presenza o meno delle persone, ecc.).

Altro vantaggio è l'adozione di appropriate tecniche di filtrazione, scelte in relazione delle caratteristiche dell'ambiente da trattare, che permettono di ridurre determinate percentuali di contaminanti presenti nell'aria esterna da immettere nel locale (la filtrazione dell'aria verrà trattata successivamente).

La ventilazione meccanica controllata risulta quindi essere il sistema più adatto per garantire il ricambio d'aria necessario ai fini della I.A.Q.

Oltre alla ventilazione, per controllare e dunque limitare la concentrazione degli inquinanti indoor, è necessario procedere alla pulizia e sanificazione dei locali; in questa maniera si riesce a togliere le polveri che si depositano sul pavimento e sugli arredi, contenenti allergeni di varia natura, provenienti dai materiali da costruzione e dai rivestimenti, dalle attività svolte nel locale, dall'aria esterna, dalle persone e dal loro abbigliamento.

1.2 COVID-19: caratteristiche e strategie per contrastarne la trasmissione

I virus rappresentano una delle cause più comuni di malattie infettive trasmesse negli ambienti interni, soprattutto a causa della loro contagiosità e resilienza ambientale.

Verso la fine del 2019 è stato scoperto un nuovo ceppo del coronavirus, denominato SARS-CoV-2 (sindrome respiratoria acuta grave coronavirus 2), che, nel giro di poco tempo, si è diffuso facendo riscontrare contagiati in tutte le parti del mondo ed obbligando l'OMS a dichiarare lo stato di pandemia globale l'11 marzo del 2020.

Questo virus provoca sintomi polmonari acuti, portando a una condizione che è stata denominata "malattia da coronavirus 2019" (COVID-19).

Le organizzazioni competenti si sono immediatamente mobilitate per trovare delle soluzioni e misure di contenimento del rischio di trasmissione del virus, con particolare attenzione agli ambienti indoor dove la probabilità di contagio risulta maggiore che all'esterno.

1.2.1 Persistenza e trasmissione del virus

Prima di parlare delle possibili soluzioni da attuare al fine di mitigare il rischio di contagio da SARS-CoV-2, è necessario comprendere le modalità con cui tale virus si può diffondere negli ambienti confinati e le sue caratteristiche di permanenza indoor; dopodiché si possono studiare tutte le strategie attuabili per il suo contenimento.

Dall'evidenza scientifica sono stati riscontrati tre metodi di trasmissione del virus:

- Trasmissione attraverso droplet: con il termine droplet vengono indicate le goccioline respiratorie, con diametro maggiore di $100\ \mu\text{m}$, prodotte dalle vie aeree superiori di un soggetto che vengono diffuse da tosse e/o starnuti, o anche dal cantare o parlare con enfasi. Queste goccioline, essendo relativamente grandi, seguono una traiettoria balistica e tendono ad atterrare entro 0,16 m-0,68 m quando le persone parlano, 0,58 m-1,09 m tossendo o 1,34 m-2,76 m starnutando (con temperatura dell'aria di $18\ ^\circ\text{C}$ e umidità relativa del 50%) [19].
- Trasmissione indiretta per contatto: avviene per contatto delle mucose con le mani che sono state infettate tramite il contatto con superfici dove si sono sedimentate le goccioline contenenti il virus.
È dunque importante capire per quanto tempo il virus riesce a resistere, in condizioni ambientali interne, una volta depositatosi su superfici di varia natura. Lo studio svolto da Doremalen et al. Ha dimostrato che il virus resiste fino a 72 ore su plastica e acciaio, 4 ore su rame e 24 ore su cartone (con condizioni di $21\text{-}23\ ^\circ\text{C}$ e 40% di umidità relativa) [20].
- Trasmissione attraverso aerosol: la diffusione via aerosol riguarda le goccioline, di diametro variabile da frazioni di micrometri a circa $100\ \mu\text{m}$, emesse a seguito di generazione dai bronchioli durante la semplice respirazione e per atomizzazione in corrispondenza delle corde vocali e della bocca nel caso di soggetto che parla, tossisce o starnutisce [21]. Queste goccioline, a causa delle loro dimensioni ridotte, permangono in aria per tempi prolungati e, sotto l'influenza del movimento delle persone, della ventilazione naturale dell'aria e di quella forzata indotta anche dagli impianti, possono essere trasportate e inalate da soggetti distanti dal punto di emissione.

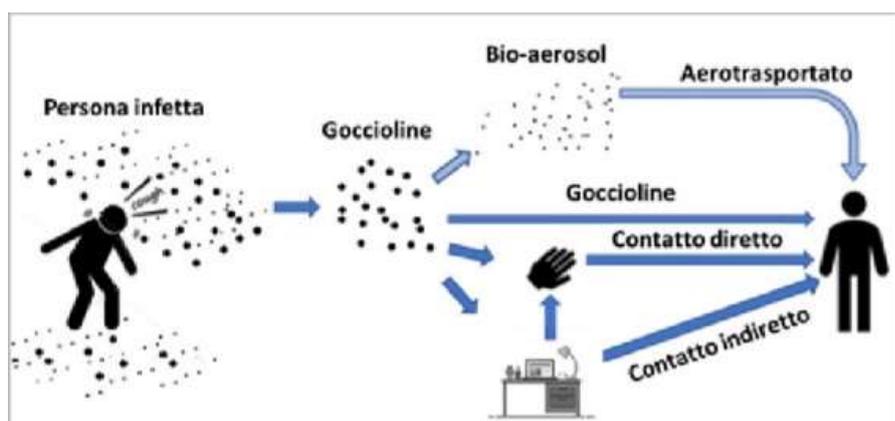


Figura 1.3 – Schematizzazione delle vie di trasmissione del virus

Sulla base di diversi studi compiuti riguardo i meccanismi di trasmissione del SARS-CoV-2, gli organismi internazionali attribuiscono alla via aerea tramite aerosol la modalità rilevante di contagio.

A supporto di tale tesi abbiamo i lunghi tempi di permanenza in aria ambiente delle goccioline con dimensioni minori di 100 μm (tempi crescenti al diminuire della dimensione), come riportato nella seguente tabella del rapporto ISS n. 33/2020 [22], e la bassa probabilità di contagio attraverso il contatto con superfici, come specificato nel rapporto ISS n. 12/2021 [23].

Tabella 1.2 – Destino delle goccioline emesse durante la respirazione, la tosse, lo starnuto o attività similari [22]

Diametro droplet (μm)	Tempo di sedimentazione entro 5 "feet" (1,524 m)	Tempo di evaporazione a 18°C e U.R. 50%	Classificazione	Destino stimato	Rischio stimato
0,5	24-41 h	0,0 s	Small droplet	Evaporano prima di cadere al suolo, con eventuale formazione di bioaerosol di droplet nuclei	Carica infettante potenziale minima ma di lunga durata in aria in ambiente chiuso
1	7~12,0 h	0,0 s			
2	2,2~3,1 h	0,0 s			
3	1,1~1,5 h	0,0 s			
5	26~31 min	0,1 s			
10	7,9~8,2 min	0,2 s			
20	2,2~2,3 min	0,8 s	Medium droplet	Sedimentano al suolo prima di evaporare entro una gittata che dipende dalla velocità di emissione	Carica infettante potenziale media dipendente dalle condizioni ambientali (temperatura, umidità, turbolenza, ecc.)
50	22,5~28,6 s	4,5 s			
80	9,1~12,6 s	10,9 s			
100	5,8~8,6 s	16,5 s	Large droplet	Sedimentano al suolo entro breve distanza	Carica infettante potenziale elevata ma di brevissima durata in aria
160	2,4~3,8 s	39,8 s			
200	1,6~2,6 s	60,4 s			
500	0,3~0,5 s	5,6 min			
1000	0,1~0,2 s	21 min			

Modificata da: Xie, et al. How far droplets can move in indoor environments - revisiting the Wells evaporation-falling curve. *Indoor Air*. 2007;17(3) 211-225. doi:10.1111/j.1600-0668.2007.00469.x e da ASHRAE Position Document on Infectious Aerosols Approved by ASHRAE Board of Directors April 14, 2020

Queste small droplet o goccioline di aerosol, oltre a permanere per molto tempo negli ambienti indoor, sono anche le particelle maggiormente emesse dalle persone; nello specifico, da un punto di vista probabilistico, la maggior parte delle emissioni in forma particellare si trova nella gamma dei diametri compresi tra 2 e 24 micron, ossia in quelle goccioline che permangono a lungo in sospensione (come riportato dallo stesso rapporto dell'ISS).

Negli ambienti interni, quindi, i contagi si possono verificare anche a distanza di metri dal soggetto infetto attraverso l'inalazione di particelle cariche di virus trasportate dall'aria in locali non correttamente aerati o con un trattamento dell'aria inadeguato.

Pertanto, ad oggi, gli organismi internazionali si focalizzano soprattutto sulla modalità di trasmissione aerea, ponendo maggiore attenzione sulla sanificazione dell'aria e dell'ambiente indoor tramite un'appropriata ventilazione dei locali.

1.2.2 Misure da attuare per limitare la diffusione del virus indoor

Dall'analisi della recente letteratura e dai rapporti in merito al Covid-19 dell'Istituto Superiore di Sanità (ISS) è evidente che il numero di contagi all'aperto risulta trascurabile rispetto alla trasmissione negli ambienti chiusi e che la maggior probabilità di trasmissione del contagio si ha per via aerea. Alla base di ciò è indispensabile focalizzarsi e realizzare degli interventi di mitigazione del rischio relativamente alla trasmissione aerea negli ambienti indoor.

Per fronteggiare la diffusione del virus SARS-CoV-2 negli ambienti interni è fondamentale garantire un'adeguata I.A.Q. tramite il ricambio dell'aria interna con aria esterna, o aria di ricircolo trattata (non contenente particelle virali) che può essere effettuato con la ventilazione naturale o con quella meccanica.

Una ventilazione appropriata e un regolare ricambio d'aria, oltre che per mantenere condizioni di comfort, sono necessari per garantirne la salubrità riducendo la concentrazione di particolato e inquinanti di natura biologica (tra cui anche i virus).

In questo periodo storico l'argomento della qualità dell'aria indoor ha assunto un ruolo principale, facendo riscontrare delle criticità in molti edifici, tra cui quelli scolastici, dove, spesso, il sistema di ventilazione meccanica controllata risultava assente o inadeguato a contrastare la diffusione del virus.

Diverse organizzazioni si sono espresse a riguardo, dettando delle linee guida con lo scopo di migliorare le condizioni degli ambienti interni.

In particolare l'OMS, a marzo 2021, nella linea guida tecnica "Roadmap to improve and ensure good *indoor* ventilation in the context of COVID-19", ha riportato indicazioni in merito alla ventilazione all'interno degli edifici per migliorare la qualità dell'aria riducendo il rischio di diffusione del virus negli ambienti interni; come indicazione di massima, l'OMS raccomanda l'utilizzo di un flusso di aria di almeno 10 L/s/persona nei diversi ambienti indoor [24].

A livello nazionale l'ISS si è mobilitato per fornire delle indicazioni utili a prevenire il contagio; in particolare nel rapporto ISS COVID-19 n. 11/2021 [25] vengono implementate delle strategie che tengono conto delle misure di contenimento e contrasto alla diffusione del virus, sia in ambienti domestici che in quelli lavorativi (tra cui anche gli edifici scolastici). Tra le varie misure da adottare, oltre all'utilizzo dei dispositivi di protezione individuale (mascherine certificate), al distanziamento sociale ed alla sanificazione degli ambienti con appositi prodotti, viene conferito un ruolo principale alla ventilazione degli ambienti interni. Nel rapporto viene consigliato di garantire un buon ricambio d'aria con mezzi naturali o meccanici in tutti gli ambienti dove sono presenti persone, con l'obiettivo di favorire l'apporto di aria primaria esterna per diluire e ridurre le concentrazioni di inquinanti presenti nell'aria indoor.

Per gli edifici che non dispongono di un impianto di ventilazione, l'ISS consiglia di aprire le finestre che si affacciano su strade meno trafficate, più volte al giorno, effettuando una ventilazione intermittente ed incrociata.

Negli edifici dotati di impianti di ventilazione, l'ISS consiglia di eliminare, ove possibile, la funzione di ricircolo dell'aria per evitare l'eventuale trasporto di agenti chimici e biologici,

peggiorando la qualità dell'aria interna. Nei casi in cui non sia possibile disattivare la quota di ricircolo, si raccomanda di ridurla il più possibile a favore dell'immissione di aria esterna "pulita".

La sezione di ricircolo dell'impianto dovrà essere dotata di un adeguato sistema filtrante in grado di trattenere una certa quota di materiale particellare, così da ridurre il rischio di contagio nei locali. Nello specifico la filtrazione dovrà essere effettuata tramite filtri ad altissima efficienza chiamati *High Efficiency Particulate Air filter* (HEPA) o *Ultra Low Penetration Air* (ULPA), classificati secondo la norma UNI EN 1822/2019; tale tipologia di filtrazione è riconosciuta come affidabile e in grado di abbattere con efficienze superiori al 99,97% il particolato con dimensione di riferimento 0,3 μm .

A sostegno delle linee guida del rapporto dell'ISS troviamo uno studio pubblicato sul sito della Federazione Regionale degli Ordini degli Ingegneri della Toscana [26] che, tramite un modello matematico, simula una situazione tipo in cui è presente una sorgente di contagio all'interno di un locale dotato di impianto di ventilazione.

Lo scopo della simulazione è quello di comprendere le dinamiche che regolano la concentrazione dell'inquinante nel locale per varie configurazioni dell'impianto di ventilazione; nello specifico, ha come obiettivo quello di conoscere se il ricircolo determina una diminuzione o meno della concentrazione dell'inquinante nel tempo, dimostrandolo matematicamente, in quanto, come scientificamente assodato, le particelle aerosolizzate contenenti il virus rimangono in sospensione nell'aria per molto tempo col rischio che le stesse possono essere catturate e veicolate all'interno dell'eventuale impianto di estrazione con ricircolo.

Per la simulazione viene utilizzato il seguente schema locale-impianto (Figura 1.4).

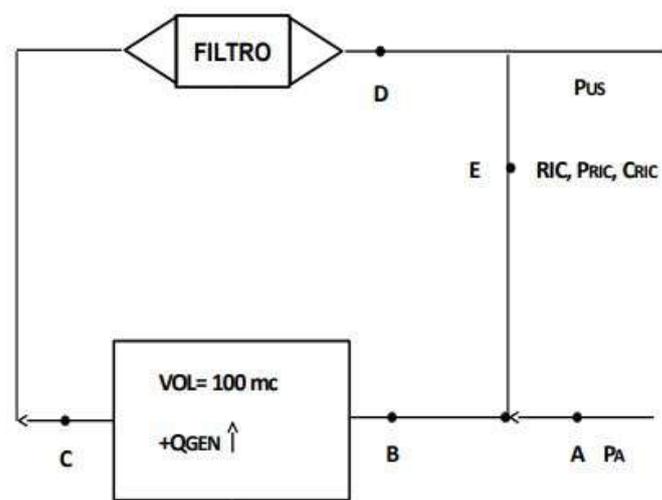


Figura 1.4 – Schema semplificato del sistema locale-impianto

La simulazione è stata svolta facendo uso di un semplice modello matematico che simula i bilanci materiali che avvengono tra ciascuna sezione del sistema schematizzato nella figura sopra e che descrive gli effetti sulla concentrazione dell'inquinante variando la configurazione dell'impianto del locale, all'interno del quale viene ipotizzata una sorgente di contagio (capace di liberare X cariche virali/h) identificata come Q_{GEN} .

Dalle simulazioni è stato ricavato il seguente grafico che mostra una rappresentazione del profilo di concentrazione dell'inquinante per cinque diversi casi.

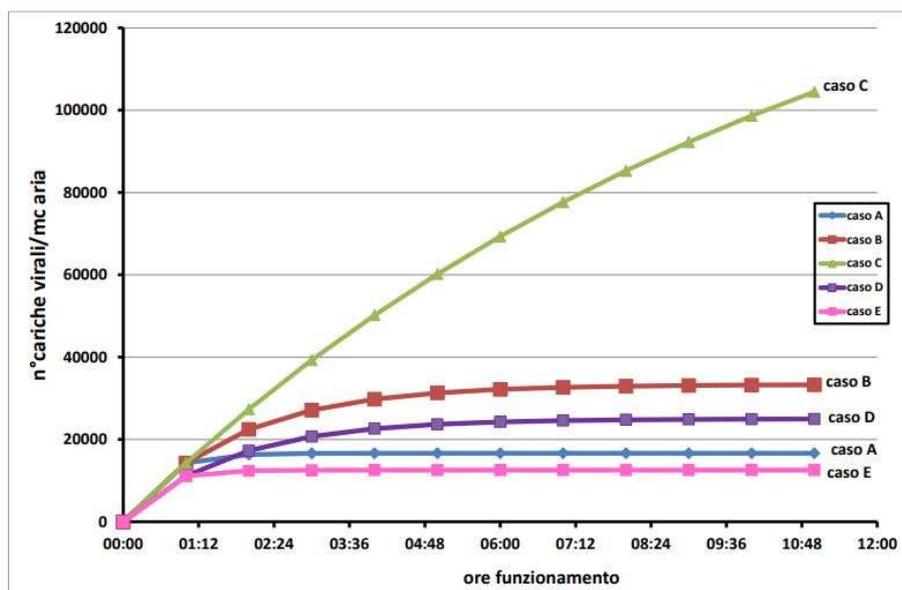


Figura 1.5 – Rappresentazione del profilo di concentrazione nei casi descritti

I casi considerati, rappresentati nel grafico, vengono descritti di seguito:

- Caso A) Tutta aria esterna con la quale si garantiscono 8 ricambi del volume del locale con aria esterna “pulita”.
- Caso B) Si mantengono i volumi totali di aria immessa nel locale (6 ricambi), ma si riduce al 50% la quota di aria pulita prelevata dall'esterno a vantaggio del ricircolo.
- Caso C) Si mantengono i volumi totali di aria reimpressa nel locale (6 ricambi), ma si riduce ulteriormente fino al 10% la quota relativa all'aria pulita esterna a vantaggio del ricircolo.
- Caso D) Si portano i ricambi di aria pulita prelevata dall'esterno ed immessa nel locale da 8 a 6.
- Caso E) Si ipotizza di operare garantendo di immettere gli 8 volumi di aria all'interno del locale, ma si riduce la quota prelevata pulita dall'esterno al 50% a vantaggio del ricircolo; in questo caso viene ipotizzato però di sottoporre l'aria alla purificazione attraverso l'uso di un idoneo sistema (es. filtro assoluto con aggiunta di una sezione di sterilizzazione).

Dal lavoro svolto si può dedurre che attuare una ventilazione chiudendo la rete di ricircolo, immettendo quindi solo aria esterna pulita, giustifica la scelta operata dall'ISS di indicare la chiusura della serranda del ricircolo come azione di massima sicurezza per gli occupanti.

Altra soluzione, da attuare nel momento in cui non è possibile chiudere la rete di ricircolo o in cui si voglia mantenere una buona efficienza energetica, può essere quella di chiudere solo parzialmente il ricircolo dotandolo di una sezione di filtrazione dell'aria adeguata, così da abbattere una buona percentuale delle particelle contaminanti.

Altro studio interessante è quello condotto da Curtius et al. [27], dove è stata testata l'efficacia di quattro purificatori d'aria dotati di filtri HEPA in un'aula scolastica durante il normale svolgimento delle lezioni. Durante le prove hanno monitorato la concentrazione di particelle di aerosol di dimensioni maggiori di 3 nm in due punti della stanza e la distribuzione dimensionale dell'aerosol nell'intervallo da 10 nm a 10 μm .

I test sono stati eseguiti con purificatori d'aria mobili disponibili in commercio (Philips modello 2887/10) dotati di filtri HEPA (High Efficiency Particulate Air Filter) che rimuovono oltre il 99,97% delle particelle nella gamma di dimensioni da 0,1 a 0,3 μm secondo il produttore (DOE STD 3020 2015) e di prefiltri per rimuovere efficacemente la polvere grossolana.

I risultati delle prove mostrano che la concentrazione di aerosol si riduce di oltre il 90% in meno di 30 minuti, con un tasso di ricambio d'aria dei purificatori di 5,5 h^{-1} , rispetto ad un'aula senza sistemi di ventilazione; inoltre la riduzione è stata omogenea in tutta la stanza e per tutte le dimensioni delle particelle di aerosol.

I ricercatori hanno anche stimato che la dose di virus inalata, nella stanza dotata dei purificatori, si riduce di un fattore 3,5 dopo 1 ora e di un fattore 6,3 dopo 2 ore rispetto alla dose inalata in un'aula senza ventilazione.

In conclusione l'utilizzo di sistemi di ventilazione, se correttamente progettati e dimensionati, coniugando correttamente la necessità dei ricambi d'aria e l'efficienza energetica, rappresenta un'azione necessaria per ottenere e mantenere una buona qualità dell'aria indoor contribuendo a ridurre i rischi di esposizione e contaminazione dal virus.

1.3 Fluidodinamica computazionale

1.3.1 Introduzione alla CFD

La fluidodinamica computazionale, (CFD, Computational Fluid Dynamics in inglese), è un ramo della meccanica dei fluidi che utilizza algoritmi numerici per simulare, analizzare e risolvere sistemi che coinvolgono flussi di fluidi, scambio di calore e fenomeni a loro relativi. La CFD è caratterizzata da una elevata versatilità e le analisi numeriche consentono di esaminare fenomeni fluidodinamici di vario genere con un costo di realizzazione relativamente basso e con tempi ridotti rispetto alle analisi sperimentali.

Per tale ragione le analisi CFD affiancano sempre di più gli studi sperimentali che, a volte, risultano difficili da investigare con le tecniche tradizionali essendo caratterizzati da elevati costi di realizzazione e ridotta flessibilità del setup sperimentale.

Inoltre, negli esperimenti tradizionali, si viene a conoscenza del fenomeno fisico attraverso la misurazione di una grandezza per volta, per un numero limitato di punti e istanti di tempo, su un modello in scala e per un range di condizioni di funzionamento limitato; con le simulazioni CFD, invece è possibile monitorare tutte le grandezze desiderate, per un numero idealmente illimitato di punti, per le dimensioni reali del modello e per ogni condizione di funzionamento desiderata.

In passato, negli anni '70 e '80, la CFD veniva utilizzata principalmente nell'ambito della ricerca poiché c'era mancanza di adeguate risorse computazionali.

Ad oggi, grazie allo sviluppo di algoritmi computazionali e di software CFD commerciali, tale tecnica è largamente utilizzata da ricercatori ed ingegneri per affiancare e complementare studi teorici e sperimentali nelle attività di ricerca, sviluppo e progettazione in svariati settori.

La fluidodinamica computazionale viene utilizzata in tutti quei campi in cui si riscontrano problematiche che coinvolgono l'azione di fluidi, come, ad esempio, nel settore aerospaziale, automobilistico, ambientale, high tech, chimico, biomedico, impiantistico ed edilizio.

I programmi CFD sono strutturati attorno agli algoritmi numerici, da risolvere in maniera iterativa nel dominio spaziale definito, che affrontano i problemi di flusso del fluido. Qualsiasi codice numerico di CFD, e quindi ogni simulazione che si effettua, è caratterizzato da tre sezioni o fasi, legate da una relazione gerarchica, mediante la quale si definisce l'analisi da effettuare e i risultati che è necessario ottenere.

- Pre-processing
- Solving, o fase di calcolo
- Post-processing

Le tre fasi verranno descritte più approfonditamente di seguito.

1.3.1.1 Pre-processing

Nella prima sezione, detta pre-processing, si introduce il problema di flusso nel programma tramite la definizione della geometria, la definizione del dominio computazionale, la definizione delle condizioni al contorno e la discretizzazione dell'ambiente in analisi, ovvero la creazione della mesh.

Con la generazione della mesh si discretizza, suddivide, l'intero volume del modello geometrico in tanti piccoli volumetti, chiamati elementi o celle, connessi tra di loro senza intersezioni. Essa localizza la posizione dei punti in cui le variabili del problema andranno calcolate mediante le equazioni del moto dei fluidi.

La generazione della griglia è un processo fondamentale per la buona riuscita di una simulazione. Inoltre la sua qualità incide fortemente sulla correttezza e sulla stabilità del calcolo. Generalmente più grande è il numero di celle in cui il dominio è suddiviso, migliore sarà la precisione della soluzione, ma aumenterà anche il tempo computazionale necessario per il calcolo. È dunque fondamentale trovare un compromesso, nella definizione della mesh, tra il costo computazionale e la validità e attendibilità dei risultati mediante un'analisi dell'indipendenza dei risultati dalla griglia.

Esistono tre tipologie di griglie di calcolo:

- Griglia strutturata: è regolare ed è caratterizzata da elementi di forma rettangolare o quadrangolare per geometrie bidimensionali e da prismi o esaedri per quelle tridimensionali. I nodi sono punti di intersezione tra linee griglia parallele che devono attraversare tutto il dominio e intersecano famiglie di linee differenti una sola volta. Tale griglia velocizza i tempi di calcolo ma può essere utilizzata solo per geometrie semplici.

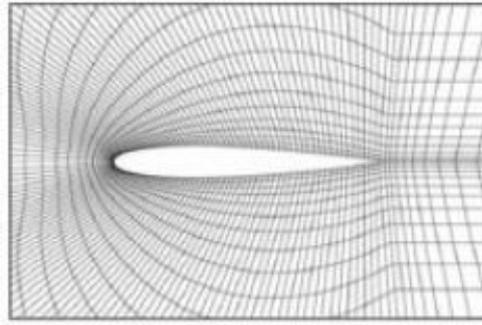


Figura 1.6 – Esempio di griglia strutturata

- Griglia non strutturata: è caratterizzata da elementi triangolari o quadrangolari per geometrie bidimensionali e da tetraedri o esaedri per quelle tridimensionali. Tale griglia può essere utilizzata anche per geometrie complesse e flessibili e permette di infittire facilmente le zone di maggiore interesse, ma richiede maggiore memoria e tempo di calcolo a causa del fatto che la struttura non è regolare.

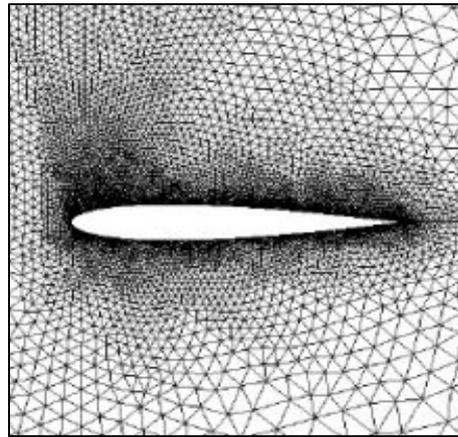


Figura 1.7 – Esempio di griglia non strutturata

- Griglia ibrida: è formata dalla combinazione di una griglia strutturata ed una non strutturata, dunque con tipi di celle diverse a seconda della necessità. Lo svantaggio è il tempo richiesto che risulta maggiore dei precedenti.

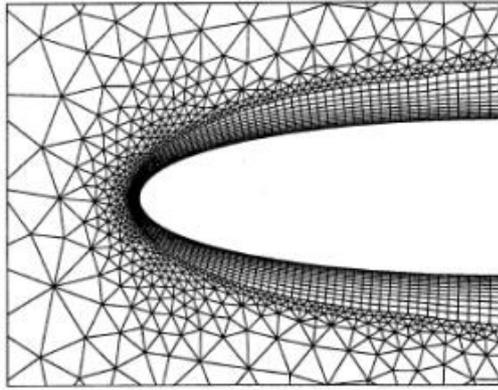


Figura 1.8 – Esempio di griglia ibrida

1.3.1.2 Solving

La fase di calcolo prevede la definizione delle sostanze impiegate, la definizione delle condizioni al contorno e delle condizioni operative e la definizione dei metodi numerici da utilizzare per la risoluzione delle equazioni governanti il moto di un fluido. Consiste nel discretizzare le equazioni di trasporto sulla mesh per poi risolverle. Tali equazioni, dette di Navier-Stokes, che descrivono come pressione, velocità, densità e temperatura di un fluido in movimento sono relazionate, si basano su tre principi fondamentali: conservazione della massa, conservazione della quantità di moto e conservazione dell'energia.

L'applicazione di questi metodi, chiamata discretizzazione, permette di approssimare le equazioni differenziali alle derivate parziali governanti della meccanica dei fluidi, trasformandole in un sistema di equazioni algebriche. La soluzione ad un problema (velocità, pressione, temperatura, ecc.) è definita nel nodo all'interno di ogni volume di controllo, detto centroide, e, perciò, risulta discretizzata nello spazio e nel tempo.

Vi sono tre metodi di discretizzazione:

- Metodo delle differenze finite: è il metodo più semplice; le derivate sono sostituite con il loro rapporto incrementale. I termini differenziali dunque diventano algebrici.
- Metodo degli elementi finiti: si suddivide il volume in elementi finiti a cui si approssima la soluzione con una combinazione lineare di funzioni.
- Metodo dei volumi finiti: è il metodo più utilizzato in CFD. È basato sull'integrazione delle equazioni differenziali alle derivate parziali in un volume di controllo, sulle superfici del quale sono imposte le condizioni al contorno.

Le condizioni al contorno sono applicate sulle superfici del volume di controllo e specificano i valori che una variabile deve assumere al contorno del dominio. L'imposizione delle condizioni al contorno ad un'equazione differenziale è necessaria per determinare una delle infinite soluzioni possibili.

1.3.1.3 Post-processing

La terza sezione, detta post-processing, consiste nell'elaborazione dei risultati ottenuti esprimendoli mediante un'interfaccia grafica al fine di renderne più semplice l'interpretazione; si possono quindi estrapolare le rappresentazioni grafiche, di facile comprensione, dei valori di tutte le variabili come temperatura, velocità, pressione, ecc.

1.3.1.4 Turbolenza

Il moto di un fluido può essere laminare o turbolento. Il moto è definito laminare quando le particelle di fluido scorrono le une sulle altre senza miscelarsi ed è governato dalle forze viscosi, mentre le forze di inerzia sono trascurabili; dunque è un moto stazionario. Nel moto turbolento le forze di inerzia riescono a sovrastare le forze viscosi e l'aumento di velocità e le fluttuazioni delle pressioni rendono il moto tridimensionale. In regime turbolento le piccole perturbazioni tendono a intensificarsi e portano il movimento del fluido a cambiare continuamente direzione; si creano dei vortici che sono la causa principale di una forte miscelazione tra le specie presenti. Il fenomeno turbolento risulta essere molto complicato e difficile anche da definire infatti il movimento del fluido in tale regime è molto complesso. La risoluzione delle equazioni applicate a casi reali, che per la maggior parte delle volte presentano flussi di natura turbolenta, richiede necessariamente un approccio numerico. Tra i modelli di risoluzione della turbolenza troviamo:

- Modello Direct Numerical Simulation (DNS): è l'approccio più semplice. Risolve in maniera esplicita le equazioni simulando i flussi turbolenti con elevata accuratezza nei risultati ottenuti. È la soluzione numerica delle equazioni di bilancio di Navier-Stokes dipendenti dal tempo senza utilizzo di alcuna semplificazione dunque senza l'utilizzo di modelli turbolenti. L'assenza del modello di turbolenza implica che la simulazione si ottiene risolvendo numericamente tutte le scale spaziali e temporali di turbolenza, e dunque ha la migliore precisione come metodo. Tuttavia, richiede un elevato costo computazionale ed economico poiché richiede l'utilizzo di un computer con elevate caratteristiche. Tale modello oggi si utilizza solamente in ambito di ricerca e accademico.
- Modello Large Eddy Simulation (LES): calcola numericamente le strutture più grandi di una dimensione scelta come caratteristica e quelle inferiori sono invece modellate con i modelli di turbolenza. Si ha dunque la descrizione diretta del moto dei grandi vortici che compongono la turbolenza. Il costo computazionale è notevolmente ridotto rispetto al precedente ma più elevato rispetto al modello RANS.
- Modello Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS): considera le proprietà istantanee del flusso di un regime turbolento come pressione e velocità decomposte nella componente media e fluttuante con il tempo. Si ottiene dunque un sistema di equazioni alle derivate parziali semplificate. Descrive dunque il flusso medio. Tale modello ha dunque un basso costo computazionale ma rispetto ai modelli DNS e LES ha minore accuratezza e richiede modelli di turbolenza per la risoluzione del problema. Il tempo richiesto da un modello RANS, come dimostrato in, è un decimo

rispetto al tempo richiesto dalle simulazioni LES e DES. Grazie al basso costo computazionale e la sua semplicità e robustezza è il modello più utilizzato nei modelli trattati simili al nostro caso studio.

Ci sono due differenti tipologie di modelli RANS: modello ad una equazione e modello a due equazioni; tali equazioni sono da aggiungere a quelle di Navier-Stokes per la chiusura del problema. Il modello con una singola equazione è caratterizzato da un'unica equazione di trasporto addizionale, solitamente per il calcolo dell'energia cinetica di turbolenza k . I modelli a due equazioni utilizzano due equazioni di trasporto per calcolare due proprietà della turbolenza, solitamente la prima proprietà è sempre l'energia cinetica turbolenta k , mentre la seconda varia.

1.3.2 L'analisi CFD applicata agli impianti di ventilazione

L'analisi CFD, inizialmente, veniva utilizzata in ambito industriale per la progettazione e analisi di componenti; tuttavia, grazie ai vantaggi che può introdurre, l'uso della fluidodinamica computazionale nel settore edilizio è aumentato nel corso degli ultimi anni. I software CFD rappresentano un importante strumento di supporto alla progettazione in quanto, fornendo una descrizione dettagliata dei flussi d'aria, favoriscono un'analisi approfondita dell'ambiente termico, della ventilazione, del comfort e della qualità dell'aria interna (I.A.Q.).

In particolare, affiancando delle analisi fluidodinamiche alla progettazione dei sistemi di ventilazione, si possono comprendere al meglio le dinamiche dei flussi d'aria così da ottimizzare l'impianto in termini di prestazioni ed efficacia.

Nella recente letteratura si trovano molti studi incentrati sul supporto alla progettazione degli impianti di ventilazione meccanica mediante l'analisi delle dinamiche dei flussi d'aria con software CFD; dalle simulazioni effettuate, ricercatori e progettisti individuano le soluzioni migliori da adottare nella configurazione dell'impianto al fine di ottimizzarne i ricambi d'aria ed ottenere ottime prestazioni in termini di I.A.Q. e comfort ambientale (ad es. temperatura e velocità dei flussi d'aria).

N. Mao et al. [28] ha valutato le prestazioni di un sistema di condizionamento dell'aria di una camera da letto, variando l'altezza delle bocchette di immissione ed estrazione, tramite analisi CFD; si è riscontrato che, variando la configurazione delle bocchette, si ottengono schemi del flusso d'aria molto diversi tra loro, influenzando le prestazioni dell'impianto. Grazie alle analisi fluidodinamiche si è trovata la posizione migliore delle bocchette al fine di ottimizzare il risparmio energetico e la rimozione della CO_2 .

Chen et al. [29] ha studiato, tramite analisi CFD, le prestazioni di ventilazione di quattro diversi dispositivi di immissione dell'aria in un ufficio, trovando quello più appropriato.

J. Mou et al. [30] ha analizzato un'aula seminari dotata di un sistema di ventilazione a domanda controllata per ottimizzarne il controllo; il sistema di controllo attiva l'impianto quando i sensori leggono una concentrazione di CO_2 sopra un limite preimpostato, così da mantenere un'adeguata I.A.Q.; lo scopo della ricerca è quello di individuare la corretta posizione per l'installazione dei sensori in quanto la qualità dei dati misurati incide sull'efficacia di tale sistema di controllo. È stata quindi condotta un'analisi fluidodinamica

computazionale per studiare le caratteristiche del flusso d'aria e le distribuzioni di CO₂ dovute agli occupanti e per poter poi ricavare il giusto posizionamento dei sensori.

L'analisi fluidodinamica computazionale può essere applicata per la valutazione e lo studio di impianti di molteplici destinazioni d'uso, come abitazioni, scuole, musei, ospedali, uffici, grandi sale aperte al pubblico, ecc.

Un'applicazione della CFD di relativa importanza per questo lavoro riguarda l'analisi degli impianti di ventilazione degli edifici scolastici, ponendo particolare attenzione al benessere ambientale degli alunni nelle aule.

L'aspetto della ventilazione delle aule scolastiche è divenuto un argomento di rilevante importanza in seguito alla recente pandemia da SARS-CoV-2, a causa della quale sono state rilevate delle carenze impiantistiche nella maggior parte degli edifici scolastici (riferendosi alla situazione italiana), alle quali si associa una scarsa qualità dell'aria interna; la ventilazione, di solito, non è adeguatamente progettata e si basa tipicamente sulla ventilazione naturale e sull'aerazione manuale: quindi, la qualità dell'aria interna dipende dalle perdite d'aria dell'edificio e dalla percezione personale delle persone che gestiscono l'edificio. Si devono quindi tenere in conto, come descritto nel capitolo 1.1 relativo alla I.A.Q., tutte le problematiche che possono insorgere negli alunni frequentanti aule con una scarsa qualità dell'aria interna.

È nata quindi la necessità di prevedere degli interventi di adeguamento o di installazione, ove assente, dell'impianto di ventilazione nelle aule scolastiche.

L'analisi fluidodinamica computazione può, dunque, risultare molto utile negli interventi futuri appena descritti, o nel progetto di un nuovo edificio, come supporto alla progettazione; può assumere un ruolo importante poiché permette di studiare la configurazione dell'impianto così da ottimizzarne le prestazioni e garantire un benessere ambientale agli occupanti.

Nella letteratura degli ultimi anni sono presenti studi effettuati in merito all'uso della CFD, sia a livello nazionale che internazionale, per studiare e migliorare le prestazioni degli impianti di ventilazione nelle aule scolastiche.

KC Noh et al. [31] ha valutato le prestazioni di ventilazione, in termini di età media dell'aria e concentrazione di CO₂, di un aula dotata di un condizionatore d'aria a soffitto del tipo a cassetta a 4 vie e di un sistema di ventilazione composto da quattro diffusori, quattro estrattori ed un recuperatore di calore; per le valutazioni delle prestazioni del sistema sono stati svolti studi sperimentali e numerici, mediante l'utilizzo di un software per analisi fluidodinamiche computazionali. Nelle misurazioni sperimentali sono stati rilevati i valori delle concentrazioni di CO₂ e dell'età media dell'aria in nove precisi punti dell'aula; al fine di valutare le prestazioni del dispositivo di condizionamento, le portate del sistema di ventilazione meccanica sono state mantenute costanti e pari a 800 m³/h durante l'acquisizione delle misure, mentre le portate del condizionatore a soffitto sono state variate da 0 a 1600 m³/h. Per superare le limitazioni introdotte dalle misurazioni sperimentali sono state svolte delle analisi numeriche tramite il software STAR-CD; al fine di convalidare il modello CFD sono stati confrontati i risultati delle simulazioni numeriche e dei dati sperimentali per gli stessi casi, ovvero misurazione delle concentrazioni di CO₂ e delle velocità dell'aria nei nove punti prescelti e per portate d'aria del condizionatore a cassetta di 0 e 1600 m³/h. Successivamente il modello convalidato è stato utilizzato per la valutazione di diversi scenari, variando la portata del condizionatore a cassetta a 4 vie da 0 a 1600 m³/h, il numero di persone considerate da 20 a 30 e la portata del sistema di ventilazione meccanica

da 720 a 840 m³/h; gli occupanti sono stati modellati come oggetti rettangolari aventi un'altezza di 1,2 m e un volume di 1,62 m³, con un'emissione di CO₂ emessa pari a 0,014 m³/h. Nella ricerca vengono mostrati i risultati ottenuti del profilo delle distribuzioni di velocità dell'aria e delle concentrazioni di CO₂ sul piano verticale passante per la cassetta a 4 vie, per cinque valori di portata d'aria del dispositivo (0 m³/h, 400 m³/h, 800 m³/h, 1200 m³/h e 1600 m³/h); vengono inoltre riportati i valori medi delle concentrazioni di CO₂ dell'aula, considerando 20 e 30 occupanti e tre diverse portate dell'impianto di ventilazione meccanica (720 m³/h, 800 m³/h e 840 m³/h), per le cinque portate del condizionatore a soffitto elencate precedentemente e le variazioni dell'età media dell'aria in relazione a tre portate di ventilazione meccanica (descritte in precedenza) ed alle cinque portate del dispositivo di condizionamento. Dal lavoro svolto è possibile dedurre che la concentrazione di CO₂ nell'aula diminuisce gradualmente all'aumentare della portata del condizionatore a cassetta a 4 vie fino al valore di 800 m³/h, dopodiché non si notano dei miglioramenti significativi; aumentando invece la portata del dispositivo migliora la distribuzione interna dell'aria, portandola a miscelarsi con maggiore efficacia; nella valutazione dell'età media dell'aria, al contrario, sono stati riscontrati dei modesti peggioramenti del parametro all'aumentare della portata del condizionatore a soffitto.

Yao e Lin [32] hanno effettuato delle simulazioni sperimentali e fluidodinamiche computazionali di un sistema di ventilazione di un'aula scolastica variando la tipologia dei diffusori; nello specifico sono stati utilizzati diffusori circolari, quadrati, forati e a griglia a doppia deflessione. In fase sperimentale, mantenendo una portata costante di 10 ricambi orari ed una temperatura ambiente impostata a 27 °C, sono state misurate la velocità e la temperatura dell'aria in sei determinati punti e per due altezze diverse, 0,1 m e 1,1 m; inoltre sono stati condotti dei test su degli studenti presenti in aula a cui è stato chiesto di fornire una risposta qualitativa delle sensazioni termiche e del comfort per le diverse condizioni sperimentali; per il test è stato adottato un questionario basato sul voto della sensazione termica della scala ASHRAE a 7 punti. Per un'analisi completa sono state svolte delle analisi fluidodinamiche computazionali, col modello RNG $k-\epsilon$ basato sul programma FLUENT, così da riuscire ad esaminare le prestazioni del sistema di ventilazione mantenendo stabili le fonti di calore interne e le condizioni al contorno; in questo studio, il modello CFD è stato validato da risultati sperimentali confrontando i valori delle velocità e delle temperature prese all'altezza di 1,1 m per le sei posizioni di misurazione; tramite le simulazioni numeriche sono stati valutati il profilo di velocità dell'aria, la distribuzione della temperatura dell'aria, l'età media locale dell'aria e le distribuzioni di CO₂ ad un'altezza di 1,1 m da terra. In conclusione in lavoro prevede la valutazione delle prestazioni del sistema di ventilazione, con quattro diversi tipi di diffusore, basata sul comfort termico e sulla qualità dell'aria interna. In linea generale le prestazioni dei quattro diffusori sono tutte accettabili; per quanto riguarda il comfort termico si riscontrano delle prestazioni migliori usando i diffusori circolari e, in minor misura, quelli forati, in quanto riescono a fornire un ambiente termico più uniforme; per quanto riguarda invece la qualità dell'aria interna, l'età media locale dell'aria risulta più alta, e pari a 380 s, nel caso del diffusore circolare rispetto agli altri casi dove si sono riscontrati valori compresi tra 220 e 280 s, a causa del suo inferiore profilo di velocità; riguardo la concentrazione di CO₂, per il diffusore circolare si ha una distribuzione più uniforme rispetto agli altri diffusori, con valori compresi tra 600 e 700 ppm nella zona occupata, mentre per gli altri tre casi si ha una maggiore diluizione nella zona occupata ma maggiori concentrazioni al di fuori. I ricercatori hanno quindi riscontrato, in linea generale, delle prestazioni migliori con l'utilizzo dei diffusori circolari.

Nell'Università Nazionale di Asuncion (Paraguay), P. Kehler et al. [33] ha condotto uno studio della ventilazione meccanica in un'aula della facoltà di ingegneria mediante software CFD; lo scopo della ricerca è quello di assumere una conoscenza dettagliata del modello dei flussi d'aria con l'attuale configurazione del sistema di ventilazione, in vista della riapertura delle attività in presenza post pandemia, e, inoltre, di prevedere dei miglioramenti del sistema o di pianificare un nuovo layout distributivo degli studenti.

G. Efren et al. [34] ha condotto uno studio computazionale per analizzare il flusso d'aria in un'aula universitaria del Dipartimento di Ingegneria Meccanica del Tecnológico Nacional de México, Campus Veracruz, situato nel porto di Veracruz, in Messico, dotata di un impianto di condizionamento dell'aria. Nelle simulazioni sono stati valutati l'andamento e le relative velocità dei flussi d'aria, la distribuzione delle temperature e la distribuzione delle concentrazioni di CO₂ per diversi numeri di Reynolds (Re) dell'aria, nell'intervallo da 1000 a 35000, con sorgenti di CO₂, da 35.000 ppm a 42.500 ppm, generate dagli occupanti (30 studenti più un insegnante) e distribuite in classe e per tre diversi orari della giornata a cui corrispondono tre flussi di calore entranti nel locale dalle finestre; le analisi appena citate vengono eseguite per otto casi, ognuno dei quali corrisponde ad una diversa posizione dell'estrattore dell'impianto, mentre il diffusore viene mantenuto fisso. Il flusso d'aria di immissione ha velocità comprese tra 0,21 e 1,46 m/s, una temperatura di 22 °C ed una concentrazione di CO₂ di 340 ppm. Per gli occupanti si considera un flusso di calore di 75 W ed una produzione di CO₂ compresa tra $9,456 \times 10^{-6}$ kg/s e $1,202 \times 10^{-5}$ kg/s ciascuno. L'obiettivo dello studio, quindi, è quello di trovare la posizione dell'estrattore che determini la maggiore efficacia del sistema di ventilazione, in termini di rimozione della CO₂ e comfort termico degli occupanti. Per convalidare il modello i ricercatori si sono avvalsi di due tecniche: la prima prevede la risoluzione del problema della convezione naturale turbolenta in una cavità quadrata, mentre con la seconda si sono confrontati i valori delle temperature interne ricavate dal modello matematico e dalle sperimentazioni, con un discostamento massimo dei risultati del 2,4 %. Lo scopo del lavoro è quello di individuare la posizione migliore dell'estrattore in modo da ottenere una maggiore efficacia complessiva della ventilazione. In particolare, la migliore configurazione dell'impianto, in termini di andamento del flusso d'aria per ventilare l'intero volume dell'aula, di distribuzione della temperatura e quindi di comfort termico e di concentrazioni della CO₂, si ha quando l'estrattore è posizionato nello stesso lato del diffusore ed in prossimità della finestra; le prestazioni peggiori, invece, si hanno quando l'estrattore è posizionato nel lato opposto al diffusore, poiché l'aria immessa non riesce a raggiungere tutte le zone dell'aula.

Nello studio di F. Ascione et al. [35] è stato analizzato un intervento di ristrutturazione architettonica e tecnologica di un edificio dell'Università del Molise, che ospita il Dipartimento di Agraria, Ambiente e Alimentazione, nella città di Campobasso, finalizzato a fornire una nuova distribuzione degli spazi interni e, in particolare, per ottenere 7 nuove aule. Oltre alla variazione degli spazi architettonici, l'intervento mira alla riprogettazione dell'impianto di condizionamento, scegliendolo tra le varie possibili soluzioni analizzate; in particolare sono state studiate le prestazioni di un sistema HVAC misto aria-acqua, avente come terminali dei ventilconvettori, e di cinque sistemi HVAC a tutt'aria (CAV, Constant Air Volume), con e senza installazione di un recuperatore di calore sensibile, per i quali viene variata, di caso in caso, la portata d'aria di ricircolo. In questo studio sono state condotte due indagini numeriche complementari sulle prestazioni energetiche degli edifici; Una prima analisi BPS (Building Performance Simulation) per comprendere il comportamento energetico dell'edificio e poter quindi confrontare le possibili

configurazioni dell'impianto di condizionamento in termini di fabbisogno di energia primaria, per unità di area, per il riscaldamento, il raffrescamento ed il condizionamento annuale degli ambienti (rispettivamente EP_H , EP_C e EP_{SC} , espressi in kWh_p/m^2), risparmio di energia primaria ottenibile (ΔEP) rispetto alla configurazione attuale, costi economici per il condizionamento degli ambienti e la sua variazione, emissioni evitate di anidride carbonica equivalente (ΔCO_2); dalle analisi è emerso che, trovandosi in una zona caratterizzata da un clima freddo nella stagione invernale, l'impianto di climatizzazione dovrà essere dotato di recupero di calore sensibile per soddisfare il fabbisogno dell'edificio con un'efficienza maggiore, dal 19 % al 50 % in più, rispetto alla configurazione impiantistica iniziale. Successivamente allo studio energetico, economico ed ambientale delle diverse configurazioni dell'impianto HVAC, si è passato ad uno studio approfondito di una delle nuove aule della facoltà dotandola di un sistema HVAC già studiato con le analisi BPS, che prevede un ricambio orario di $7,5 h^{-1}$ e con un 50 % di aria ricircolata, con l'obiettivo di limitare la richiesta di energia e migliorare la qualità microclimatica interna; in particolare sono state analizzate quattro tipologie di sistemi di alimentazione ed estrazione dell'aria, ovvero una prima soluzione con sei diffusori quadrati a soffitto, la seconda con quattro griglie a parete, la terza con dieci ugelli a parete ad alta turbolenza ed infine la quarta con sei strisce parallele di diffusori a feritoie lineari a soffitto, attraverso simulazioni CFD per riscontrare delle differenze in termini di comfort termico e qualità dell'aria interna; con le simulazioni fluidodinamiche, svolte in regime invernale con una temperatura di mandata dell'aria di $23\text{ }^\circ C$ (ricavata dallo studio BPS), sono stati valutati la temperatura dell'aula, con particolare riferimento all'uniformità termica, le velocità ed i campi dei flussi d'aria, il comfort termo-igrometrico secondo l'approccio del Fanger, e quindi calcolando gli indici PMV (Predicted Mean Vote) e PPD (Predicted Percentage Dissatisfied) e l'età media dell'aria. Analizzando i risultati forniti dalle simulazioni CFD si deduce che tutte le configurazioni dei terminali utilizzati danno risultati soddisfacenti in termini di comfort termico, ma la tipologia del sistema di alimentazione che garantisce migliori risultati per quanto riguarda l'uniformità della distribuzione dell'aria e la sua purezza, nonché condizioni di comfort ottimali, è quella con diffusori a feritoie lineari.

Gli autori hanno concluso sottolineando l'importanza di affiancare alle valutazioni energetiche della progettazione impiantistica, studi in termini di comfort ambientale e I.A.Q. tramite strumenti di analisi fluidodinamiche computazionali che rendono più flessibile e accurata la progettazione.

H. Arjamandi et al [36] ha studiato, basandosi su simulazioni CFD, le prestazioni di un sistema di ventilazione di un'aula scolastica, con cinque differenti configurazioni dei terminali, per valutare il controllo della diffusione di particelle infettive nell'aria ed il comfort ambientale; nel caso 1 l'impianto di ventilazione è composto da due bocchette, una di immissione ed una di estrazione, posizionate in due pareti opposte, nel caso 2 è composto da quattro terminali di immissione a soffitto e quattro terminali di estrazione posti in due pareti opposte, nel caso 3 si hanno quattro bocchette di immissione nelle due pareti opposte e quattro terminali di estrazione a soffitto, nel caso 4 l'impianto è composto da un terminale di immissione a pavimento in corrispondenza di ogni occupante e da cinque file di estrattori a feritoia lineare a soffitto nel caso 5 si hanno un terminale di immissione a pavimento ed uno di estrazione a soffitto in corrispondenza di ogni occupante. Per le simulazioni è stato adottato il software FLUENT ed il modello creato è stato validato mediante le misure sperimentali; nello specifico la validazione è stata effettuata confrontando i valori di temperatura presi in parti specifiche dell'aula e i valori della concentrazione di CO_2 presi in

un punto. Le prestazioni dei cinque casi vengono confrontate sulla base delle linee di percorso dei flussi d'aria, dell'intensità della loro velocità e il tempo di permanenza delle particelle all'interno dello spazio; dalle simulazioni si può vedere come nei casi 4 e 5 il flusso d'aria segue un percorso relativamente rettilineo e l'esposizione per gli studenti è ridotta e, nello specifico, il caso 5 risulta il migliore in quanto una mancanza di miscelazione orizzontale permette una direzione indisturbata del flusso e un'efficace rimozione degli aerosol dalla zona di respirazione, assicurando un minor rischio di esposizione all'agente patogeno; inoltre il tempo di permanenza dell'agente patogeno nell'aria, nel caso 5, è sensibilmente minore di quello negli altri casi.

Una volta aver individuato nel caso 5 il miglior sistema con possibilità minime di diffusione dell'infezione, è stata effettuata la sua ottimizzazione modificando i parametri delle variabili di progetto, tra cui le dimensioni delle prese d'aria, il tasso di ricambio d'aria e la temperatura di immissione, per valutarne gli effetti sulle condizioni di comfort termico e sull'efficacia del ricambio d'aria; ai fini dell'ottimizzazione i ricercatori hanno usufruito di una funzione di desiderabilità dipendente da vari parametri tra cui il ricambio d'aria, la larghezza dei terminali e la temperatura di immissione. Il miglior risultato ottenibile, corrispondente ad una desiderabilità del 95,2 %, si ha per una larghezza dei terminali di 0,13 m, per una temperatura di immissione dell'aria di 296,597 K e per un tasso di ricambio d'aria compreso tra 9,689 e 9,858.

In uno studio di S-H Park et al [37] è stato studiato un innovativo sistema di ventilazione in un'aula scolastica dotata di 36 postazioni per gli studenti, tramite delle misurazioni in loco e delle simulazioni fluidodinamiche computazionali, per poi confrontare le sue prestazioni con l'impianto reale già presente nell'aula. L'impianto analizzato ha la particolarità di essere provvisto di due file, da tre terminali ciascuna, di immissione a soffitto e di quattro file, da cinque terminali ciascuna, di estrazione a pavimento, così da promuovere un flusso d'aria verticale; mentre l'impianto di ventilazione presente è composto da tre terminali di immissione e tre di estrazione, entrambi a soffitto. Per le simulazioni fluidodinamiche è stato utilizzato il software FLUENT della ANSYS, assumendo il modello standard di turbolenza $k-\epsilon$; il flusso d'aria di immissione ha una portata corrispondente a 6,4 ricambi orari, una temperatura di 20 °C ed una pressione pari a quella atmosferica. Per verificare l'accuratezza del modello creato sono state prese delle misure sperimentali nell'aula dotata del nuovo impianto; nel dettaglio sono state misurate le quantità di particelle inquinanti presenti in otto postazioni di campionamento, mantenendo una portata costante dell'impianto di ventilazione, al fine di stimare l'età dell'aria; dal confronto dei risultati sperimentali e numerici si è riscontrato che le concentrazioni ottenute mediante le simulazioni fluidodinamiche sono più alte di quelle sperimentali, discostandosi però di un valore inferiore al 10 %, permettendo di assumere come valido il modello creato. Nelle simulazioni numeriche sono stati valutati la qualità dell'aria interna, soprattutto in termini di età media dell'aria, i campi di flusso e le velocità dell'aria. Nella valutazione dell'età dell'aria sono stati presi come riferimento due piani orizzontali alle altezze di 0,9 m e 1,75 m da terra, che corrispondono rispettivamente alla quota di respirazione di un soggetto seduto e in piedi; dai risultati è emerso che, analizzando il piano orizzontale a quota 0,9 m dal pavimento, l'età dell'aria della nuova configurazione impiantistica è più bassa, e pari a 603 s, rispetto a quella della recente configurazione, pari a 720 s, con un abbassamento del 16 %; nel piano a quota 1,75 m dal pavimento l'età dell'aria passa da 694 s, della vecchia configurazione impiantistica, a 569 s della nuova, facendo registrare un miglioramento del 18 %. Successivamente, dall'analisi dell'andamento dei flussi d'aria, si deduce che con la nuova

configurazione dell'impianto di ventilazione le aree stagnanti sono ridotte al minimo, favorendo un buon ricambio d'aria in tutto il volume dell'aula. Infine, dalla valutazione delle velocità dei flussi d'aria si possono notare degli abbassamenti dei valori, e quindi dei miglioramenti del comfort termico locale, rispettivamente da 0,30 m/s a 0,15 m/s, con valori medi che vanno da 0,065 m/s a 0,044 m/s, nel piano orizzontale a 0,9 m dal pavimento, e da 0,70 m/s a 0,50 m/s, con valori medi che vanno da 0,1 m/s a 0,083 m/s, nel piano orizzontale a 1,75 m dal pavimento. In conclusione i ricercatori hanno dimostrato che un flusso verticale dell'aria migliora le condizioni di comfort e qualità dell'aria delle aule, contribuendo a migliorare la salute e la capacità di apprendimento degli studenti.

L'analisi fluidodinamica consente di ottenere vari vantaggi come la possibilità di analizzare diverse soluzioni impiantistiche al fine di ridurre i consumi energetici ed ottimizzare il posizionamento dei terminali dell'impianto e la possibilità di prevedere, con elevata accuratezza e in tutto il volume dell'ambiente analizzato, le grandezze che influiscono sul benessere degli occupanti come la temperatura e velocità dell'aria e le concentrazioni degli inquinanti (in genere CO₂).

Si può quindi affermare che l'analisi CFD è uno strumento che può rendersi molto utile nella fase di progettazione degli impianti di ventilazione poiché consente di simulare ed ottimizzare i flussi d'aria negli ambienti e, perciò, di rendere più efficiente ed efficace l'impianto in termini di qualità ambientale interna, al fine di assicurare agli occupanti degli ambienti confortevoli; questa considerazione risulta alquanto importante se si considerano le scuole in quanto sono frequentate da una parte della popolazione più suscettibile alla I.A.Q.

2 Quadro normativo e legislativo

In questo capitolo vengono discussi i principali riferimenti normativi in merito alla ventilazione meccanica controllata, concentrando la trattazione sui requisiti previsti per la qualità dell'ambiente interno. Nello specifico vengono esaminati i parametri richiesti per il comfort termo-igrometrico e la qualità dell'aria interna trattati nelle normative UNI EN 16798-1:2019 [38], UNI EN 16798-3:2018 [39] e UNI 10339:1995 [40] e nel D.M. 18/12/1975 [41].

2.1 Norme UNI EN 16798

Lo standard europeo EN 16798, costituito da 17 parti inerenti la ventilazione degli edifici, fa parte di un pacchetto di norme tecniche che mirano a unificare a livello internazionale le metodologie per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, definito come pacchetto normativo EPBD (*Energy Performance of Buildings Directive*).

Il set di norme in oggetto recepisce i requisiti della Direttiva 2010/31/UE (EPBD recast) [42] del Parlamento Europeo e del Consiglio sulla prestazione energetica nell'edilizia, recepita in Italia con D. Lgs. 63/2013 [43].

L'Italia ha poi recepito gli standard europei di supporto alle EPBD, inerenti la ventilazione degli edifici, nel gruppo di norme UNI EN 16798; in questo lavoro vengono analizzate la UNI EN 16798-1 e la UNI EN 16798-3.

2.1.1 UNI EN 16798-1

La norma italiana UNI EN 16798-1, entrata in vigore il 13 giugno 2019, recepisce la norma europea EN 16798-1 facente parte del set di standard europei di supporto alle EPBD recast; inoltre sostituisce la norma tecnica UNI EN 15251:2008 [44] che recepiva le linee guida della Direttiva 2002/91/CE (EPBD) [45].

La norma specifica i requisiti per i parametri ambientali interni riferiti all'ambiente termico, alla qualità dell'aria interna, all'illuminazione e all'acustica e, inoltre, specifica come stabilire questi parametri per la progettazione del sistema dell'edificio e i calcoli delle prestazioni energetiche.

La norma è valida quando i criteri per l'ambiente interno sono regolati dall'occupazione umana e dove la produzione o i processi lavorativi non hanno un maggiore impatto sull'ambiente interno. Vengono specificati inoltre i programmi di occupazione da utilizzare nei calcoli energetici e come diverse categorie per l'ambiente interno possono essere usate. I criteri di questa norma europea sono perfettamente applicabili ai metodi di calcolo nazionali, ma la suddetta non specifica quali debbano essere i metodi di progettazione poiché vengono forniti i parametri di input al progetto dell'involucro dell'edificio, dei sistemi di riscaldamento, raffrescamento, ventilazione ed illuminazione.

Lo standard utilizza generalmente due tipologie di edifici, quali il residenziale ed il non residenziale.

La UNI EN 16798-1 comprende due appendici: l'Appendice A è caratterizzata da informazioni e tabelle di riferimento (senza valori), da usare come riferimento per la stesura della legislazione a livello nazionale, mentre l'Appendice B riporta le tabelle con i valori di default.

Lo Standard definisce criteri di progettazione, basati sull'individuazione di determinati parametri per ciascun fattore ambientale (ambiente termico, qualità dell'aria interna, illuminazione e acustica), che consentono di conferire una qualità dell'ambiente interno (IEQ, Indoor Environmental Quality) desiderata; sulla base di questi parametri, quindi, verrà dimensionato il sistema edificio-impianto.

Le categorie di qualità ambientale interna sono riportate nella Tabella 2.1.

Tabella 2.1 – Categorie di qualità ambientale interna

Category	Level of expectation
IEQ _I	High
IEQ _{II}	Medium
IEQ _{III}	Moderate
IEQ _{IV}	Low
NOTE In the tables only the category numbers are used without the IEQ _x symbol.	

Le categorie sono correlate al livello di aspettative che gli occupanti possono avere. Un livello di qualità normale è definito come *Medio*. Il livello *Alto* può essere utilizzato quando all'interno dell'ambiente sono presenti occupanti con particolari necessità, come per esempio bambini, anziani, persone disabili ecc. Il livello *Basso* non comporterà alcun rischio per la salute, ma potrebbe diminuire il comfort.

In questa trattazione vengono presi in considerazione solamente i parametri ambientali interni strettamente collegati al progetto degli impianti di ventilazione, ovvero l'ambiente termico (nel caso in cui la ventilazione venga integrata nel sistema di riscaldamento e/o raffrescamento) e la qualità dell'aria interna, omettendo quindi l'illuminazione e l'acustica.

Si ricorda inoltre che la presente tesi farà riferimento solamente ai parametri ed alle indicazioni riportati per la categoria di edifici non residenziali, essendo il caso studio una scuola.

2.1.1.1 Ambiente termico

Negli edifici dotati di un impianto di ventilazione per il riscaldamento e/o il raffrescamento dei locali, i criteri di progettazione per l'ambiente termico devono basarsi sugli indici di comfort termico PMV e PPD, assumendo tipici livelli di attività e tipici valori di isolamento termico dell'abbigliamento (estivo o invernale). Tali indici, che rappresentano rispettivamente il *Predicted Mean Vote* (Voto Medio Previsto) ed il *Predicted Percentage of Dissatisfied* (Percentuale Prevista di Insoddisfatti) sono definiti dalla norma tecnica UNI EN ISO 7730 [46].

L'indice di benessere termo-igrometrico PMV, basato sul bilancio di energia termica del corpo umano, fornisce una previsione del valore medio dei voti di un gruppo di persone sulla base di una scala di sensazione termica di sette punti (Tabella 2.2); l'indice viene normalmente calcolato in condizioni di regime stazionario e per differenti combinazioni di attività fisica svolta, abbigliamento, temperatura dell'aria, temperatura media radiante, umidità relativa dell'aria e velocità dell'aria.

Tabella 2.2 – Voti della sensazione termica

VOTO	SENSAZIONE
+3	molto caldo
+2	caldo
+1	leggermente caldo
0	neutro
-1	leggermente freddo
-2	freddo
-3	molto freddo

L'indice di benessere termo-igrometrico PPD, che è funzione dell'indice PMV, fornisce invece una previsione quantitativa della percentuale di persone termicamente insoddisfatte, che sentono troppo caldo o troppo freddo. Nel seguente grafico viene illustrata la relazione tra i due indici di benessere.

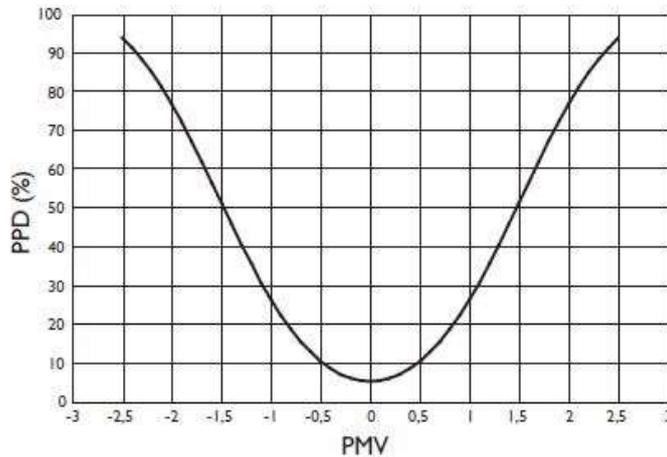


Figura 2.1 – Percentuale prevista di insoddisfatti (PPD) in funzione del voto medio previsto (PMV)

La normativa, quindi, fornisce dei valori di riferimento degli indici di benessere termigrometrico PMV-PPD in relazione delle categorie di qualità dell’ambiente interno, come illustrato nella Tabella 4 estrapolata dall’Appendice B della medesima norma.

Tabella 2.3 – Categorie di default per la progettazione di edifici riscaldati e raffrescati meccanicamente

Category	Thermal state of the body as a whole	
	Predicted Percentage of Dissatisfied PPD %	Predicted Mean Vote PMV
I	< 6	-0,2 < PMV < + 0,2
II	< 10	-0,5 < PMV < + 0,5
III	< 15	-0,7 < PMV < + 0,7
IV	< 25	-1,0 < PMV < + 1,0

Nell’Appendice B è presente anche una tabella in cui vengono indicati i valori di default della temperatura operativa interna, in inverno e in estate, per le varie destinazioni d’uso ed in relazione della categoria di qualità ambientale interna; tali temperature devono essere utilizzate nella progettazione dei sistemi di riscaldamento e raffrescamento.

Tabella 2.4 – Valori default di progetto della temperatura operativa interna in inverno ed estate per edifici con sistemi di riscaldamento/raffrescamento meccanici

Type of building/ space	Category	Operative temperature °C	
		Minimum for heating (winter season), approximately 1,0 clo	Maximum for cooling (summer season), approximately 0,5 clo
Residential buildings, living spaces (bed room's, living rooms, kitchens, etc.) Sedentary activity ~1,2 met	I	21,0	25,5
	II	20,0	26,0
	III	18,0	27,0
	IV	16,0	28,0
Residential buildings, other spaces (utility rooms, storages, etc.) Standing-walking activity ~1,5 met	I	18,0	
	II	16,0	
	III	14,0	
Offices and spaces with similar activity (single offices, open plan offices, conference rooms, auditorium, cafeteria, restaurants, class rooms, Sedentary activity ~1,2 met	I	21,0	25,5
	II	20,0	26,0
	III	19,0	27,0
	IV	18,0	28,0
NOTE A 50% relative humidity level and low air velocity level (<0,1 m/s) is assumed.			

Altro aspetto importante, da tenere in conto nella progettazione, riguarda la determinazione delle grandezze microclimatiche che potrebbero causare un discomfort all'interno degli ambienti e, quindi, un'insoddisfazione termica da parte degli occupanti; la causa alla base dell'insoddisfazione termica è un raffreddamento o un riscaldamento indesiderato di una parte del corpo dovuti principalmente ai seguenti parametri di disagio locale: correnti d'aria con una certa velocità, differenza di temperatura verticale dell'aria (tra il livello delle caviglie e quello della testa), pavimento troppo caldo o troppo freddo, asimmetria della temperatura radiante troppo elevata.

I valori dei parametri di discomfort termico locale sono descritti in funzione della categoria di qualità dell'ambiente interno nella seguente tabella estrapolata dall'Appendice B della norma.

Tabella 2.5 – Criteri di progettazione del disagio termico

	Draught			Vertical air temperature difference (head ankle)		Range of floor temperature		Radiant temperature asymmetry				
	DR (Draught Rate) [%]	Maximum air velocity ^a		PD [%]	Temp. Difference ^b [K]	PD [%]	Floor surface temperature range [°C]	PD [%]	Warm ceiling [K]	Cool wall [K]	Cool ceiling [K]	Warm wall [K]
		Winter [m/s]	summer [m/s]									
Category I	10	0,10	0,12 ^c	3	2	10	19 to 29	5	< 5	< 10	< 14	< 23
Category II	20	0,16	0,19 ^c	5	3	10	19 to 29	5	< 5	< 10	< 14	< 23
Category III	30	0,21	0,24 ^c	10	4	15	17 to 31	10	< 7	< 13	< 18	< 35

^a Assuming an activity level of 1,2 met, a turbulence intensity of 40% and an air temperature equal to the operative temperature of around 20 °C in winter and 23 °C in summer.

^b Difference between 1,1 and 0,1 m above the floor.

^c When the air temperature is above 25 °C higher maximum air speeds are allowed and often even preferred (draught becomes pleasurable breeze); but only under the condition that occupants have direct control over the air speed. See B.2.3 for examples of operative temperature corrections.

2.1.1.2 Qualità dell'aria interna

La norma specifica che la qualità dell'aria interna deve essere controllata mediante tre metodi quali il controllo della sorgente, la ventilazione e, quando possibile, la filtrazione e/o la pulizia dell'aria.

Il controllo delle emissioni di inquinanti da parti di sorgenti non umane deve essere la strategia primaria per mantenere una qualità dell'aria interna accettabile. Si raccomanda di identificare le principali fonti di inquinanti e di eliminarle o ridurre la concentrazione di inquinanti tramite la ventilazione.

Per questo controllo la scelta dei materiali da costruzione, delle finiture, delle modalità di manutenzione e degli arredi ha un impatto sulle emissioni di contaminanti nei locali. Per supportare il progettista nella scelta dei materiali, la normativa classifica gli edifici in poco inquinanti (*low polluting buildings*) e molto poco inquinanti (*very low polluting buildings*); per ottenere tali certificazioni, l'edificio, al suo interno, deve avere la maggior parte dei materiali a bassa emissione (*low emitting materials*) o a bassissima emissione (*very low emitting materials*) e le attività svolte non devono risultare come inquinanti. I materiali a bassa o bassissima emissione sono la pietra, il vetro, la ceramica, i metalli non trattati e tutti i materiali che mostrano delle basse o bassissime emissioni se testati in una camera di prova ventilata dopo 28 giorni seguendo degli standard internazionali (EN 16516, ISO16000-3, ISO 16000-6, EN ISO 16000-9, EN ISO 16000-11).

I limiti delle emissioni dei materiali usati negli ambienti interni, in relazione al tipo di edificio che si vuole ottenere, vengono riportati nella seguente tabella presa dall'Appendice B della norma.

Tabella 2.6 – Criteri per differenti tipologie edilizie

SOURCE	Low emitting products for low polluted buildings	Very low emitting products for very low polluted buildings
Total VOCs TVOC (as in EN 16516)	< 1 000 µg/m ³	< 300 µg/m ³
Formaldehyde	< 100 µg/m ³	< 30 µg/m ³
Any C1A or C1B classified carcinogenic VOC	< 5 µg/m ³	< 5 µg/m ³
R value (as in EN 16516)	< 1,0	< 1,0

Altra strategia che si deve adottare per controllare la qualità dell'aria interna riguarda la ventilazione dell'edificio. I metodi utilizzati per la progettazione di qualsiasi tipo di sistema di ventilazione, che sia meccanico, naturale o ibrido, devono basarsi sul calcolo delle portate d'aria di ventilazione.

Per il progetto dei sistemi di ventilazione, i tassi di ventilazione di progetto devono basarsi sui riferimenti nazionali oppure, quando non c'è una regolazione a livello nazionale, devono essere calcolati seguendo uno dei metodi proposti dalla presente normativa.

La norma fornisce tre metodi per determinare i parametri della qualità dell'aria interna.

Il *Metodo 1* si basa sulla qualità dell'aria percepita; questo metodo prevede di adottare come tasso di ventilazione di progetto quello più alto fra il tasso necessario per la riduzione dei rischi per la salute di uno specifico inquinante atmosferico ed il tasso richiesto per ottenere il livello di qualità dell'aria interna desiderato. Qualora venissero individuate sorgenti inquinanti critiche per la salute è necessario che esse rimangano in ogni caso al di sotto del valore di soglia indicato nel *Metodo 2*.

I livelli di qualità dell'aria percepita sono predefiniti per tutte quelle persone che non sono in grado di adattarsi facilmente a condizioni diverse negli edifici non residenziali, e le persone che si adattano nel caso degli edifici residenziali.

Il tasso di ventilazione totale si calcola combinando la ventilazione per diluire e/o rimuovere gli inquinanti generati dalle persone (bio effluenti) e la ventilazione per rimuovere e/o diluire gli inquinanti prodotti dall'edificio e dagli impianti, secondo l'equazione 2.1; il tasso di ventilazione dipende quindi dalla densità di occupazione e dalla tipologia di edificio (Tabella 2.6).

$$q_{tot} = n \cdot q_p + A_R \cdot q_B \quad (2.1)$$

Dove:

q_{tot} = tasso totale di ventilazione per la zona di respirazione, [l/s]

n = valore di progetto per il numero di persone presenti nell'ambiente, [-]

q_p = tasso di ventilazione per l'occupazione per persona, [l/s·persona]

A_R = area di pavimento, [m²]

q_B = tasso di ventilazione per le emissioni dall'edificio, [l/s·m²]

Nella Tabella 2.7 vengono riportati i tassi di ventilazione necessari per la diluizione o la rimozione degli inquinanti prodotti dagli occupanti (q_p), per ciascuna delle categorie di qualità ambientale interna.

Tabella 2.7 – Tassi di ventilazione di progetto per persone sedentarie, adulte, non adattabili per diluire le emissioni (bio effluenti) di persone per diverse categorie

Category	Expected Percentage Dissatisfied	Airflow per non-adapted person l/(s per person)
I	15	10
II	20	7
III	30	4
IV	40	2,5

Nella Tabella 2.8, invece, vengono indicati i tassi di ventilazione necessari per la rimozione o la diluizione delle emissioni prodotte dagli edifici e/o dagli impianti presenti (q_B), per ciascuna delle quattro categorie di qualità dell'aria. I valori di questa tabella, inoltre, seguono le *Linee guida* proposte dall'Organizzazione Mondiale della Sanità.

Tabella 2.8 – Tassi di ventilazione di progetto per diluire le emissioni di diverse tipologie di edifici

Category	Very low polluting building, LPB-1 l/(s m ²)	Low polluting building, LPB-2 l/(s m ²)	Non low-polluting building, LPB-3 l/(s m ²)
I	0,5	1,0	2,0
II	0,35	0,7	1,4
III	0,2	0,4	0,8
IV	0,15	0,3	0,6

È importante non scendere sotto la soglia indicata in grassetto nella tabella. La norma raccomanda che, per motivi di salute, la portata minima del ricambio d'aria durante l'occupazione non deve mai scendere sotto il valore di 4 l/s per persona, come da categoria III di qualità ambientale interna di Tabella 2.7.

Il *Metodo 2* utilizza i valori limite della concentrazione delle sostanze inquinanti; con questo metodo si calcolano i tassi di ventilazione necessari per diluire una sostanza secondo l'equazione 2.2, basata sul bilancio di massa della concentrazione della sostanza considerata nell'ambiente.

$$Q_h = \frac{G_h}{C_{h,i} - C_{h,o}} \cdot \frac{1}{\varepsilon_v} \quad (2.2)$$

Dove:

Q_h = tasso di ventilazione necessario per la diluizione, [m³/s]

G_h = tasso di generazione di una sostanza, [μg/s]

$C_{h,i}$ = valore di riferimento per la sostanza, [μg/m³]

$C_{h,o}$ = concentrazione della sostanza dell'aria di mandata, [μg/m³]

ε_v = efficacia della ventilazione, [-]

La formula si applica in regime stazionario e il metodo richiede che la concentrazione dell'inquinante dell'aria immessa all'interno sia minore di quella presente nel locale.

È dunque necessario individuare tutte le possibili sostanze che incidono sulla qualità dell'aria; tra i vari contaminanti, la CO₂ è il principale indicatore della qualità dell'aria interna ed i suoi valori limite sono indicati nella Tabella 2.9 in relazione della categoria ambientale.

Tabella 2.9 – Concentrazioni di default di CO₂ di progetto al di sopra della concentrazione esterna assumendo una emissione standard di CO₂ di 20 l/h per persona

Category	Corresponding CO ₂ concentration above outdoors in PPM for non-adapted persons
I	550 (10)
II	800 (7)
III	1 350 (4)
IV	1 350 (4)

I valori delle altre sostanze si trovano nella tabella inerente alle *Linee guida* dell'OMS nell'Appendice B.

I valori relativi all'efficacia della ventilazione (ϵ_v) sono indicati nella norma UNI EN 16798-3 che verrà trattata in seguito.

Il *Metodo 3* permette di determinare i valori minimi predefiniti del tasso di ventilazione, mettendo in relazione i requisiti di percezione della qualità dell'aria e di salubrità del locale. I tassi di ventilazione predefiniti possono essere espressi in funzione di uno o più dei seguenti parametri:

- ventilazione totale di progetto per persone e componenti dell'edificio (q_{tot});
- ventilazione di progetto per unità di area di pavimento (q_m^2);
- ventilazione di progetto per persona (q_p);
- tassi di ricambio dell'aria di progetto (ach);
- tassi di ventilazione di progetto per singolo ambiente e tipologia di edificio (q_{room}).

I valori di default dei tassi di ricambio d'aria di progetto, in termini di area di pavimento (q_m^2) e per persona (q_p), sono indicati rispettivamente nelle Tabelle 2.8 e 2.7.

Con questo metodo, il tasso di ventilazione può essere espresso in funzione delle persone ($l/s \cdot persona$) oppure in funzione dell'area a pavimento ($l/s \cdot m^2$).

L'ultima strategia, dettata dalla norma, per controllare la qualità dell'aria interna si basa sulla filtrazione e/o pulizia dell'aria immessa dall'esterno. Per questo metodo si devono tenere in considerazione i seguenti punti:

- ridurre la quantità di inquinanti atmosferici (pollini, muffe, spore, particelle, polvere) dalla presa d'aria esterna facendo passare l'aria attraverso un filtro o un dispositivo simile;
- passare l'aria secondaria attraverso un filtro o un'altra tecnologia di purificazione per ridurre la quantità di inquinanti nell'aria interna;
- ridurre la concentrazione di odori e contaminanti gassosi facendo passare l'aria secondaria o ricircolando l'aria di ritorno attraverso un filtro dell'aria in fase gassosa.

Le linee guida di progettazione della purificazione e filtrazione dell'aria sono descritte nella UNI EN 16798-3.

La norma fornisce ulteriori indicazioni in merito al mantenimento di una buona qualità dell'aria interna nei periodi in cui l'edificio non viene occupato e la ventilazione viene spenta. Si devono determinare i tassi di ventilazione necessari per limitare la concentrazione di inquinanti emessi dai materiali presenti all'interno dell'ambiente, in modo da poter assicurare un'adeguata ventilazione prima che l'edificio venga nuovamente occupato.

La norma indica come quantità minima di aria da ricambiare prima dell'occupazione il valore di un volume nelle due ore che precedono l'occupazione del locale.

2.1.2 UNI EN 16798-3

La norma italiana UNI EN 16798-3, entrata in vigore l'8 marzo 2018, recepisce la norma europea EN 16798-3 facente parte del set di standard europei di supporto alle EPBD recast; inoltre sostituisce la norma tecnica UNI EN 13779:2008 [47].

La norma si applica alla progettazione, al rendimento energetico degli edifici e all'implementazione di sistemi di ventilazione e condizionamento di locali per edifici non residenziali soggetti ad occupazione umana, escluse le applicazioni come i processi industriali.

La guida fornita per la progettazione è applicabile principalmente ai sistemi di ventilazione meccanica.

In particolare, per questa trattazione, si fa riferimento all'efficacia della ventilazione, parametro necessario per il calcolo del tasso di ricambio d'aria descritto nel *Metodo 2* della UNI EN 16798-1, ed alla filtrazione dell'aria nei sistemi di ventilazione meccanica poiché, la presente normativa, costituisce un punto di riferimento per la scelta di tali sistemi.

2.1.2.1 Efficacia della ventilazione

L'efficacia della ventilazione rappresenta l'efficienza con la quale l'aria immessa dal sistema di ventilazione riesce a rimuovere gli inquinanti presenti dagli ambienti occupati; tale parametro esprime la correlazione tra l'efficienza della ventilazione, definita con la concentrazione di inquinante presente nel locale, e il metodo di diffusione dell'aria scelto.

Tuttavia, la relazione tra questi due aspetti dipende da numerosi fattori, tra cui la posizione dei diffusori, la portata d'aria, le regole di progettazione, il carico termico dell'edificio, il dimensionamento delle apparecchiature, la temperatura dell'aria immessa e quella dell'aria nel locale.

L'efficacia della ventilazione è un parametro fondamentale per verificare la capacità del sistema di ventilazione di effettuare un buon ricambio d'aria, ed è definito dalla normativa mediante la seguente equazione:

$$\varepsilon_v = \frac{C_e - C_s}{C_i - C_s} \quad (2.3)$$

Dove:

C_e = concentrazione di inquinanti nell'aria estratta;

C_s = concentrazione di inquinanti nell'aria immessa;

C_i = concentrazione di inquinanti nella zona occupata dalle persone (zona di respirazione).

Nel caso di perfetta miscelazione tra l'aria immessa e l'inquinante l'efficacia della ventilazione assume il valore 1.

L'efficacia diminuisce quando l'aria estratta ha una concentrazione di inquinanti inferiore a quella dell'aria ambiente, rendendo perciò necessario aumentare la portata di ricambio d'aria, come si può dedurre dall'equazione 2.2 in cui l'efficacia della ventilazione compare al denominatore; se la concentrazione di inquinante, invece, è minore nella zona di respirazione rispetto all'aria estratta, si avrà un valore dell'efficacia maggiore di 1 con la possibilità di soddisfare il livello di qualità desiderato con un tasso di ricambio d'aria minore.

Nell'Appendice B della presente norma, data la dipendenza dell'efficacia della ventilazione da numerosi fattori sopra citati, viene indicato che in assenza di un progetto individuale il valore del parametro deve essere pari ad 1.

2.1.2.2 Filtrazione dell'aria

La filtrazione dell'aria esterna deve essere determinata per soddisfare i requisiti di qualità dell'aria nell'edificio tenendo in considerazione la categoria dell'aria esterna, che è funzione delle concentrazioni dei diversi contaminanti. Il dimensionamento della sezione filtrante dovrebbe essere il risultato di un'ottimizzazione prendendo in considerazione diversi parametri, nella situazione specifica, quali tempo di funzionamento, carico di inquinamento, contesto di inquinamento locale, ecc.

La normativa classifica la qualità dell'aria esterna definendo tre categorie (Tabella 2.10), basate sulle concentrazioni limite di contaminanti, sulle 24 ore, indicate all'interno delle Linee Guida dell'OMS (2005) [48].

Tabella 2.10 – Classificazione dell'aria esterna (ODA, classification of outdoor air)

Category	Description
ODA 1	Outdoor air which may be only temporarily dusty (e.g. pollen)
ODA 2	Outdoor air with high concentrations of particulate matter and/or gaseous pollutants
ODA 3	Outdoor air with very high concentrations of gaseous pollutants and/or particulate matter

Nel dettaglio, la categoria di qualità ODA 1 si applica quando le Linee Guida dell'OMS (2005) ed ogni norma o regolamento nazionale sulla qualità dell'aria esterna sono soddisfatti. La categoria ODA 2 si applica quando le concentrazioni di contaminanti superano le Linee Guida dell'OMS (2005) o qualsiasi norma o regolamento nazionale sulla qualità dell'aria esterna di un fattore fino a 1,5.

La categoria ODA 3 si applica invece quando le concentrazioni di contaminanti superano le Linee Guida dell'OMS (2005) o qualsiasi norma o regolamento nazionale sulla qualità dell'aria esterna di un fattore maggiore di 1,5.

Ai fini della determinazione del sistema filtrante la norma specifica che deve essere caratterizzata anche la qualità dell'aria di mandata dell'impianto; la sua qualità, negli edifici soggetti all'occupazione umana, deve tener conto delle emissioni previste nei locali interni, dovute al metabolismo umano, alle attività e processi svolti all'interno, ai materiali e alle finiture dell'edificio, e delle emissioni provenienti dal sistema di ventilazione stesso per garantire il raggiungimento di una qualità dell'aria interna adeguata.

La normativa propone la seguente classificazione della qualità dell'aria di mandata, basata sulle concentrazioni dei contaminanti presenti.

Tabella 2.11 – *Classificazione dell'aria di mandata (SUP, supply air classification)*

Category	Description
SUP 1	Supply air with very low concentration of particulate matter and/or gases
SUP 2	Supply air with low concentrations of particulate matter and/or gases
SUP 3	Supply air with medium concentrations of particulate matter and/or gases matter
SUP 4	Supply air with high concentrations of particulate matter and/or gases matter
SUP 5	Supply air with very high concentrations of particulate matter and/or gases matter

In particolare, la classificazione si basa sulle percentuali delle concentrazioni dei contaminanti presenti rispetto a determinate concentrazioni limite definite.

La categoria SUP 1 si applica quando l'aria di mandata soddisfa i valori limite delle Linee Guida dell'OMS (2005) e qualsiasi valore limite indicato nelle norme o nei regolamenti nazionali sulla qualità dell'aria con un fattore di 0,25.

La categoria SUP 2 si applica quando l'aria di mandata soddisfa i valori limite delle Linee Guida dell'OMS (2005) e qualsiasi valore limite indicato nelle norme o nei regolamenti nazionali sulla qualità dell'aria con un fattore di 0,50.

La categoria SUP 3 si applica quando l'aria di mandata soddisfa i valori limite delle Linee Guida dell'OMS (2005) e qualsiasi valore limite indicato nelle norme o nei regolamenti nazionali sulla qualità dell'aria con un fattore di 0,75.

La categoria SUP 4 si applica quando l'aria di mandata soddisfa i valori limite delle Linee Guida dell'OMS (2005) e qualsiasi valore limite indicato nelle norme o nei regolamenti nazionali sulla qualità dell'aria.

La categoria SUP 5 si applica quando l'aria di mandata soddisfa i valori limite delle Linee Guida dell'OMS (2005) e qualsiasi valore limite indicato nelle norme o nei regolamenti nazionali sulla qualità dell'aria con un fattore di 1,50.

A seconda della categoria di aria esterna e della qualità dell'aria di mandata desiderata sono necessarie diverse efficienze di filtrazione, in accordo con la normativa EN 779 [49], come indicato nella Tabella 2.12 fornita dalla norma.

Tabella 2.12 – Efficienza minima di filtrazione basata sulla qualità dell'aria esterna e su quella di mandata

Outdoor air quality	Supply air class				
	SUP 1	SUP 2	SUP 3	SUP 4	SUP 5
ODA (P) 1	88 % ^a	80 % ^a	80 % ^a	80 % ^a	Not specified
ODA (P) 2	96 % ^a	88 % ^a	80 % ^a	80 % ^a	60 %
ODA (P) 3	99 % ^a	96 % ^a	92 % ^a	80 % ^a	80 %

^a Combined average filtration efficiency over a single or multiple stage filtration in accordance to average filtration efficiency specified in EN 779.

Si precisa che la filtrazione media richiesta può essere raggiunta usando un singolo o un multiplo stadio filtrante; di conseguenza è opportuno calcolare l'efficienza combinata di filtrazione dell'intero stadio filtrante, mediante la formula 2.4, per determinare se la qualità dell'aria di mandata richiesta sia soddisfatta.

$$E_t = 100 \cdot \left(1 - \left(\left(1 - \frac{E_{s1}}{100} \right) \cdot \left(1 - \frac{E_{s2}}{100} \right) \cdot \dots \cdot \left(1 - \frac{E_{sn+1}}{100} \right) \right) \right) \quad (2.4)$$

Dove:

E_t = efficienza combinata di filtrazione;

E_{sn+1} = Efficienza di filtrazione dello stadio n-esimo, espressa in accordo con la normativa EN 779.

Per semplificare la scelta del filtro dell'aria al fine di soddisfare le efficienze di rimozione degli inquinanti descritte nella tabella precedente, nell'Appendice B la normativa riporta anche una tabella riassuntiva dei filtri idonei, in accordo con la EN 779.

Tabella 2.13 – Classi minime di filtro consigliate (definizione delle classi di filtro in accordo con la EN 779)

Outdoor air quality	Supply air class				
	SUP 1	SUP 2	SUP 3	SUP 4	SUP 5
ODA 1	M5+F7	F7	F7	F7	-
ODA 2	F7 + F7	M5 + F7	F7	F7	M5
ODA 3	F7 + F9	F7 + F7	M6 + F7	F7	F7

Nei casi in cui sia richiesto un livello di qualità dell'aria di mandata pari a SUP 1 o SUP 2 e in cui la composizione chimica dell'aria esterna sia di livello ODA 2 o ODA 3 è raccomandabile l'implementazione della sezione filtrante con l'impiego di un'adeguata filtrazione specifica per gas, per ridurre i livelli nocivi di CO, NO_x, SO_x, VOC e O₃.

2.2 Norma UNI 10339

La norma italiana UNI 10339:1995, entrata in vigore il 30 giugno 1995, rappresenta uno standard nazionale consolidato in merito alla salubrità dell'aria negli ambienti interni ed è richiamata in moltissimi Regolamenti Edilizi e di Igiene.

La norma fornisce principalmente indicazioni per la classificazione e la definizione dei requisiti minimi degli impianti e dei valori delle grandezze di riferimento durante il loro funzionamento, ma anche l'individuazione degli elementi che il committente ed il fornitore devono indicare nell'offerta, i documenti per l'ordine e le condizioni da rispettare nel corso della fornitura. Si applica pertanto agli impianti aeraulici destinati al benessere delle persone, installati sia in edifici e ambienti residenziali che non residenziali; la norma non considera gli edifici industriali e gli ambienti nei quali la climatizzazione ha finalità di processo.

Attualmente la norma è in fase di revisione per un adeguamento della stessa rispetto all'evoluzione del quadro normativo di settore. In particolare, spiega l'UNI, si ritiene di dover integrare la precedente versione della norma con prescrizioni e indicazioni aggiornate allo stato dell'arte della tecnica sulla progettazione e sull'installazione degli impianti aeraulici per la ventilazione e per la climatizzazione (invernale e/o estiva). La precedente versione necessita altresì di un aggiornamento per quanto riguarda i riferimenti e i richiami normativi.

Tralasciando la parte della normativa riferita alle regole per la richiesta dell'offerta, per l'ordine e la fornitura, una parte interessante ai fini della presente trattazione riguarda i requisiti degli impianti in termini di qualità, portate e movimentazione dell'aria. In particolare, la norma prescrive che gli impianti, al fine di garantire livelli di benessere accettabili per le persone, prendendo in considerazione le esigenze di contenimento dei consumi energetici, assicurino:

- un'immissione di aria esterna almeno pari a determinati valori minimi in funzione della destinazione d'uso dei locali;
- una filtrazione minima dell'aria;
- una movimentazione dell'aria con velocità entro determinati limiti.

Il tutto per mantenere nel volume convenzionalmente occupato dalle persone, adeguate caratteristiche termiche, igrometriche e di qualità dell'aria.

Per quanto riguarda la portata minima di aria esterna per il ricambio orario la norma, nel Prospetto III, indica i valori da rispettare per le varie destinazioni d'uso; di seguito si riportano solamente i valori relativi agli ambienti scolastici.

Tabella 2.14 – Portate di aria esterna in edifici adibiti ad uso scolastico

Categorie di edifici	Portata di aria esterna o di estrazione		Note
	Q_{op} (10^{-3} m ³ /s per persona)	Q_{os} (10^{-3} m ³ /s m ²)	

EDIFICI ADIBITI AD ATTIVITÀ SCOLASTICHE E ASSIMILABILI			
- asili nido e scuole materne	4	-	-
- aule scuole elementari	5	-	-
- aule scuole medie inferiori	6	-	-
- aule scuole medie superiori	7	-	-
- aule universitarie	7	-	-
• transiti, corridoi	-	-	-
• servizi		estrazioni	A
- altri locali:			
• biblioteche, sale lettura	6	-	-
• aule musica e lingue	7	-	-
• laboratori	7	-	-
• sale insegnanti	6	-	-

* Salvo le indicazioni di cui in 9.1.1.1.
** Per gli ambienti di questa categoria non è ammesso utilizzare aria di ricircolo.
Note: A - Ricambio richiesto nei servizi igienici:
- edifici adibiti a residenza e assimilabili 0,0011 vol/s (4 vol/h);
- altre categorie in tabella 0,0022 vol/s (8 vol/h);
il volume è quello relativo ai bagni (antibagni esclusi).
B - Verificare i regolamenti locali.
C - Valori più elevati possono essere richiesti per il controllo dell'umidità.
D - Per questi ambienti le portate d'aria devono essere stabilite in relazione alle prescrizioni vigenti ed alle specifiche esigenze delle singole applicazioni.

In assenza di valori certi degli occupanti, si adottano i valori degli affollamenti, ovvero il numero di persone presenti per ogni metro quadrato di superficie calpestabile, indicati nel Prospetto VIII riportato di seguito.

Tabella 2.15 – Indici di affollamento n_s per ogni metro quadrato di superficie

Classificazione degli edifici per categorie	n_s
EDIFICI ADIBITI AD ATTIVITÀ SCOLASTICHE	
- asili nido e scuole materne	0,40
- aule scuole elementari, medie inferiori e superiori	0,45
- aule universitarie	0,60
- altri locali:	
• aule musica e lingue	0,50
• laboratori	0,30
• sale insegnanti	0,30

Nel prospetto IV, riportato in Tabella 2.16, sono indicati i coefficienti correttivi da utilizzare per aggiustare le portate, tenendo conto dell'altitudine del sito di installazione sul livello del mare.

Tabella 2.16 – Coefficiente correttivo in funzione dell'altitudine H sul livello medio del mare

Altitudine H m s.l.m.	Coefficiente correttivo
0	1,00
500	1,06
1 000	1,12
1 500	1,18
2 000	1,25
2 500	1,31
3 000	1,38

Ai fini della qualità dell'aria interna, è importante, se non fondamentale, anche la posizione della presa d'aria esterna.

La norma definisce dove non deve essere collocata, e in particolare: in prossimità di una strada di grande traffico, in prossimità di una ribalta di carico/scarico automezzi, in prossimità di scarichi di fumi o prodotti della combustione, in punti vicini ad espulsioni industriali, di servizi igienici o comunque di aria viziata o contaminata, in vicinanza di torri di raffreddamento o torri evaporative, oppure ad un'altezza minore di 4 m dal piano stradale più elevato di accesso all'edificio.

In ogni caso, sia l'aria esterna, che quella di ricircolo, devono essere filtrate tramite l'impiego di filtri di classe appropriata, funzione dell'efficienza degli stessi.

La classificazione dei filtri è riportata nella seguente tabella, estrapolata dal Prospetto V della norma.

Tabella 2.17 – Classificazione dei filtri

Classe	Efficienza del filtro E	Campo di efficienza %	Metodo di prova
1	M	$E < 65$	ponderale
2	M	$65 \leq E < 80$	ponderale
3	M	$80 \leq E < 90$	ponderale
4	M	$90 \leq E$	ponderale
5	A	$40 \leq E < 60$	atmosferaico
6	A	$60 \leq E < 80$	atmosferaico
7	A	$80 \leq E < 90$	atmosferaico
8	A	$90 \leq E < 95$	atmosferaico
9	A	$95 \leq E$	atmosferaico
10	AS	$95 \leq E < 99,9$	fiamma sodio
11	AS	$99,9 \leq E < 99,97$	fiamma sodio
12	AS	$99,97 \leq E < 99,99$	fiamma sodio
13	AS	$99,99 \leq E < 99,999$	fiamma sodio
14	AS	$99,999 \leq E$	fiamma sodio

M = media efficienza
A = alta efficienza
AS = altissima efficienza e filtri assoluti

Si riporta di seguito la tabella del Prospetto VI che indica la classe di filtri e l'efficienza di filtrazione richiesta per edifici adibiti ad uso scolastico.

Tabella 2.18 – Classe di filtri e efficienza di filtrazione richiesti in edifici adibiti ad uso scolastico

Classificazione degli edifici per categorie	Classe ** di filtri		Efficienza di filtrazione**
	min.	max.	
EDIFICI ADIBITI AD ATTIVITÀ SCOLASTICHE			
- scuole materne ed elementari	7	9	M + A
- aule in genere	5	6	M + A
- altri locali:			
• aule musica e lingue	6	7	M + A
• laboratori	6	7	M + A
* Da adottare per efficienze sino a 4.			
** Per la definizione dei simboli vedere prospetto V.			

Ogni filtro facente parte di una determinata categoria deve essere preceduto da un filtro avente efficienza compresa nella categoria precedente.

Per quanto riguarda la movimentazione dell'aria, la norma prescrive che la distribuzione debba garantire che il flusso d'aria immesso si misceli con l'aria ambiente in tutto il volume convenzionale occupato, con velocità dell'aria all'interno del locale entro determinati limiti, e comunque non superiore a 0,3 m/s in corrispondenza della superficie luogo dei punti distanti 60 cm dal perimetro della griglia.

2.3 D.M. 18/12/1975

In riferimento all'edilizia scolastica, il Decreto Ministeriale , oltre a fornire dei criteri generali associati alla localizzazione delle scuole e alle dimensioni delle stesse, definisce le “condizioni di abitabilità soddisfacenti per tutto il periodo di durata e di uso, malgrado agenti esterni normali”; tra queste condizioni, rivestono particolare importanza l'equilibrio e la conservazione dei fattori fisici dai quali dipende il benessere termo-igrometrico, così come il mantenimento della purezza chimica e microbiologica dell'aria.

Per il mantenimento delle condizioni di purezza dell'aria, il decreto prescrive delle portate d'aria esterna da garantire mediante ventilazione naturale e/o meccanica, in funzione della destinazione d'uso dell'ambiente considerato. Queste portate sono espresse sotto forma di “coefficienti di ricambio”, riportati nella tabella sottostante e corrispondenti al rapporto tra il volume di aria esterna introdotto ogni ora nell'ambiente e il volume dell'ambiente stesso.

Tabella 2.19 – Coefficienti di ricambio d'aria – D.M. 18/12/1975

Tipologia ambiente	Tipologia di scuola	Coefficiente di ricambio
ambienti adibiti ad attività didattica collettiva o attività di gruppo	per scuole materne ed elementari	2,5
	per scuole medie	3,5
	scuole secondarie di secondo grado	5,0
altri ambienti di passaggio, uffici servizi igienici, palestre, refettori	-	1,5
	-	2,5

Per quanto riguarda le condizioni termo-igrometriche, il Decreto prescrive determinati valori di temperatura e umidità relativa da mantenere all'interno degli ambienti tramite le seguenti indicazioni:

“La temperatura degli ambienti adibiti ad usi scolastici dovrà essere assicurata, in condizioni invernali, da un adatto impianto di riscaldamento capace di assicurare in tutti gli ambienti quando all'esterno si verificano le condizioni invernali di progetto, le seguenti condizioni interne: temperatura di $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ salvo non sia diversamente prescritto per locali ad uso speciale.”

“E' consigliabile che vengano assicurati adatti valori della umidità relativa negli ambienti interni adibiti ad attività didattiche e collettive nel periodo invernale, mediante un trattamento di umidificazione dell'aria esterna effettuato dall'impianto di ventilazione idoneo a realizzare un'umidità relativa dell'aria ambiente del 45-55% e a mantenere negli ambienti $T = 20^{\circ}\text{C}$.”

Si ricorda però che, a decorrere dall'entrata in vigore della Legge 11 gennaio 1996, n. 23, non si applicano più le prescrizioni del D.M. 18 dicembre 1975, salvo quanto previsto al comma 3 dell'articolo 5 della legge indicata.

2.4 I tre metodi a confronto: calcolo delle portate di ricambio d'aria

Per dimensionare correttamente un impianto di ventilazione meccanica è necessario calcolare le portate di rinnovo dell'aria che devono essere fornite quando gli ambienti sono occupati. A tal fine è importante conoscere la normativa di riferimento.

Al momento, in Italia, sono vigenti due normative che i progettisti possono utilizzare per calcolare le portate di ricambio dell'aria ai fini del dimensionamento di un impianto di ventilazione meccanica: la UNI 10339 del 1995, al momento in fase di revisione, e la UNI EN 16798-1 del 2019, da applicare nel caso in cui, a livello nazionale, non sia presente una regolazione per il calcolo dei tassi di ventilazione.

In questo capitolo si riporta un esempio di calcolo della portata di rinnovo d'aria di un'aula delle scuole elementari con l'ausilio delle norme sopra citate e del D.M. 18/12/1975 anche se non è più in vigore, come sopra precisato. L'aula ha una superficie di 50 m^2 con un'altezza di 3 m e quindi un volume di 150 m^3 ed è frequentata da 20 occupanti, tra cui 19 studenti e un insegnante.

Di seguito si riportano gli esempi di calcolo delle portate di ventilazione dell'aula.

2.4.1 Calcolo della portata con la UNI EN 16798-1

Per il calcolo della portata di ventilazione la norma UNI EN 16798-1 fornisce tre diversi metodi alternativi l'uno all'altro, descritti nel capitolo 2.1.1.2, da poter utilizzare; in questo esempio i tassi di ventilazione vengono ricavati facendo uso del *Metodo 1* e del *Metodo 2*. Si ricorda inoltre che i risultati vengono forniti per tutte e quattro le categorie di qualità dell'aria interna, anche se la norma sconsiglia di scendere al di sotto della categoria III.

Metodo 1

La portata di ricambio d'aria mediante questo metodo si calcola combinando la ventilazione per diluire e/o rimuovere gli inquinanti generati dalle persone (bio effluenti) e la ventilazione per rimuovere e/o diluire gli inquinanti prodotti dall'edificio e dagli impianti, applicando l'equazione 2.1; è necessario quindi conoscere il numero degli occupanti ed il tipo di edificio con la relativa superficie pavimentata. I dati sono riportati di seguito.

Tabella 2.20 – Dati per il calcolo della portata d'aria di ventilazione – UNI EN 16798-1, Metodo 1

Dati			
Descrizione parametro	Simbolo	Unità di misura	Valore
Valore di progetto per il numero di persone presenti nell'ambiente	n	[-]	20
Tasso di ventilazione per l'occupazione per persona	q _p	[l/s·persona]	Vedi Tabella 2.7
Area di pavimento	A _R	[m ²]	50
Tasso di ventilazione per le emissioni dall'edificio	q _B	[l/s·m ²]	Vedi Tabella 2.8

Si procede quindi con il calcolo del tasso di ventilazione inerente agli occupanti.

Tabella 2.21 – Calcolo del tasso di ventilazione inerente agli occupanti – UNI EN 16798-1, Metodo 1

Categoria	Tasso di ventilazione per persone non adattabili - q _p	Numero persone presenti nell'ambiente	Tasso di ventilazione per diluire e/o rimuovere gli inquinanti generati dalle persone (bio effluenti)
	[l/s·persona]		[l/s]
I	10	20	200,00
II	7		140,00
III	4		80,00
IV	2,5		50,00

Successivamente si calcola la portata d'aria necessaria per rimuovere gli inquinanti generati dall'edificio; a tal proposito è stato scelto un edificio appartenente alla classe LPB-2, ovvero un *low polluting building*.

Tabella 2.22 – Calcolo del tasso di ventilazione inerente al tipo di edificio – UNI EN 16798-1, Metodo 1

Categoria	Tasso di ventilazione per edifici LPB-1 - q_B	Tasso di ventilazione per edifici LPB-2 - q_B	Tasso di ventilazione per edifici LPB-3 - q_B	Area di pavimento [m ²]	Tasso di ventilazione per rimuovere e/o diluire gli inquinanti prodotti dall'edificio
	[l/s·m ²]	[l/s·m ²]	[l/s·m ²]		[l/s]
I	0,50	1,00	2,00	50,00	50,00
II	0,35	0,70	1,40		35,00
III	0,20	0,40	0,80		20,00
IV	0,15	0,30	0,60		15,00

Infine, per trovare la portata di ventilazione necessaria per l'aula scolastica, si devono sommare i due tassi di ventilazione appena ricavati.

Tabella 2.23 – Calcolo del tasso di ventilazione totale – UNI EN 16798-1, Metodo 1

Categoria	Tasso di ventilazione per diluire e/o rimuovere gli inquinanti generati dalle persone (bio effluenti)	Tasso di ventilazione per rimuovere e/o diluire gli inquinanti prodotti dall'edificio	Tasso di ventilazione totale - q_{tot}		Ricambi orari - ACH
	[l/s]	[l/s]	[l/s]	[m ³ /h]	[h ⁻¹]
I	200	50	250,00	900,00	6,00
II	140	35	175,00	630,00	4,20
III	80	20	100,00	360,00	2,40
IV	50	15	65,00	234,00	1,56

Metodo 2

Per l'applicazione del presente metodo, basato sul calcolo dei tassi di ventilazione necessari per diluire una sostanza secondo l'equazione 2.2, è stata scelta la CO₂ (anidride carbonica) come contaminante principale presente nell'aula, con un tasso di produzione pro-capite di 20 l/h (10041,67 µg/s) come anche specificato nella normativa. Per l'efficacia della ventilazione è stato preso il valore unitario in quanto non si è a conoscenza del progetto. Di seguito si riportano i dati necessari al calcolo.

Tabella 2.24 - Dati per il calcolo della portata d'aria di ventilazione – UNI EN 16798-1, Metodo 2

Dati			
Descrizione parametro	Simbolo	Unità di misura	Valore
Numero di persone presenti nell'ambiente	n	[-]	20
Tasso di generazione di CO ₂ (per studente)	G _h	[µg/s]	10041,67
Valore di riferimento di concentrazione per la CO ₂	C _{h,i}	[µg/m ³]	Vedi tabella 2.9
Concentrazione di CO ₂ nell'aria di mandata	C _{h,o}	[µg/m ³]	Pari alla concentrazione esterna
Efficacia della ventilazione	ε _v	[-]	1

Si procede quindi con il calcolo del tasso di ventilazione necessario alla diluizione/rimozione della CO₂ generata dagli occupanti. Si precisa che, il termine al denominatore della formula 2.2 ($C_{h,i}-C_{h,o}$), è pari alla concentrazione interna di CO₂ al di sopra di quella esterna (come da Tabella 2.9) poiché l'aria esterna di rinnovo non presenta un filtro di riduzione dell'inquinante.

Tabella 2.25 - Calcolo del tasso di ventilazione necessario per la diluizione – UNI EN 16798-1, Metodo 2

Categoria	Tasso di generazione di CO ₂ - G _h	Concentrazione di CO ₂ al di sopra della concentrazione esterna - (C _{h,i} -C _{h,o})	Efficacia della ventilazione - ε _v	Tasso di ventilazione totale - Q _h			Ricambi orari - ACH
	[μg/s]	[μg/m ³]	[-]	[m ³ /s]	[m ³ /h]	[l/s]	[h ⁻¹]
I	200833,4	900000	1	0,22	803,33	223,15	5,36
II		1440000		0,14	502,08	139,47	3,35
III		2430000		0,08	297,53	82,65	1,98
IV		2430000		0,08	297,53	82,65	1,98

Da specificare che, procedendo con il calcolo del tasso di ventilazione con entrambi i metodi, per le prime tre categorie di qualità dell'aria interna, viene sempre soddisfatta la portata minima di 4 l/s per persona, come specificato dalla normativa in esame.

2.4.2 Calcolo della portata con la UNI 10339

La portata di ricambio d'aria calcolata tramite la UNI 10339 si basa sull'individuazione della destinazione d'uso dell'edificio. Nel caso in esame, dalla Tabella 2.14, si considera la portata d'aria esterna per persona necessaria per il dimensionamento di un impianto di ventilazione di una scuola elementare e dalla Tabella 2.15 si ricava il relativo indice di affollamento. Quindi saranno necessari i seguenti dati per il calcolo.

Tabella 2.26 - Dati per il calcolo della portata d'aria di ventilazione – UNI 10339

Dati			
Descrizione parametro	Simbolo	Unità di misura	Valore
Portata di aria esterna o di estrazione	Q _{op}	[m ³ /s·persona]	Vedi tabella 2.14
Indice di affollamento	n _s	[persone/m ²]	0,45
Superficie calpestabile	A	[m ²]	50

Si procede quindi con il calcolo del tasso di ventilazione minimo da adottare.

Tabella 2.27 – Calcolo del tasso di ventilazione totale – UNI 10339

Grado scuola	Portata di aria esterna o di estrazione - Q_{op}	Indice di affollamento - n_s	Superficie calpestabile - A	Tasso di ventilazione totale - Q_{tot}			Ricambi orari - ACH
	[m ³ /s/persona]	[persone/m ²]	[m ²]	[m ³ /s]	[m ³ /h]	[l/s]	[h ⁻¹]
Aule scuole elementari	0,005	0,45	50	0,113	405,00	112,50	2,70

Dal risultato ottenuto si può dedurre che il tasso di ventilazione calcolato mediante la UNI 10339 soddisfa il requisito di ricambio d'aria minimo di 4 l/s per persona secondo la norma UNI EN 16798-1.

2.4.3 Calcolo della portata con il D.M. 18/12/1975

Il calcolo della portata di ricambio d'aria tramite il D.M. 18/12/1975 si basa sull'individuazione della destinazione d'uso dell'edificio e, di conseguenza, del tasso di ricambio d'aria dalla Tabella 2.19.

Quindi saranno necessari i seguenti dati per il calcolo.

Tabella 2.28 - Dati per il calcolo della portata d'aria di ventilazione – D.M. 18/12/1975

Dati			
Descrizione parametro	Simbolo	Unità di misura	Valore
Coefficiente di ricambio d'aria	n	[1/h]	Vedi tabella 2.19
Volume aula	V	[m ³]	150

Si procede con il calcolo del tasso di ventilazione minimo da adottare, moltiplicando il coefficiente di ricambio d'aria n con il volume dell'aula.

Tabella 2.29 – Calcolo del tasso di ventilazione totale – D.M. 18/12/197

Grado scuola	Coefficiente di ricambio d'aria - n	Volume aula - V	Tasso di ventilazione totale - Q_{tot}		
	[1/h]	[m ³]	[m ³ /s]	[m ³ /h]	[l/s]
Aule scuole elementari	2,5	150	0,104	375,00	104,17

3 Misurazioni sperimentali

3.1 Premessa

Assicurare il comfort ambientale interno ed una qualità dell'aria accettabili nelle aule scolastiche è un aspetto di relativa importanza e da tenere in conto in fase di progettazione di nuovi edifici o di interventi di retrofit, come ampiamente giustificato nel Capitolo 1.

In questo capitolo vengono riportate le misurazioni sperimentali effettuate dal Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche (DIISM), conseguentemente all'incarico ricevuto dall'Università Politecnica delle Marche dalla Regione Marche. Nello specifico vengono monitorate le prestazioni dei sistemi impiantistici installati in due scuole della regione, la scuola secondaria di I grado G. Ferraris nel comune di Falconara Marittima, provincia di Ancona, e la scuola primaria Istituto Comprensivo Luca Della Robbia nel comune di Appignano, provincia di Macerata, a seguito dell'intervento straordinario emanato dalla Regione Marche per l'installazione nelle aule scolastiche di impianti di ventilazione meccanica controllata (VMC).

Le misurazioni effettuate hanno lo scopo di determinare se le installazioni realizzate sono efficienti dal punto di vista termico, acustico e sulla qualità dell'aria; le prove realizzate sono state divise in tre categorie: termiche e qualità dell'aria, fluidodinamiche e acustiche. Le prove termiche e sulla qualità dell'aria consistono nella misurazione e nel monitoraggio della temperatura dell'aria interna, dell'umidità relativa e dell'anidride carbonica (CO₂). Le prove fluidodinamiche comprendono la misurazione della portata d'aria dell'unità VMC installata, il "blower door test" per la valutazione della permeabilità dell'aula e prove con un generatore di fumo per valutare l'influenza dell'aria espulsa sulla presa di aria esterna e il tempo di decadimento delle particelle generate. Le prove acustiche comprendono la valutazione del tempo di riverbero, del livello di rumore degli impianti in ambiente e dei due descrittori denominati C50 (Speech Clarity) e STI (speech transmission index).

Attraverso questi parametri è stato possibile valutare le condizioni di comfort termico, acustico e la qualità dell'aria, ovvero gli aspetti più importanti che determinano la qualità di un ambiente interno.

3.2 Prove termiche e qualità dell'aria

3.2.1 Introduzione

Queste prove consistono nella misurazione e nel monitoraggio dei principali parametri riguardanti il comfort termico e la qualità dell'aria, ovvero la temperatura dell'aria interna [°C], l'umidità relativa [%] e la concentrazione di anidride carbonica [ppm].

La qualità dell'aria all'interno di un ambiente confinato dipende da varie tipologie di indicatori ed inquinanti. Il principale indicatore utilizzato per determinare la qualità dell'aria è l'anidride carbonica (CO₂) poiché è di facile misurazione rispetto agli altri inquinanti. La CO₂ è un gas prodotto dai processi di combustione ma anche dall'uomo tramite la respirazione, infatti all'interno dei locali scolastici la principale fonte di emissione di CO₂ sono le persone; un elevato tasso di CO₂ può compromettere il grado di attenzione degli utenti presenti in aula, provocando mal di testa, sonnolenza e difficoltà di concentrazione, come dimostrato da varie ricerche scientifiche menzionate nel Capitolo 1.

Il monitoraggio effettuato ha lo scopo di fornire un set di dati continuo che permetta di verificare l'influenza della ventilazione meccanica sui parametri misurati. Tali parametri sono anche strettamente influenzati dalla presenza di persone (gli studenti), dal profilo di accensione dell'impianto di riscaldamento e dall'eventuale apertura/chiusura delle finestre.

3.2.2 Riferimenti normativi

La norma tecnica di riferimento utilizzata per la misurazione della temperatura dell'aria e dell'umidità relativa è la UNI EN ISO 7726:2002 [50]. La norma tecnica di riferimento utilizzata per la misurazione della CO₂ è la UNI EN ISO 16000-26:2012 [51]. La norma UNI EN 16798-1:2019 [38], trattata nel Capitolo 2.1.1, descrive invece i limiti di concentrazione di anidride carbonica in funzione delle categorie di comfort; per gli edifici scolastici, il valore di 1250 ppm (800 + 450) viene assunto come valore di riferimento per una buona qualità dell'aria. In mancanza di un dato da monitoraggio, viene preso come valore di riferimento per la concentrazione di anidride carbonica esterna 450 ppm.

3.2.3 Strumenti di misura

Lo strumento utilizzato per le misurazioni è un acquisitore di temperatura, umidità relativa e CO₂, di modello/tipo HOBO MX CO₂ Logger (MX1102A), mostrato in Figura 3.1, ed avente le seguenti caratteristiche:

- Range sensore di temperatura: 0°C-50°C
- Accuratezza sensore di temperatura: +/- 0.21°C
- Range sensore di umidità relativa: 1%-90%
- Accuratezza sensore di umidità relativa: +/- 2%
- Range sensore di CO₂: 0 ppm-5000ppm

- Accuratezza sensore di CO₂: +/- 50 ppm



Figura 3.1 – Foto dell'acquisitore utilizzato (HOBO MX CO₂ Logger)

3.3 Prove fluidodinamiche

3.3.1 Misurazione portata unità VMC

3.3.1.1 Introduzione

Questa prova consiste nella misurazione della velocità [m/s] e della portata d'aria di immissione e di estrazione [m³/h] fornita dall'unità di ventilazione installata; le misurazioni sono state effettuate alle tre impostazioni di velocità disponibili della macchina. Queste misurazioni hanno lo scopo di verificare il rispetto dei valori di portata d'aria determinati tramite il Decreto Ministeriale del 18 dicembre 1975 [41] e la norma UNI 10339:1995 [40]. La portata misurata sarà inoltre confrontata con la portata dichiarata nella scheda tecnica dell'unità VMC installata.

3.3.1.2 Riferimenti normativi

Come riportato precedentemente, le norme di riferimento per la determinazione della portata d'aria minima di rinnovo sono il Decreto Ministeriale del 18 dicembre 1975 e la UNI 10339. La norma tecnica di riferimento utilizzata per le misure è la UNI EN 12599:2012 [52].

3.3.1.3 Strumenti di misura

Lo strumento utilizzato per le misurazioni nella scuola secondaria di I grado G. Ferraris è un anemometro a elica con sonda fissa da 100 mm, di modello/tipo TESTO 417, mostrato in Figura 3.2, ed avente le seguenti caratteristiche:

- Campo di misura velocità: 0.30 m/s-20 m/s
- Precisione velocità: +/- 0.10 m/s + 1,5% v.m.
- Risoluzione velocità: 0.10 m/s
- Campo di misura portata: 0 m³/h-99999 m³/h
- Risoluzione Portata: 0.10 m³/h fino a 99.9 m³/h, 1 m³/h da 100 m³/h a 99999 m³/h



Figura 3.2 – Foto dell'anemometro utilizzato (TESTO 417)

Lo strumento utilizzato per le misurazioni nella scuola primaria I.C. Luca Della Robbia è un balometro, di modello/tipo ALNOR EBT721, mostrato in Figura 3.3, ed avente le seguenti caratteristiche:

- Campo di misura velocità: 0.125 m/s-78 m/s
- Precisione velocità: +/- 0.04 m/s + 3% v.m.
- Risoluzione velocità: 0.01 m/s
- Campo di misura portata: 42 m³/h-4250 m³/h
- Precisione portata: +/- 12 m³/h + 3% v.m
- Risoluzione Portata: 1 m³/h



Figura 3.3 – Foto del balometro utilizzato (ALNOR EBT721)

3.3.2 Prove con generatore di fumo

3.3.2.1 Introduzione

In queste prove è stato utilizzato un generatore di fumo e un conta-particelle per valutare l'influenza dell'aria espulsa sulla presa di aria esterna e il tempo di decadimento delle particelle generate all'interno dell'ambiente.

Per verificare se l'aria espulsa ha o meno influenza sulla presa di aria esterna, si utilizza il generatore di fumo all'interno dell'aula per poi osservare dall'esterno il comportamento dei fumi espulsi dalla macchina.

Il tempo di decadimento delle particelle viene monitorato attraverso un conta-particelle posizionato nell'aula all'inizio della prova, così da poter valutare la condizione dell'ambiente in assenza di fumi e poi successivamente ciò che accade durante la prova.

3.3.2.2 Strumenti di misura

Lo strumento utilizzato per le misurazioni è un conta particelle, di modello/tipo FLUKE 983, mostrato in Figura 3.3, ed avente le seguenti caratteristiche:

- Dimensione delle particelle misurabili: 0.3, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 10.0 μm
- Efficienza di conteggio: 50 % per 0.3 μm ; 100 % per particelle $> 0.45 \mu\text{m}$

- Ingresso del campione: sonda isocinetica
- Campo di misura umidità relativa: 20%-90%
- Accuratezza umidità relativa: +/- 7%
- Campo di misura temperatura: 10°C-40°C
- Accuratezza temperatura: +/- 3°C



Figura 3.4 - Foto del conta-particelle utilizzato (Fluke 983)

Lo strumento utilizzato per le prove è un generatore di fumo, di modello/tipo Colt 4 Basic, mostrato in Figura 3.4, ed avente le seguenti caratteristiche:

- Durata aerosol massima portata: 14-15 minuti
- Produzione di fumo: 0 – 120 m³/min a 1,5 m di visibilità
- Persistenza del fumo a 20°C: 1.25-1.5 ore
- Dimensione particelle: 0.2-0.3 μm



Figura 3.5 – Foto del generatore di fumo utilizzato (Colt4 Basic)

3.3.3 Blower Door Test

3.3.3.1 Introduzione

Il blower door test viene effettuato con lo scopo di valutare la permeabilità all'aria dell'involucro dell'aula oggetto di valutazione. La prova consiste nel generare una differenza di pressione tra interno ed esterno pari a 50 Pascal mediante un ventilatore montato temporaneamente sulla porta attraverso un telaio adattabile e un telo che sigilla la porta stessa. Il flusso d'aria generato dalla differenza di pressione impostata definisce la portata di aria di infiltrazione a 50 Pa (q_{50}). Dividendo il valore q_{50} per il volume interno dell'aula, si ottiene il numero di ricambi d'aria a 50 Pa (n_{50}). Per la realizzazione della prova è necessario inoltre misurare la temperatura e l'umidità relativa all'interno dell'ambiente e all'esterno, la velocità del vento e la pressione atmosferica.

3.3.3.2 Riferimenti normativi

La norma tecnica di riferimento utilizzata per la realizzazione del blower door test è la UNI EN ISO 9972:2015 [53].

3.3.3.3 Strumenti di misura

Lo strumento utilizzato per il blower door test di modello/tipo Infiltec E3 Blower Door, mostrato in Figura 3.5, presenta le seguenti caratteristiche:

- Componenti: telaio metallico, telo, ventilatore, manometro, pc per acquisizione
- Portata massima ventilatore: 9265 m³/h



Figura 3.6 - Foto strumenti utilizzati (Infiltec E3 Blower Door)

Il primo strumento utilizzato per le misurazioni è un misuratore di temperatura e umidità relativa, di modello/tipo Vaisala HM 70, mostrato in Figura 3.6, ed avente le seguenti caratteristiche:

- Range sensore di temperatura: -70°C - 180°C
- Accuratezza sensore di temperatura: $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$
- Range sensore di umidità relativa: 0%-100%
- Accuratezza sensore di umidità relativa: $\pm 1.5\%$



Figura 3.7 - Foto del sensore utilizzato (Vaisala HM 70)

Il secondo strumento utilizzato per le misurazioni è l'anemometro descritto nel Capitolo 3.3.1.3 e mostrato nella Figura 3.2.

3.4 Prove acustiche

3.4.1 Riferimenti normativi

Le caratteristiche acustiche interne degli ambienti scolastici vengono definite dalla norma UNI 11532-2:2020 [54] che fornisce delle indicazioni per ottenere ambienti acusticamente idonei all'attività didattica, sia per il corpo docente che per gli alunni.

Nelle scuole la comprensione del parlato è un requisito di primaria importanza e per questo motivo i fattori che sono stati valutati sono: T (tempo di riverberazione), C50 (Chiarezza), STI (Speech Transmission Index) e Lic,int (rumore degli impianti a funzionamento continuo) calcolato in funzione dell' Lpu,c (livello continuo equivalente di pressione sonora ponderato A di rumore di impianto, in posizione specifica, normalizzato rispetto al tempo di riverberazione).

La normativa ha lo scopo di definire i limiti di isolamento acustico per tutti gli edifici con destinazione d'uso diversa da quella produttiva, al fine di prevenire il disturbo percepito all'interno degli ambienti abitativi per rumori provenienti dall'esterno dell'edificio, ma anche da rumori provocati all'interno dello stesso tra diverse unità immobiliari e/o dagli impianti a servizio.

Per quanto riguarda il tempo di riverbero e lo STI nell'ambito degli edifici a destinazione scolastica, nel prospetto 1 della UNI 11532-2 vengono individuate 6 categorie funzionali:

Tabella 3.1 - Prospetto 1 della UNI 11532-2

Category	Activities in the environment	Methods of intervention
A1	Music	<i>Objective achieved with integrated design of geometry, furniture, residual noise control</i>
A2	Spoken / Conference	
A3	Lesson / communication as speech and lecture	
A4	Special classroom lecture / communication	
A5	Sport	
A6	Areas and spaces not intended for learning and libraries	<i>Objective achieved with sound absorption and residual noise control</i>

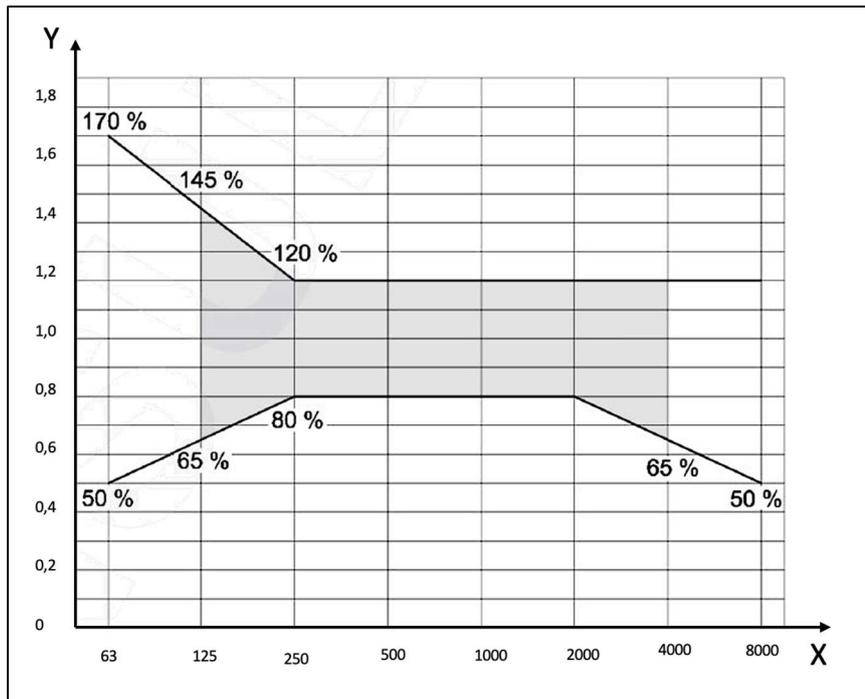
Per ciascuna delle categorie, nel prospetto 6 si individua il tempo di riverberazione ottimale T_{ott} :

Tabella 3.2 - Prospetto 6 della UNI 11532-2. (*1 Ambiente arredato e occupato all'80%, *2 Ambiente arredato e non occupato)

Category	Occupied environment 80%	Environment volume
A1	$T_{ott} = (0,45 * \text{Log}V + 0,07) ^{*1}$	$30 \text{ m}^3 < V < 1000 \text{ m}^3$
A2	$T_{ott} = (0,37 * \text{Log}V - 0,14) ^{*1}$	$50 \text{ m}^3 < V < 5000 \text{ m}^3$
A3	$T_{ott} = (0,32 * \text{Log}V - 0,17) ^{*1}$	$30 \text{ m}^3 < V < 5000 \text{ m}^3$
A4	$T_{ott} = (0,26 * \text{Log}V - 0,14) ^{*1}$	$30 \text{ m}^3 < V < 500 \text{ m}^3$
Category	No occupied environment	
A5	$T_{ott} = (0,75 * \text{Log}V - 1) ^{*2}$ $T_{ott} = 2 ^{*2}$	$200 \text{ m}^3 < V < 10000 \text{ m}^3$ $V > 10000 \text{ m}^3$

Il valore del tempo di riverberazione di progetto dovrà essere compreso nell'intervallo di conformità riportato nel grafico seguente:

Grafico 3.1 - Intervallo di conformità del valore del tempo di riverberazione di progetto



Dove:

X_f = frequenza (Hz)

$Y = T/T_{ott}$ tempo di riverberazione dipendente dalla frequenza T rispetto al tempo di riverberazione desiderato T_{ott} (adimensionale)

Nel prospetto 4 della UNI 11532-2 sono riportati i valori di STI che si applicano alle Categoria A1, A2, A3, A4.

Tabella 3.3 - Prospetto 4 della UNI 11532-2

	V < 250 m³	V > 250 m³
Without amplification system	> 0.55 with source output at 1 m on axis equal to 60 dB (A)	> 0.50 with source output at 1 m on axis equal to 70 dB (A)
With amplification system	> 0.60 with source output as in normal conditions of operation of the amplification system	

I valori di STI sono riferiti ad ambiente arredato e con la presenza di due persone al massimo (Tecnici rilevatori). Per ambienti inferiori a 250 m³ in alternativa allo STI può essere utilizzato il C50 nelle bande d'ottava 500-1000-2000 Hz. In questo caso il valore di riferimento del C50 (senza impianto di amplificazione) deve essere maggiore uguale a 2 dB.

Il rumore degli impianti a funzionamento continuo generato in ambienti diversi dall'ambiente in esame è soggetto al DPCM 5/12/1997 [55], mentre il rumore degli impianti a funzionamento continuo all'interno degli ambienti deve essere conforme al prospetto 8

della UNI 11532-2:2020 e il rumore dovuto a tutte le potenziali sorgenti di rumore L_{amb} deve essere conforme al prospetto 10 della norma UNI 11532-2:2020.

Tabella 3.4 - Prospetto 8 e 10 della UNI 11532-2: valori di riferimento dovuto agli impianti a funzionamento continuo ($L_{i,int}$ e NC) e al livello di rumore ambiente (L_{amb})

Destination of the room	$L_{i,int}$ (dBA)	NC	L_{amb} (dBA)
Classrooms < 250 m ³	≤ 34	≤ 25	≤ 38
Classrooms ≥ 250 m ³	≤ 38	≤ 30	≤ 41
Single Office	≤ 35	≤ 25	≤ 38
Expositions	≤ 45	≤ 35	≤ 48
Gyms, swimming pools, administrative offices, laboratories, areas open to the public, canteens, corridors, reception / desk area	≤ 45	≤ 35	≤ 48

3.4.2 Strumenti di misura

La strumentazione utilizzata nei rilevamenti risponde ai requisiti delle norme UNI:

- 1) Fonometro integratore B&K tipo 2250 Matr. N. 3030464 con certificato di taratura n. CDK2200397 del 17/01/2022;
- 2) Calibratore acustico B&K tipo 4231;
- 3) Microfono pre-polarizzato B&K da ½" tipo 4189 Matr. N. 3318459;
- 4) Pre-amplificatore B&K tipo ZC-0032 Matr. N. 3318459;
- 5) Sorgente sonora direzionale di riferimento B&K tipo 4720;
- 6) Sorgente sonora dodecaedrica omnidirezionale B&K tipo OmniPower Sound Source 4292-L
- 7) Amplificatore da 500 Watt su 4 Ohm output con generatore incorporato per rumore rosa e bianco B&K tipo 2734 B

La strumentazione è di Classe 1, conforme alle Norme IEC 61672-1/2 (sostituisce IEC 60651, IEC 60804) e IEC 60942. Prima e dopo la serie di misurazioni è stata controllata la calibrazione della catena strumentale mediante calibratore acustico secondo la norma UNI 9432/2011.

3.4.3 Metodologia dei rilievi

Per ogni descrittore d'interesse per il settore scolastico, vengono di seguito riportati i metodi di verifica da applicarsi.

Descrittori C50 e STI

1. Identificazione delle posizioni di misura secondo il prospetto 11 e 12 della UNI 11532-2
2. Misurazione del parametro oggettivo STI, derivato dalle misure della risposta all'impulso e del rumore di fondo, secondo la metodologia indiretta proposta dalla norma EN 60268-16
3. Calcolo della media aritmetica dei valori rilevati, da considerarsi come risultato della misurazione
4. Correzione del risultato della misurazione con l'incertezza di misura
5. Confronto del risultato della misurazione corretta con l'incertezza di misura con il valore di riferimento

Per la valutazione di C50 e STI viene utilizzata una sorgente direzionale capace di approssimare un oratore umano.

Tempo di riverberazione

Il tempo di riverbero viene misurato secondo la UNI EN ISO 3382-2:2008 e prevede:

1. Identificazione delle posizioni di misura secondo il prospetto 1 della suddetta norma con un approccio "Tecnico-Progettuale" (6 combinazioni sorgente-microfono)
2. Calcolo della media aritmetica dei valori rilevati in ambiente arredato (con il metodo della risposta integrata all'impulso), da considerarsi come risultato della misurazione
3. Nel caso in cui la misurazione sia eseguita in ambiente arredato ma non occupato, i valori sono corretti con l'equazione 3 della UNI 11532-2 che considera la superficie aggiuntiva equivalente di assorbimento acustico delle persone
4. Confronto dei risultati ottenuti con quelli di riferimento

Rumorosità degli impianti in ambiente

1. Identificazione delle posizioni di misura secondo il prospetto 11 e 12 della norma
2. Calcolo della media aritmetica dei valori rilevati, da considerarsi come risultato della misurazione
3. Correzione del risultato della misurazione con l'incertezza di misura
4. Confronto del risultato della misurazione corretta con l'incertezza di misura con il valore di riferimento

3.5 Scuola secondaria di I grado G. Ferraris

3.5.1 Dati della scuola e dell'unità VMC

Lo stabile sede delle misurazioni di controllo è la scuola secondaria di I grado G. Ferraris nel comune di Falconara Marittima, provincia di Ancona; nello specifico le aule oggetto delle prove sono la 3°B per le prove termiche, di qualità dell'aria e fluidodinamiche, la 3°D

per il blower door test e l'Aula 4 per le prove acustiche. Di seguito si riporta la planimetria della parte di edificio interessata dalle misurazioni.

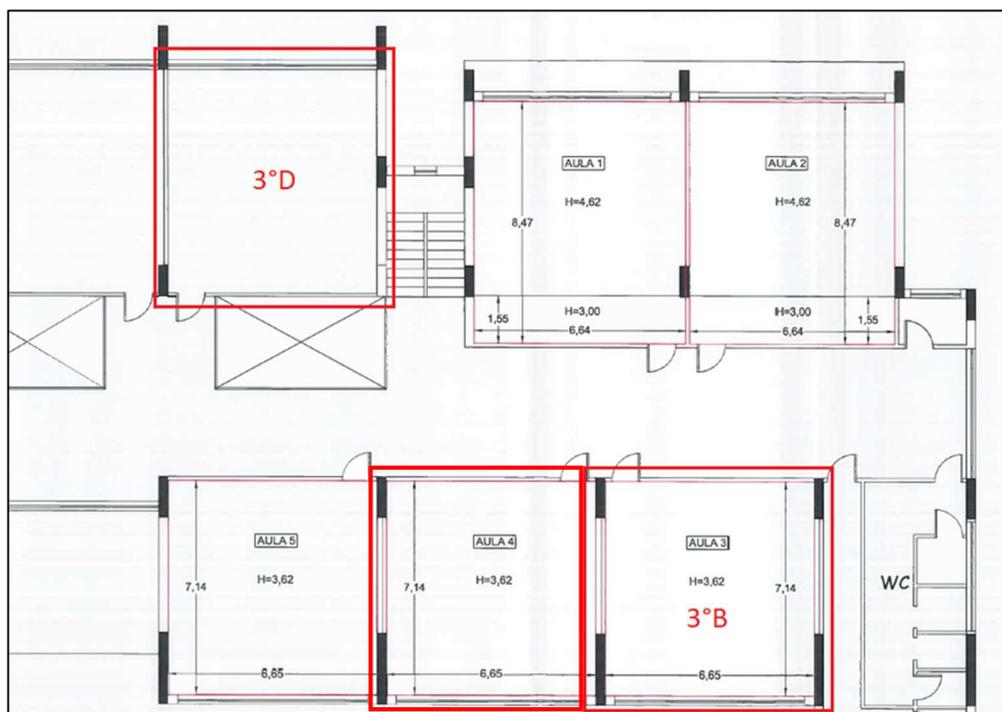


Figura 3.8 – Planimetria della scuola secondaria di I grado G. Ferraris con indicazione delle aule oggetto di prove

L'intervento prevedeva di dotare la scuola di un impianto di ventilazione decentralizzato, installando un'unità VMC interna per ogni aula oggetto di intervento.

È stata scelta l'unità VMC SCOLARIA 800 (Figura 3.9) che dispone di tre impostazioni di velocità (da 1 a 3) di immissione dell'aria e avente le seguenti caratteristiche: portata dichiarata fino a 750 m³/h, area lorda di immissione di 1815 cm², area lorda di estrazione di 1630 cm², filtri di classe F4 sulla mandata (aria di immissione) e sulla ripresa (aria estratta) ed efficienza del recuperatore di calore pari a 85,80%.



Figura 3.9 – Unità VMC SCOLARIA 800

Le dimensioni dell'unità VMC sono riportate di seguito.

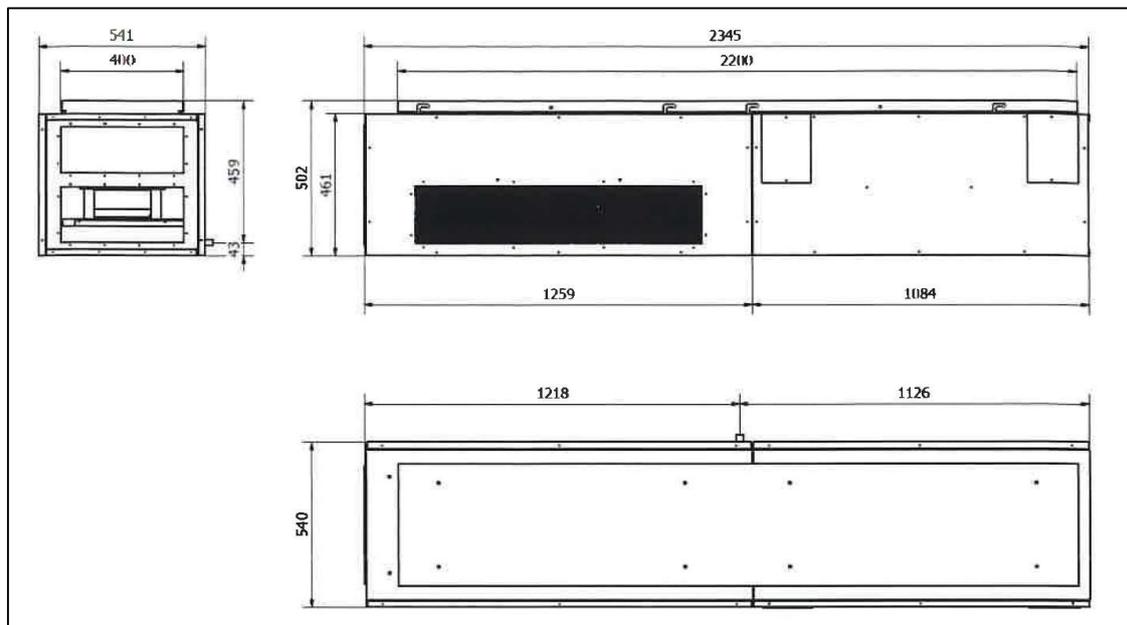


Figura 3.10 – Dimensioni unità VMC SCOLARIA 800

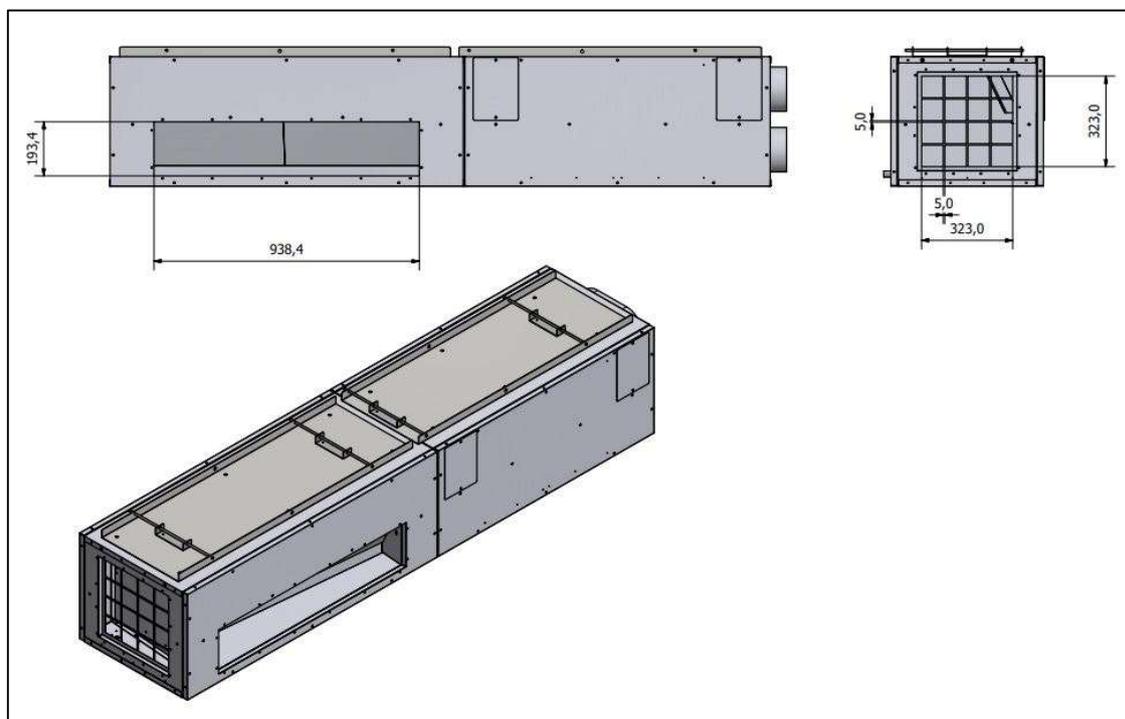


Figura 3.11 – Dimensioni aperture di immissione ed estrazione unità VMC SCOLARIA 800

3.5.2 Prove termiche e qualità dell'aria

3.5.2.1 Metodologia dei rilievi

I rilievi per la misura della temperatura, dell'umidità relativa e della CO₂ sono stati effettuati in una postazione all'interno dell'aula. Dopo la necessaria calibrazione dell'intera catena strumentale, come previsto dalle norme vigenti, sono stati eseguiti i rilievi. La posizione dello strumento è riportata in pianta e nella foto (Figura 3.12). Lo strumento è stato installato sulla parete opposta all'unità VMC ad un'altezza di 2,23 m. Tale posizione è stata scelta per evitare interferenze con l'attività scolastica ed eventuali manomissioni da parte degli utenti dell'aula.

Dati monitoraggio:

- Data inizio prova: 15/02/2022
- Data fine prova: 3/03/2022
- Durata complessiva prova: 17 giorni
- Intervallo di acquisizione dei dati: ogni 5 minuti

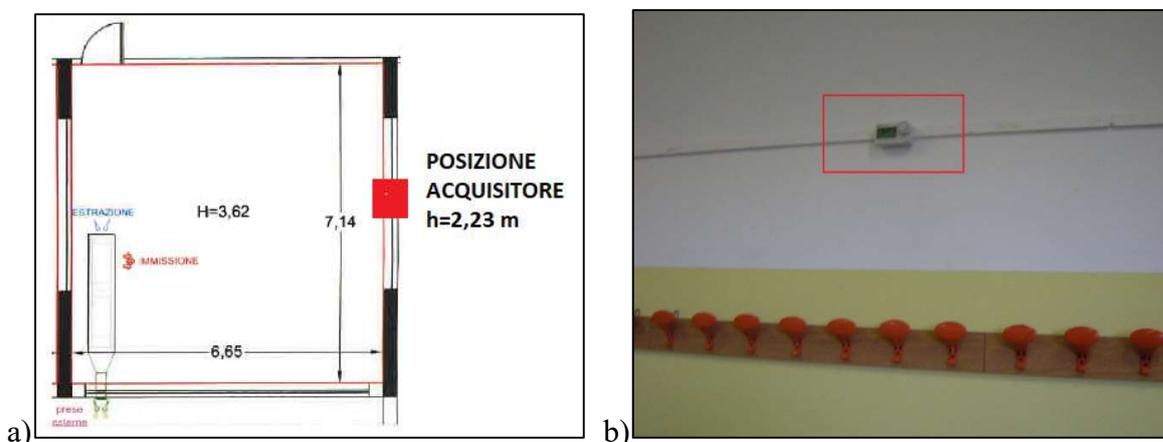


Figura 3.12 – Posizione acquirente in pianta (a) e in foto (b)

3.5.2.2 Geometria del locale

La planimetria dell'aula dove sono state effettuate le misure è mostrata in Figura 3.13, mentre in Figura 3.14 si riportano le foto delle quattro pareti dell'aula. Di seguito si riportano le caratteristiche geometriche dell'aula e i profili di occupazione e di utilizzo degli impianti.

- Denominazione aula: 3°B

- Tipologia aula: didattica
- N° studenti: 18 + 1 (docente)
- Superficie aula: 47,10 m²
- Volume aula: 165,00 m³
- Parametri da misurare: temperatura dell'aria interna, umidità relativa interna, CO₂ interna
- Profilo di occupazione dell'aula: assente
- Profilo di accensione dell'impianto di riscaldamento: 24 ore su 24
- Profilo di accensione dell'impianto di ventilazione: 24 ore su 24 all'impostazione di velocità 1
- Profilo di apertura delle finestre: assente

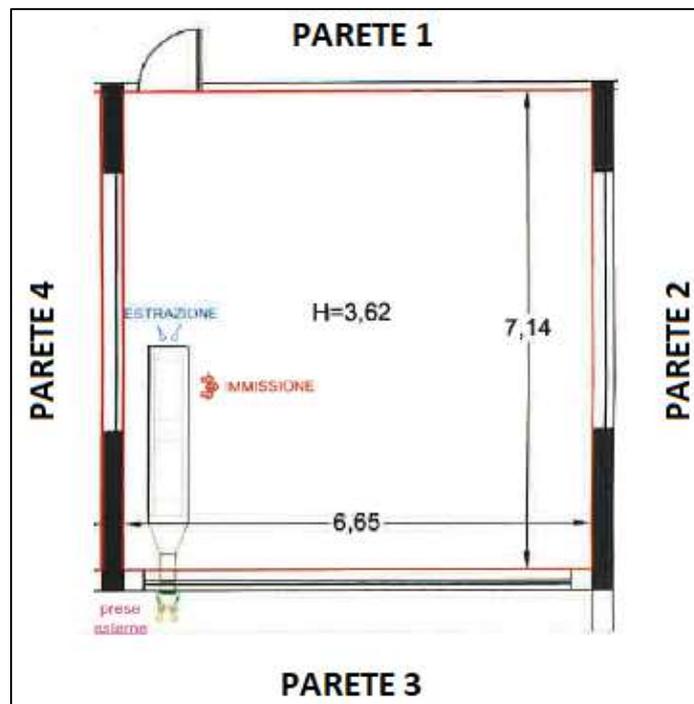
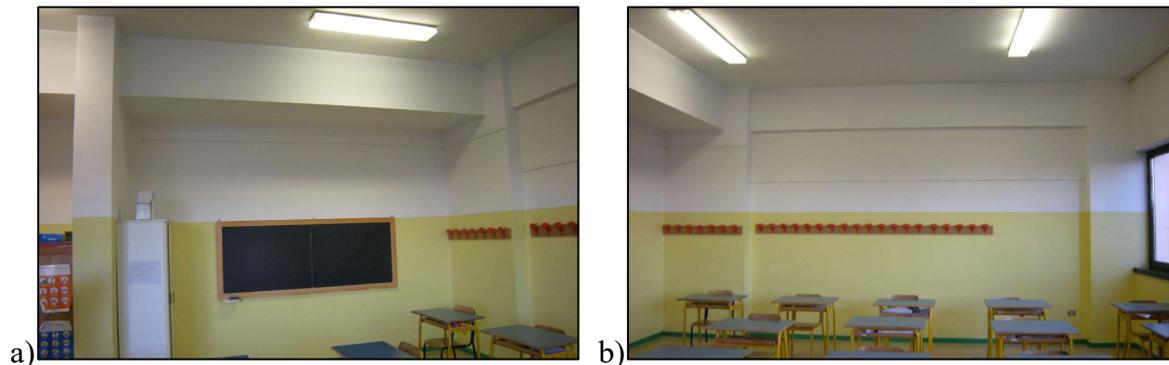


Figura 3.13 – Planimetria dell'aula 3°B oggetto di misurazioni



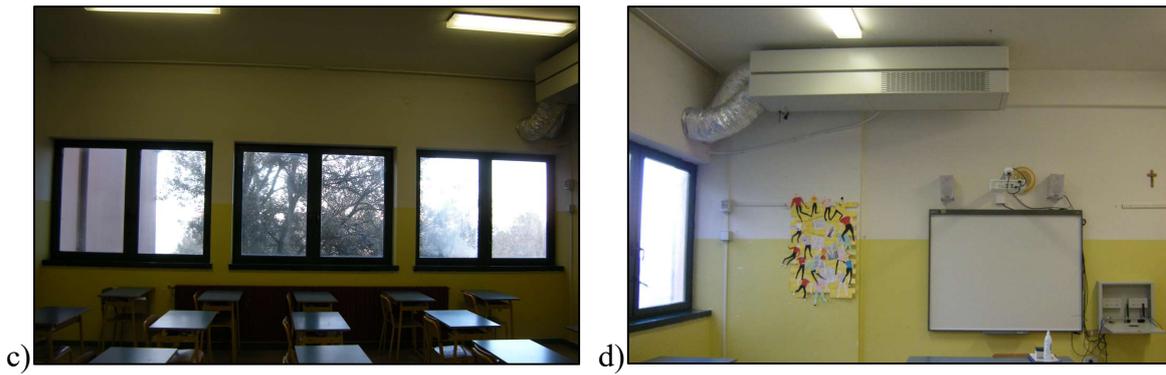


Figura 3.14 – Foto parete 1 (a), parete 2 (b), parete 3 (c), parete 4 (d)

3.5.2.3 Valori di temperatura, umidità relativa e CO₂ ottenuti

Nei Grafici 3.1, 3.2 e 3.3 sono riportati i dati della temperatura dell'aria interna, dell'umidità relativa e della concentrazione di CO₂ raccolti dal 15 febbraio al 3 marzo, per un totale di 17 giorni di monitoraggio. È importante sottolineare che non si è a conoscenza dell'impostazione di velocità a cui ha lavorato la macchina durante l'intero periodo di valutazione e dell'eventuale apertura/chiusura delle finestre. La temperatura è espressa in gradi Celsius [°C], l'umidità relativa in valore percentuale, mentre la concentrazione di CO₂ è espressa in ppm, ovvero parti di inquinante per milione di parti di aria. Nei Grafici 3.4, 3.5 e 3.6 sono riportati i dati del 18 febbraio, così da analizzare un giorno significativo appartenente al periodo di monitoraggio.

Grafico 3.2 – *Andamento della temperatura dell'aria interna nell'aula 3°B dal 15 febbraio al 3 marzo*

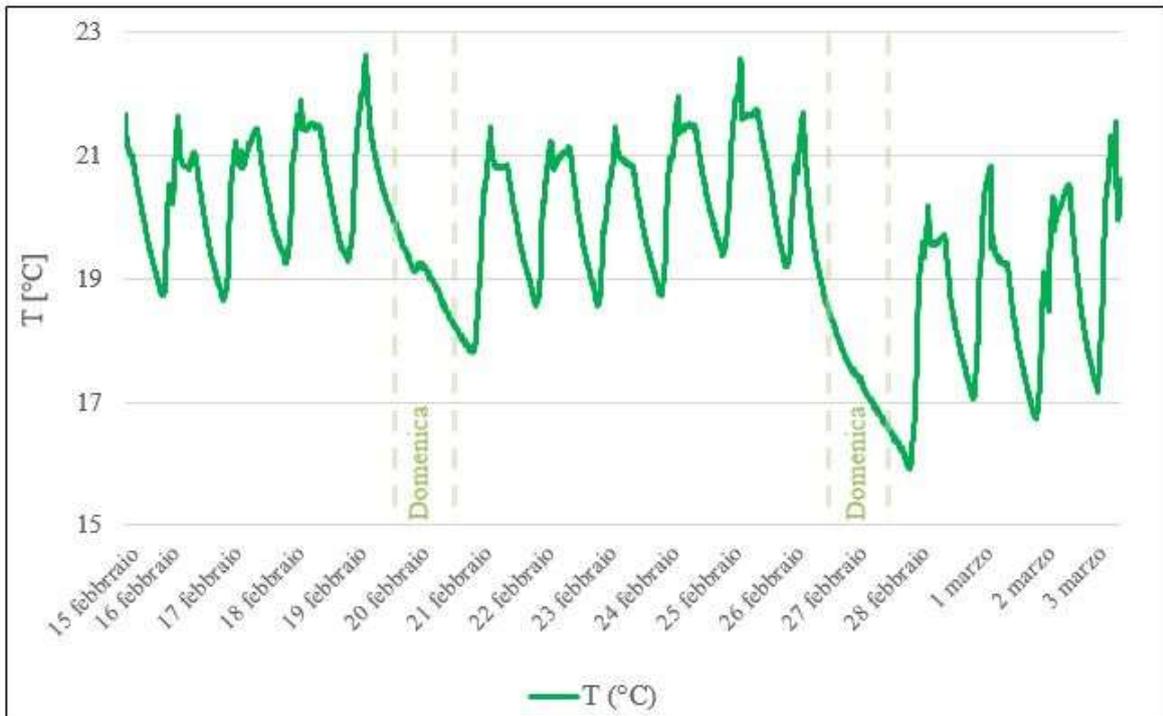


Grafico 3.3 – Andamento dell'umidità relativa nell'aula 3°B dal 15 febbraio al 3 marzo

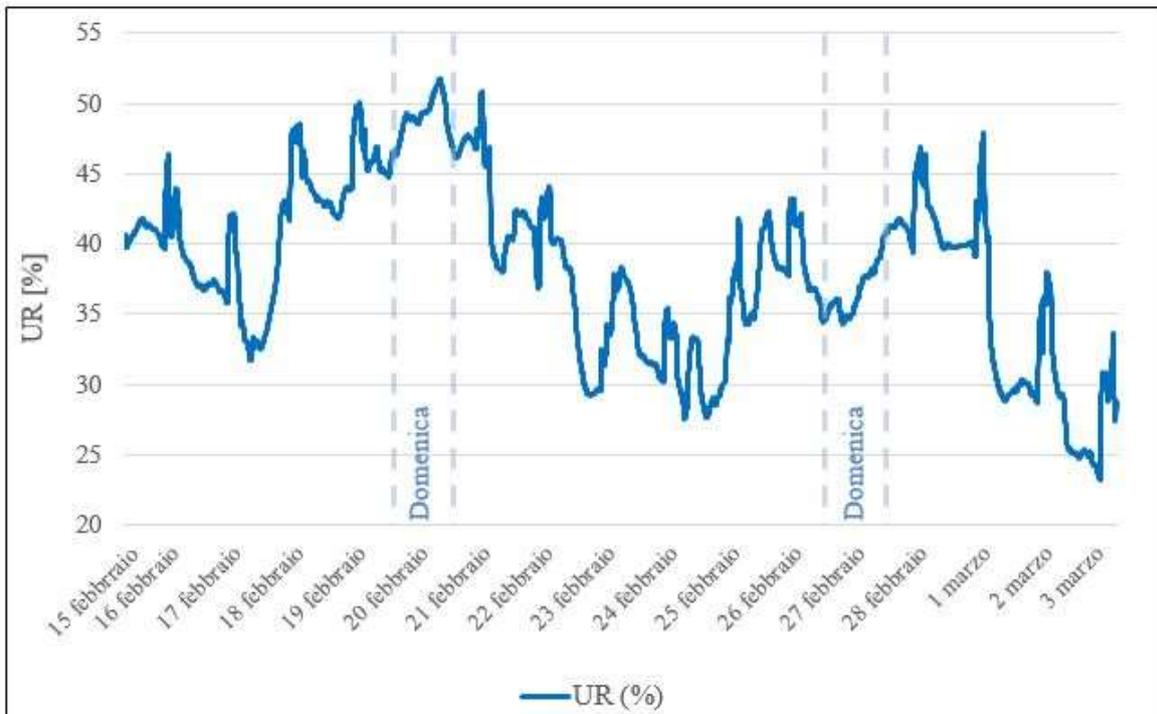


Grafico 3.4 – Andamento della concentrazione di CO₂ nell'aula 3°B dal 15 febbraio al 3 marzo

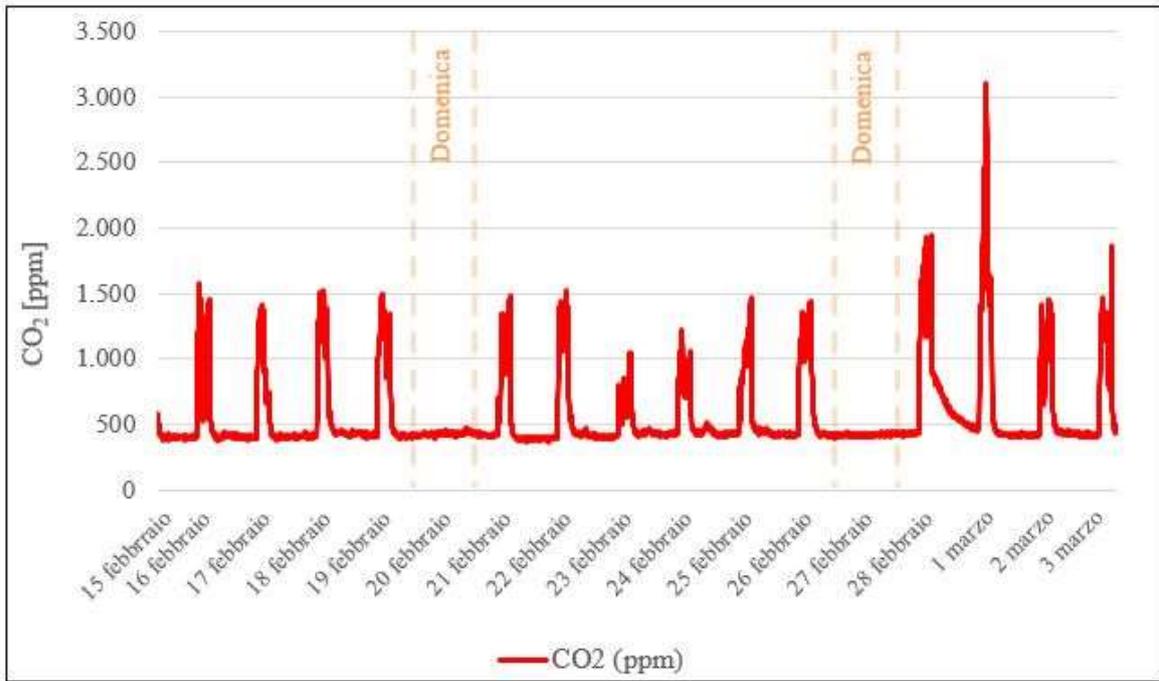


Grafico 3.5 – Andamento della temperatura dell'aria interna nell'aula 3°B il giorno 18 febbraio

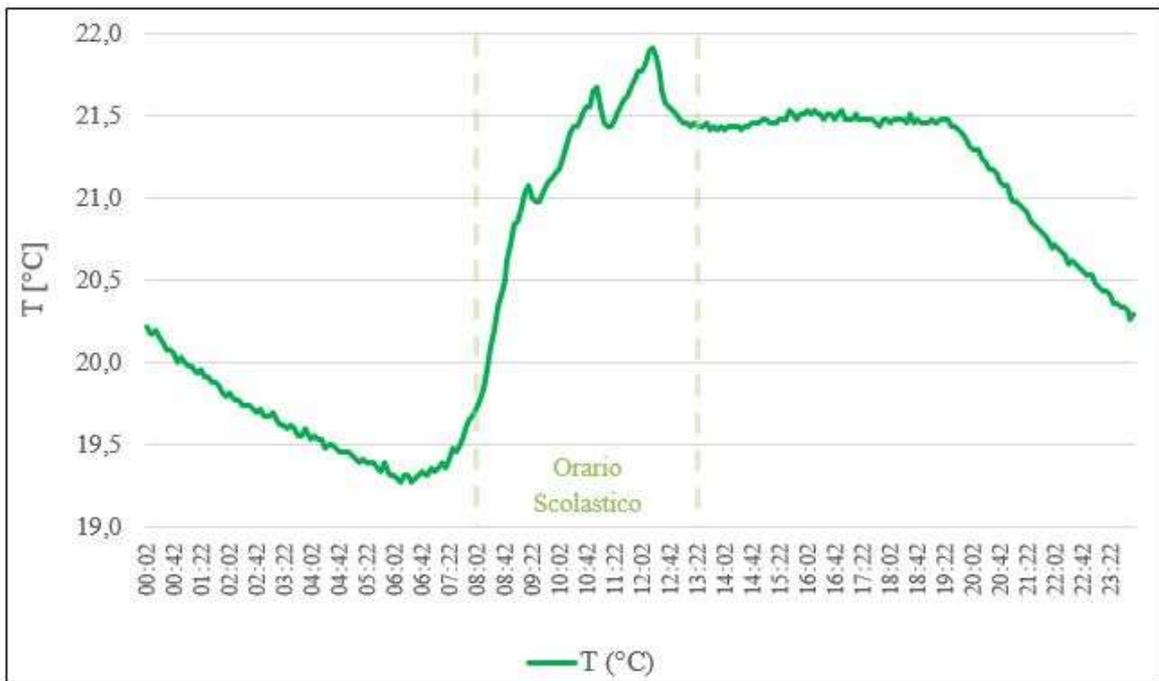


Grafico 3.6 – Andamento dell'umidità relativa nell'aula 3°B il giorno 18 febbraio

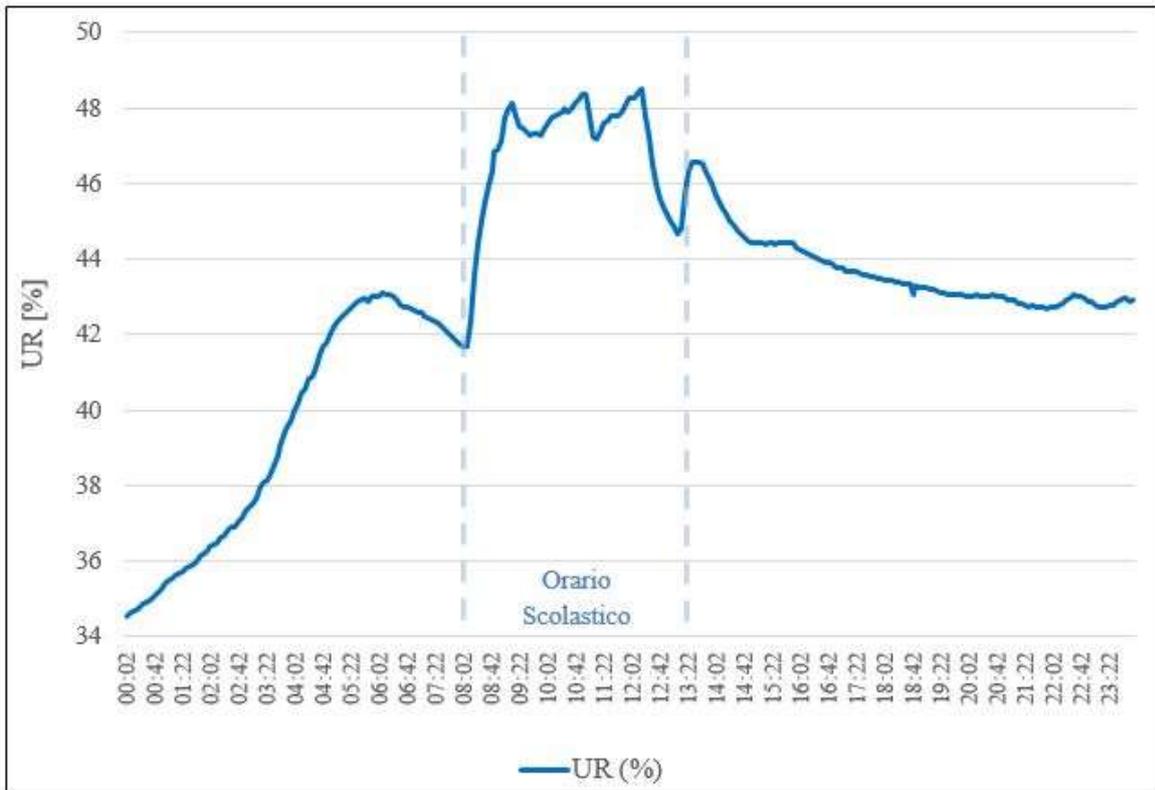
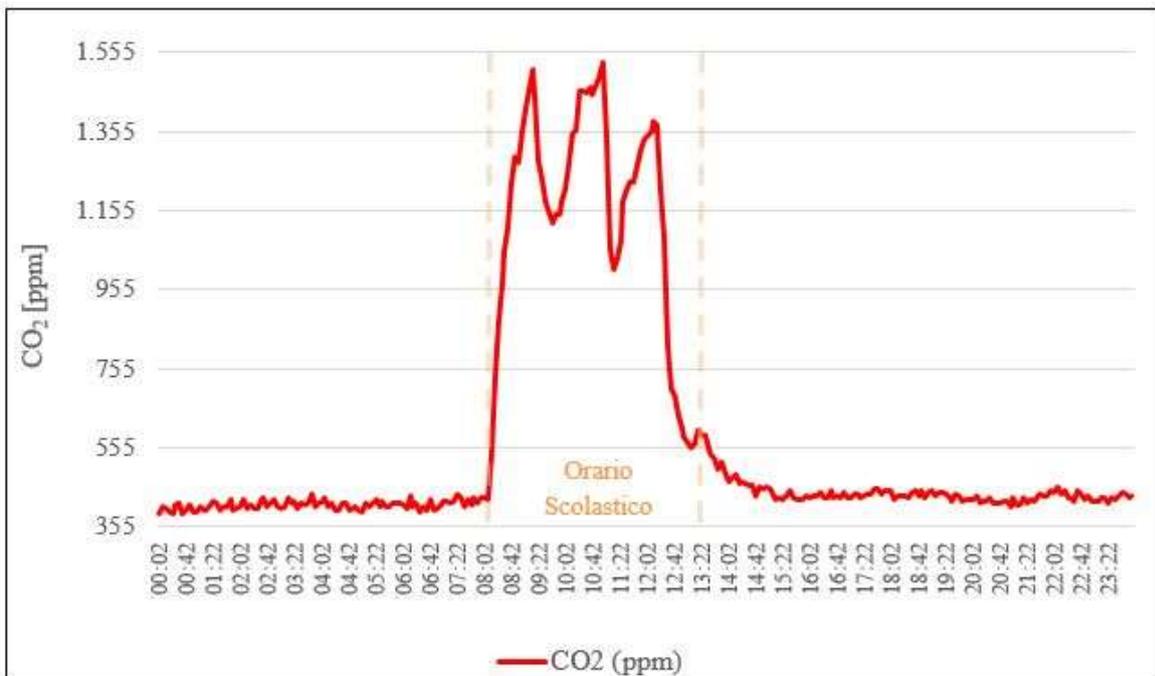


Grafico 3.7 – Andamento della concentrazione di CO₂ nell’aula 3°B il giorno 18 febbraio



3.5.2.4 Valutazioni sperimentali

I picchi presenti nei Grafici 3.1, 3.2 e 3.3 si trovano tra le ore 8:00 e le ore 13:00 di ogni giorno ad eccezione delle domeniche (20 e 27 febbraio); tali picchi sono dovuti alla presenza degli studenti durante l'orario scolastico. La presenza di utenti all'interno di un ambiente confinato produce un aumento di CO₂, temperatura e umidità relativa. Questo fenomeno è possibile osservarlo in dettaglio nei Grafici 3.4, 3.5 e 3.6 dove sono riportati gli andamenti delle grandezze misurate per un singolo giorno (18 febbraio).

La temperatura dell'aria interna varia tra i 22.6°C e i 15.9°C nell'intero periodo di monitoraggio, mentre durante l'orario scolastico, escludendo le domeniche, si ha in media una temperatura di circa 20.5°C.

L'umidità relativa varia tra il 23.2% e il 51.7%, mentre durante l'orario scolastico ad esclusione delle domeniche assume un valore medio pari al 40.5%.

La concentrazione di CO₂ varia tra i 366 ppm e i 3111 ppm, arrivando ad un valore medio di 1116.2 ppm durante l'orario scolastico. Osservando il Grafico 3.3 è possibile notare che, ad eccezione delle giornate del 23 e 24 febbraio, la concentrazione di CO₂ supera durante l'orario scolastico il valore di riferimento di 1250 ppm dato dalla norma UNI EN 16798-1:2019.

I valori di temperatura dell'aria interna e di umidità relativa risultano idonei durante le ore frequentate dagli studenti, mentre in alcune ore la concentrazione di CO₂ supera il valore di riferimento associato ad una buona qualità dell'aria.

3.5.3 Prove fluidodinamiche

3.5.3.1 Misurazione portata unità VMC

3.5.3.1.1 Metodologia dei rilievi

La misurazione delle portate d'aria e delle velocità è stata effettuata in cinque posizioni diverse (tre sull'immissione e due sull'estrazione) alle tre impostazioni di velocità disponibili della macchina. Sono state scelte cinque posizioni per verificare se il comportamento della macchina varia nei diversi punti delle aree di immissione ed estrazione dell'aria. Le posizioni scelte sono riportate nella Figura 3.15; le posizioni denominate A, B e C si trovano sull'area di immissione della macchina, mentre le posizioni D ed E si trovano sull'area di estrazione. Poiché le aree di immissione ed estrazione sono in parte ostruite dalle griglie, è stato impostato all'interno dello strumento (anemometro) il fattore di incidenza della griglia K.FACT che indica la proporzione di spazio libero sulla sezione. Il K.FACT è stato quindi ricavato effettuando il rapporto tra l'area netta di immissione/estrazione e l'area lorda di immissione/estrazione, ottenendo un valore pari a 0,42.

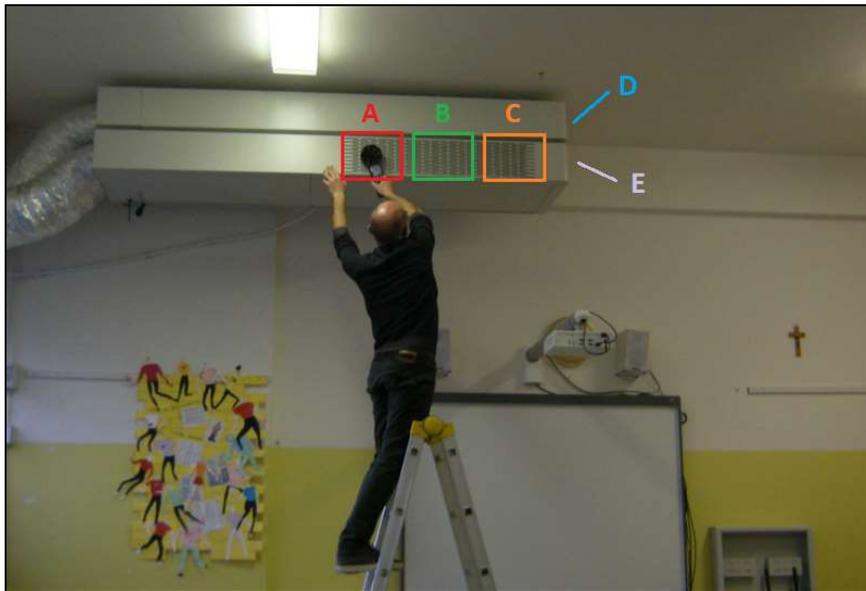


Figura 3.15 - Unità VMC con evidenziati i punti dove è stato utilizzato lo strumento

Dati monitoraggio:

- Data inizio prova: 3/03/2022
- Data fine prova: 3/03/2022
- Durata complessiva prova: 30 minuti

3.5.3.1.2 Geometria del locale

L'unità VMC scelta per le misure è posizionata nella medesima aula utilizzata per le prove termiche. La planimetria dell'aula è mostrata nella Figura 3.13, con le relative foto del rilievo (Figura 3.14).

- Denominazione aula: 3°B
- Tipologia aula: didattica
- N° studenti: 18 + 1 (docente)
- Superficie aula: 47,10 m²
- Volume aula: 165,00 m³
- Parametri da misurare: portata d'aria e velocità sulla mandata e ripresa dell'unità VMC alle tre impostazioni di velocità
- Portata dichiarata da scheda tecnica: fino a 750 m³/h
- Area lorda di immissione: 1815 cm²
- Area lorda di estrazione: 1630 cm²
- Portata secondo D.M. 18/12/1975: 577,5 m³/h

- Portata secondo UNI 10339: 457,8 m³/h

3.5.3.1.3 Valori di portata d'aria e velocità ottenuti

Nella Tabella 3.5 sono riportati i dati della portata d'aria e della velocità per le cinque posizioni definite, alle tre impostazioni di velocità della macchina disponibili; la portata è espressa in m³/h, mentre la velocità in m/s. Nel Grafico 3.7 sono riportate le portate d'aria misurate per le cinque posizioni scelte; tale grafico permette di evidenziare l'andamento delle portate d'aria sull'immissione dalla posizione di sinistra (A) alla posizione di destra (C) e l'andamento delle portate d'aria sull'estrazione dall'alto (D) verso il basso (E). Nel Grafico 3.8, come per le portate, sono state riportate le velocità misurate per le cinque posizioni, così da evidenziare l'andamento anche per la velocità. Infine, nella Tabella 3.6 sono riportate le portate di immissione ed estrazione medie calcolate effettuando la media tra le portate misurate nelle posizioni tre posizioni sull'area di immissione (A, B e C) e nelle due posizioni sull'area di estrazione (D ed E), la loro differenza per valutare se l'ambiente sia in pressione (valore positivo) o in depressione (valore negativo) e la variazione in percentuale tra le due.

Tabella 3.5 - Valori di portata e velocità ottenuti durante le misurazioni nelle posizioni definite

Grandezza	Impostazione 1	Impostazione 2	Impostazione 3
Portata mandata posizione A [m ³ /h]	143	218	265
Velocità mandata posizione A [m/s]	0.52	0.80	0.96
Portata mandata posizione B [m ³ /h]	156	260	405
Velocità mandata posizione B [m/s]	0.57	0.96	1.50
Portata mandata posizione C [m ³ /h]	156	320	465
Velocità mandata posizione C [m/s]	0.56	1.15	1.70
Portata ripresa posizione D [m ³ /h]	116	235	315
Velocità ripresa posizione D [m/s]	0.48	0.95	1.30
Portata ripresa posizione E [m ³ /h]	190	280	410
Velocità ripresa posizione E [m/s]	0.75	1.12	1.65

Grafico 3.8 - Andamento della portata per le cinque posizioni definite alle tre impostazioni di velocità

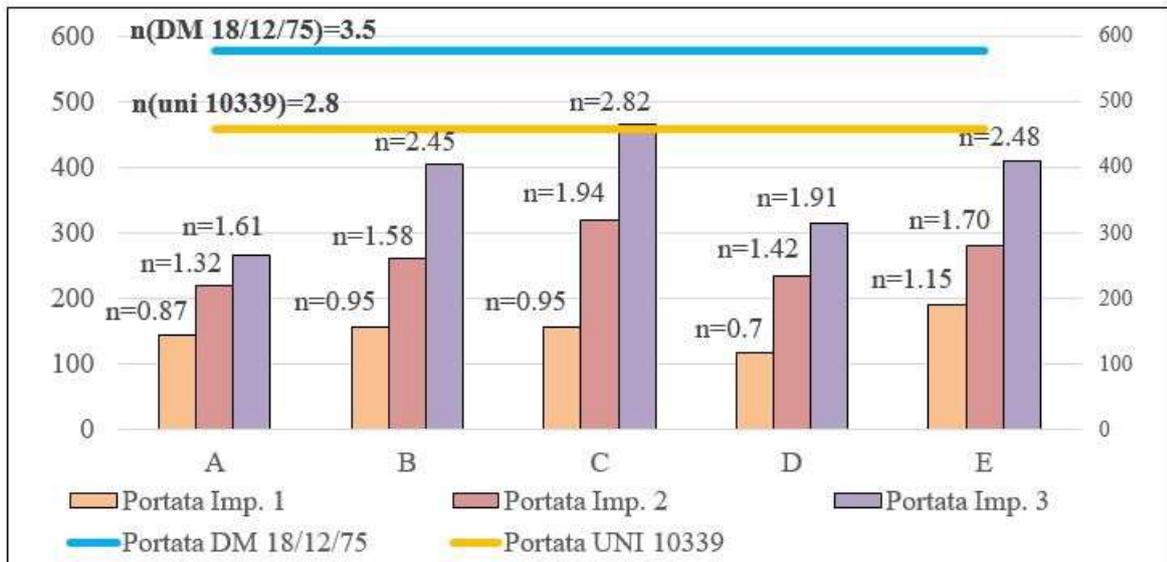


Grafico 3.9 - Andamento della velocità per le cinque posizioni definite alle tre impostazioni di velocità

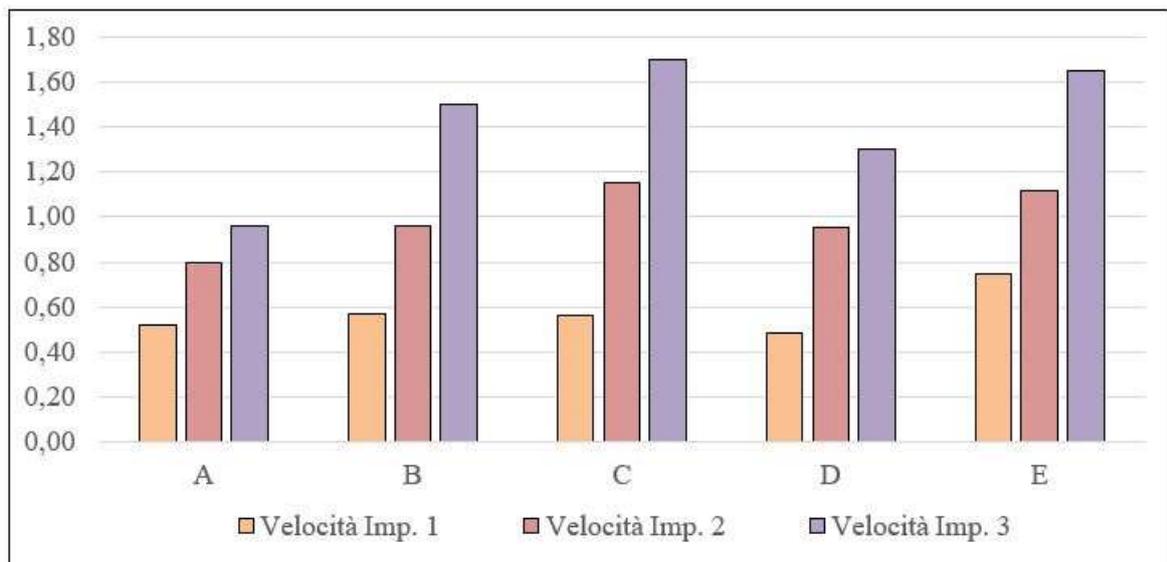


Tabella 3.6 – Portate medie di immissione ed estrazione con variazione percentuale tra le due

Grandezza	Impostazione 1	Impostazione 2	Impostazione 3
Portata media di immissione [m ³ /h]	151.67	266.00	378.33
Portata media di estrazione [m ³ /h]	153.00	257.50	362.50
Differenza tra portata media di immissione ed estrazione [m ³ /h]	-1.33	8.50	15.83
Variazione percentuale tra immissione ed estrazione [%]	0.88	-3.20	-4.19

3.5.3.1.4 Valutazioni sperimentali

La portata massima misurata è pari a 465 m³/h nella posizione C all'impostazione di velocità 3 (Tabella 3.5). In ogni posizione e per ogni impostazione di velocità non risultata rispettata la portata calcolata secondo il D.M. 18/12/1975, pari a 577,5 m³/h, mentre solo nella posizione C all'impostazione di velocità 3 è rispettata la portata calcolata secondo la norma UNI 10339, pari a 457,8 m³/h. Inoltre, le portate misurate non raggiungono il valore dichiarato nella scheda tecnica alle condizioni di prova della macchina. Nell'area di immissione (grafico 3.7), sia la portata che la velocità aumentano spostandosi da sinistra (posizione A) verso destra (posizione B), mentre nell'area di estrazione (Grafico 3.8) la portata e la velocità sono molto più elevate nella posizione in basso (E) rispetto alla posizione in alto (D).

Infine, effettuando una media tra le portate misurate sull'aria di immissione e quelle misurate sull'aria di estrazione (per tutte e tre le velocità, Tabella 3.6), il sistema risulta abbastanza bilanciato, avendo una variazione percentuale massima pari al 4,19% tra le due portate. Osservando anche le differenze tra la portata di immissione e quella di estrazione si nota come all'impostazione 1 di velocità l'ambiente risulta leggermente in depressione, mentre alle impostazioni di velocità 2 e 3 l'ambiente risulta in pressione.

3.5.3.2 Prove con generatore di fumo

3.5.3.2.1 Metodologia dei rilievi

Il conta-particelle è stato posizionato al centro dell'aula oggetto di misurazione (Figura 3.16 e 3.17), mentre il generatore di fumo è stato utilizzato vicino all'area di estrazione della macchina. La posizione del generatore di fumo è stata scelta in modo tale che la maggior parte dei fumi venissero immediatamente aspirati dalla macchina così da renderli maggiormente visibili all'esterno per la valutazione sull'aria espulsa. Il conta-particelle è stato posizionato al centro dell'aula così da valutare il decadimento delle particelle all'interno dell'area maggiormente occupata durante l'orario scolastico.

Il monitoraggio tramite il conta-particelle è stato avviato prima dell'inizio della prova, così da valutare la condizione stazionaria dell'aula prima della generazione dei fumi. La macchina è stata impostata alla terza velocità per valutare l'influenza dell'aria espulsa sulla presa di aria esterna e il tempo di decadimento delle particelle alla massima velocità della macchina. Il conta-particelle è stato impostato per effettuare la misurazione su 1 litro di aria, tale quantità di aria viene prelevata dal conta-particelle in 21 secondi.



Figura 3.16 – Posizione conta-particelle

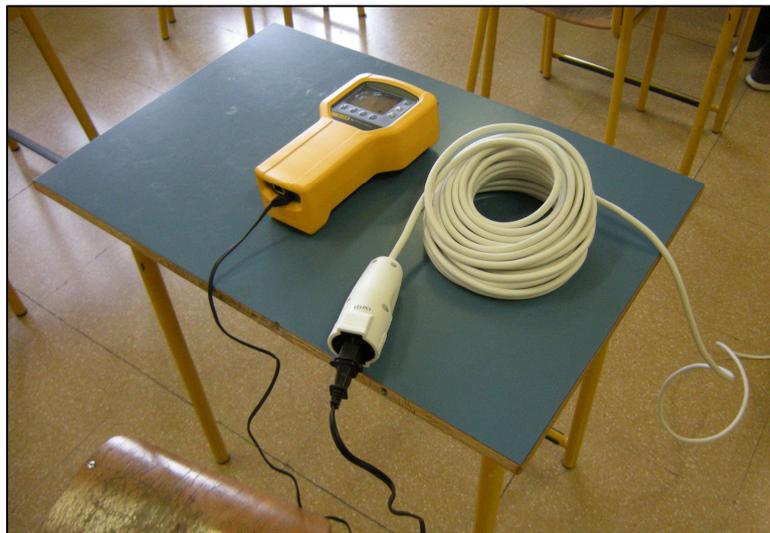


Figura 3.17 – Foto installazione conta-particelle

Dati monitoraggio:

- Data inizio prova: 3/03/2022
- Data fine prova: 3/03/2022
- Durata complessiva prova: 1 ora e 28 minuti
- Intervallo di acquisizione dei dati: 1 minuto + 21 secondi
- Volume di aria utilizzato per ogni misurazione: 1 litro
- Tempo di utilizzo del generatore di fumo: 5 minuti

3.5.3.2.2 Geometria del locale

L'aula scelta per le misure è la medesima utilizzata per le prove termiche e per la misurazione della portata. La planimetria dell'aula è mostrata nella Figura 3.13, con le relative foto del rilievo (Figura 3.14).

- Denominazione aula: 3°B
- Tipologia aula: didattica
- N° studenti: 18 + 1 (docente)
- Superficie aula: 47,10 m²
- Volume aula: 165,00 m³
- Parametri da misurare: andamento dell'aria espulsa, tempo di decadimento delle particelle

3.5.3.2.3 Valori e andamento delle particelle ottenuti

Nel Grafico 3.9 è riportata la variazione nel tempo del numero di particelle misurate durante l'intero periodo di monitoraggio, mentre nella Tabella 3.7 sono riportati i valori massimi e minimi per ogni dimensione di particella misurata.

Grafico 3.10 - Andamento nel tempo del numero di particelle misurate per ogni dimensione considerata

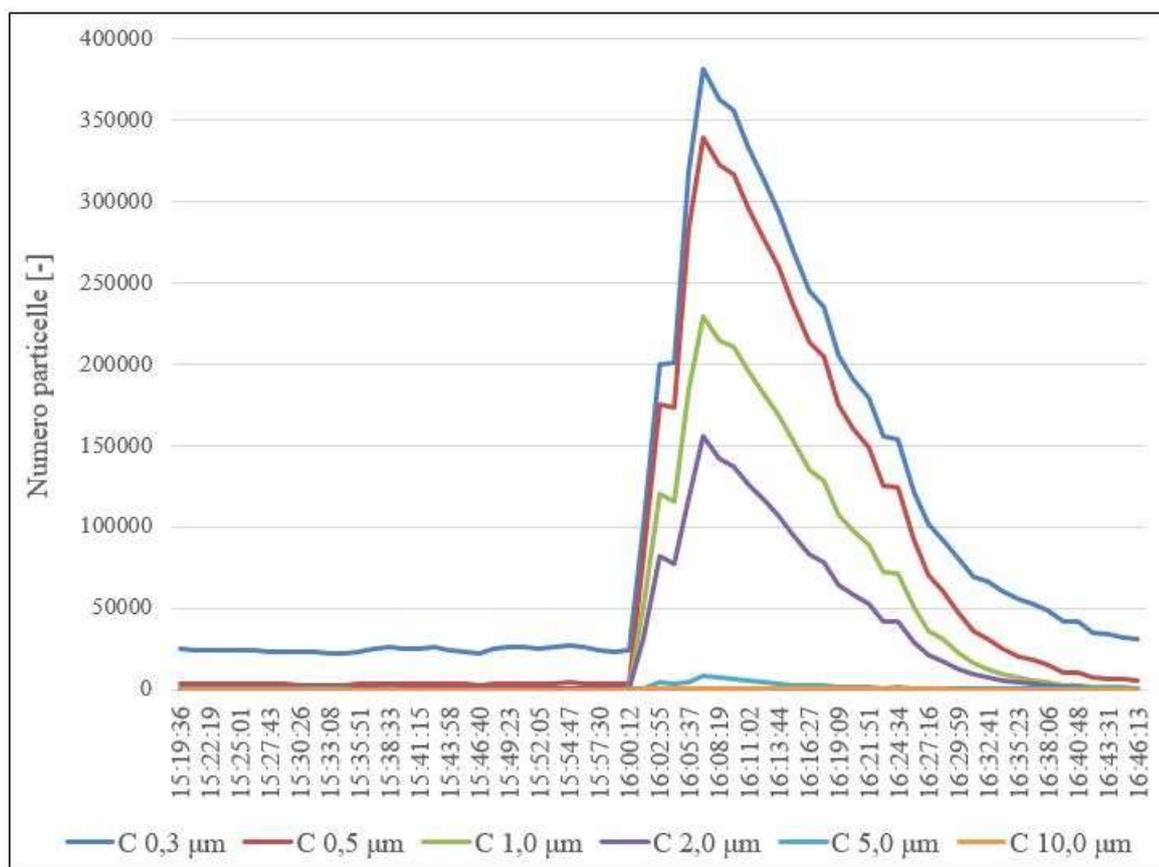


Tabella 3.7 - Valori massimi e minimi per ogni dimensione di particella considerata

	0,3 µm	0,5 µm	1,0 µm	2,0 µm	5,0 µm	10,0 µm
MAX	381108	338954	229364	155623	8497	265
MIN	22458	2807	375	141	5	0

3.5.3.2.4 Valutazioni sperimentali

Dal Grafico 3.9 è possibile notare la condizione dell'aula prima dell'inizio della prova, poiché l'andamento delle varie dimensioni di particelle si mantiene costante nel tempo. Intorno alle ore 16:00 si può individuare l'accensione del generatore di fumo, poiché il numero di particelle per ogni dimensione aumenta molto velocemente. Raggiunto il picco massimo intorno alle 16:05, le particelle cominciano a diminuire nel tempo poiché il generatore di fumo è stato spento. Osservando il decadimento delle particelle nel tempo è possibile notare che alla fine della prova (dopo circa 45 minuti dall'accensione del generatore) si è quasi raggiunta la condizione stazionaria che si aveva prima dell'inizio della prova. Ciò significa che il volume d'aria presente nell'aula è stato quasi interamente ricambiato, tornando alle condizioni iniziali. Si può quindi stimare un tempo di circa un'ora

per ricambiare il volume d'aria dell'aula. L'unità VMC installata, alla terza impostazione di velocità, effettua un ricambio d'aria di circa 1 volume ogni ora.

Per quanto riguarda la valutazione inerente all'influenza dell'aria espulsa sulla presa di aria esterna, durante l'accensione del generatore sono stati osservati i fumi in uscita dall'espulsione dell'unità VMC. Si è notato che una parte dei fumi espulsi è stata prelevata e immessa nuovamente nell'ambiente interno; tale fenomeno è dovuto alla vicinanza tra la presa dell'aria estratta e la presa dell'aria esterna, come è possibile notate dalla Figura 3.18. È importante comunque evidenziale che tale fenomeno è fortemente influenzato dalla presenza o meno del vento e dalla sua direzione.



Figura 3.18 - Posizione della presa dell'aria esterna (sezione circolare) e della presa dell'aria estratta (sezione con lamiera) dell'unità VMC

3.5.3.3 Blower Door Test

3.5.3.3.1 Metodologia dei rilievi

Nel vano porta è stata posizionata l'intelaiatura per prenderne la misura, successivamente si fissano le dimensioni delle barre verticali e orizzontali. Si estrae delicatamente dal vano l'intelaiatura e su di essa si pone il telo per rendere la porta stagna. È necessario evitare punti di infiltrazione, eventualmente introducendo negli angoli parti in plastica o del nastro adesivo. Viene inserita un'ulteriore barra orizzontale posta a metà altezza del telaio, tale barra è necessaria per fissare il ventilatore. Il ventilatore viene inserito all'interno del foro presente nel telo e fissato alla barra orizzontale precedentemente posizionata.

Sono presenti dei tubicini che devono essere collegati alla presa di pressione sul telo, sul ventilatore e al manometro. Dopo aver configurato il manometro e il software per la lettura dei dati è possibile iniziare la prova accendendo il ventilatore. Deve essere definita la direzione del flusso d'aria generato dal ventilatore in funzione della tipologia di prova che si vuole effettuare (pressione o depressione).



Figura 3.19 - Installazione del sistema per il blower door test

Dati monitoraggio:

- Data inizio prova: 15/02/2022
- Data fine prova: 15/02/2022
- Durata complessiva prova: 2 ore
- Temperatura dell'aria interna: 20°C
- Umidità relativa interna: 47%
- Temperatura esterna: 18°C
- Umidità relativa esterna: 40%
- Velocità del vento: 0,35 m/s
- Pressione atmosferica: 1013 Pa

3.5.3.3.2 Geometria del locale

La planimetria dell'aula dove sono state effettuate le misure è mostrata in Figura 3.20.

- Denominazione aula: 3°D
- Tipologia aula: didattica
- N° studenti: 24 + 1 (docente)
- Superficie aula: 48,35 m²
- Volume aula: 145,00 m³
- Parametri da misurare: n₅₀

- Profilo di occupazione dell'aula: assente
- Profilo di accensione dell'impianto di riscaldamento: 24 ore su 24
- Profilo di accensione dell'impianto di ventilazione: 24 ore su 24 all'impostazione di velocità 1
- Profilo di apertura delle finestre: assente

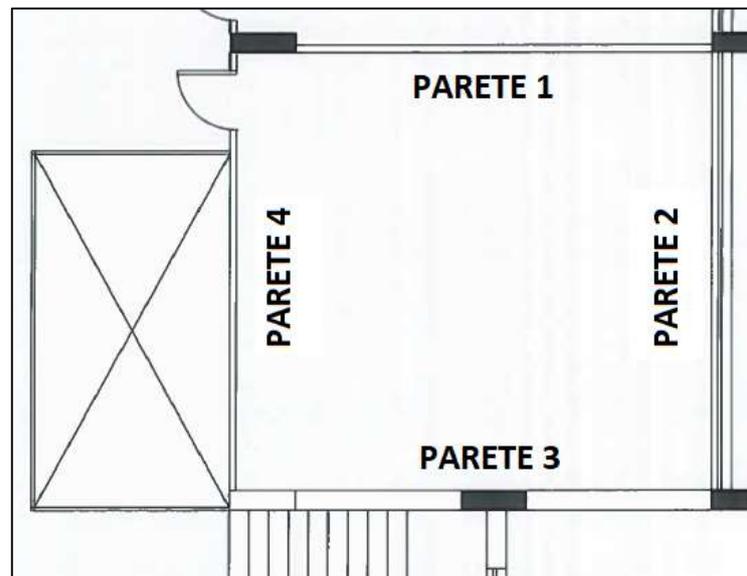


Figura 3.20 - Planimetria dell'aula 3°D oggetto di misurazioni

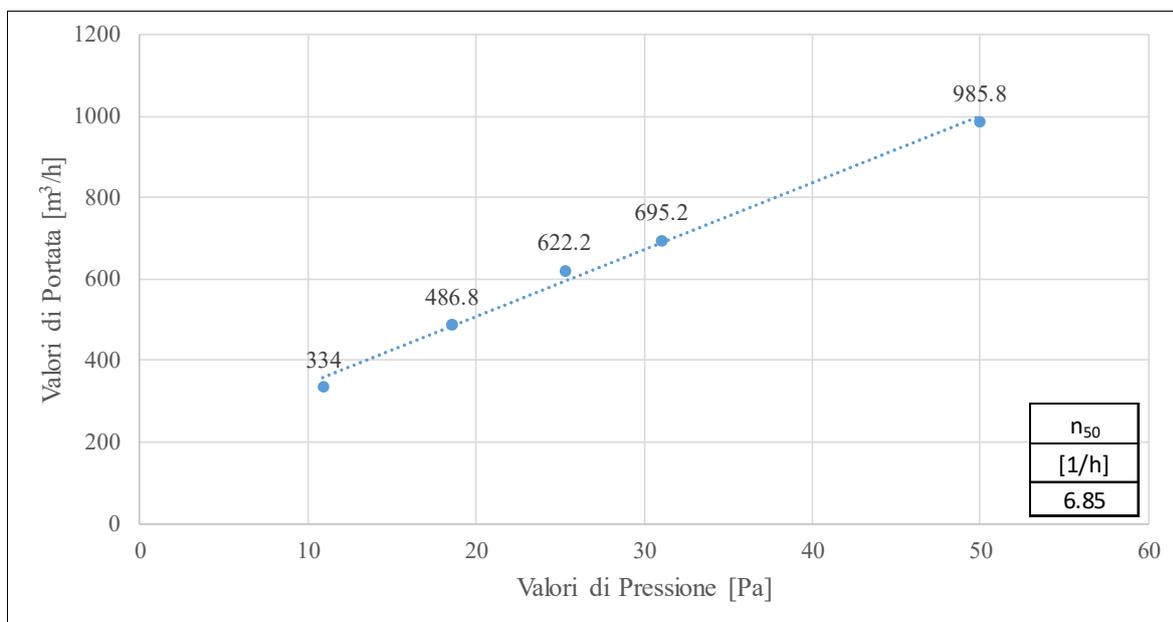


Figura 3.21 - Foto parete 1 (a), parete 2 (b), parete 3 (c), parete 4 (d)

3.5.3.3.3 Risultati Blower Door Test

La prova è stata realizzata in depressione. Il massimo valore di pressione raggiunto durante la prova è pari a 31,06 Pa. L'involucro dell'aula non ha permesso di raggiungere il valore di 50 Pa richiesto. Il software utilizzato ha permesso di ricavare il valore della portata a 50 Pa e il relativo valore di n_{50} pari a 6.85 1/h. Tale valore risulta molto elevato, ciò significa che l'aula è molto permeabile.

Grafico 3.11 - Retta costruita attraverso i valori di pressione e portata ricavati durante il blower door test



3.5.4 Prove acustiche

3.5.4.1 Geometria del locale

L'aula oggetto di rilevamento è la AULA 4 le cui misure sono 6,77 m x 6,67 m x 3,40 m. L'aula non è dotata di controsoffitto acustico fonoassorbente, sedie e tavoli sono in legno. A discapito delle riflessioni la superficie finestrata occupa 1/3 della superficie totale delle

partizioni verticali. Le misure sono state effettuate con impianto di amplificazione spento e in assenza di persone. La planimetria dell'aula è mostrata di seguito.

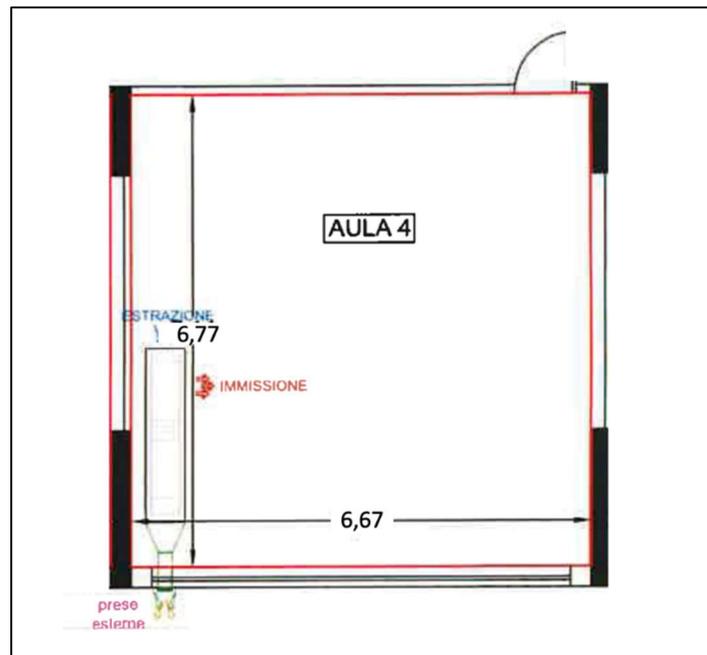


Figura 3.22 - Planimetria dell'aula 3°B oggetto di misurazioni

- Denominazione aula: Aula 4
- Tipologia aula: didattica
- N° studenti: 18 + 1 (docente)
- Superficie aula: 45,3 m²
- Volume aula: 159,00 m³
- Parametri da misurare: STI, C50, Tempo di riverbero e Rumore degli impianti
- Misura in assenza di persone e con arredo

3.5.4.2 Report delle misure

Nella figura sottostante si identificano i punti di misura utilizzati nell'AULA 4 in rispetto del prospetto 11 e 12 e della figura 3 della UNI 11532-2 per la valutazione dello STI, C50, T e Lic,int.

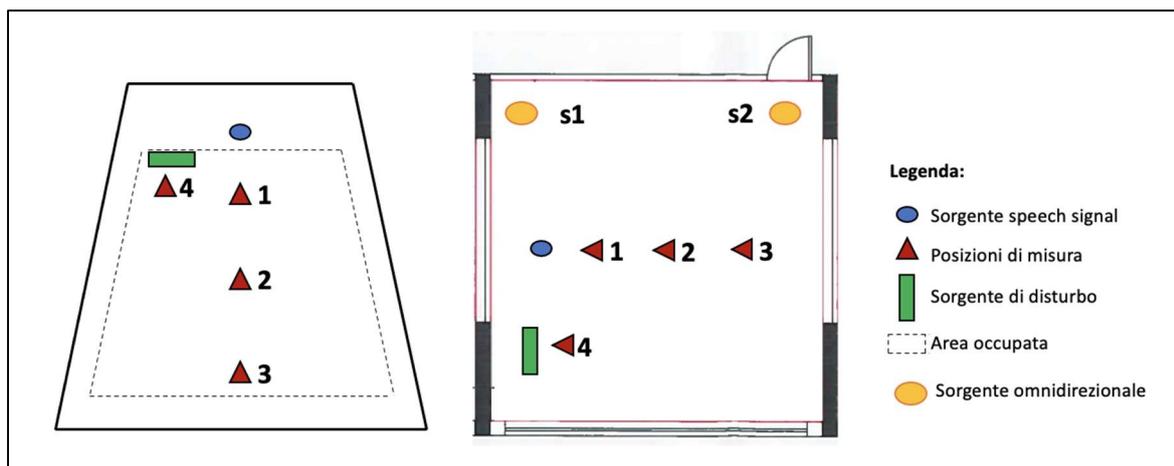


Figura 3.23 – Punti di misura utilizzati

STI (Speech transmission Index)

Vengono effettuate le misure dello STI per le tre velocità della VMC e ad impianto spento. La media aritmetica spaziale dello STI misurato nei quattro punti viene corretto con l'incertezza estesa all' 84% $U=k \cdot S_m$, con il fattore di copertura k pari a 1 e lo scarto tipo di riproducibilità S_m pari a 0.05.

Tabella 3.8 - Risultati delle misure per il calcolo dello STI

P.to di Misura	VMC 3	VMC 2	VMC 1	VMC 0 (off)
1	0.4	0.5	0.53	0.54
2	0.37	0.45	0.48	0.49
3	0.36	0.46	0.43	0.49
4	0.26	0.28	0.43	0.43
STI_{medio}	0.35	0.42	0.47	0.49
STI_{corr}=STI_m-U	0.30	0.37	0.42	0.44
Valore di riferimento	≥ 0.55			
Verifica?	No	No	No	No

I valori dello STI non sono verificati né a VMC accesa, né a VMC spenta.

C50 (Speech Clarity)

I valori di C50 rilevati nelle singole posizioni utente, sono ottenuti come media aritmetica dei valori delle pressioni sonore nelle bande d'ottava 500-1000-2000 Hz. Lo C50 viene corretto con l'incertezza estesa all'84% $U=k \cdot S_m$, in cui il fattore di copertura k è pari a 1 e lo scarto tipo di riproducibilità S_m è pari a 1.

Tabella 3.9 - Risultati delle misure per il calcolo dello C50

P.to di Misura	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
1	-1.24	1.36	-0.22	-0.87	0.55	5.19
2	-2.47	-3.1	-1.92	-3.37	-1.08	1.92
3	-3.96	1.25	-0.11	-2.91	-2.48	-0.33
4	-1.61	-0.77	-3.54	-2.95	-2.2	-1.52
C50_{medio}	-2.32	-0.32	-1.45	-2.53	-1.30	1.32
C50_{corr}=C50_m-U	-3.32	-1.32	-2.45	-3.53	-2.30	0.32
	-			-2.8		-
Valore di riferimento	-			≥ 2 dB		-
Verifica?	-			No		-

I valori dello C50 non sono verificati.

Tempo di Riverberazione

I valori del tempo di riverbero medio (T_{mean}) per ogni frequenza, sono ottenuti mediando aritmeticamente i valori di T30 (s) rilevati nelle tre posizioni utente (P2, P3, P4), con due posizioni di sorgente (S1, S2) (vedi Tabella 3.10).

Tabella 3.10 - Tempo di riverbero T30 misurato in 3 posizioni utente e 2 posizioni di sorgente

T30 (s)	Frequenza (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
P3-S2	1.83	2.07	1.86	1.83	1.54	1.38
P2-S2	1.89	1.88	1.69	1.77	1.63	1.4
P4-S2	2.13	1.97	2.1	1.87	1.63	1.33
P3-S1	1.97	1.92	1.86	1.95	1.59	1.36
P2-S1	1.64	1.99	1.89	1.78	1.6	1.37
P4-S1	2.01	1.97	1.88	1.77	1.57	1.36
T_{mean}	1.91	1.97	1.88	1.83	1.59	1.37

Le misure sono effettuate in ambiente arredato e non occupato, per cui il T_{mean} , per essere confrontato con i valori limite imposti dalla norma, deve essere corretto in funzione del valore della superficie aggiuntiva equivalente di assorbimento acustico delle persone ΔA_{pers} indicato nel Prospetto C1 e in funzione al volume del locale. Identificando l'attività "Persona seduta su sedia non imbottita" e moltiplicando i valori di ogni frequenza per il numero di occupanti (19 persone), si ottiene ΔA_{pers} totale.

Tabella 3.11 - Calcolo del valore della superficie aggiuntiva equivalente di assorbimento acustico delle persone totale

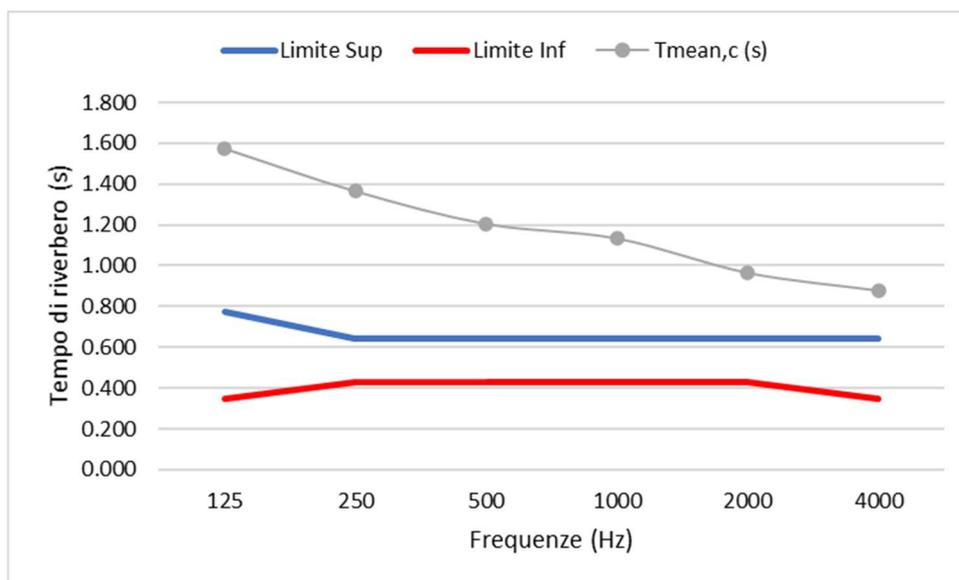
Descrizione	Frequenza (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
2 Persona seduta su sedia non imbottita	0.15	0.30	0.40	0.45	0.55	0.55
ΔA (80% occupato + arredamento)	2.85	5.70	7.60	8.55	10.45	10.45

Applicando la formula 3 della UNI 11532-2, il T_{mean} viene corretto e può essere confrontato con i limiti di riferimento ottenuti attraverso il calcolo del tempo di riverbero ottimale (T_{ott}) secondo il Prospetto 6 della UNI 11532-2 per la Categoria A3.

Tabella 3.12 – Verifica del tempo di riverbero

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Limite Superiore	0.775	0.641	0.641	0.641	0.641	0.641
Limite Inferiore	0.347	0.428	0.428	0.428	0.428	0.347
$T_{mean,c}$ (s)	1.574	1.365	1.204	1.132	0.963	0.875
Verifica?	No	No	No	No	No	No

Grafico 3.12 – Verifica del tempo di riverbero



Il tempo di riverbero non è verificato.

Impianti tecnici

Il livello di rumore degli impianti in ambiente è espresso tramite il descrittore $L_{ic,int}$, ottenuto dalla media aritmetica dei valori di $L_{pu,c}$ nelle posizioni utente e corretto con

l'incertezza estesa dell'84% pari a 1.2 dB(A) . I valori di $L_{pu,c}$ sono ottenuti per ogni posizione utente applicando la seguente formula:

$$L_{pu,c} = Leq(A) - K1 + K2 \quad (3.1)$$

Dove:

$Leq(A)$ = livello equivalente ponderato A ottenuto come media energetica dei $Leq(A)$ alle varie frequenze, per ogni posizione utente.

$K1$ = termine di correzione per il tempo residuo.

$K2$ = termine di normalizzazione rispetto al tempo di riverberazione pari a $-10\log(T/T_0)$, con T che identifica la media aritmetica dei tempi di riverberazione nelle bande di terzi d'ottava e T_0 che identifica il tempo di riverberazione di riferimento variabile in funzione del volume.

Tabella 3.13 - Calcolo del termine di normalizzazione rispetto al tempo di riverberazione

Tempi di riverbero	
f [Hz]	Tmean [s]
125	1.91
250	1.97
500	1.88
1000	1.83
2000	1.59
4000	1.37
mean	1.76
T0	0.63
K2	-4.46

Tabella 3.14 - Misura del livello di pressione sonora residuo

RESIDUO				
	P1	P2	P3	P4
f [Hz]	Leq [dBA]	Leq [dBA]	Leq [dBA]	Leq [dBA]
125	24.3	17.9	19.7	23.3
250	27.2	23.6	23.9	31.8
500	25.3	22	23.8	31.0
1000	31.1	32.5	28.8	34.6
2000	19.5	19.7	16.6	23.6
4000	15.3	15	14	19.7
Leq(A)	34.1	33.7	31.5	37.9

Tabella 3.15 - Risultati delle misurazioni per la determinazione del livello di rumore degli impianti

RUMORE IMPIANTO CONTINUO: Velocità 1				
	<i>P1</i>	<i>P2</i>	<i>P3</i>	<i>P4</i>
f [Hz]	<i>Leq [dBA]</i>	<i>Leq [dBA]</i>	<i>Leq [dBA]</i>	<i>Leq [dBA]</i>
125	40.7	41.9	40.8	41.7
250	36.3	37.2	36.4	37.5
500	32.9	32.2	32.6	34.3
1000	35.1	33.2	33.5	34.2
2000	27.8	27.9	27.5	27.5
4000	17.1	15.9	17.2	17.5
Leq(A)	43.4	44.0	43.2	44.2
ΔL	9.3	10.3	11.7	6.3
K1	0.5	0.0	0.0	1.2
Lpu,c	38.4	39.5	38.8	38.6
Lp,int	40.1			
Valori limite UNI 11532-2	Aula < 250m ³	< = 34 dB	VERIFICA?	NO

RUMORE IMPIANTO CONTINUO: Velocità 2				
	<i>P1</i>	<i>P2</i>	<i>P3</i>	<i>P4</i>
f [Hz]	<i>Leq [dBA]</i>	<i>Leq [dBA]</i>	<i>Leq [dBA]</i>	<i>Leq [dBA]</i>
125	38.5	38.8	38.4	40.6
250	53.2	52.2	56.1	52.0
500	43.8	43.6	44.8	44.5
1000	42.8	42.3	43.1	42.4
2000	40	40.6	40.5	40.7
4000	27.4	27.5	27.5	27.6
LAeq	54.3	53.5	56.8	53.6
ΔL	20.3	19.8	25.3	15.7
K1	0.0	0.0	0.0	0.0
Lpu,c	49.9	49.1	52.3	49.1
Lp,int	51.3			
Valori limite UNI 11532-2	Aula < 250m ³	< = 34 dB	VERIFICA?	NO

RUMORE IMPIANTO CONTINUO: Velocità 3				
	P1	P2	P3	P4
f [Hz]	<i>Leq [dBA]</i>	<i>Leq [dBA]</i>	<i>Leq [dBA]</i>	<i>Leq [dBA]</i>
125	44.4	43.5	42.9	46.3
250	55.5	55.3	55.8	55.8
500	54.1	52.5	53.8	54.0
1000	55.4	51.4	54.3	53.0
2000	48.6	48.5	48.6	48.7
4000	37.3	37.2	36.6	37.8
LAeq	60.3	58.8	59.9	59.8
ΔL	26.2	25.1	28.5	21.9
K1	0.0	0.0	0.0	0.0
Lpu,c	55.8	54.3	55.5	55.3
Lp,int	56.4			
Valori limite UNI 11532-2	Aula < 250m³	< = 34 dB	VERIFICA?	NO

Il livello di rumore degli impianti non è verificato.

3.6 Scuola primaria I.C. Luca Della Robbia

3.6.1 Dati della scuola e dell'unità VMC

Lo stabile sede delle misurazioni di controllo è la scuola primaria dell'Istituto Comprensivo Luca Della Robbia nel comune di Appignano, provincia di Macerata; nello specifico le aule oggetto delle prove sono la 1 (3°B), 2 (3°A), 3 (2°B), 4 (2°A), 5 (4°B), 6 (4°A), 8-16 (Mensa), 9 (1°B), 10 (5°B), 11 (1°A), 12 (5°A), 13 (Biblioteca), 14 (Laboratorio Ceramica), 15 (Aula Informatica) e l'Aula Sostegno per le prove termiche, di qualità dell'aria e fluidodinamiche, l'Aula 12 (5°A) per il blower door test, l'Aula 9 (1°B) per la prova con generatore di fumo e l'Aula 4 (2°A) per le prove acustiche. Di seguito si riporta la planimetria dell'edificio scolastico con l'indicazione delle macchine VMC installate.

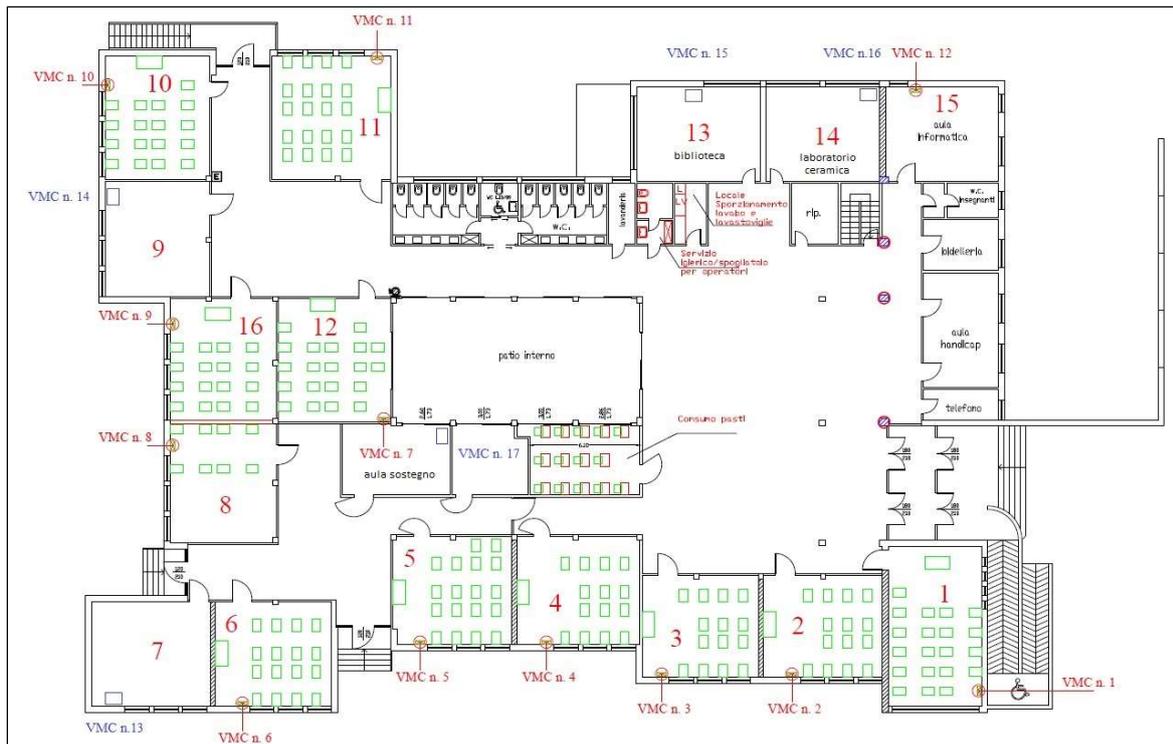


Figura 3.24 - Planimetria della scuola primaria I.C. Luca Della Robbia con l'indicazione delle macchine VMC installate

L'intervento prevedeva di dotare la scuola di un impianto di ventilazione decentralizzato, installando una o più unità VMC interne per ogni aula oggetto di intervento. È stata scelta l'unità VMC 2.0 RINNOVA verticale 30 (Figura 3.25) che dispone di tre impostazioni di velocità (da 1 a 3) di immissione dell'aria ed avente le seguenti caratteristiche: portata dichiarata di 320 m³/h, per l'impostazione alla velocità massima (V3), e di 380 m³/h, alla modalità booster, area lorda di immissione e di estrazione pari a 1125 cm², filtri di classe ePM1 80% sulla mandata (aria di immissione) e sulla ripresa (aria estratta) e prefiltro Coarse sull'aria esterna.

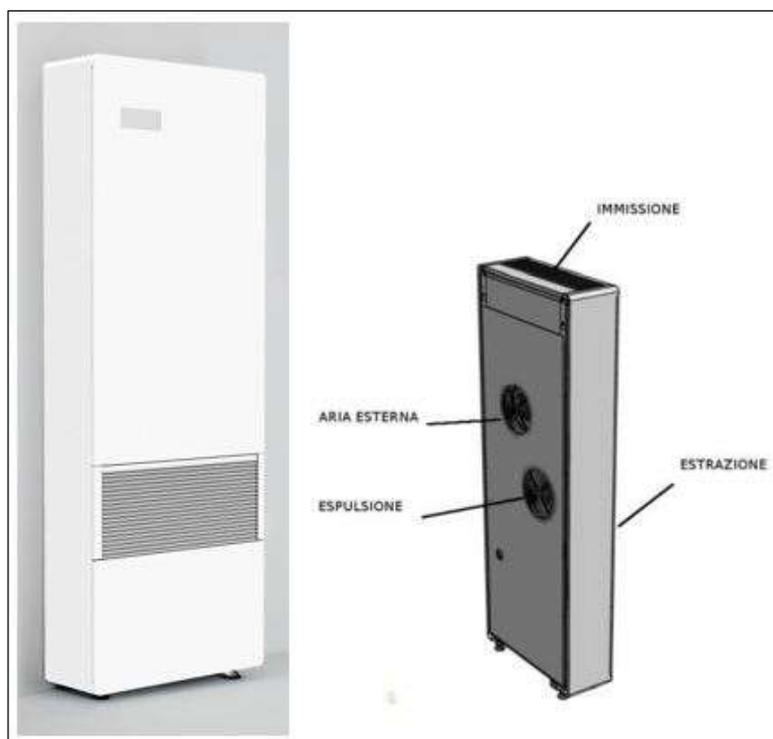


Figura 3.25 – Unità VMC 2.0 RINNOVA verticale 30

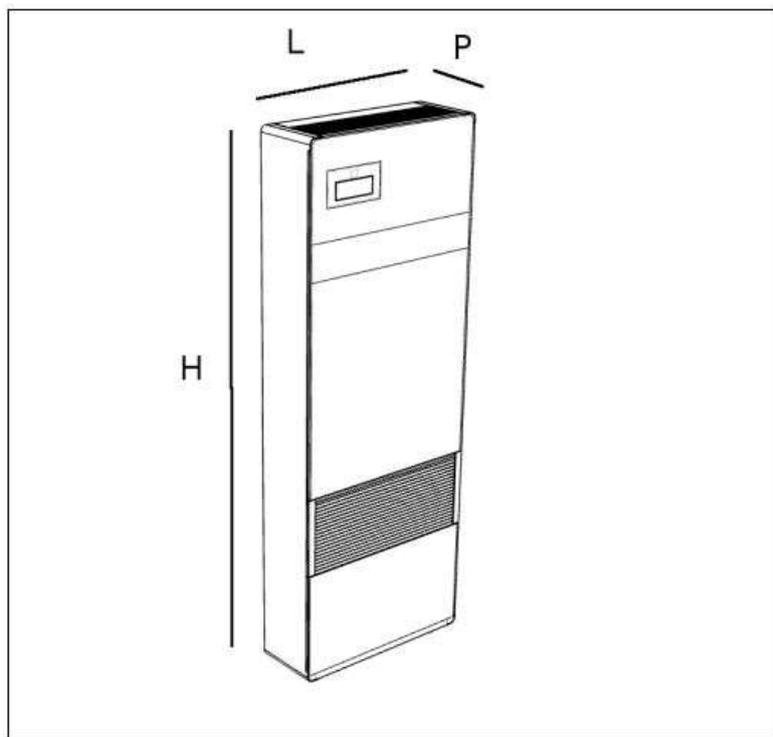
L'unità è ulteriormente dotata di un recuperatore di calore termodinamico attivo che permette di avere un'integrazione rispetto alle condizioni climatiche ambientali grazie al suo circuito frigorifero il quale fornisce energia all'ambiente in quantità superiore rispetto a quella sottratta dalla ventilazione per il 90% del funzionamento dell'unità.

Le prestazioni in riscaldamento e in raffreddamento dell'unità di ventilazione sono indicate di seguito.

Tabella 3.16 – Prestazioni in riscaldamento e in raffreddamento dell'unità VMC 2.0 RINNOVA 30

PRESTAZIONI IN RISCALDAMENTO (A -5 °C; A 20 °C)			
Potenza in riscaldamento totale	(4)	kW	3,10
Potenza in riscaldamento al netto del carico di ventilazione	(4)	kW	0,38
Max Potenza assorbita totale	(4)	kW	0,71
COP	(4)		4,40
PRESTAZIONI IN RAFFREDDAMENTO (A 35 °C; A 27 °C)			
Potenza in raffreddamento totale	(5)	kW	2,41
Potenza in raffreddamento al netto del carico di ventilazione	(5)	kW	0,76
Max Potenza assorbita totale	(5)	kW	0,73
EER	(5)		3,30

Le dimensioni dell'unità VMC sono riportate di seguito.



Modello	HRA+	2.0 RINNOVA 30 V M Verticale a vista
Larghezza L	mm	500
Profondità P	mm	1398
Altezza H	mm	185
DN Aria esterna/espulsione	mm	162
DN Mandata Aria	Mm	/
Condensa	Ø	20
Peso	kg	53

Figura 3.26 – Dimensioni unità VMC 2.0 RINNOVA 30

3.6.2 Prove termiche e qualità dell'aria

3.6.2.1 Metodologia dei rilievi

I rilievi per la misura della temperatura, dell'umidità relativa e della CO₂ sono stati effettuati in una postazione all'interno delle aule. Dopo la necessaria calibrazione dell'intera catena strumentale, come previsto dalle norme vigenti, sono stati eseguiti i rilievi.

Dati monitoraggio:

- Data inizio prova: 16/01/2023
- Data fine prova: 23/01/2023
- Durata complessiva prova: 7 giorni
- Intervallo di acquisizione dei dati: ogni 5 minuti

Di seguito si riportano le posizioni degli strumenti installati, in pianta e in foto, per ogni aula oggetto di monitoraggio. Si precisa che le posizioni degli acquisitori sono state scelte per evitare interferenze con l'attività scolastica ed eventuali manomissioni da parte degli utenti dell'aula.

Aula 1 (3°B)

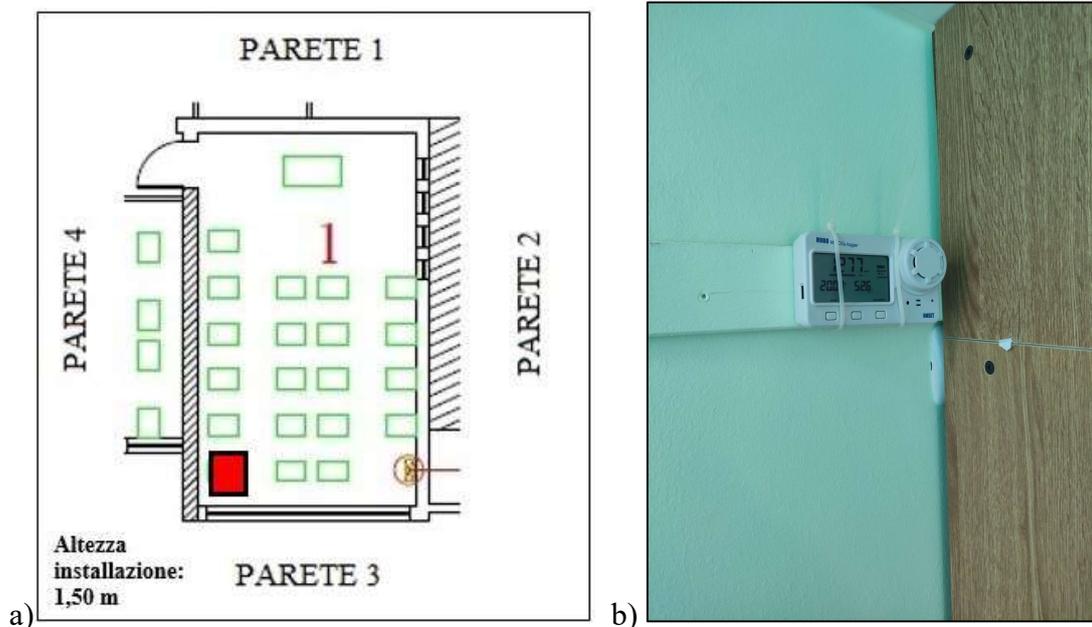


Figura 3.27 – Posizione acquisitore in pianta (a) e in foto (b) Aula 1 (3°B)

Aula 2 (3°A)

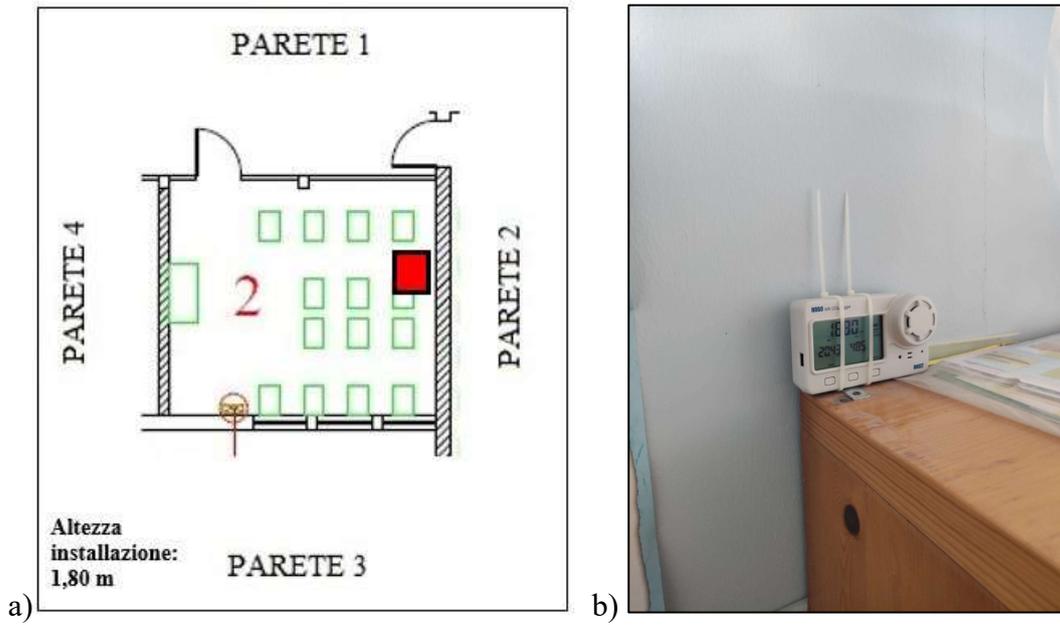


Figura 3.28 – Posizione acquisitore in pianta (a) e in foto (b) Aula 2 (3°A)

Aula 3 (2°B)

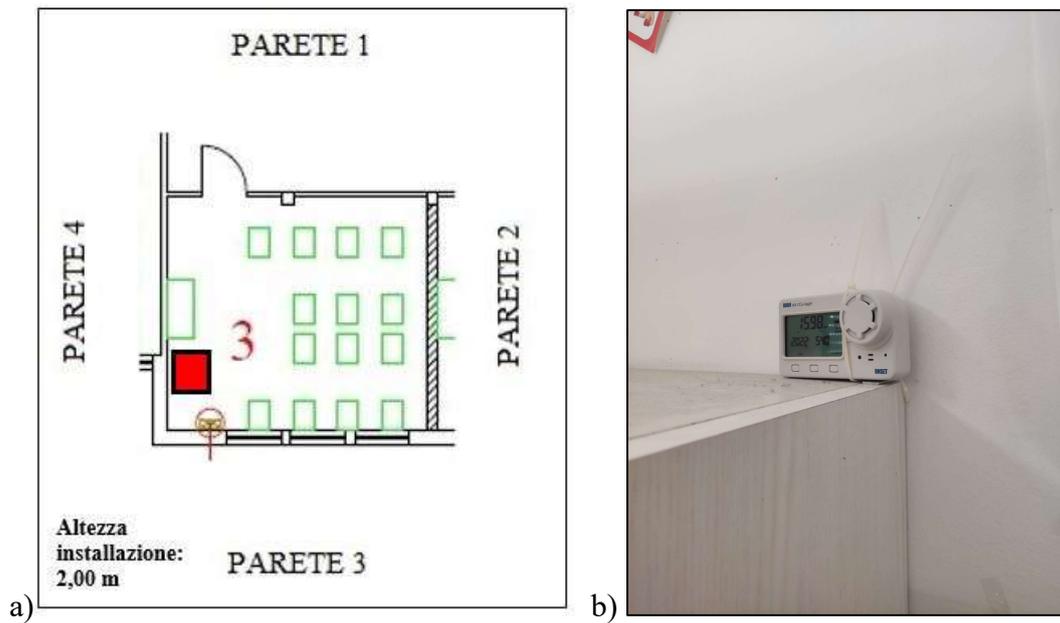


Figura 3.29 – Posizione acquisitore in pianta (a) e in foto (b) Aula 3 (2°B)

Aula 4 (2°A)

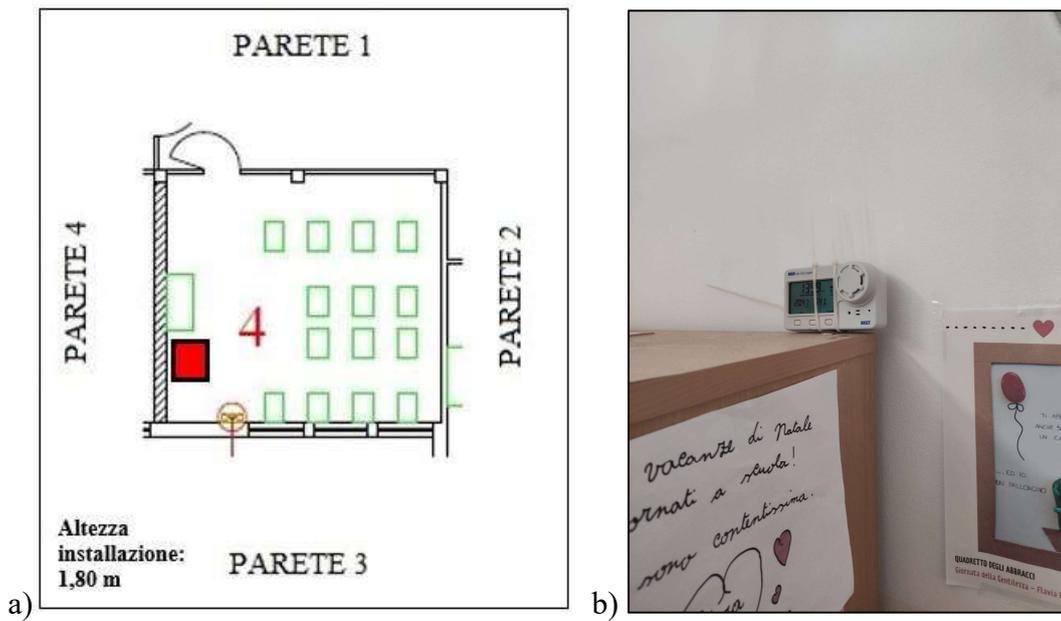


Figura 3.30 – Posizione acquirente in pianta (a) e in foto (b) Aula 4 (2°A)

Aula 5 (4°B)

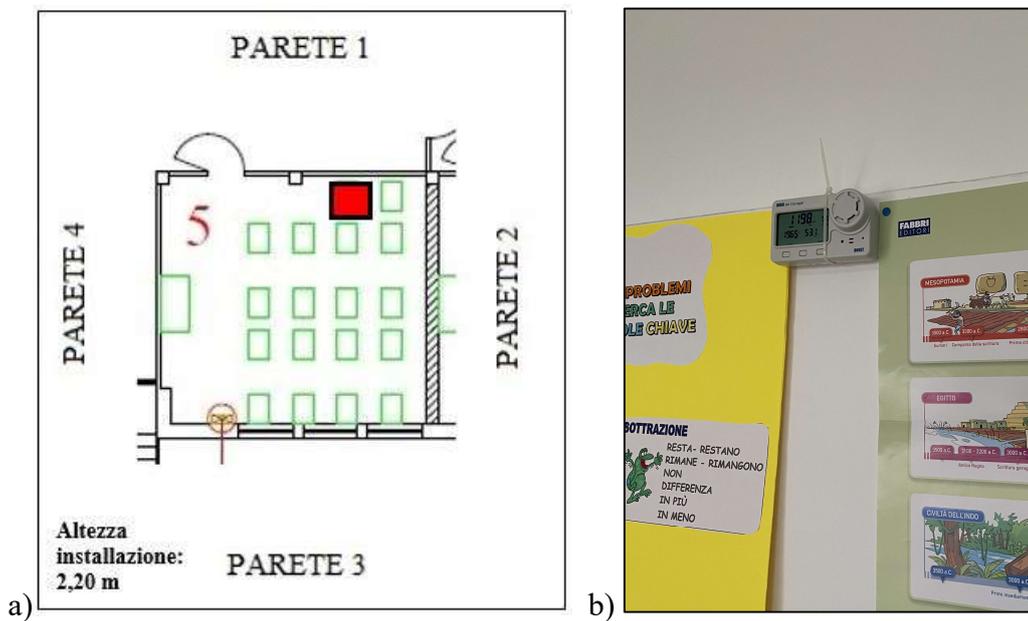


Figura 3.31 – Posizione acquirente in pianta (a) e in foto (b) Aula 5 (4°B)

Aula 6 (4°A)

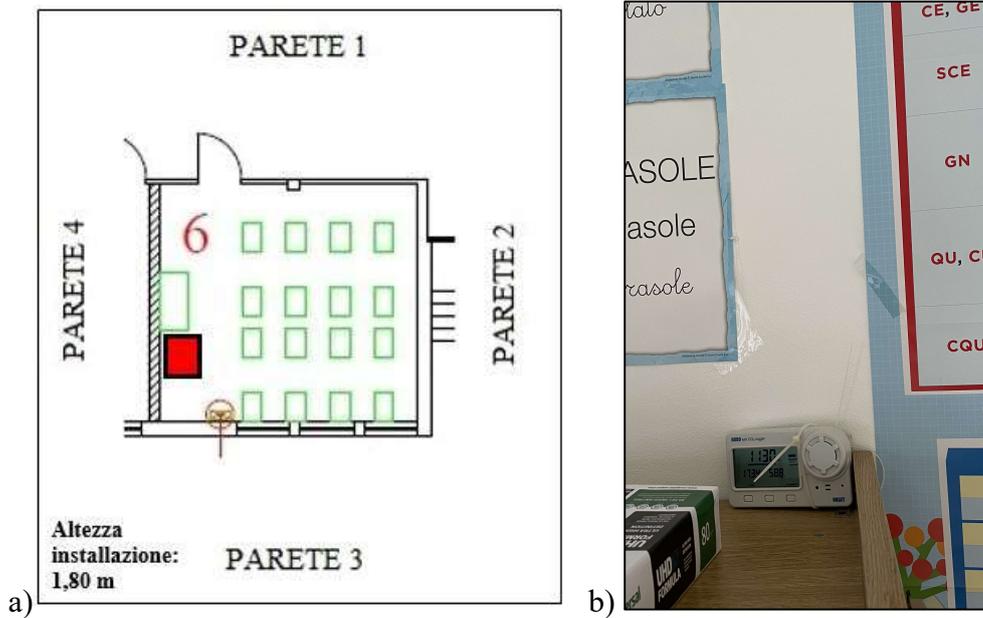


Figura 3.32 – Posizione acquisitore in pianta (a) e in foto (b) Aula 6 (4°A)

Aula 8-16 (Mensa)

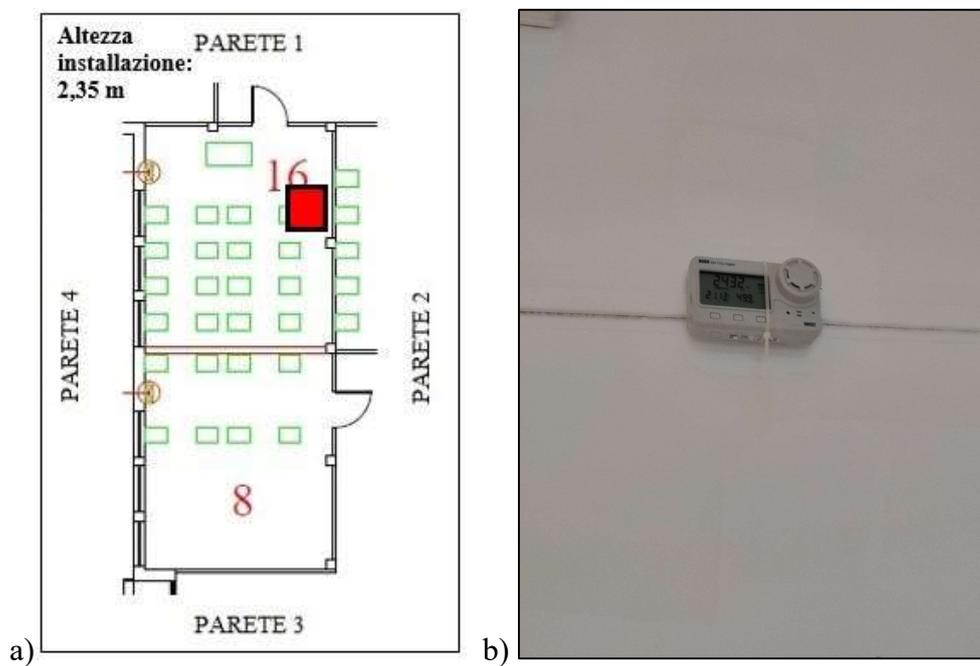


Figura 3.33 – Posizione acquisitore in pianta (a) e in foto (b) Aula 8-16 (Mensa)

Aula 9 (1°B)

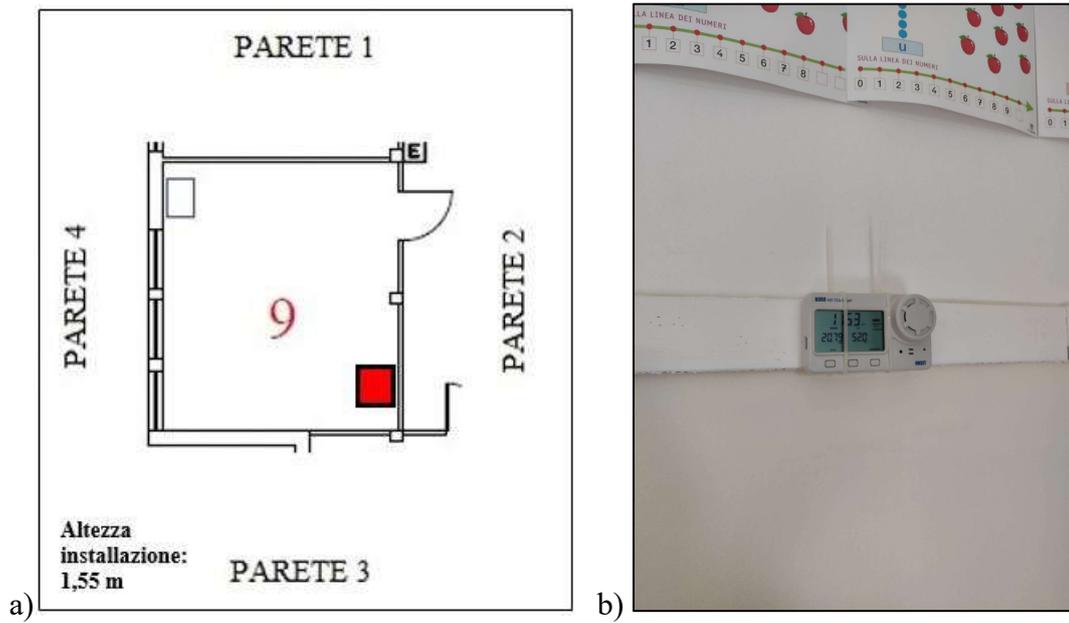


Figura 3.34 – Posizione acquisitore in pianta (a) e in foto (b) Aula 9 (1°B)

Aula 10 (5°B)

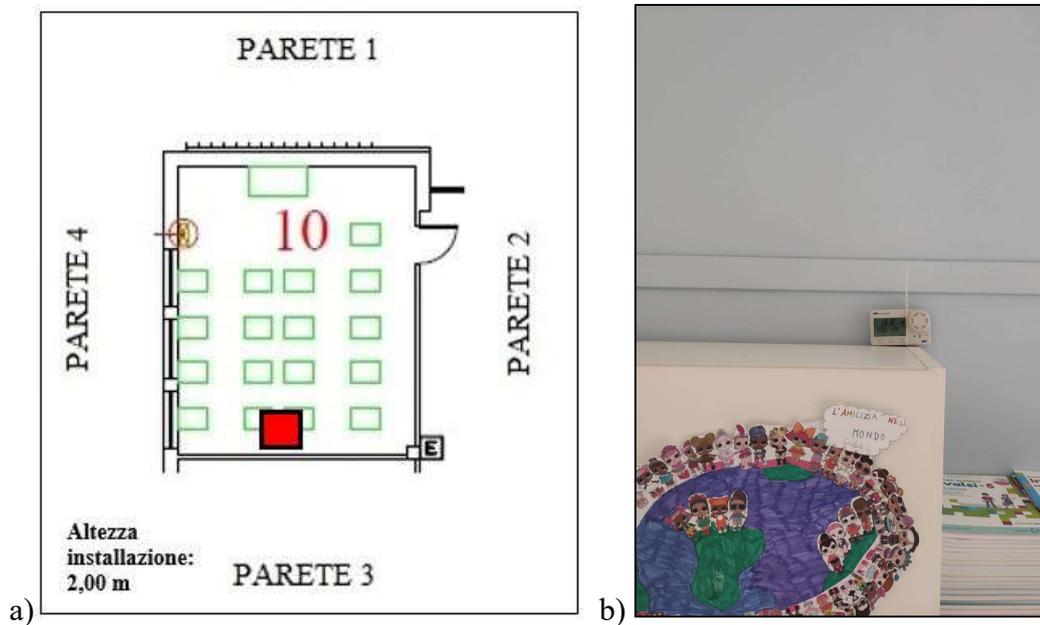


Figura 3.35 – Posizione acquisitore in pianta (a) e in foto (b) Aula 10 (5°B)

Aula 11 (1°A)

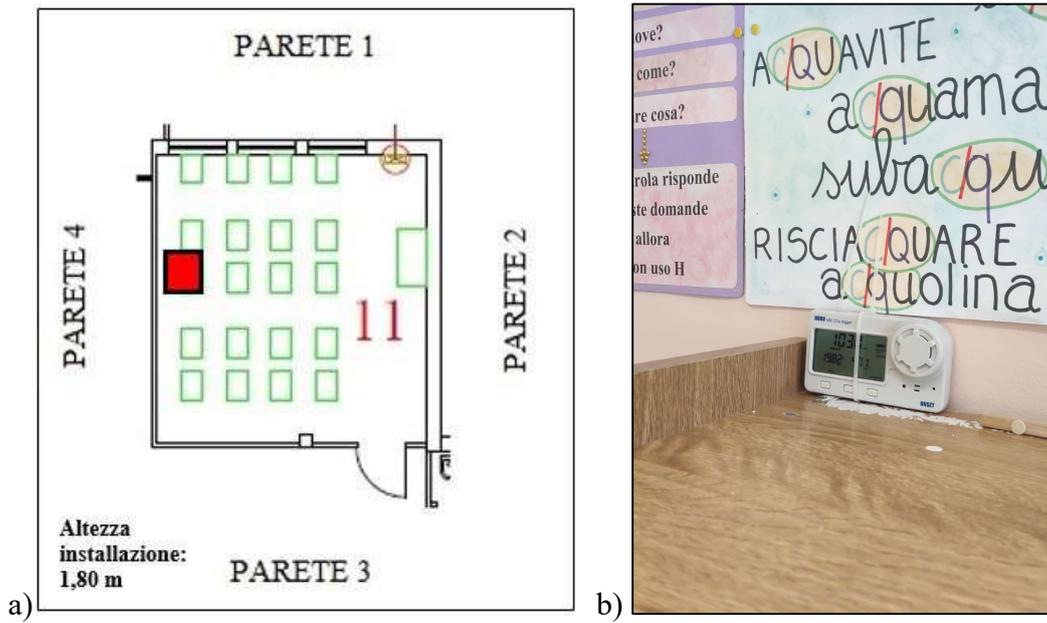


Figura 3.36 – Posizione acquisitore in pianta (a) e in foto (b) Aula 11 (1^a)

Aula 12 (5[°]A)

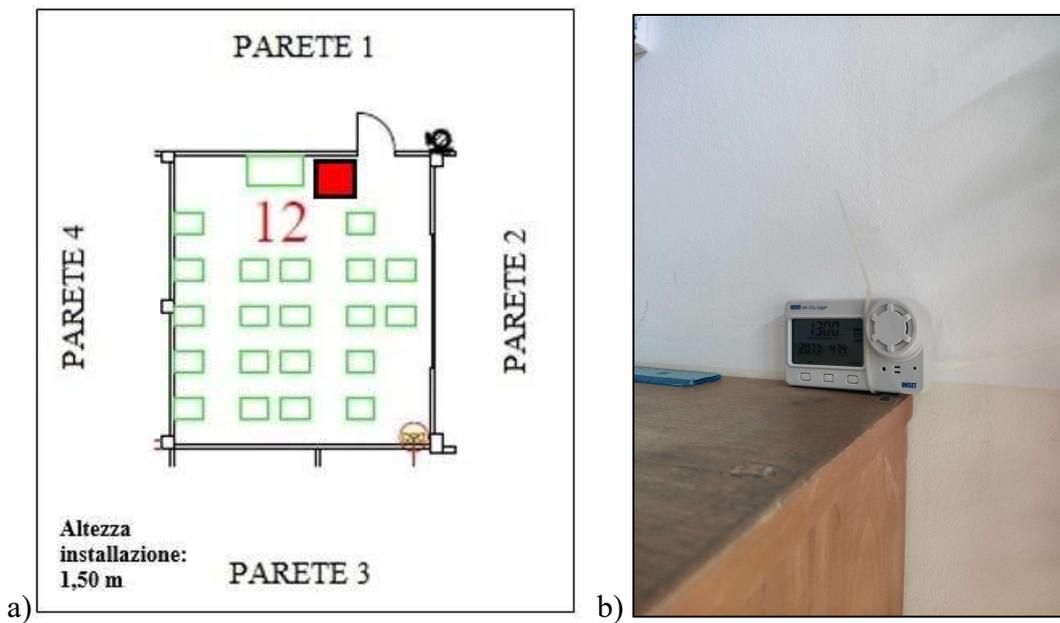


Figura 3.37 – Posizione acquisitore in pianta (a) e in foto (b) Aula 12 (5[°]A)

Aula 13 (Biblioteca)

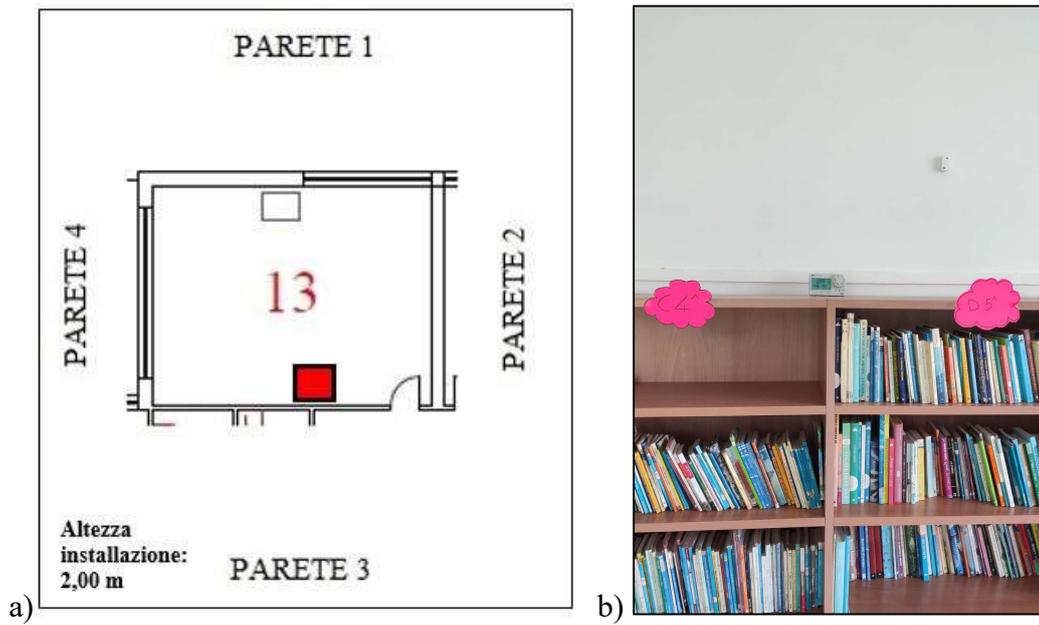


Figura 3.38 – Posizione acquisitore in pianta (a) e in foto (b) Aula 13 (Biblioteca)

Aula 14 (Laboratorio Ceramica)

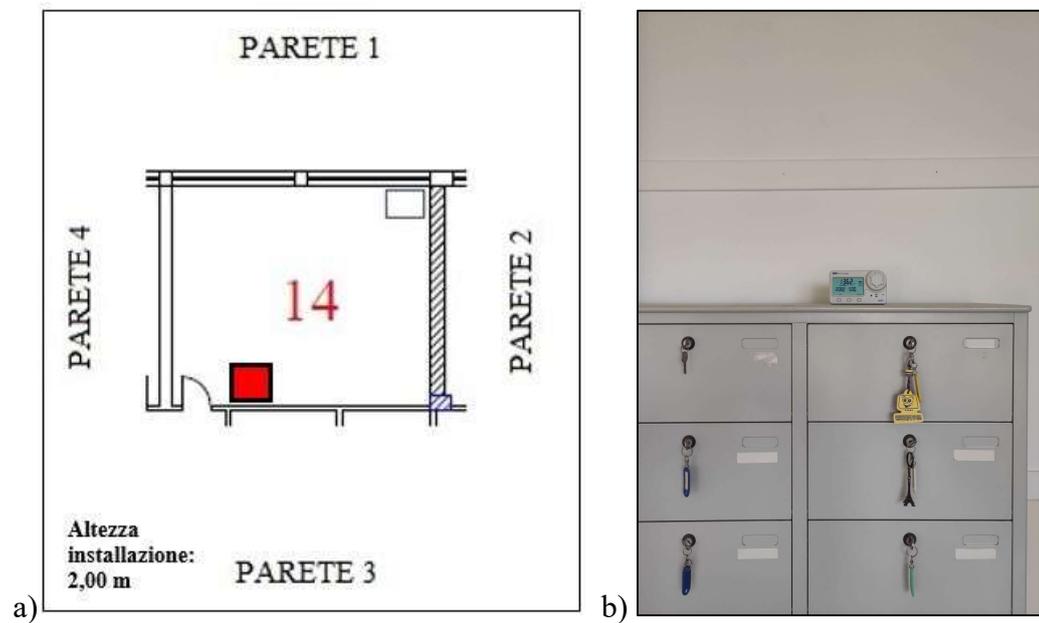


Figura 3.39 – Posizione acquisitore in pianta (a) e in foto (b) Aula 14 (Laboratorio Ceramica)

Aula 15 (Aula Informatica)

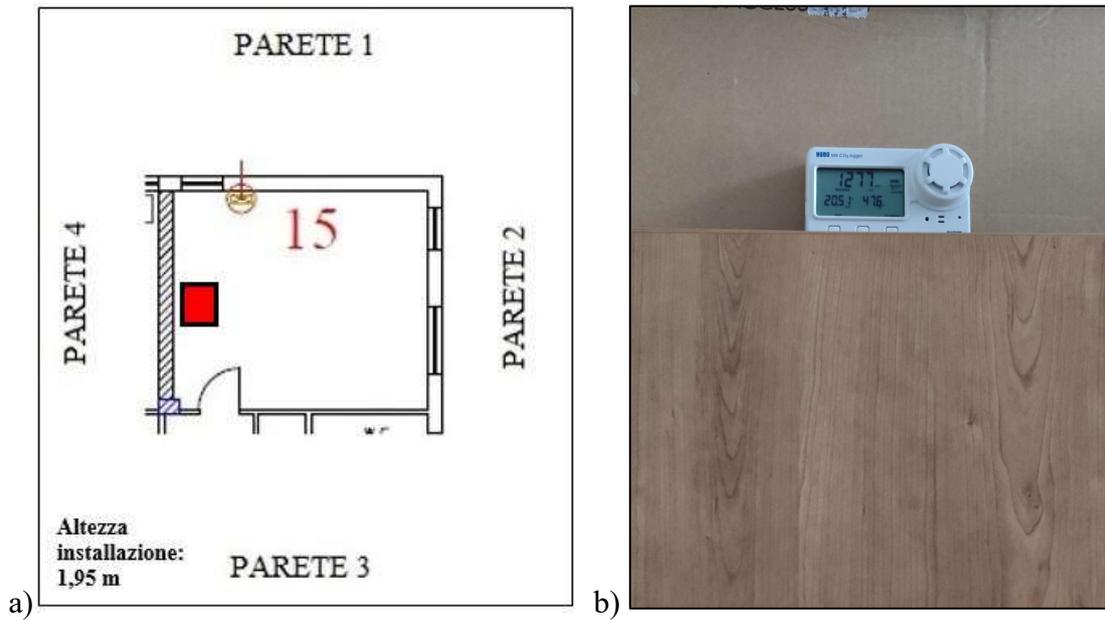


Figura 3.40 – Posizione acquirente in pianta (a) e in foto (b) Aula 15 (Aula Informatica)

Aula Sostegno

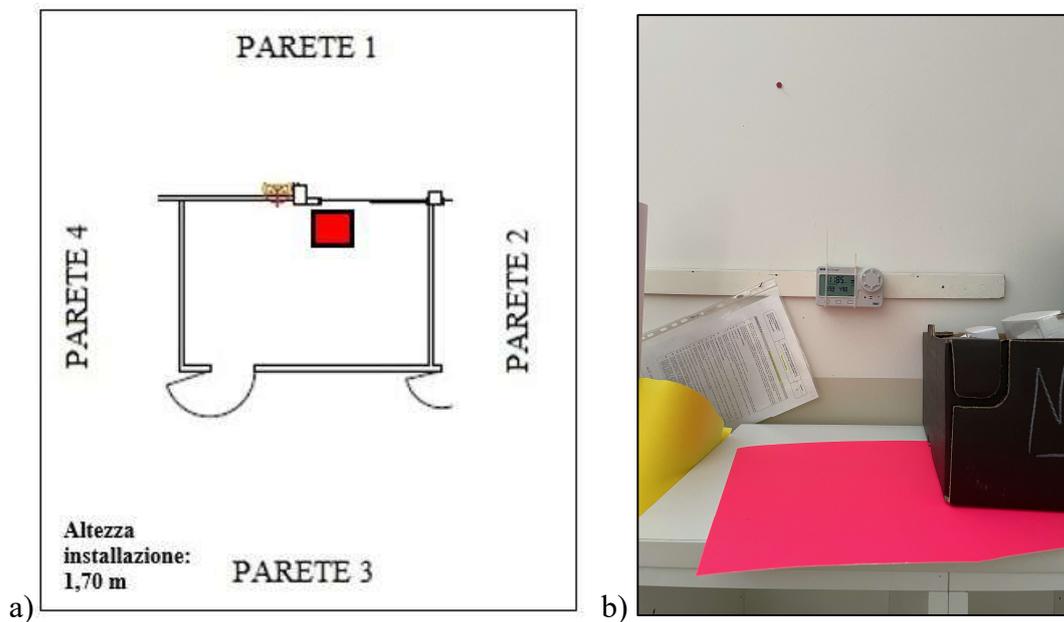


Figura 3.41 – Posizione acquirente in pianta (a) e in foto (b) Aula Sostegno

3.6.2.2 Geometria del locale

Di seguito si riportano le caratteristiche geometriche delle aule, i profili di occupazione e di utilizzo degli impianti, le planimetrie e le foto delle quattro pareti delle aule dove sono state effettuate le misure.

Aula 1 (3°B)

- Denominazione aula: 1 (3°B)
- Tipologia aula: didattica
- N° studenti: 19 + 1 (docente)
- Superficie aula: 45,50 m²
- Altezza aula: 3,20 m
- Volume aula: 145,60 m³
- Parametri da misurare: temperatura dell'aria interna, umidità relativa interna, CO₂ interna
- Profilo di occupazione dell'aula: assente
- Profilo di accensione dell'impianto di riscaldamento: 24 ore su 24
- Profilo di accensione dell'impianto di ventilazione: 24 ore su 24 all'impostazione di velocità 1
- Profilo di apertura delle finestre: assente

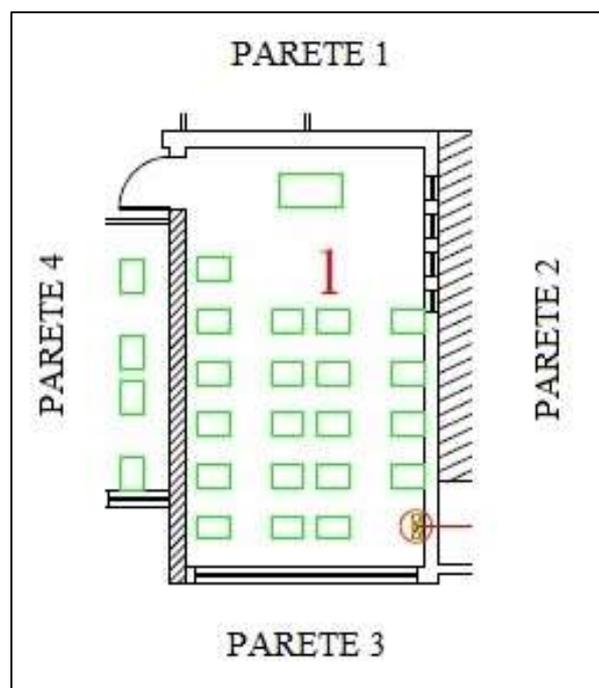


Figura 3.42 – Planimetria dell'Aula 1 (3°B) oggetto di misurazioni



Figura 3.43 – Foto parete 1 (a), parete 2 (b), parete 3 (c), parete 4 (d) Aula 1 (3°B)

Aula 2 (3°A)

- Denominazione aula: 2 (3°A)
- Tipologia aula: didattica
- N° studenti: 14 + 1 (docente)
- Superficie aula: 37,34 m²
- Altezza aula: 3,30 m
- Volume aula: 123,21 m³
- Parametri da misurare: temperatura dell'aria interna, umidità relativa interna, CO₂ interna
- Profilo di occupazione dell'aula: assente
- Profilo di accensione dell'impianto di riscaldamento: 24 ore su 24
- Profilo di accensione dell'impianto di ventilazione: 24 ore su 24 all'impostazione di velocità 1
- Profilo di apertura delle finestre: assente

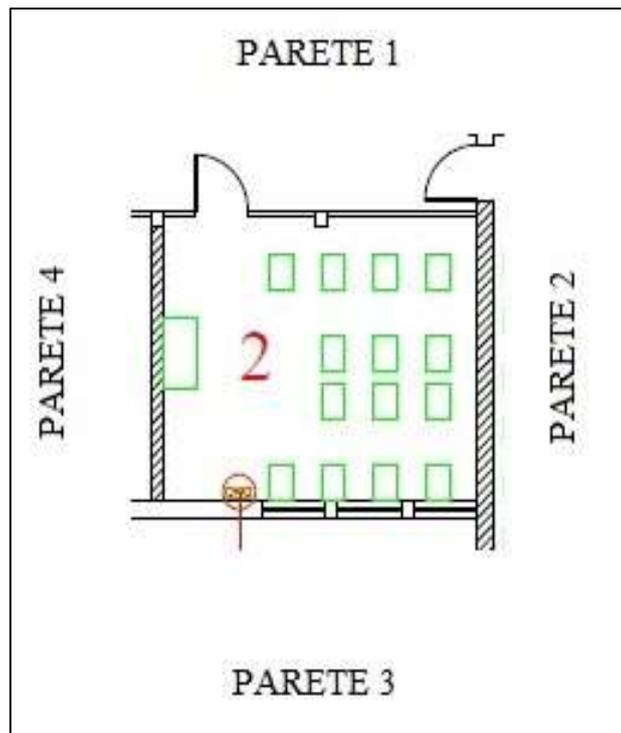


Figura 3.44 – Planimetria dell'Aula 2 (3°A) oggetto di misurazioni



Figura 3.45 – Foto parete 1 (a), parete 2 (b), parete 3 (c), parete 4 (d) Aula 2 (3°A)

Aula 3 (2°B)

- Denominazione aula: 3 (2°B)

- Tipologia aula: didattica
- N° studenti: 14 + 1 (docente)
- Superficie aula: 36,48 m²
- Altezza aula: 3,30 m
- Volume aula: 120,38 m³
- Parametri da misurare: temperatura dell'aria interna, umidità relativa interna, CO₂ interna
- Profilo di occupazione dell'aula: assente
- Profilo di accensione dell'impianto di riscaldamento: 24 ore su 24
- Profilo di accensione dell'impianto di ventilazione: 24 ore su 24 all'impostazione di velocità 1
- Profilo di apertura delle finestre: assente

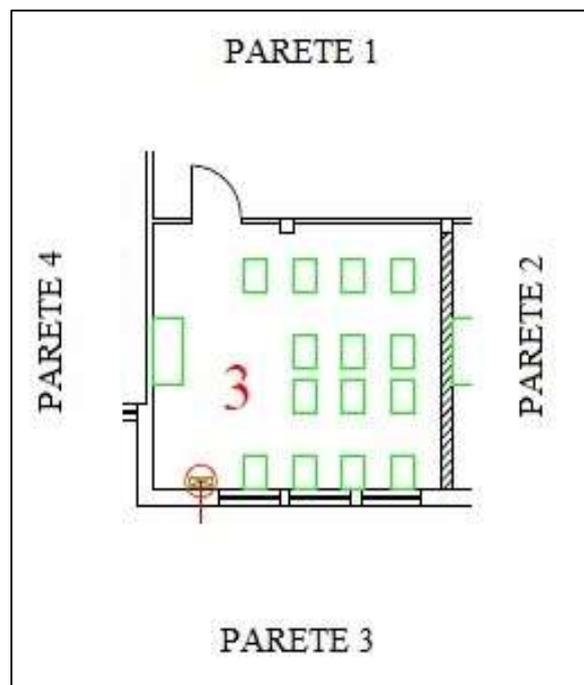


Figura 3.46 – Planimetria dell'Aula 3 (2°B) oggetto di misurazioni





Figura 3.47 – Foto parete 1 (a), parete 2 (b), parete 3 (c), parete 4 (d) Aula 3 (2°B)

Aula 4 (2°A)

- Denominazione aula: 4 (2°A)
- Tipologia aula: didattica
- N° studenti: 19 + 1 (docente)
- Superficie aula: 39,10 m²
- Altezza aula: 3,30 m
- Volume aula: 129,03 m³
- Parametri da misurare: temperatura dell'aria interna, umidità relativa interna, CO₂ interna
- Profilo di occupazione dell'aula: assente
- Profilo di accensione dell'impianto di riscaldamento: 24 ore su 24
- Profilo di accensione dell'impianto di ventilazione: 24 ore su 24 all'impostazione di velocità 1
- Profilo di apertura delle finestre: assente

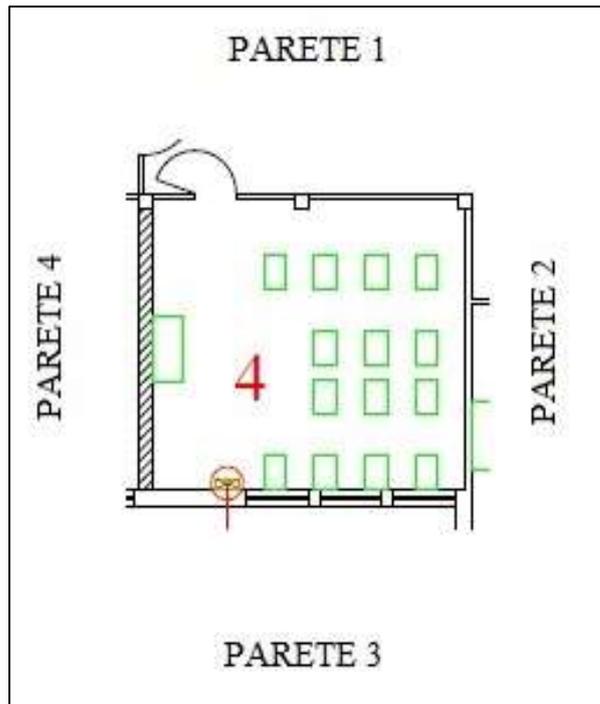


Figura 3.48 – Planimetria dell’Aula 4 (2°A) oggetto di misurazioni



Figura 3.49 – Foto parete 1 (a), parete 2 (b), parete 3 (c), parete 4 (d) Aula 4 (2°A)

Aula 5 (4°B)

- Denominazione aula: 5 (4°B)
- Tipologia aula: didattica

- N° studenti: 18 + 1 (docente)
- Superficie aula: 38,53 m²
- Altezza aula: 3,25
- Volume aula: 125,21 m³
- Parametri da misurare: temperatura dell'aria interna, umidità relativa interna, CO₂ interna
- Profilo di occupazione dell'aula: assente
- Profilo di accensione dell'impianto di riscaldamento: 24 ore su 24
- Profilo di accensione dell'impianto di ventilazione: 24 ore su 24 all'impostazione di velocità 1
- Profilo di apertura delle finestre: assente

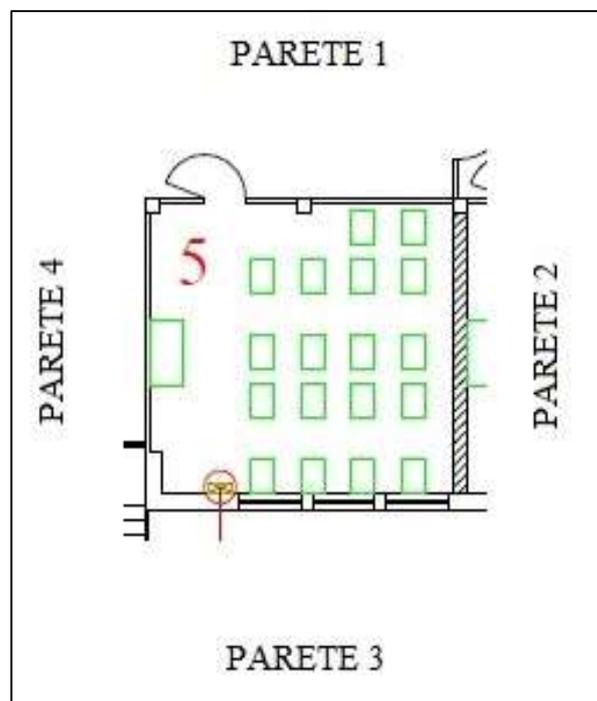


Figura 3.50 – Planimetria dell'Aula 5 (4°B) oggetto di misurazioni





Figura 3.51 – Foto parete 1 (a), parete 2 (b), parete 3 (c), parete 4 (d) Aula 5 (4°B)

Aula 6 (4°A)

- Denominazione aula: 6 (4°A)
- Tipologia aula: didattica
- N° studenti: 18 + 1 (docente)
- Superficie aula: 37,70 m²
- Altezza aula: 3,30 m
- Volume aula: 124,41 m³
- Parametri da misurare: temperatura dell'aria interna, umidità relativa interna, CO₂ interna
- Profilo di occupazione dell'aula: assente
- Profilo di accensione dell'impianto di riscaldamento: 24 ore su 24
- Profilo di accensione dell'impianto di ventilazione: 24 ore su 24 all'impostazione di velocità 1
- Profilo di apertura delle finestre: assente

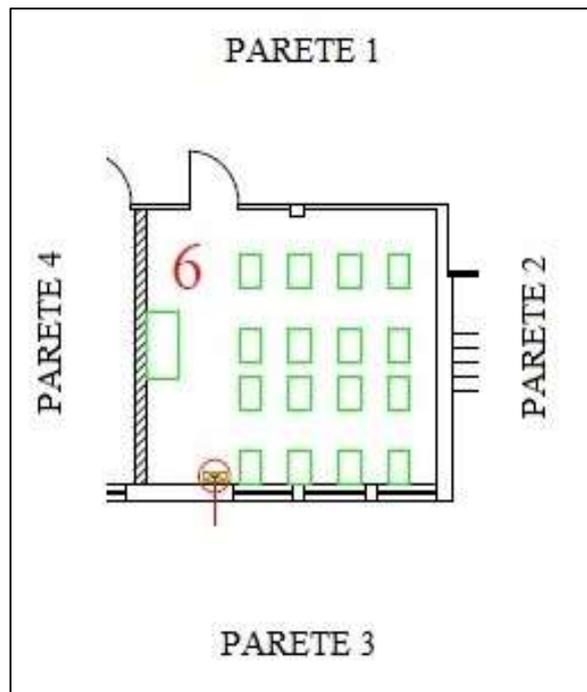


Figura 3.52 – Planimetria dell'Aula 6 (4ª) oggetto di misurazioni

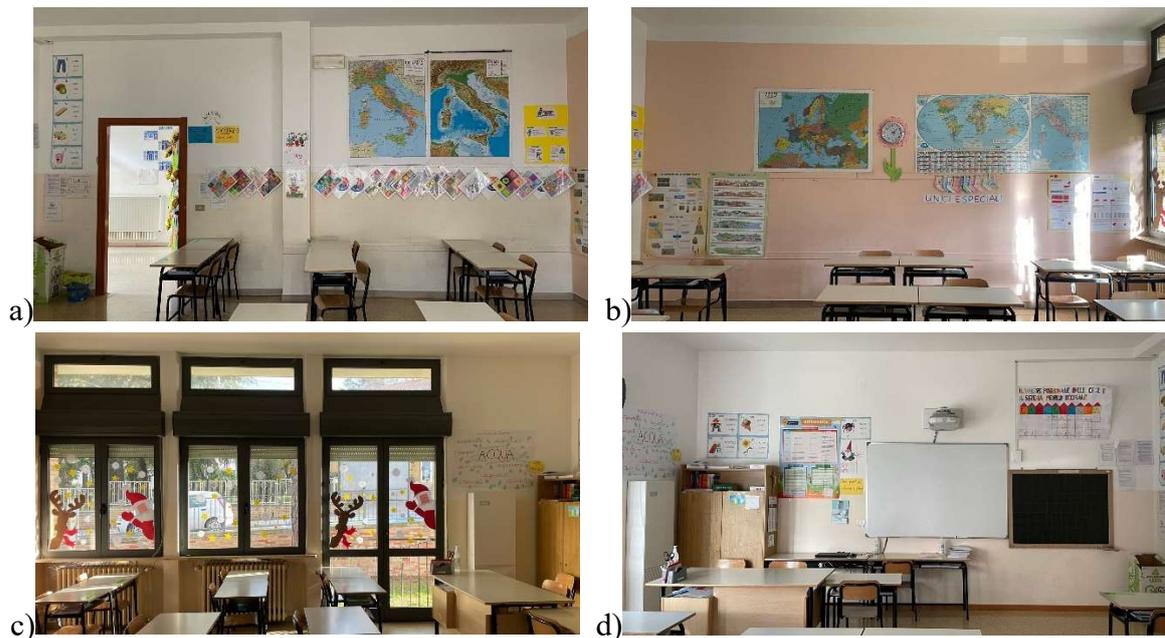


Figura 3.53 – Foto parete 1 (a), parete 2 (b), parete 3 (c), parete 4 (d) Aula 6 (4ª)

Aula 8-16 (Mensa)

- Denominazione aula: 8-16 (Mensa)
- Tipologia aula: didattica
- N° studenti: non noto

- Superficie aula: 77,52 m²
- Altezza aula: 3,30 m
- Volume aula: 255,82 m³
- Parametri da misurare: temperatura dell'aria interna, umidità relativa interna, CO₂ interna
- Profilo di occupazione dell'aula: assente
- Profilo di accensione dell'impianto di riscaldamento: 24 ore su 24
- Profilo di accensione dell'impianto di ventilazione: 24 ore su 24 all'impostazione di velocità 1
- Profilo di apertura delle finestre: assente

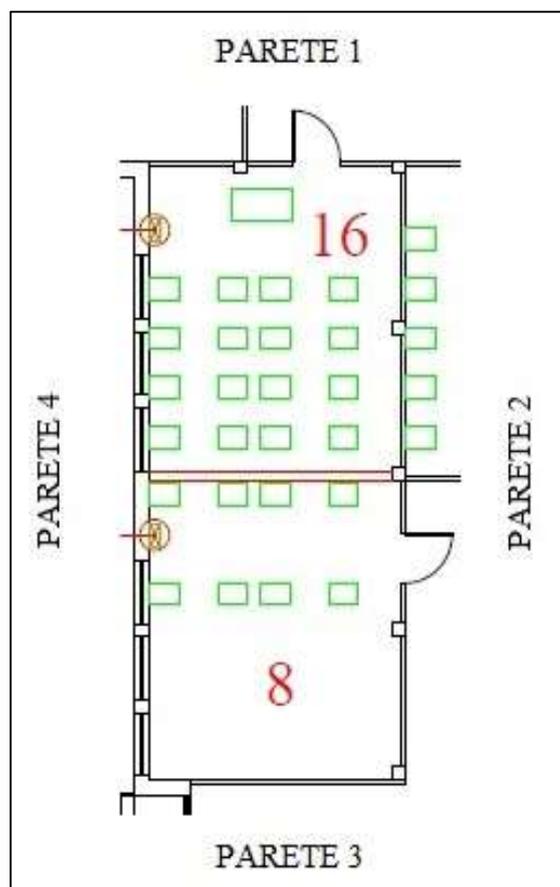


Figura 3.54 – Planimetria dell'Aula 8-16 (Mensa) oggetto di misurazioni

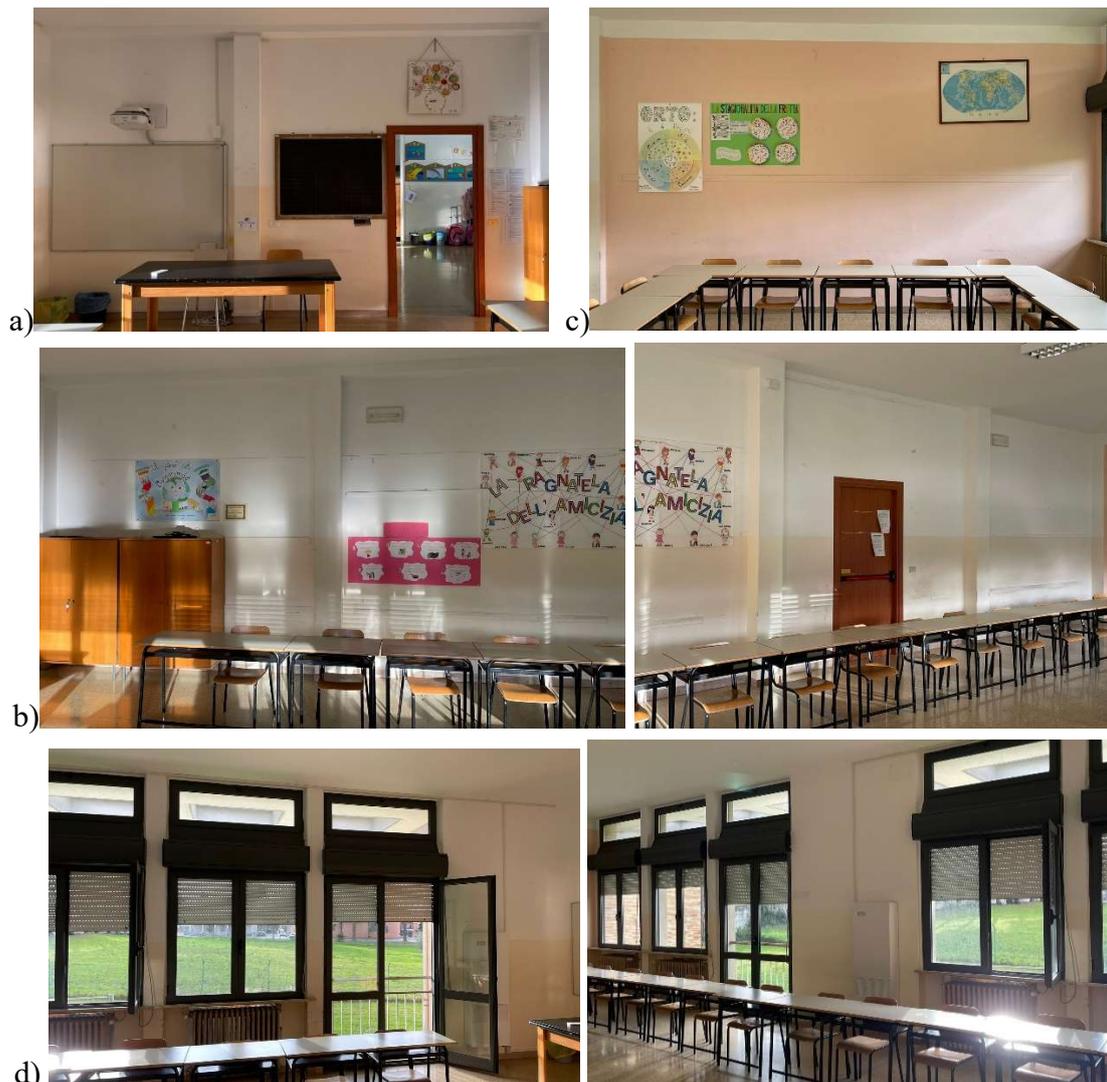


Figura 3.55 – Foto parete 1 (a), parete 2 (b), parete 3 (c), parete 4 (d) Aula 8-16 (Mensa)

Aula 9 (1°B)

- Denominazione aula: 9 (1°B)
- Tipologia aula: didattica
- N° studenti: 16 + 1 (docente)
- Superficie aula: 37,91 m²
- Altezza aula: 3,30 m
- Volume aula: 125,09 m³
- Parametri da misurare: temperatura dell'aria interna, umidità relativa interna, CO₂ interna
- Profilo di occupazione dell'aula: assente
- Profilo di accensione dell'impianto di riscaldamento: 24 ore su 24
- Profilo di accensione dell'impianto di ventilazione: 24 ore su 24 all'impostazione di velocità 1

- Profilo di apertura delle finestre: assente

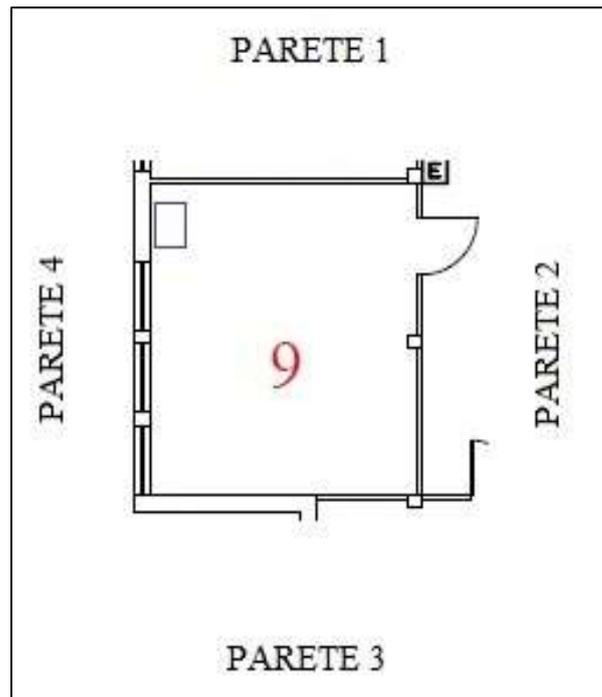


Figura 3.56 – Planimetria dell’Aula 9 (1°B) oggetto di misurazioni



Figura 3.57 – Foto parete 1 (a), parete 2 (b), parete 3 (c), parete 4 (d) Aula 9 (1°B)

Aula 10 (5°B)

- Denominazione aula: 10 (5°B)
- Tipologia aula: didattica
- N° studenti: 14 + 1 (docente)
- Superficie aula: 37,34 m²
- Altezza aula: 3,30 m
- Volume aula: 123,21 m³
- Parametri da misurare: temperatura dell'aria interna, umidità relativa interna, CO₂ interna
- Profilo di occupazione dell'aula: assente
- Profilo di accensione dell'impianto di riscaldamento: 24 ore su 24
- Profilo di accensione dell'impianto di ventilazione: 24 ore su 24 all'impostazione di velocità 1
- Profilo di apertura delle finestre: assente

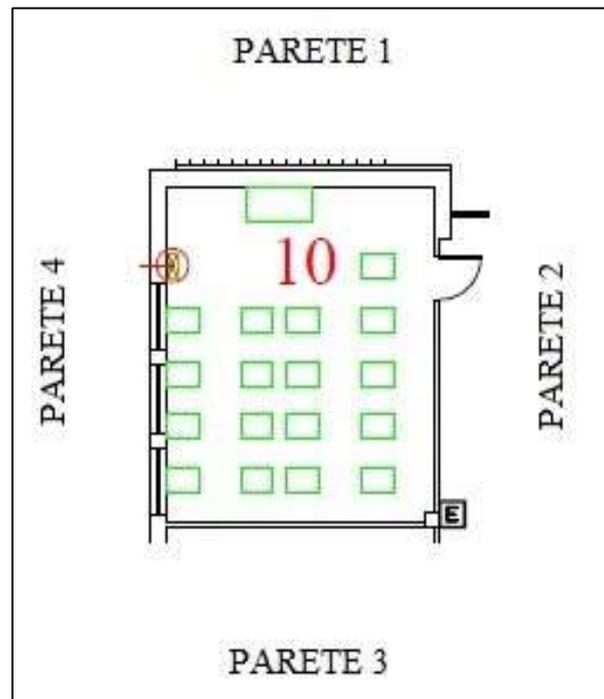


Figura 3.58 – Planimetria dell'Aula 10 (5°B) oggetto di misurazioni





Figura 3.59 – Foto parete 1 (a), parete 2 (b), parete 3 (c), parete 4 (d) Aula 10 (5°B)

Aula 11 (1°A)

- Denominazione aula: 11 (1°A)
- Tipologia aula: didattica
- N° studenti: 20 + 1 (docente)
- Superficie aula: 43,55 m²
- Altezza aula: 3,30 m
- Volume aula: 143,72 m³
- Parametri da misurare: temperatura dell'aria interna, umidità relativa interna, CO₂ interna
- Profilo di occupazione dell'aula: assente
- Profilo di accensione dell'impianto di riscaldamento: 24 ore su 24
- Profilo di accensione dell'impianto di ventilazione: 24 ore su 24 all'impostazione di velocità 1
- Profilo di apertura delle finestre: assente

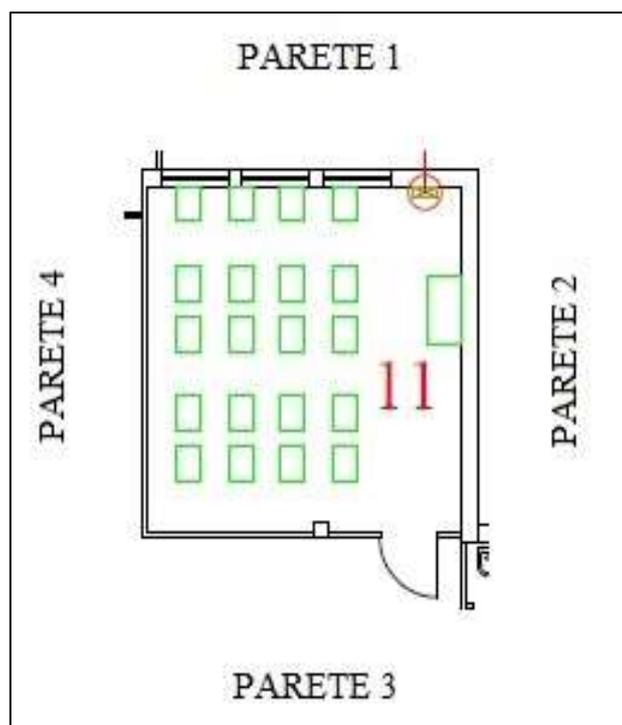


Figura 3.60 – Planimetria dell’Aula 11 (1°A) oggetto di misurazioni



Figura 3.61 – Foto parete 1 (a), parete 2 (b), parete 3 (c), parete 4 (d) Aula 11 (1°A)

Aula 12 (5°A)

- Denominazione aula: 12 (5°A)
- Tipologia aula: didattica
- N° studenti: 15 + 1 (docente)

- Superficie aula: 45,22 m²
- Altezza aula: 3,25 m
- Volume aula: 146,97 m³
- Parametri da misurare: temperatura dell'aria interna, umidità relativa interna, CO₂ interna
- Profilo di occupazione dell'aula: assente
- Profilo di accensione dell'impianto di riscaldamento: 24 ore su 24
- Profilo di accensione dell'impianto di ventilazione: 24 ore su 24 all'impostazione di velocità 1
- Profilo di apertura delle finestre: assente

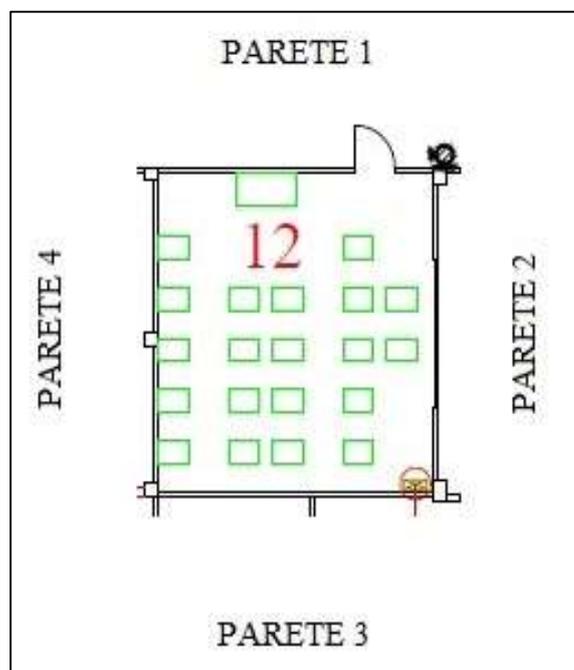


Figura 3.62 – Planimetria dell'Aula 12 (5°A) oggetto di misurazioni





Figura 3.63 – Foto parete 1 (a), parete 2 (b), parete 3 (c), parete 4 (d) Aula 12 (5°A)

Aula 13 (Biblioteca)

- Denominazione aula: 13 (Biblioteca)
- Tipologia aula: didattica
- N° studenti: non noto
- Superficie aula: 35,44 m²
- Altezza aula: 3,25 m
- Volume aula: 115,17 m³
- Parametri da misurare: temperatura dell'aria interna, umidità relativa interna, CO₂ interna
- Profilo di occupazione dell'aula: assente
- Profilo di accensione dell'impianto di riscaldamento: 24 ore su 24
- Profilo di accensione dell'impianto di ventilazione: 24 ore su 24 all'impostazione di velocità 1
- Profilo di apertura delle finestre: assente

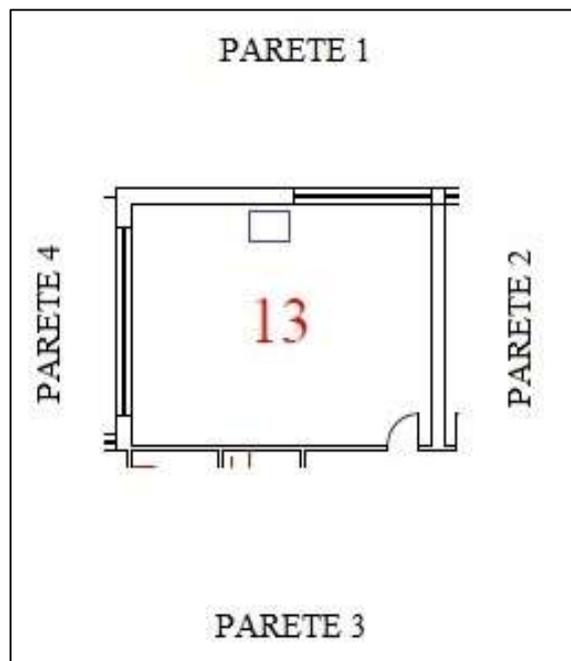


Figura 3.64 – Planimetria dell’Aula 13 (Biblioteca) oggetto di misurazioni



Figura 3.65 – Foto parete 1 (a), parete 2 (b), parete 3 (c), parete 4 (d) Aula 13 (Biblioteca)

Aula 14 (Laboratorio Ceramica)

- Denominazione aula: 14 (Laboratorio Ceramica)
- Tipologia aula: didattica
- N° studenti: non noto
- Superficie aula: 35,43 m²
- Altezza aula: 3,30 m
- Volume aula: 116,90 m³
- Parametri da misurare: temperatura dell’aria interna, umidità relativa interna, CO₂ interna
- Profilo di occupazione dell'aula: assente
- Profilo di accensione dell'impianto di riscaldamento: 24 ore su 24
- Profilo di accensione dell'impianto di ventilazione: 24 ore su 24 all'impostazione di velocità 1
- Profilo di apertura delle finestre: assente

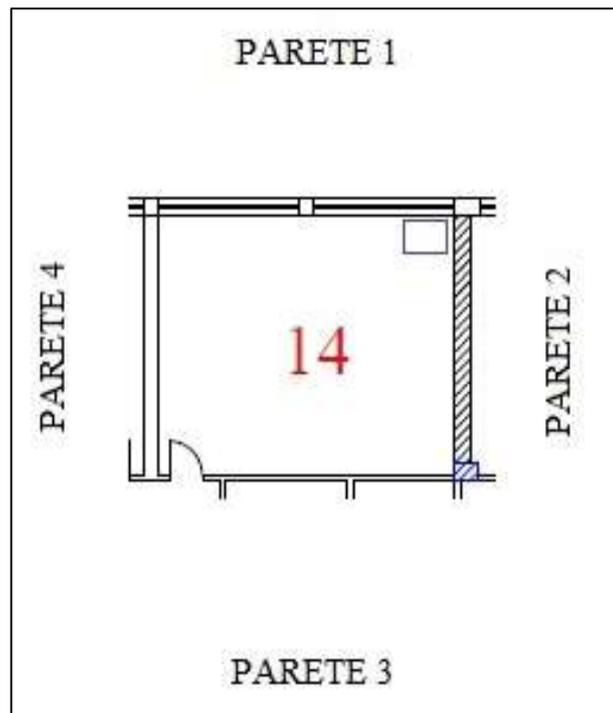


Figura 3.66 – Planimetria dell'Aula 14 (Laboratorio Ceramica) oggetto di misurazioni



Figura 3.67 – Foto parete 1 (a), parete 2 (b), parete 3 (c), parete 4 (d) Aula 14 (Laboratorio Ceramica)

Aula 15 (Aula Informatica)

- Denominazione aula: 15 (Aula Informatica)
- Tipologia aula: didattica
- N° studenti: non noto

- Superficie aula: 31,76 m²
- Altezza aula: 3,30 m
- Volume aula: 104,82 m³
- Parametri da misurare: temperatura dell'aria interna, umidità relativa interna, CO₂ interna
- Profilo di occupazione dell'aula: assente
- Profilo di accensione dell'impianto di riscaldamento: 24 ore su 24
- Profilo di accensione dell'impianto di ventilazione: 24 ore su 24 all'impostazione di velocità 1
- Profilo di apertura delle finestre: assente

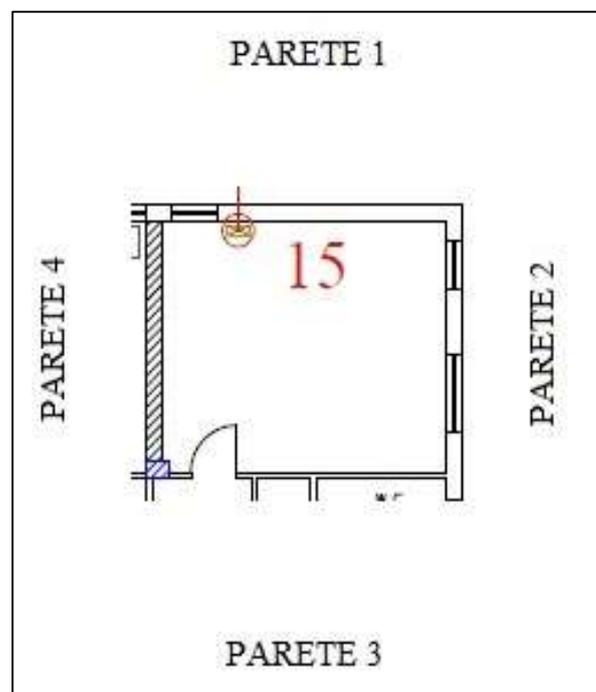
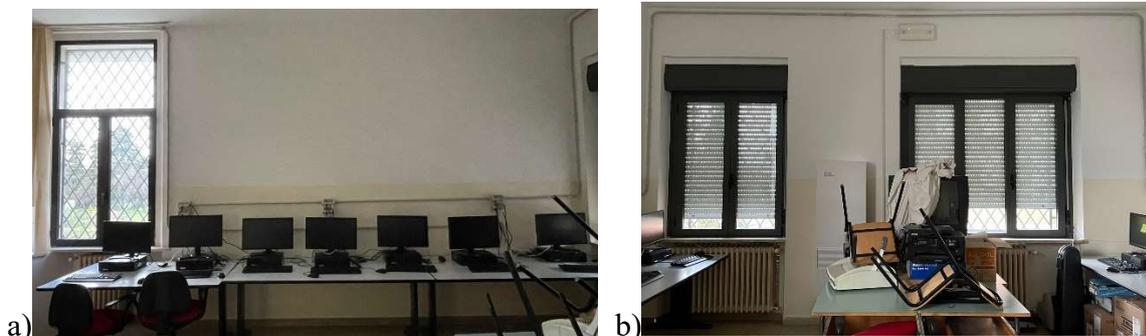


Figura 3.68 – Planimetria dell'Aula 15 (Aula Informatica) oggetto di misurazioni



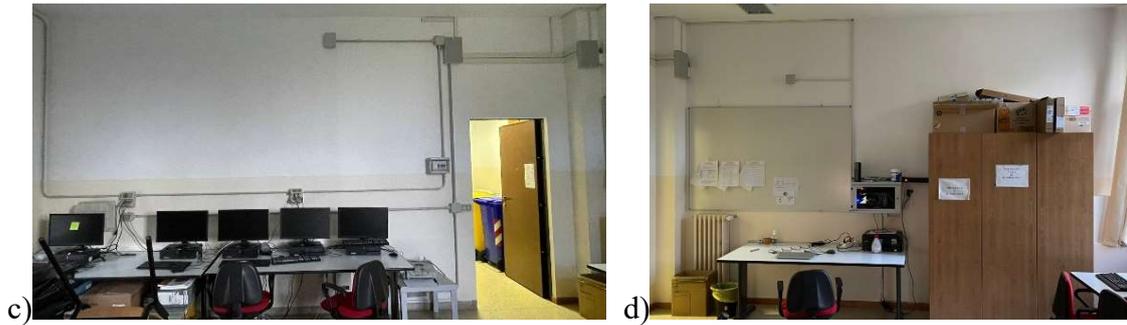


Figura 3.69 – Foto parete 1 (a), parete 2 (b), parete 3 (c), parete 4 (d) Aula 15 (Aula Informatica)

Aula Sostegno

- Denominazione aula: Aula sostegno
- Tipologia aula: didattica
- N° studenti: 2 + 1 (docente)
- Superficie aula: 23,37 m²
- Doppia altezza aula: 3,30 m – 4,90 m – 4,60 m
- Volume aula: 90,79 m³
- Parametri da misurare: temperatura dell'aria interna, umidità relativa interna, CO₂ interna
- Profilo di occupazione dell'aula: assente
- Profilo di accensione dell'impianto di riscaldamento: 24 ore su 24
- Profilo di accensione dell'impianto di ventilazione: 24 ore su 24 all'impostazione di velocità 1
- Profilo di apertura delle finestre: assente

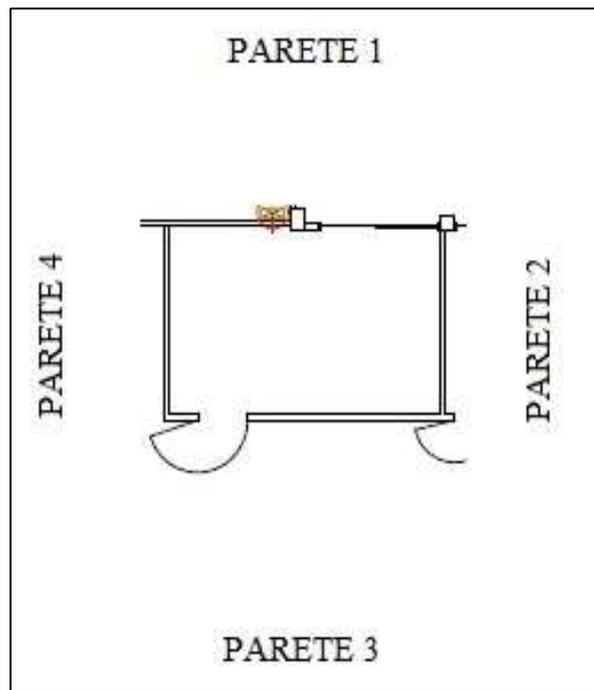


Figura 3.70 – Planimetria dell’Aula Sostegno oggetto di misurazioni



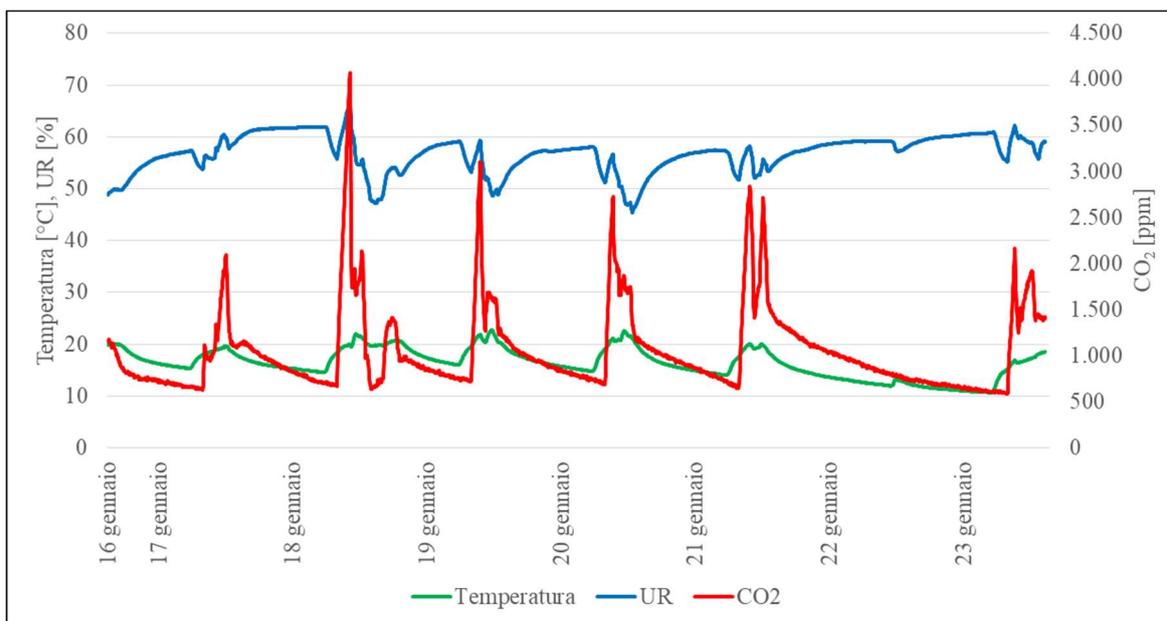
Figura 3.71 – Foto parete 1 (a), parete 2 (b), parete 3 (c), parete 4 (d) Aula Sostegno

3.6.2.3 Valori di temperatura, umidità relativa e CO₂ ottenuti

Nei seguenti grafici sono riportati i dati della temperatura dell'aria interna, dell'umidità relativa e della concentrazione di CO₂ raccolti dal 16 gennaio al 23 gennaio, per un totale di 7 giorni di monitoraggio, per ogni aula. È importante sottolineare che non si è a conoscenza dell'impostazione di velocità a cui ha lavorato la macchina durante l'intero periodo di valutazione e dell'eventuale apertura/chiusura delle finestre. La temperatura è espressa in gradi Celsius [°C], l'umidità relativa in valore percentuale, mentre la concentrazione di CO₂ è espressa in ppm, ovvero parti di inquinante per milione di parti di aria.

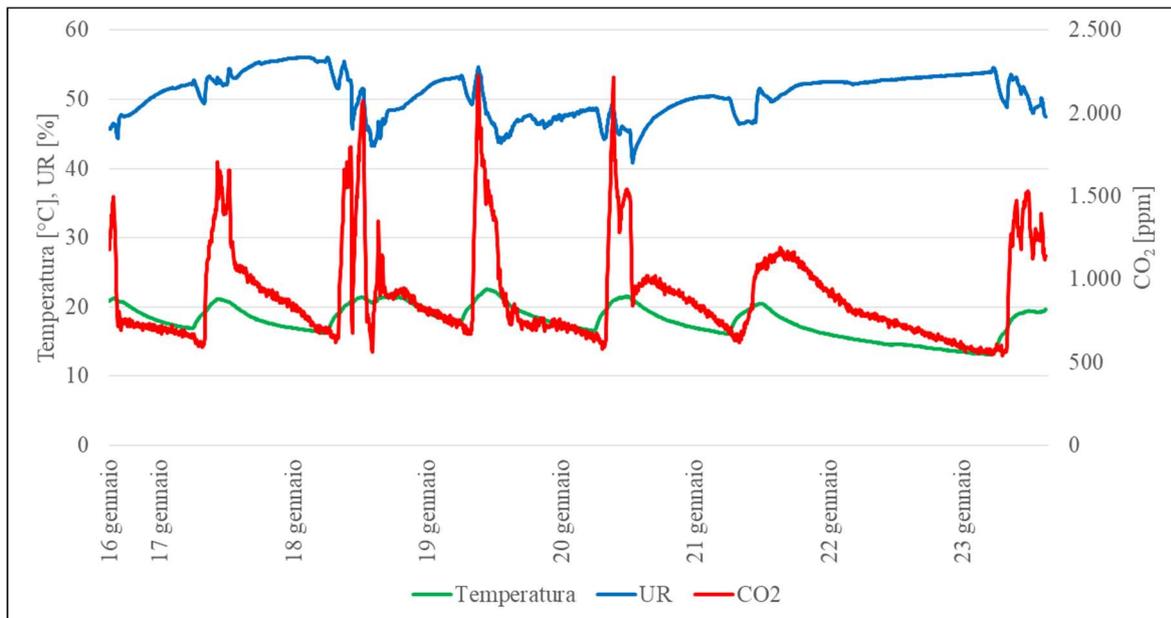
Aula 1 (3°B)

Grafico 3.13 – Andamento della temperatura dell'aria interna, dell'umidità relativa e della CO₂ nell'Aula 1 (3°B) dal 16 gennaio al 23 gennaio



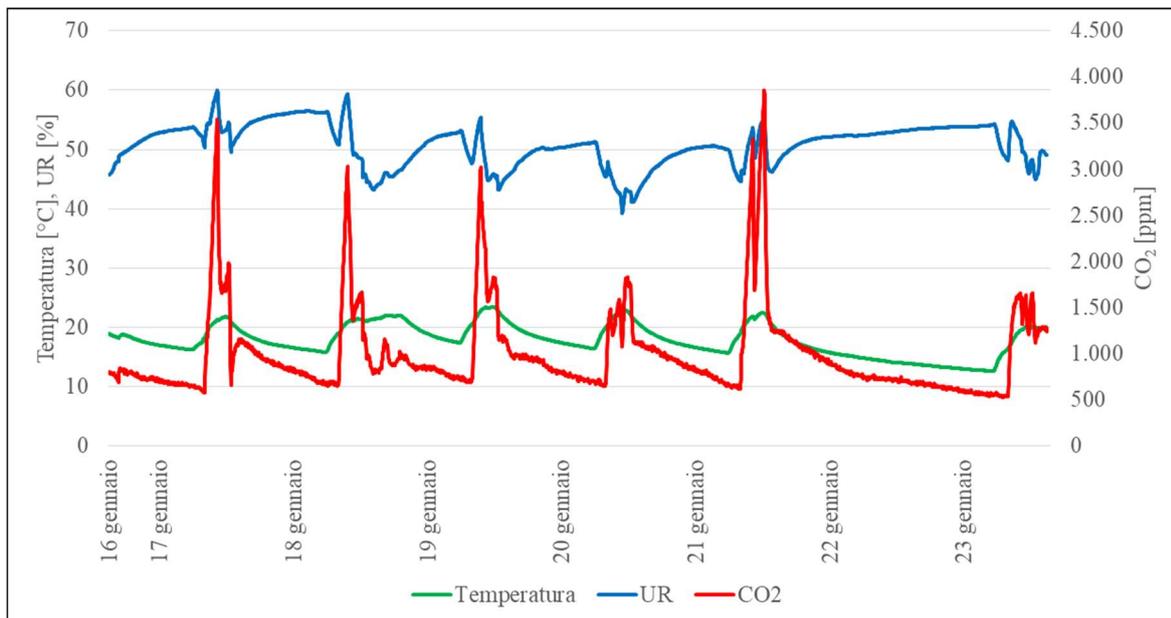
Aula 2 (3°A)

Grafico 3.14 – Andamento della temperatura dell'aria interna, dell'umidità relativa e della CO₂ nell'Aula 2 (3°A) dal 16 gennaio al 23 gennaio



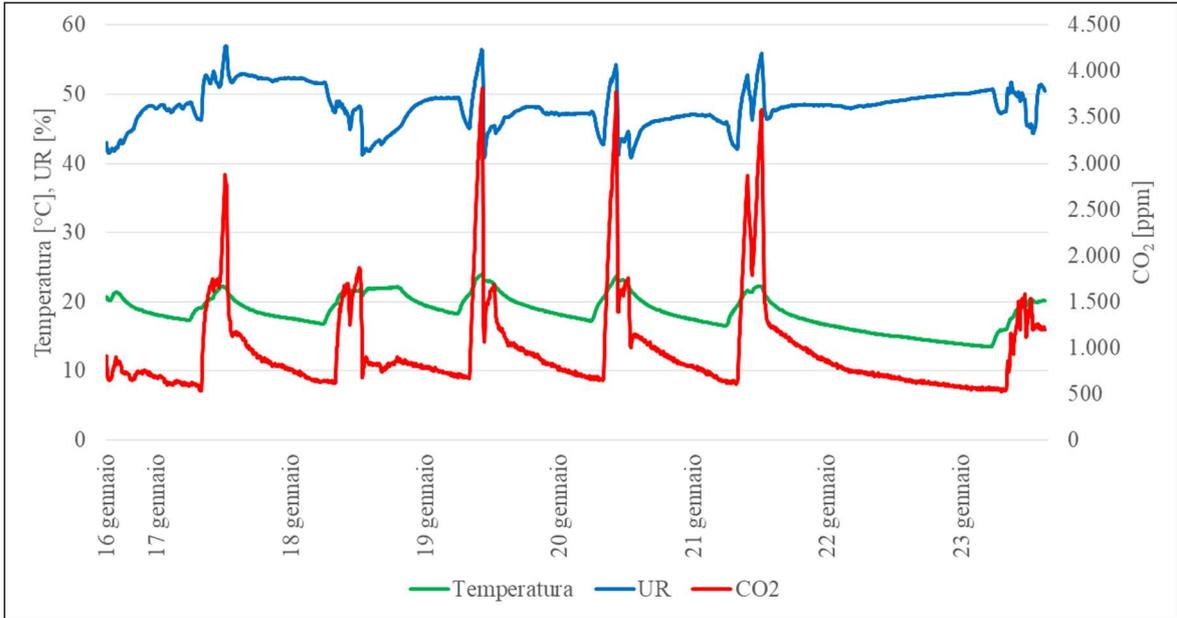
Aula 3 (2°B)

Grafico 3.15 – Andamento della temperatura dell'aria interna, dell'umidità relativa e della CO₂ nell'Aula 3 (2°B) dal 16 gennaio al 23 gennaio



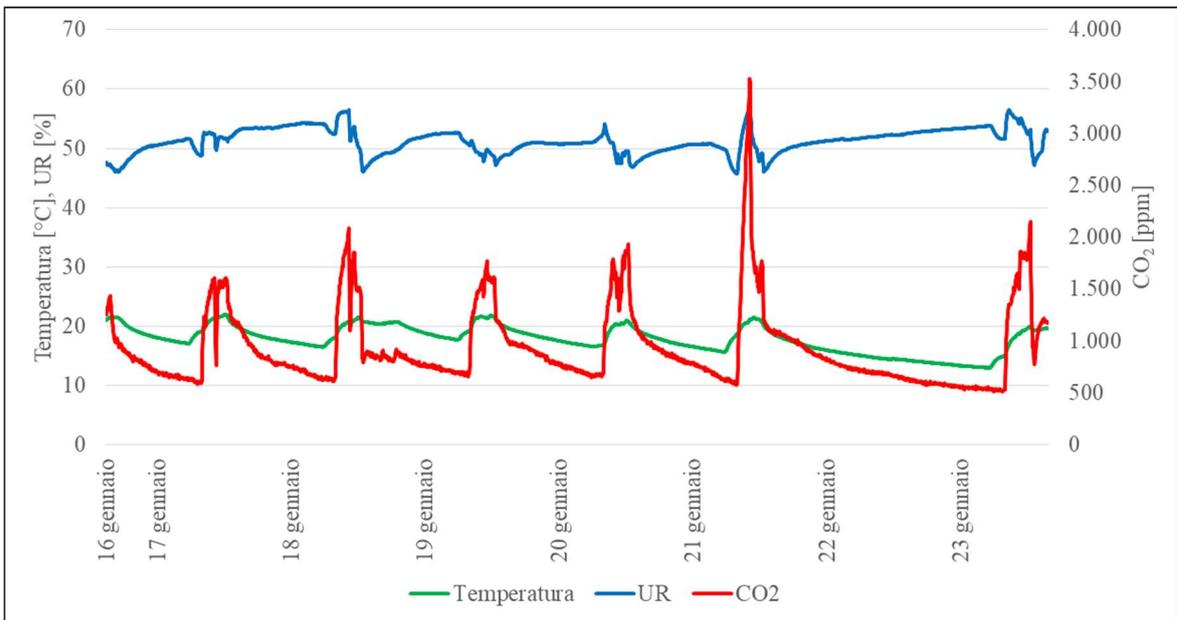
Aula 4 (2°A)

Grafico 3.16 – Andamento della temperatura dell'aria interna, dell'umidità relativa e della CO₂ nell'Aula 4 (2°A) dal 16 gennaio al 23 gennaio



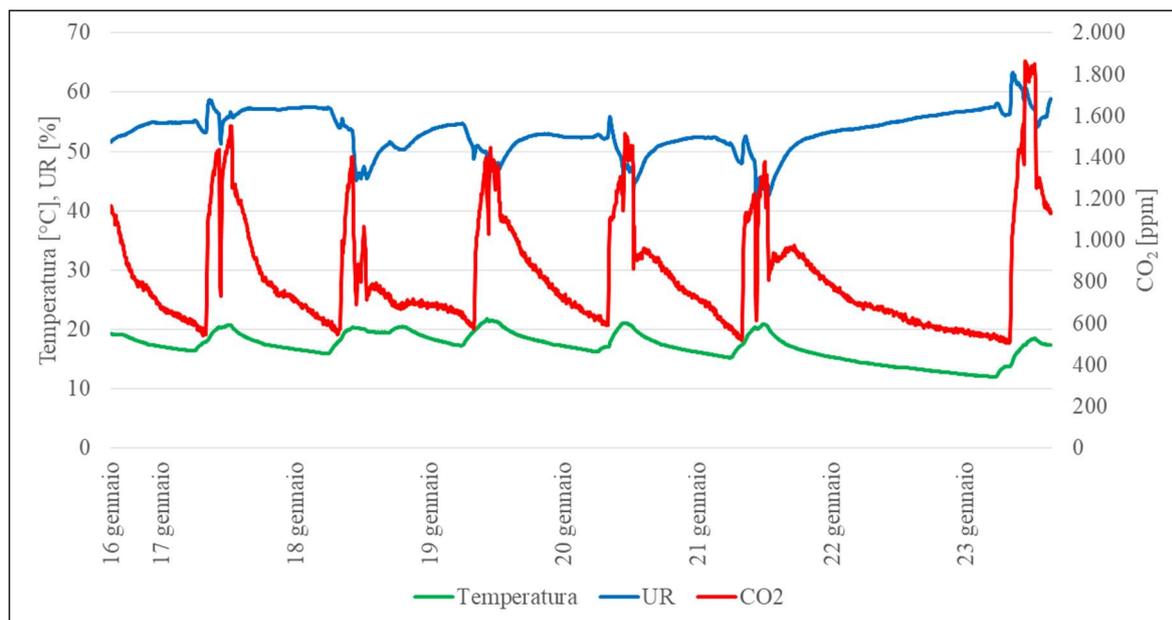
Aula 5 (4°B)

Grafico 3.17 – Andamento della temperatura dell'aria interna, dell'umidità relativa e della CO₂ nell'Aula 5 (4°B) dal 16 gennaio al 23 gennaio



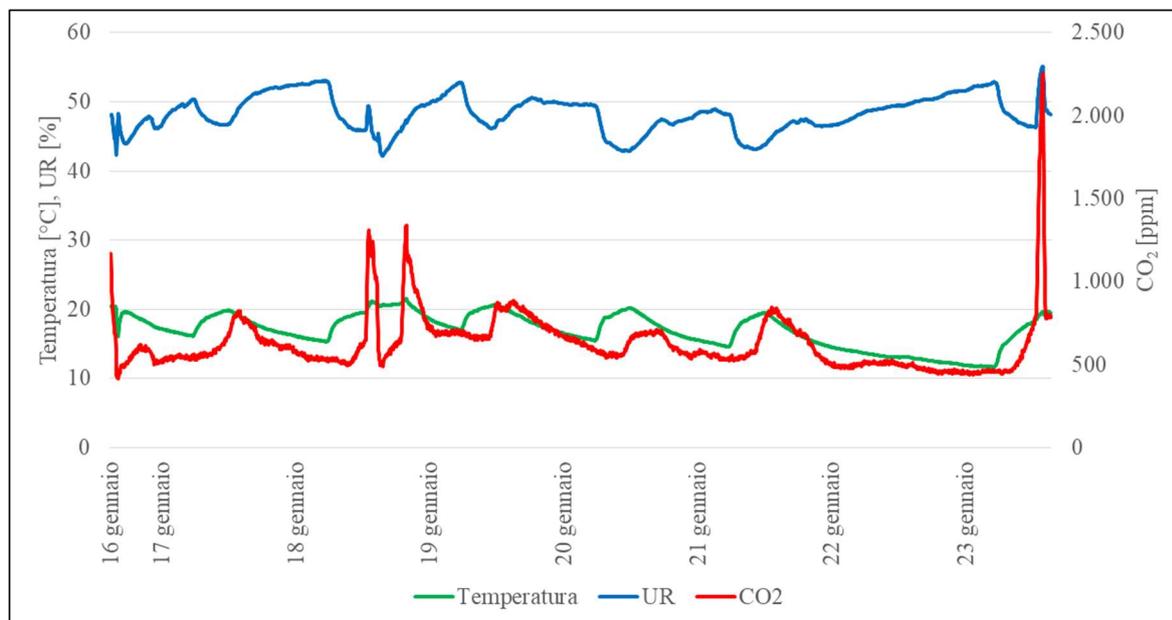
Aula 6 (4°A)

Grafico 3.18 – Andamento della temperatura dell'aria interna, dell'umidità relativa e della CO₂ nell'Aula 6 (4°A) dal 16 gennaio al 23 gennaio



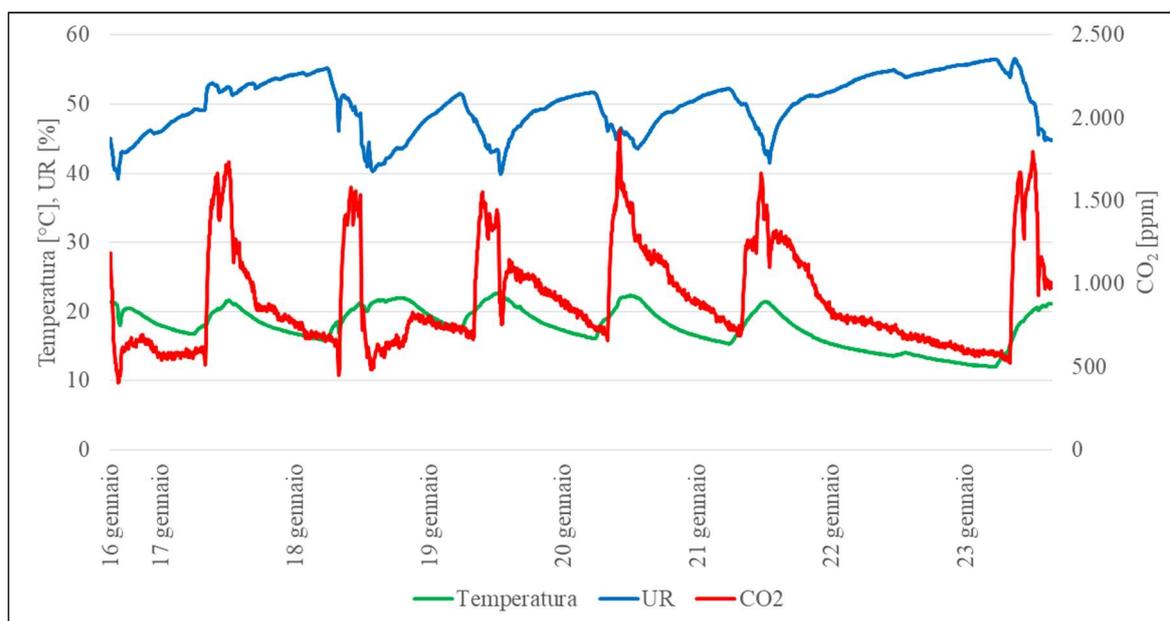
Aula 8-16 (Mensa)

Grafico 3.19 – Andamento della temperatura dell'aria interna, dell'umidità relativa e della CO₂ nell'Aula 8-16 (Mensa) dal 16 gennaio al 23 gennaio



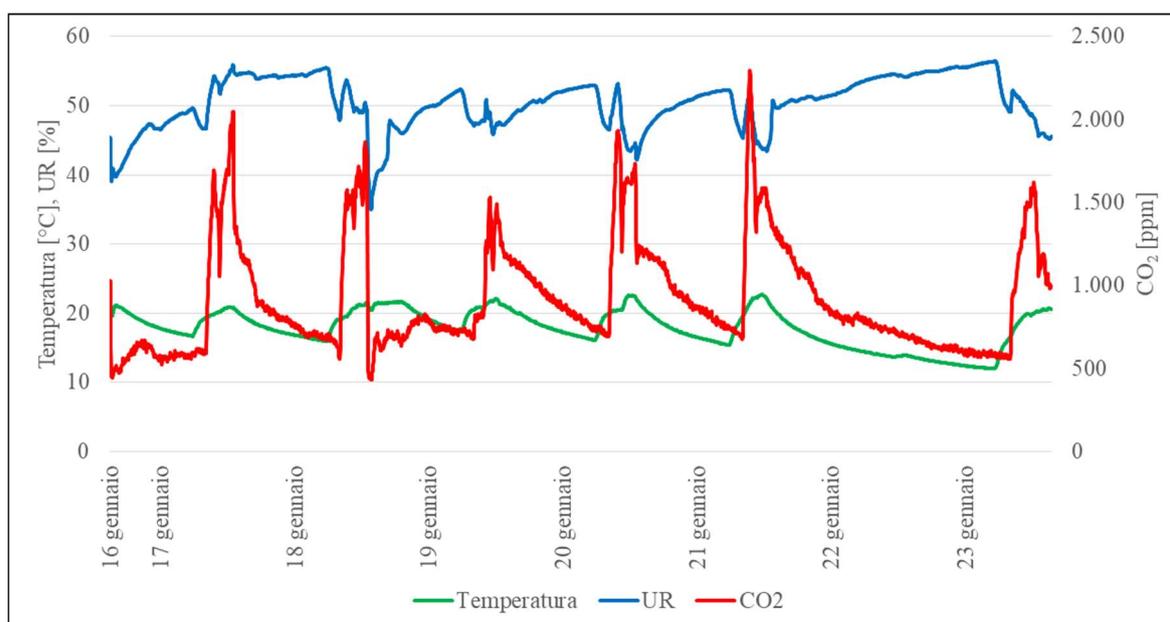
Aula 9 (1°B)

Grafico 3.20 – Andamento della temperatura dell'aria interna, dell'umidità relativa e della CO₂ nell'Aula 9 (1°B) dal 16 gennaio al 23 gennaio



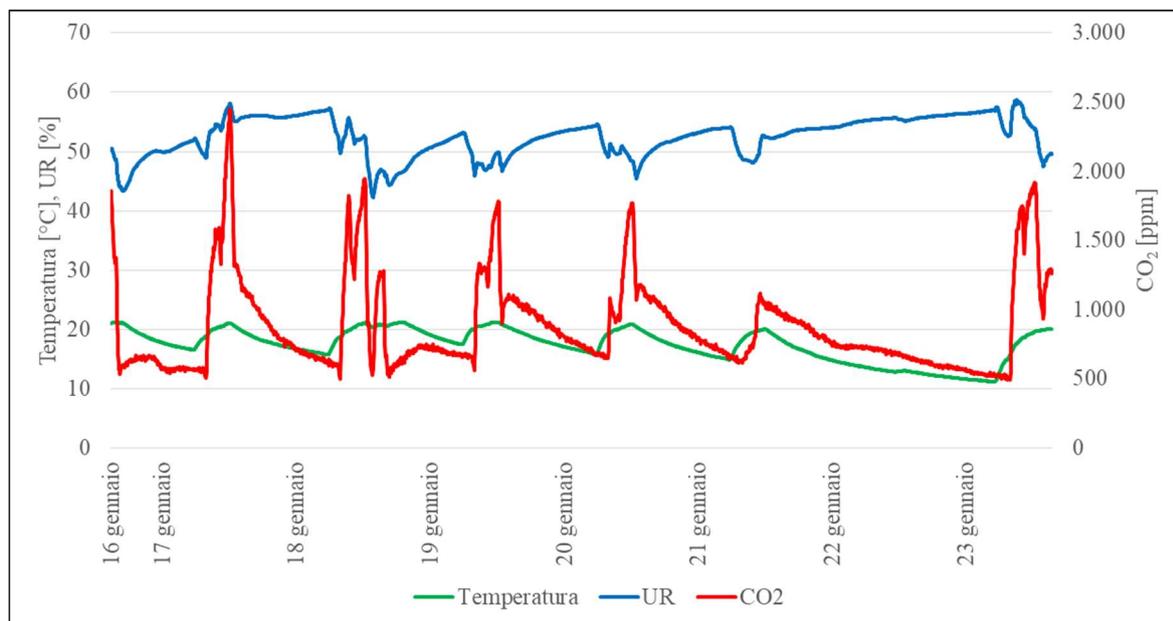
Aula 10 (5°B)

Grafico 3.21 – Andamento della temperatura dell'aria interna, dell'umidità relativa e della CO₂ nell'Aula 10 (5°B) dal 16 gennaio al 23 gennaio



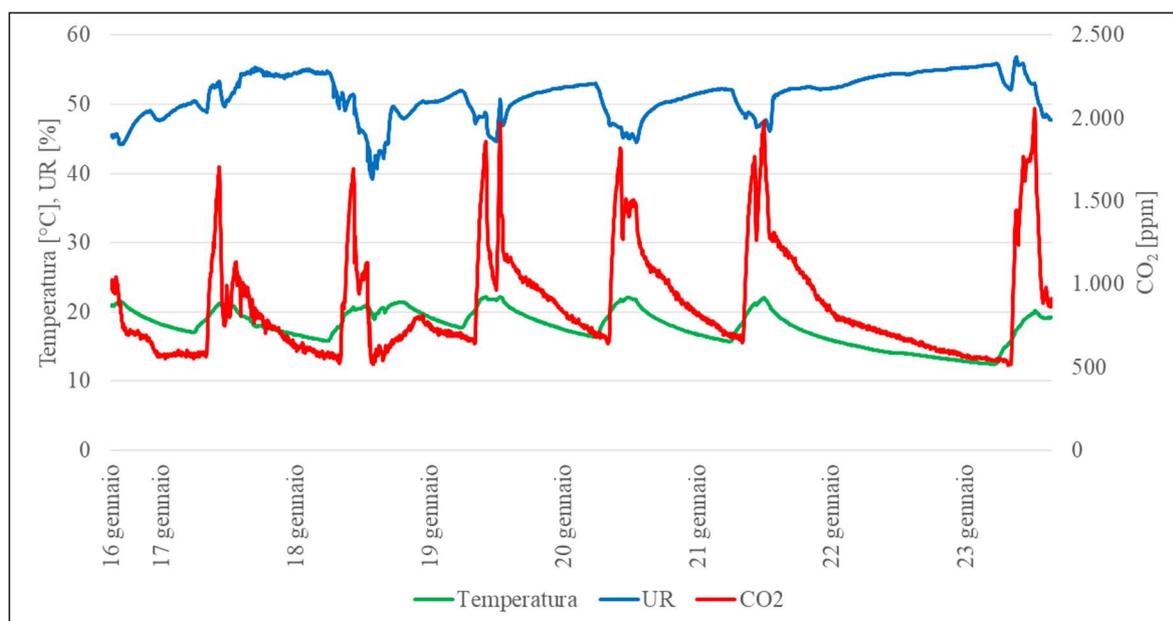
Aula 11 (1°A)

Grafico 3.22 – Andamento della temperatura dell'aria interna, dell'umidità relativa e della CO₂ nell'Aula 11 (1°A) dal 16 gennaio al 23 gennaio



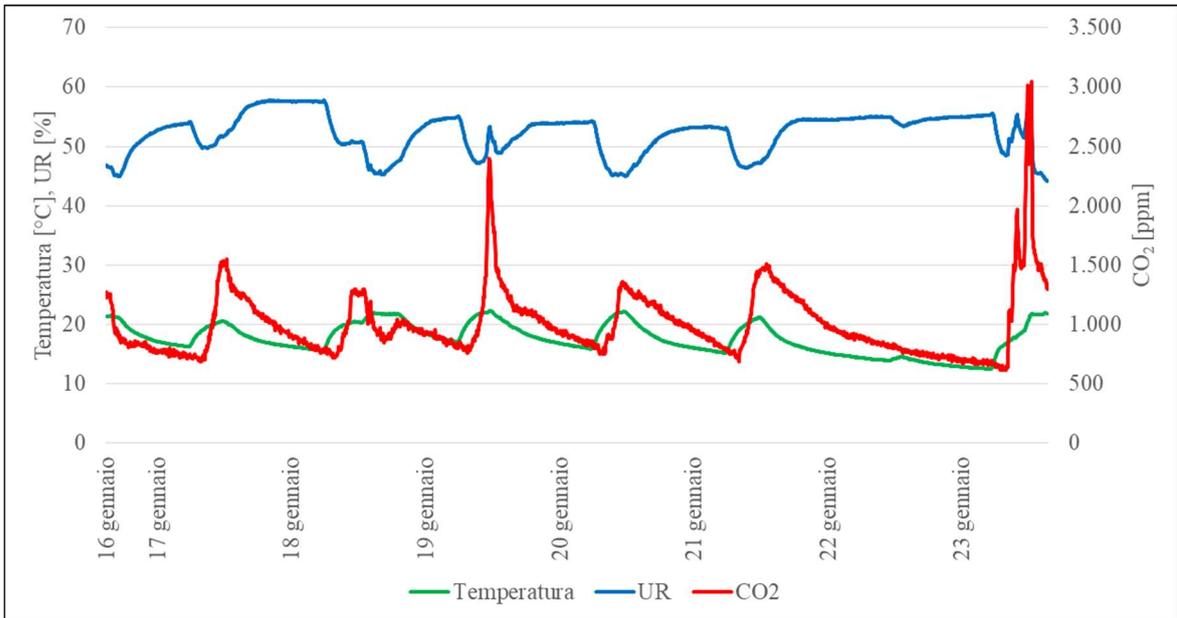
Aula 12 (5°A)

Grafico 3.23 – Andamento della temperatura dell'aria interna, dell'umidità relativa e della CO₂ nell'Aula 12 (5°A) dal 16 gennaio al 23 gennaio



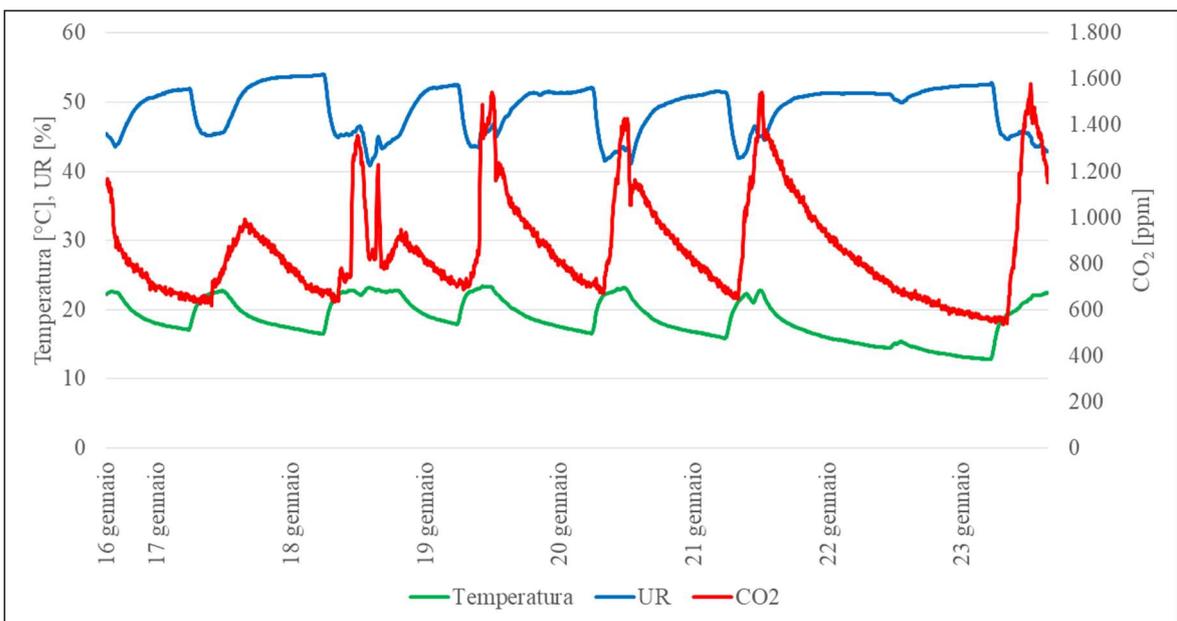
Aula 13 (Biblioteca)

Grafico 3.24 – Andamento della temperatura dell'aria interna, dell'umidità relativa e della CO₂ nell'Aula 13 (Biblioteca) dal 16 gennaio al 23 gennaio



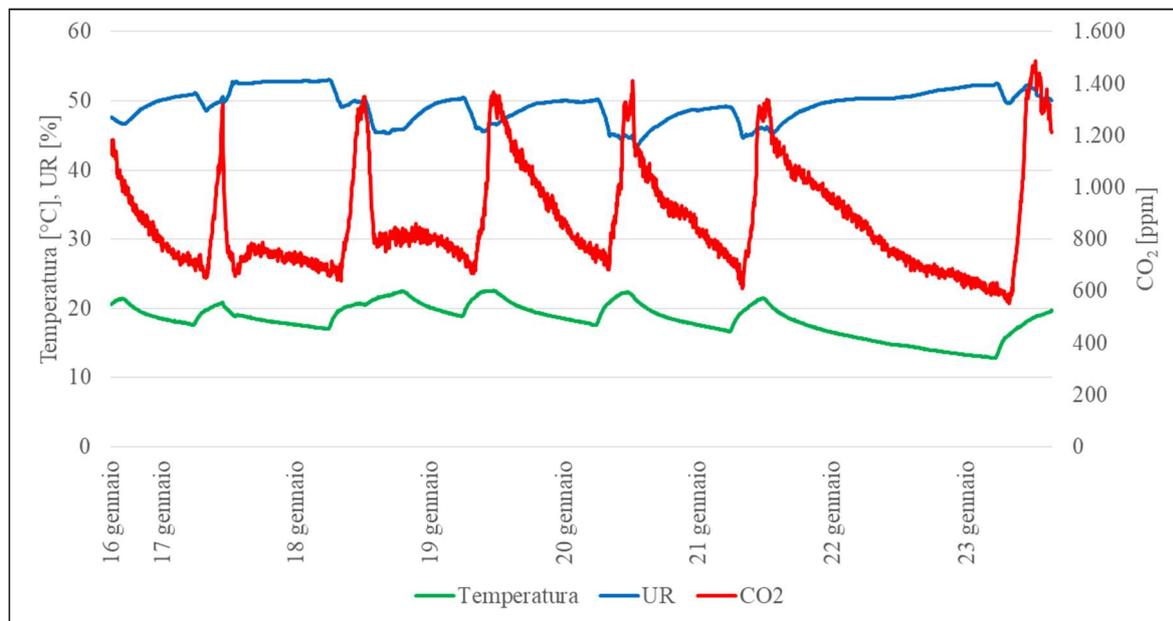
Aula 14 (Laboratorio Ceramica)

Grafico 3.25 – Andamento della temperatura dell'aria interna, dell'umidità relativa e della CO₂ nell'Aula 14 (Laboratorio Ceramica) dal 16 gennaio al 23 gennaio



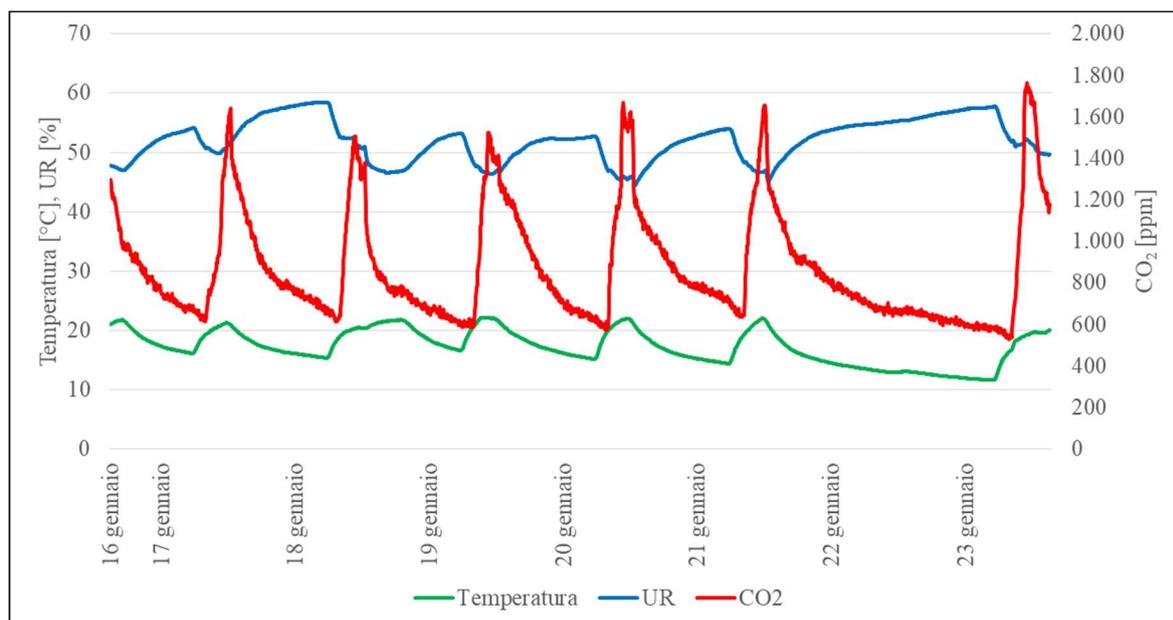
Aula 15 (Aula Informatica)

Grafico 3.26 – Andamento della temperatura dell'aria interna, dell'umidità relativa e della CO₂ nell'Aula 15 (Aula Informatica) dal 16 gennaio al 23 gennaio



Aula Sostegno

Grafico 3.27 – Andamento della temperatura dell'aria interna, dell'umidità relativa e della CO₂ nell'Aula Sostegno dal 16 gennaio al 23 gennaio



Nei seguenti grafici sono riportati i dati relativi al 18 gennaio, in cui si è svolto anche il rientro pomeridiano, dell'Aula 2 (3°A), così da analizzare un giorno significativo appartenente al periodo di monitoraggio. Il primo intervallo orario, che va dalle 8:00 alle 12:30, è l'orario di svolgimento delle lezioni mattutine mentre il secondo intervallo orario, che va dalle 14:00 alle 16:00, è l'orario delle lezioni pomeridiane.

Grafico 3.28 – Andamento della temperatura dell'aria interna nell'Aula 2 (3°A) del 18 gennaio

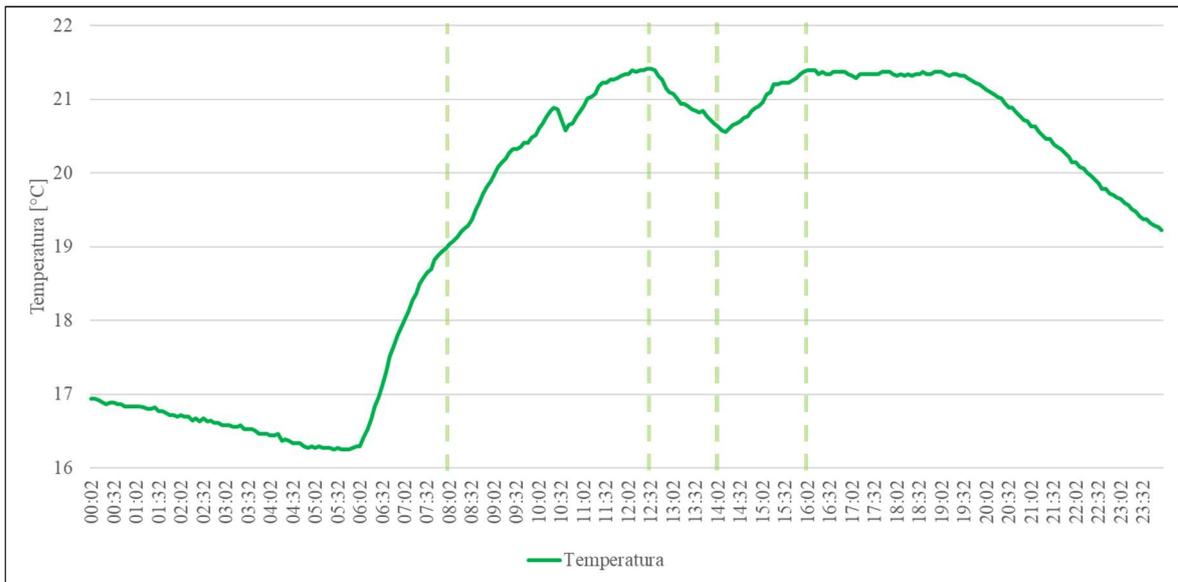


Grafico 3.29 – Andamento dell'umidità relativa nell'Aula 2 (3°A) del 18 gennaio

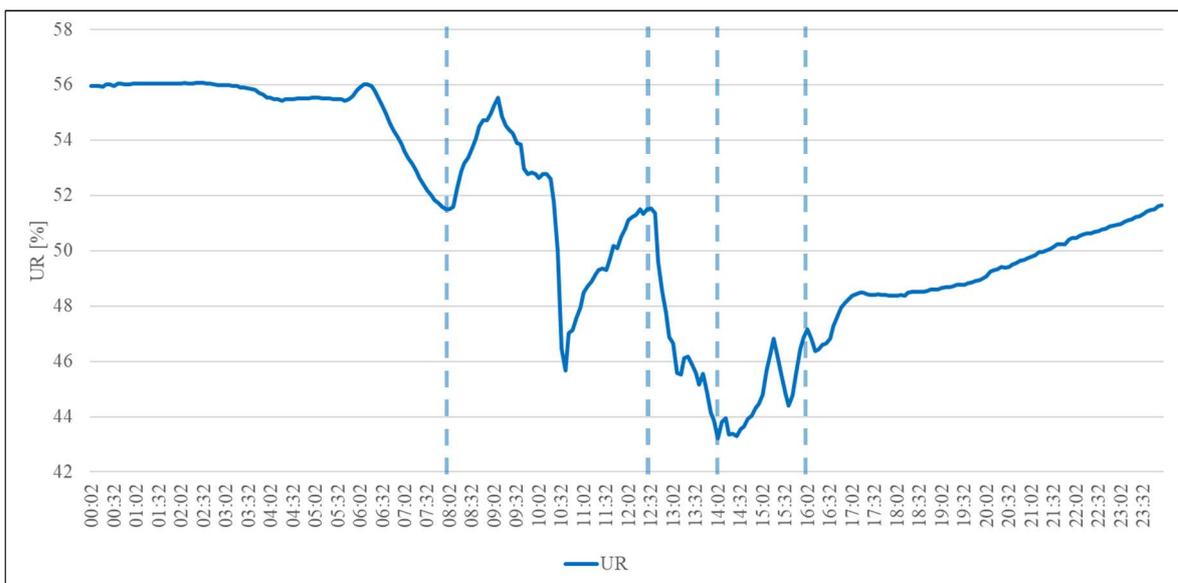
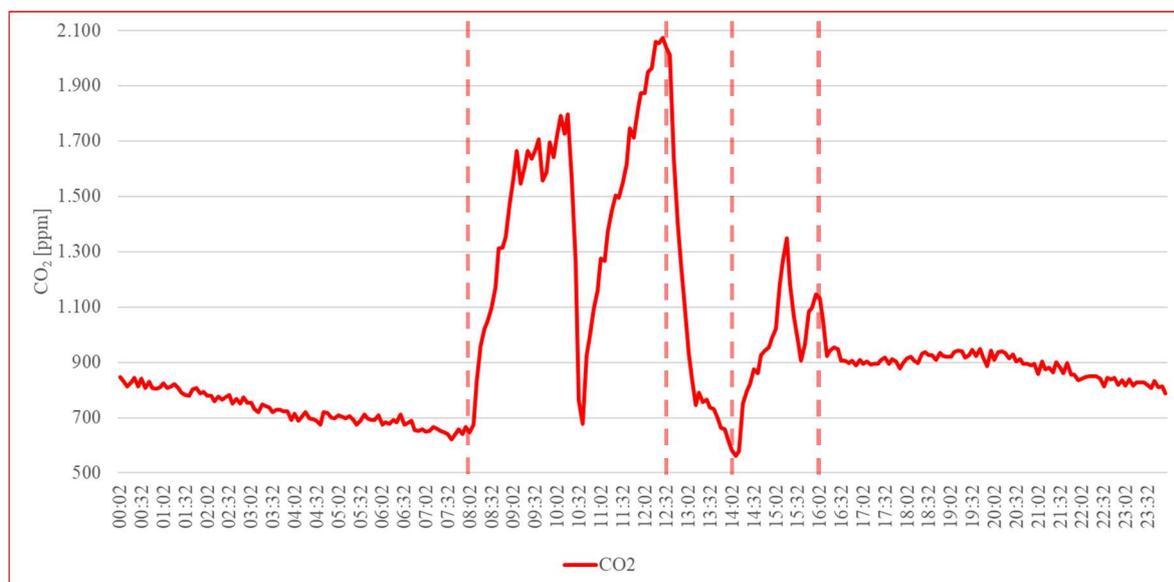


Grafico 3.30 – Andamento della CO₂ nell'Aula 2 (3°A) del 18 gennaio



3.6.2.4 Valutazioni sperimentali

I picchi presenti nei precedenti grafici si trovano tra le ore 8:00 e le ore 12:30 di ogni giorno ad eccezione della domenica (22 gennaio), mentre per l'aula mensa i picchi si trovano tra le ore 12:30 e le ore 14:00; tali picchi sono dovuti alla presenza degli studenti durante l'orario scolastico. La presenza di utenti all'interno di un ambiente confinato produce un aumento di CO₂, temperatura e umidità relativa.

Di seguito si riporta la tabella con i valori di temperatura, umidità relativa e CO₂, registrati nel periodo di monitoraggio, delle aule in esame; nel dettaglio si riportano i valori massimi e minimi dei parametri registrati ed il loro valore medio nel periodo dello svolgimento delle lezioni, ovvero tra le ore 8:00 e le ore 12:30 per tutte le aule ad eccezione della mensa, tra le ore 8:00 e le ore 12:30 e tra le ore 14:00 e le ore 16:00 per le Aule 2 (3°A) e 11 (1°A) e nel periodo di pausa pranzo per l'Aula 8-16 (Mensa), ovvero tra le ore 12:30 e le ore 14:00.

Tabella 3.17 – Valori di temperatura, umidità relativa e CO₂ nelle aule monitorate

Aula	Temperatura [°C]			Umidità relativa [%]			CO ₂ [ppm]		
	Max	Min	Media	Max	Min	Media	Max	Min	Media
Aula 1 (3°B)	22,78	10,64	19,55	66,67	45,46	56,05	4070,00	582,00	1790,72
Aula 2 (3°A)	22,61	13,09	20,44	56,08	40,80	49,94	2225,00	543,00	1340,60
Aula 3 (2°B)	23,42	12,56	21,09	60,01	39,18	50,14	3855,00	520,00	1799,63
Aula 4 (2°A)	23,93	13,45	21,31	56,96	40,80	49,24	3812,00	528,00	1813,25
Aula 5 (4°B)	21,94	12,94	20,20	57,52	45,70	51,86	3523,00	512,00	1584,76
Aula 6 (4°A)	21,72	11,90	19,54	63,33	40,80	52,05	1862,00	505,00	1233,14
Aula 8-16 (Mensa)	21,49	11,61	19,80	55,10	42,21	49,25	2254,00	418,00	1299,47
Aula 9 (1°B)	22,68	12,00	20,23	56,54	39,26	48,73	1929,00	402,00	1384,94
Aula 10 (5°B)	22,70	11,98	20,57	56,47	34,94	49,17	2293,00	432,00	1378,33
Aula 11 (1°A)	21,27	11,18	19,90	58,64	42,19	51,80	2449,00	489,00	1357,30
Aula 12 (5°A)	22,25	12,44	20,42	56,81	39,14	49,31	2060,00	515,00	1302,78
Aula 13 (Biblioteca)	22,25	12,44	20,34	57,79	44,21	49,20	3047,00	611,00	1240,62
Aula 14 (Laboratorio Ceramica)	23,38	12,77	22,14	54,05	40,87	44,70	1580,00	537,00	1026,83
Aula 15 (Aula Informatica)	22,56	12,82	20,50	53,08	43,14	47,93	1488,00	554,00	1019,22
Aula Sostegno	22,13	11,59	20,53	58,42	44,41	49,03	1765,00	529,00	1202,35

Osservando la Tabella 3.17 è possibile notare che, ad eccezione delle Aule 6 (4°A), 13 (Biblioteca), 14 (Laboratorio Ceramica), 15 (Aula Informatica) e Aula Sostegno, la concentrazione di media CO₂ supera durante l'orario scolastico il valore di riferimento di 1250 ppm dato dalla norma UNI EN 16798-1:2019.

Mentre in tutte le aule, ad eccezione dell'Aula 14 (Laboratorio Ceramica) nel giorno 17 gennaio, durante l'orario scolastico viene sempre superato il valore di riferimento di 1250 ppm dato dalla norma UNI EN 16798-1:2019.

I picchi dei valori registrati che si osservano nei grafici di tutte le aule sono dovuti alla presenza degli studenti. È possibile osservare nel dettaglio questo fenomeno nei Grafici 3.28, 3.29 e 3.30 dove si riportano i valori delle tre grandezze monitorate nell'Aula 2 (3°A), per un singolo giorno (18 gennaio); è stato scelto il giorno in cui si svolgono anche le lezioni pomeridiane nell'aula in esame.

Si osserva come all'interno del periodo frequentato dagli studenti, tra le linee tratteggiate, i valori delle tre grandezze monitorate aumentano, così come ci si può aspettare; invece, i picchi verso il basso della temperatura dell'aria interna, dell'umidità relativa e della CO₂ sono dovuti probabilmente all'apertura delle finestre; infatti si nota come questi abbassamenti dei valori si hanno in corrispondenza dello stesso orario.

I valori di temperatura dell'aria interna e di umidità relativa risultano idonei durante le ore frequentate dagli studenti, mentre in quasi tutte le ore la concentrazione di CO₂ supera il valore di riferimento associato ad una buona qualità dell'aria.

3.6.3 Prove fluidodinamiche

3.6.3.1 Misurazione portata unità VMC

3.6.3.1.1 Metodologia dei rilievi

La misurazione delle portate d'aria e delle velocità è stata effettuata mediante un balometro, sull'immissione sull'estrazione, alle tre impostazioni di velocità disponibili della macchina.

Dati monitoraggio:

- Data inizio prova: 16/01/2023
- Data fine prova: 16/01/2023
- Durata complessiva prova: 10 minuti

3.6.3.1.2 Geometria del locale

L'unità VMC scelta per le misure è posizionata nell'Aula 12 (5°A). La planimetria dell'aula è mostrata nella Figura 3.62, con le relative foto del rilievo (Figura 3.63).

- Denominazione aula: 12 (5°A)
- Tipologia aula: didattica
- N° studenti: 15 + 1 (docente)
- Superficie aula: 45,22 m²
- Altezza aula: 3,25 m
- Volume aula: 146,97 m³
- Parametri da misurare: portata d'aria sulla mandata e ripresa dell'unità VMC alle tre impostazioni di velocità
- Portata dichiarata da scheda tecnica: fino a 320 m³/h (impostazione alla velocità massima V3) e fino a 380 m³/h (modalità booster)
- Area lorda di immissione: 1125 cm²
- Area lorda di estrazione: 1125 cm²
- Portata secondo D.M. 18/12/1975: 367,41 m³/h
- Portata secondo UNI 10339: 366,28 m³/h

3.6.3.1.3 Valori di portata d'aria e velocità ottenuti

Nella Tabella 3.18 sono riportati i dati della portata d'aria, alle tre impostazioni di velocità della macchina disponibili; la portata è espressa in m³/h. Nel Grafico 3.31 sono riportate le portate d'aria misurate. Infine, nella Tabella 3.19 sono riportate le portate di immissione ed estrazione, la loro differenza per valutare se l'ambiente sia in pressione (valore positivo) o in depressione (valore negativo) e la variazione in percentuale tra le due.

Tabella 3.18 - Valori di portata ottenuti durante le misurazioni

Grandezza	Impostazione 1	Impostazione 2	Impostazione 3
Portata mandata [m ³ /h]	190	250	380
Portata ripresa [m ³ /h]	80	120	150

Grafico 3.31 - Andamento della portata alle tre impostazioni di velocità

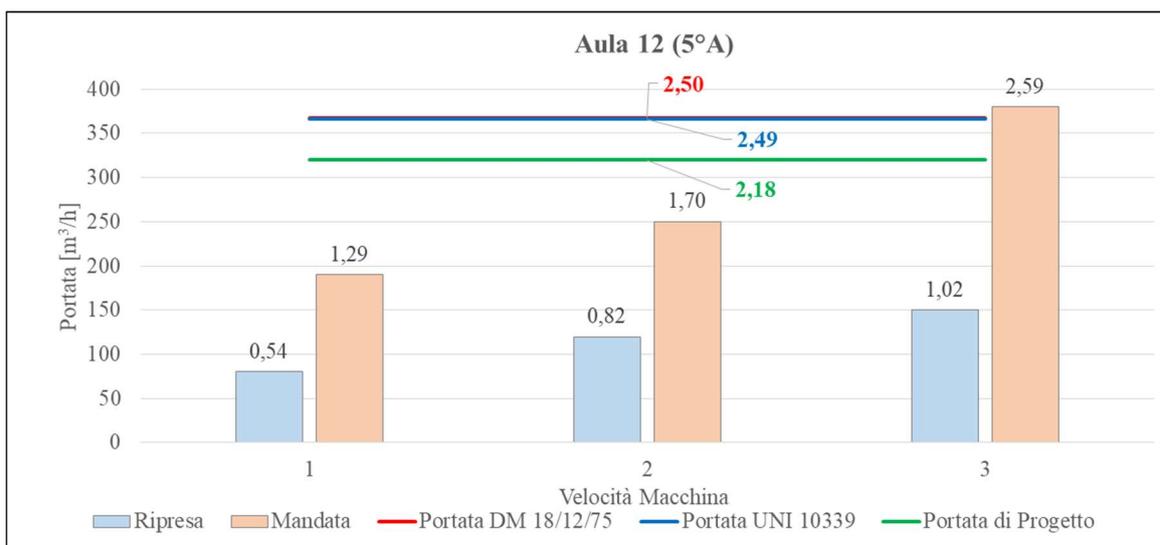


Tabella 3.19 – Portate di immissione ed estrazione con variazione percentuale tra le due

Grandezza	Impostazione 1	Impostazione 2	Impostazione 3
Portata di immissione [m ³ /h]	190	250	380
Portata di estrazione [m ³ /h]	80	120	150
Differenza tra portata media di immissione ed estrazione [m ³ /h]	110	130	230
Variazione percentuale tra immissione ed estrazione [%]	57,89	52,00	60,53

3.6.3.1.4 Valutazioni sperimentali

La portata massima misurata è pari a 380 m³/h all'impostazione di velocità 3 (Tabella 3.18). Solamente per l'impostazione di velocità 3 risulta rispettata la portata calcolata secondo il D.M. 18/12/1975, pari a 367,41 m³/h, e secondo la norma UNI 10339, pari a 366,28 m³/h. Le portate misurate raggiungono il valore dichiarato nella scheda tecnica alle condizioni di prova della macchina.

Infine, dalla Tabella 3.19, il sistema non risulta bilanciato, avendo una variazione percentuale tra il 52,00 % ed il 60,53% tra la portata immessa e quella estratta; quindi l'ambiente risulta in pressione per tutte e tre le velocità dell'unità.

3.6.3.2 Prove con generatore di fumo

3.6.3.2.1 Metodologia dei rilievi

Il conta-particelle è stato posizionato al centro dell'aula oggetto di misurazione (Figura 3.72 e 3.73), mentre il generatore di fumo è stato utilizzato vicino parete 1 ed all'unità di ventilazione, di fronte al conta-particelle. La posizione del generatore di fumo è stata scelta in modo tale che la maggior parte dei fumi venissero immediatamente aspirati dalla macchina così da renderli maggiormente visibili all'esterno per la valutazione sull'aria espulsa. Il conta-particelle è stato posizionato al centro dell'aula così da valutare il decadimento delle particelle all'interno dell'area maggiormente occupata durante l'orario scolastico.

Il monitoraggio tramite il conta-particelle è stato avviato prima dell'inizio della prova, così da valutare la condizione stazionaria dell'aula prima della generazione dei fumi. La macchina è stata impostata alla terza velocità per valutare l'influenza dell'aria espulsa sulla presa di aria esterna e il tempo di decadimento delle particelle alla massima velocità della macchina. Il conta-particelle è stato impostato per effettuare la misurazione su 1 litro di aria, tale quantità di aria viene prelevata dal conta-particelle in 21 secondi.

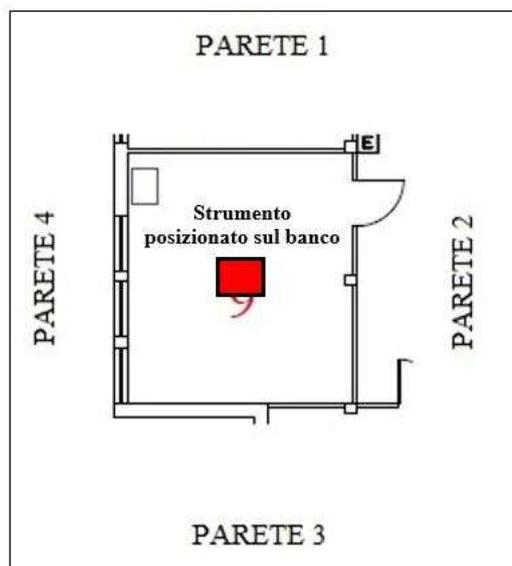


Figura 3.72 – Posizione conta-particelle

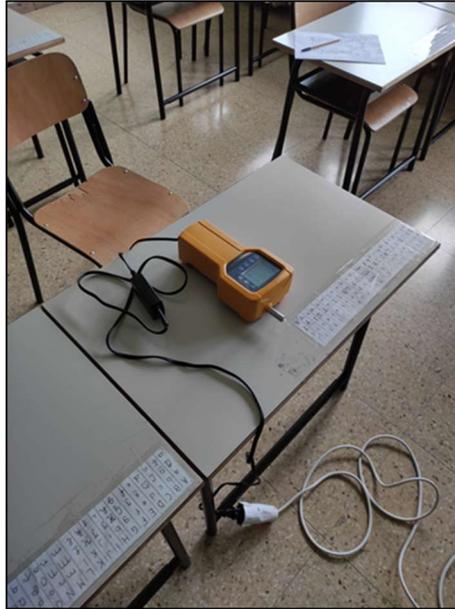


Figura 3.73 – Foto installazione conta-particelle

Dati monitoraggio:

- Data inizio prova: 16/01/2023
- Data fine prova: 16/01/2023
- Durata complessiva prova: 1 ora e 40 minuti
- Intervallo di acquisizione dei dati: 5 minuti + 21 secondi
- Volume di aria utilizzato per ogni misurazione: 1 litro
- Tempo di utilizzo del generatore di fumo: 1 minuto

3.6.3.2.2 Geometria del locale

L'aula scelta per le misure è la 9 (1°B). La planimetria dell'aula è mostrata nella Figura 3.56, con le relative foto del rilievo (Figura 3.57).

- Denominazione aula: 9 (1°B)
- Tipologia aula: didattica
- N° studenti: 16 + 1 (docente)
- Superficie aula: 37,91 m²
- Altezza aula: 3,30 m
- Volume aula: 125,09 m³
- Parametri da misurare: andamento dell'aria espulsa, tempo di decadimento delle particelle

3.6.3.2.3 Valori e andamento delle particelle ottenuti

Nel Grafico 3.32 è riportata la variazione nel tempo del numero di particelle misurate durante l'intero periodo di monitoraggio, mentre nella Tabella 3.20 sono riportati i valori massimi e minimi per ogni dimensione di particella misurata.

Grafico 3.32 - Andamento nel tempo del numero di particelle misurate per ogni dimensione considerata

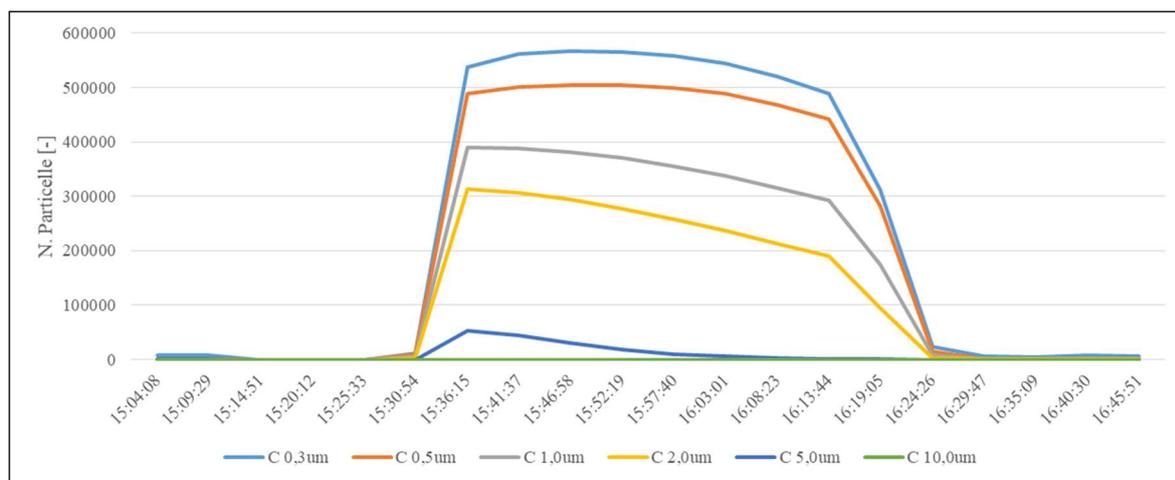


Tabella 3.20 - Valori massimi e minimi per ogni dimensione di particella considerata

	0,3 μm	0,5 μm	1,0 μm	2,0 μm	5,0 μm	10,0 μm
MAX	565853	504826	389057	313815	52761	12
MIN	4643	679	146	75	21	12

3.6.3.2.4 Valutazioni sperimentali

Dal Grafico 3.26 è possibile notare la condizione dell'aula prima dell'inizio della prova, poiché l'andamento delle varie dimensioni di particelle si mantiene costante nel tempo. Intorno alle ore 15:30 si può individuare l'accensione del generatore di fumo, poiché il numero di particelle per ogni dimensione aumenta molto velocemente. Raggiunto il picco massimo intorno alle 15:40, le particelle cominciano a diminuire lentamente nel tempo poiché il generatore di fumo è stato spento. Osservando il decadimento delle particelle nel tempo è possibile notare che alla fine della prova (dopo circa 45 minuti dall'accensione del generatore) la concentrazione delle particelle è diminuita di poco, avendo quindi una condizione lontana dalla condizione stazionaria che si aveva prima dell'inizio della prova. Ciò significa che il volume d'aria presente nell'aula è stato ricambiato in poca parte. Si può

quindi stimare un tempo di circa tre ore per ricambiare il volume d'aria dell'aula. L'unità VMC installata, alla terza impostazione di velocità, effettua un ricambio d'aria di circa 0,3 volumi ogni ora, risultando quindi inefficiente.

Per quanto riguarda la valutazione inerente all'influenza dell'aria espulsa sulla presa di aria esterna, durante l'accensione del generatore sono stati osservati i fumi in uscita dall'espulsione dell'unità VMC. Si è notato che una parte dei fumi espulsi è stata prelevata e immessa nuovamente nell'ambiente interno; tale fenomeno è dovuto alla vicinanza tra la presa dell'aria estratta e la presa dell'aria esterna, come è possibile notare dalla Figura 3.18. È importante comunque evidenziare che tale fenomeno è fortemente influenzato dalla presenza o meno del vento e dalla sua direzione.



Figura 3.74 - Posizione della presa dell'aria esterna (in alto) e della presa dell'aria estratta (in basso) dell'unità VMC

3.6.3.3 Blower Door Test

3.6.3.3.1 Metodologia dei rilievi

Nel vano porta è stata posizionata l'intelaiatura per prenderne la misura, successivamente si fissano le dimensioni delle barre verticali e orizzontali. Si estrae delicatamente dal vano l'intelaiatura e su di essa si pone il telo per rendere la porta stagna. È necessario evitare punti di infiltrazione, eventualmente introducendo negli angoli parti in plastica o del nastro adesivo. Viene inserita un'ulteriore barra orizzontale posta a metà altezza del telaio, tale barra è necessaria per fissare il ventilatore. Il ventilatore viene inserito all'interno del foro presente nel telo e fissato alla barra orizzontale precedentemente posizionata.

Sono presenti dei tubicini che devono essere collegati alla presa di pressione sul telo, sul ventilatore e al manometro. Dopo aver configurato il manometro e il software per la lettura dei dati è possibile iniziare la prova accendendo il ventilatore. Deve essere definita la direzione del flusso d'aria generato dal ventilatore in funzione della tipologia di prova che si vuole effettuare (pressione o depressione).



Figura 3.75 - Installazione del sistema per il blower door test

Dati monitoraggio:

- Data inizio prova: 16/01/2023
- Data fine prova: 16/01/2023
- Durata complessiva prova: 1 ora e 10 minuti
- Temperatura dell'aria interna: 21°C
- Umidità relativa interna: 45%
- Temperatura esterna: 8°C
- Umidità relativa esterna: 60%
- Velocità del vento: 0,35 m/s
- Pressione atmosferica: 1013 Pa

3.6.3.3.2 Geometria del locale

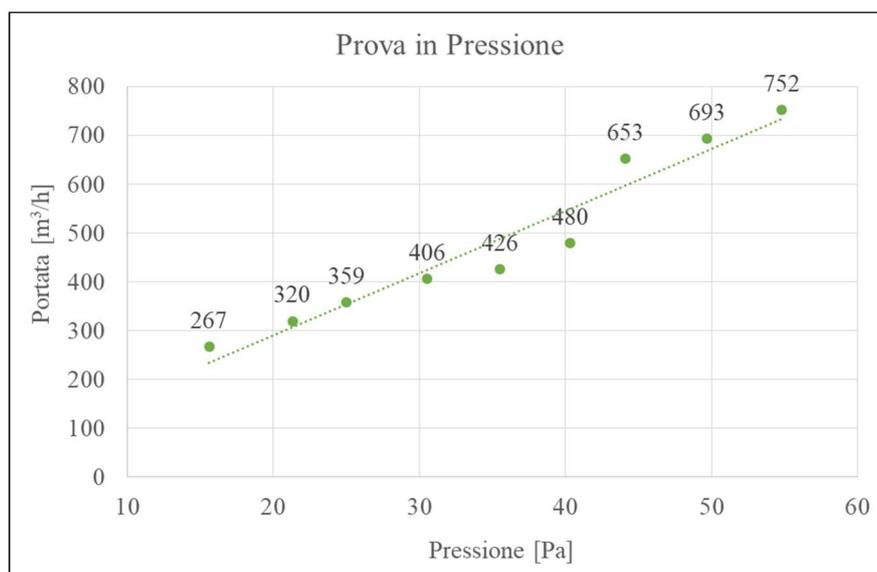
L'aula scelta per la prova è la 12 (5°A). La planimetria dell'aula è mostrata nella Figura 3.62, con le relative foto del rilievo (Figura 3.63).

- Denominazione aula: 12 (5°A)
- Tipologia aula: didattica
- N° studenti: 15 + 1 (docente)
- Superficie aula: 45,22 m²
- Altezza aula: 3,25 m
- Volume aula: 146,97 m³
- Parametri da misurare: n₅₀
- Profilo di occupazione dell'aula: assente
- Profilo di accensione dell'impianto di riscaldamento: 24 ore su 24
- Profilo di accensione dell'impianto di ventilazione: 24 ore su 24 all'impostazione di velocità 1
- Profilo di apertura delle finestre: assente

3.6.3.3.3 Risultati Blower Door Test

La prova è stata realizzata in pressione. Il massimo valore di pressione raggiunto durante la prova è pari a 54,80 Pa, con il relativo valore di portata pari a 752 m³/h. L'involucro dell'aula ha permesso di raggiungere il valore di 50 Pa richiesto. Il software utilizzato ha permesso di ricavare il valore della portata a 50 Pa, pari a 696,47 m³/h, e il relativo valore di n₅₀ pari a 4,74 l/h.

Grafico 3.33 - Retta costruita attraverso i valori di pressione e portata ricavati durante il blower door test



3.6.4 Prove acustiche

3.6.4.1 Geometria del locale

L'aula oggetto di rilevamento è l'Aula 4 (2°A). L'aula non è dotata di controsoffitto acustico fonoassorbente, sedie e tavoli sono in legno. A discapito delle riflessioni la superficie finestrata occupa 1/3 della superficie totale delle partizioni verticali. Le misure sono state effettuate con impianto di amplificazione spento e in assenza di persone. La planimetria dell'aula è mostrata di seguito.

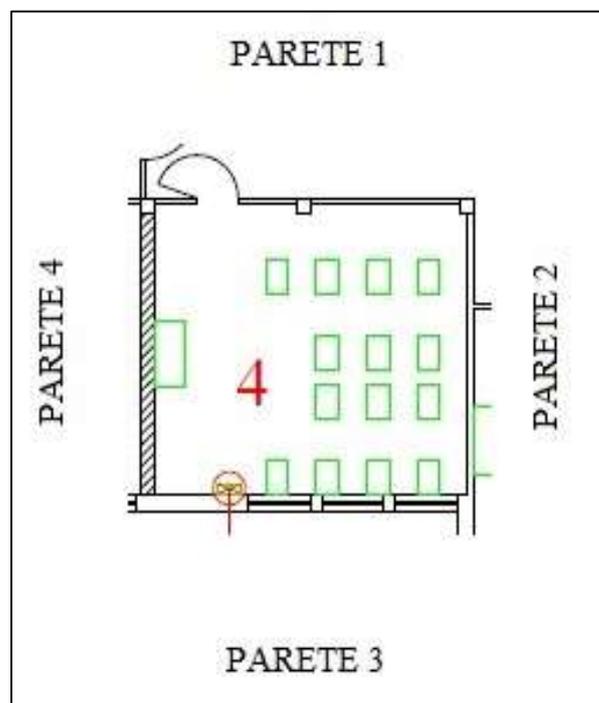


Figura 3.76 - Planimetria dell'Aula 4 (2°A) oggetto di misurazioni

- Denominazione aula: 4 (2°A)
- Tipologia aula: didattica
- N° studenti: 19 + 1 (docente)
- Superficie aula: 39,10 m²
- Altezza aula: 3,30 m
- Volume aula: 129,03 m³
- Parametri da misurare: Tempo di riverbero e Rumore degli impianti
- Misura in assenza di persone e con arredo

3.6.4.2 Report delle misure

Nella figura sottostante si identificano i punti di misura utilizzati nell'Aula 4 (2°A) in rispetto del prospetto 11 e 12 e della figura 3 della UNI 11532-2 per la valutazione dello T e Lic,int.

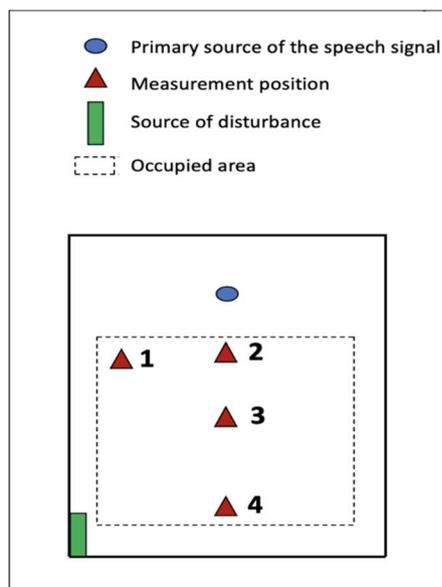


Figura 3.77 – Punti di misura utilizzati

Tempo di Riverberazione

I valori del tempo di riverbero medio (T_{mean}) per ogni frequenza, sono ottenuti mediando aritmeticamente i valori di T30 (s) rilevati nelle tre posizioni utente (P2, P3, P4), con due posizioni di sorgente (S1, S2) (vedi Tabella 3.10).

Tabella 3.21 - Tempo di riverbero T30 misurato in 3 posizioni utente e 2 posizioni di sorgente

T30 (s)	Frequenza (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
P3-S2	1.00	1.95	1.44	1.35	1.22	0.99
P2-S2	1.23	1.80	1.49	1.38	1.17	1.02
P4-S2	1.44	1.75	1.40	1.38	1.21	1.00
P3-S1	1.42	1.64	1.49	1.38	1.19	1.04
P2-S1	1.12	1.57	1.49	1.44	1.20	1.04
P4-S1	1.31	1.77	1.58	1.41	1.17	1.00
T_{mean}	1.25	1.75	1.48	1.39	1.19	1.02

Le misure sono effettuate in ambiente arredato e non occupato, per cui il T_{mean} , per essere confrontato con i valori limite imposti dalla norma, deve essere corretto in funzione del valore della superficie aggiuntiva equivalente di assorbimento acustico delle persone ΔA_{pers} indicato nel Prospetto C1 e in funzione al volume del locale. Identificando l'attività "Persona seduta su sedia non imbottita" e moltiplicando i valori di ogni frequenza per il numero di occupanti (20 persone), si ottiene ΔA_{pers} totale.

Tabella 3.22 - Calcolo del valore della superficie aggiuntiva equivalente di assorbimento acustico delle persone totale

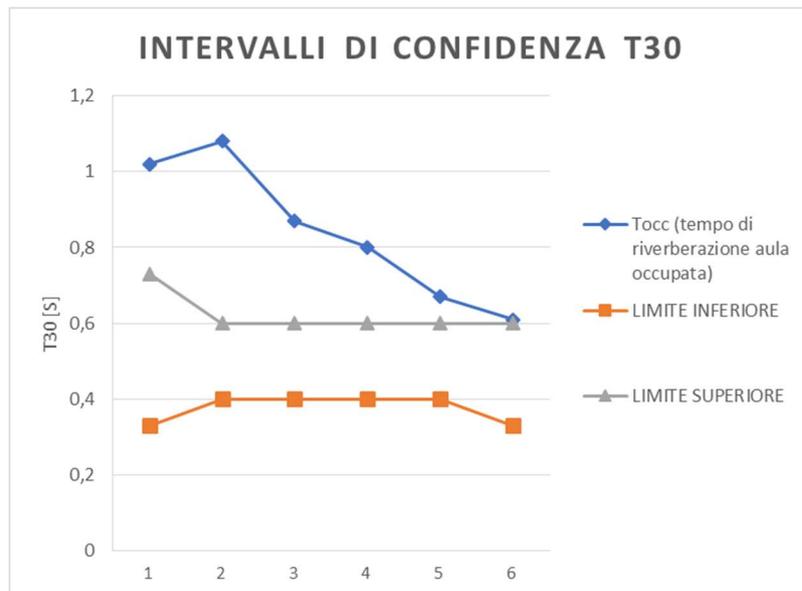
Descrizione	Frequenza (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
2 Persona seduta su sedia non imbottita	0.15	0.30	0.40	0.45	0.55	0.55
ΔA (80% occupato + arredamento)	3.60	7.20	9.60	10.80	13.20	13.20

Applicando la formula 3 della UNI 11532-2, il T_{mean} viene corretto e può essere confrontato con i limiti di riferimento ottenuti attraverso il calcolo del tempo di riverbero ottimale (T_{ott}) secondo il Prospetto 6 della UNI 11532-2 per la Categoria A3.

Tabella 3.23 – Verifica del tempo di riverbero

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Limite Superiore	0.73	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
Limite Inferiore	0.33	0.40	0.40	0.40	0.40	0.33
$T_{\text{mean,c}}$ (s)	1.02	1.08	0.87	0.80	0.67	0.61
Verifica?	No	No	No	No	No	No

Grafico 3.34 – Verifica del tempo di riverbero



Il tempo di riverbero non è verificato.

Impianti tecnici

Il livello di rumore degli impianti in ambiente è espresso tramite il descrittore $L_{ic,int}$, ottenuto dalla media aritmetica dei valori di $L_{pu,c}$ nelle posizioni utente e corretto con l'incertezza estesa dell'84% pari a 1.2 dB(A). I valori di $L_{pu,c}$ sono ottenuti per ogni posizione utente applicando la seguente formula:

$$L_{pu,c} = Leq(A) - K1 + K2 \quad (3.1)$$

Dove:

$Leq(A)$ = livello equivalente ponderato A ottenuto come media energetica dei $Leq(A)$ alle varie frequenze, per ogni posizione utente.

$K1$ = termine di correzione per il tempo residuo.

$K2$ = termine di normalizzazione rispetto al tempo di riverberazione pari a $-10\log(T/T_0)$, con T che identifica la media aritmetica dei tempi di riverberazione nelle bande di terzi d'ottava e T_0 che identifica il tempo di riverberazione di riferimento variabile in funzione del volume.

Tabella 3.24 - Calcolo del termine di normalizzazione rispetto al tempo di riverberazione

Tempi di riverbero	
<i>f</i> [Hz]	<i>T</i> _{mean} [s]
125	1.33
250	1.75
500	1.48
1000	1.43
2000	1.20
4000	1.02
mean	1.37
T0	0.56
K2	-4.46

Tabella 3.25 - Misura del livello di pressione sonora residuo

RESIDUO				
<i>f</i> [Hz]	<i>P1</i> <i>Leq</i> [dBA]	<i>P2</i> <i>Leq</i> [dBA]	<i>P3</i> <i>Leq</i> [dBA]	<i>P4</i> <i>Leq</i> [dBA]
125	40.2	40.4	42.9	49.1
250	38.3	37.86	37.8	49
500	29.2	34.03	34.3	44.6
1000	25.0	33.89	27.5	34.9
2000	21.3	30.33	23.4	29
4000	20.0	31.8	21	26.4
Leq(A)	42.7	43.9	44.6	52.8

Tabella 3.26 - Risultati delle misurazioni per la determinazione del livello di rumore degli impianti

RUMORE IMPIANTO CONTINUO: Velocità 1				
<i>f</i> [Hz]	<i>P1</i> <i>Leq</i> [dBA]	<i>P2</i> <i>Leq</i> [dBA]	<i>P3</i> <i>Leq</i> [dBA]	<i>P4</i> <i>Leq</i> [dBA]
125	56.2	52.2	57.4	51.7
250	49.2	50	48.2	46
500	49.3	48.1	47.6	46.4
1000	45.6	48.5	44.5	43.3
2000	40.5	40.6	39.6	36
4000	30.1	20.2	29.6	28
Leq(A)	58.0	56.2	58.5	54.1
L_{pu,c}	50.6	51.3	49.6	47.6
L_{p,int}	50.0			
Valori limite UNI 11532-2	Aula < 250m³	< = 34 dB	VERIFICA?	NO

RUMORE IMPIANTO CONTINUO: Velocità 2				
	P1	P2	P3	P4
f [Hz]	Leq [dBA]	Leq [dBA]	Leq [dBA]	Leq [dBA]
125	51.4	41.8	36.6	38.1
250	46.3	44.1	43	43.4
500	50.6	46.6	46.3	47.4
1000	49.7	45.4	45	46.5
2000	45.8	41.2	41	42
4000	33.7	28.6	28.3	29.2
LAeq	56.3	51.3	50.5	51.6
Lpu,c	53.2	49	48.6	49.8
Lp,int	50.6			
Valori limite UNI 11532-2	Aula < 250m³	<= 34 dB	VERIFICA?	NO

RUMORE IMPIANTO CONTINUO: Velocità 3				
	P1	P2	P3	P4
f [Hz]	Leq [dBA]	Leq [dBA]	Leq [dBA]	Leq [dBA]
125	38	40.2	38.3	39.2
250	50	52.3	51.5	48.8
500	54.3	54.7	54.7	53.2
1000	53.4	54	54.2	53.8
2000	50.2	50.8	51	50.6
4000	40.6	41.2	41.3	40.9
LAeq	58.5	59.3	59.3	58.2
Lpu,c	57.1	57.7	57.8	57.2
Lp,int	57.5			
Valori limite UNI 11532-2	Aula < 250m³	<= 34 dB	VERIFICA?	NO

Il livello di rumore degli impianti non è verificato.

4 Analisi fluidodinamica computazionale dell'aula

4.1 Premessa

Dopo aver analizzato le prestazioni delle unità VMC installate nelle due scuole in esame mediante delle misurazioni sperimentali, si passa all'analisi fluidodinamica computazionale, tramite l'ausilio di un software, dell'unità di ventilazione meccanica controllata installata nell'aula 3°B della scuola secondaria di I grado G. Ferraris.

Si precisa che le simulazioni non hanno lo scopo di ricreare le condizioni reali nell'aula, ovvero quelle analizzate tramite le analisi sperimentali, in quanto le variabili in gioco da controllare sono notevoli, ma di esaminare, in seguito a delle approssimazioni sul modello, l'andamento ed i valori che i parametri fondamentali assumono all'interno del volume dell'aula, così da poter ricavare la migliore configurazione dell'unità di ventilazione installata.

Nello specifico vengono monitorati i valori che le varie grandezze di interesse, come temperatura, andamento e velocità dei flussi d'aria, assumono nell'aula o, meglio, in un volume di controllo scelto appositamente per definire lo spazio occupato dagli studenti.

Vengono quindi prima effettuate delle simulazioni dell'unità VMC installata e poi delle simulazioni variando l'inclinazione delle alette della bocchetta di immissione dell'aria; i risultati ottenuti saranno successivamente analizzati e confrontati, così da poter dedurre quale sia la configurazione migliore in termini di comfort termico e di qualità dell'aria.

Le analisi mediante un software CFD richiedono dei passaggi, legati in maniera gerarchica, che includono la definizione della geometria del modello, la definizione delle condizioni al contorno, la creazione della mesh, l'impostazione del setup della simulazione, che consente di definire le caratteristiche del fluido e del modello, l'avvio della simulazione dove il software calcola e risolve iterativamente le equazioni di governo ed, infine, la visualizzazione dei risultati sia dal punto di vista numerico che grafico, grazie all'interfaccia del software.

Il software utilizzato per le simulazioni CFD è ANSYS 2019 R2. Tutte le simulazioni sono state create con l'utilizzo del tool Ansys Workbench; all'apertura del software si sceglie Fluid Flow (Fluent) che permette di effettuare delle analisi del flusso di fluidi mediante il risolutore Fluent.

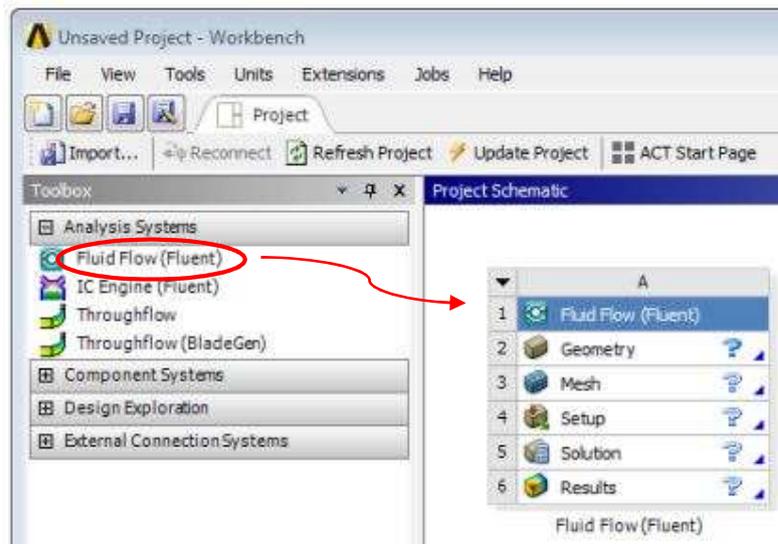


Figura 4.1 – Schermata iniziale del software

La modellazione della geometria viene effettuata con ANSYS DesignModeler.

La mesh viene creata con l'ausilio di ANSYS Meshing.

Per impostare il setup delle simulazioni e, quindi, avviare il calcolo si utilizza il risolutore ANSYS Fluent (che è già stato scelto inizialmente).

Infine, per poter visualizzare i risultati delle simulazioni in forma grafica, viene utilizzato il tool ANSYS Results.

4.2 Modellazione geometrica

4.2.1 Descrizione dell'aula e dell'unità VMC

Il primo passo da eseguire per svolgere una simulazione CFD dunque è la creazione della geometria, ricreando il caso reale nel software.

Il caso in esame riprende una delle aule monitorate della scuola secondaria di I grado G. Ferraris nel comune di Falconara Marittima; nello specifico l'aula è la 3°B. Di seguito si riportano le caratteristiche planimetriche dell'aula (Figura 4.2) e le foto delle quattro pareti (Figura 4.3).

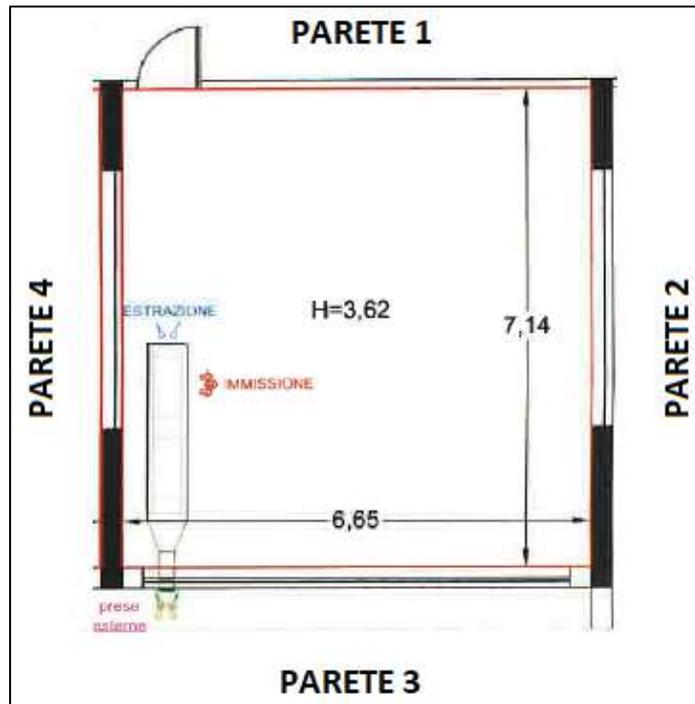


Figura 4.2 – Planimetria dell’aula 3°B oggetto di simulazioni

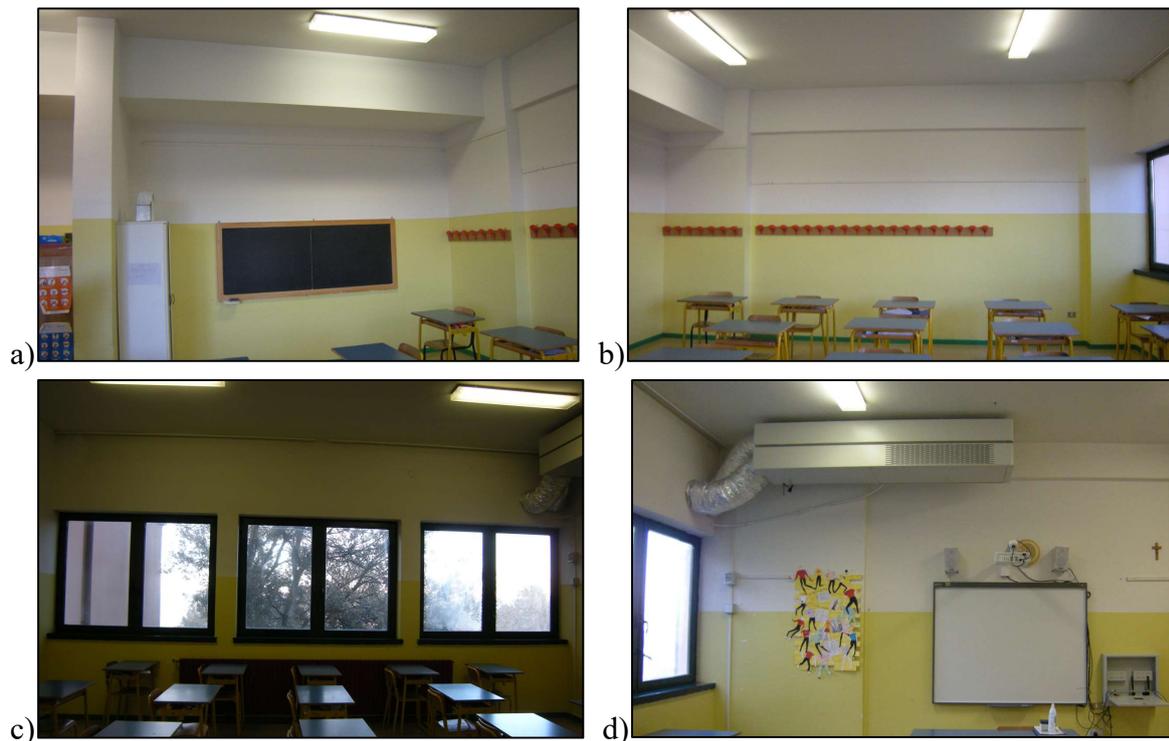


Figura 4.3 – Foto parete 1 (a), parete 2 (b), parete 3 (c), parete 4 (d)

Mentre l’unità VMC installata, modello SCOLARIA 800, presenta le seguenti dimensioni (le seguenti immagini sono riprese dalla scheda tecnica del produttore):

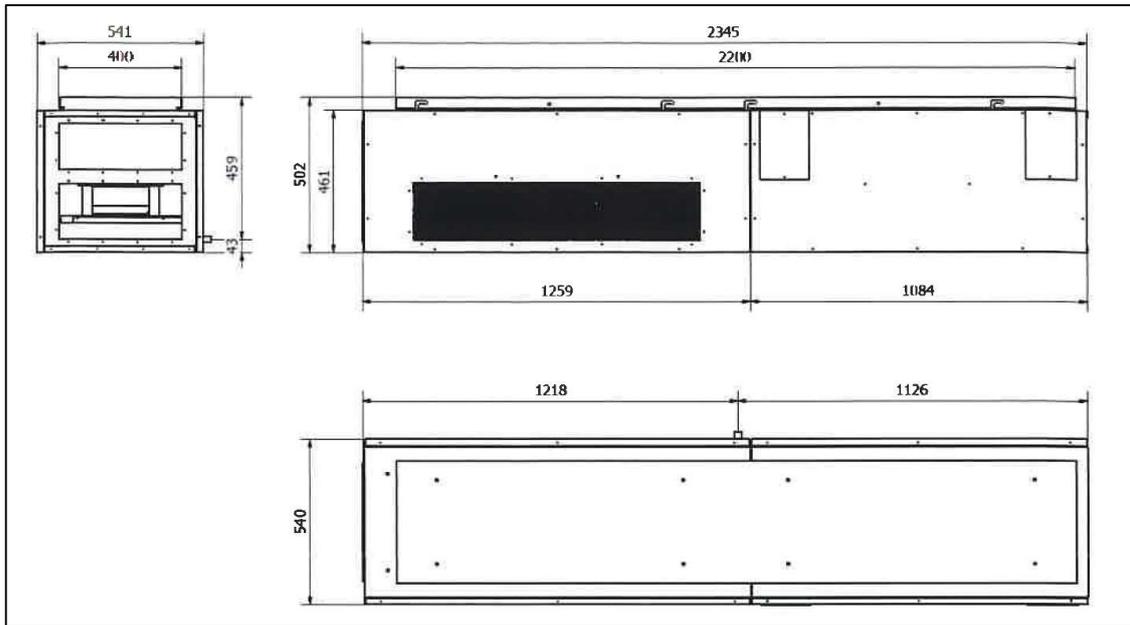


Figura 4.4 – Dimensioni unità VMC SCOLARIA 800

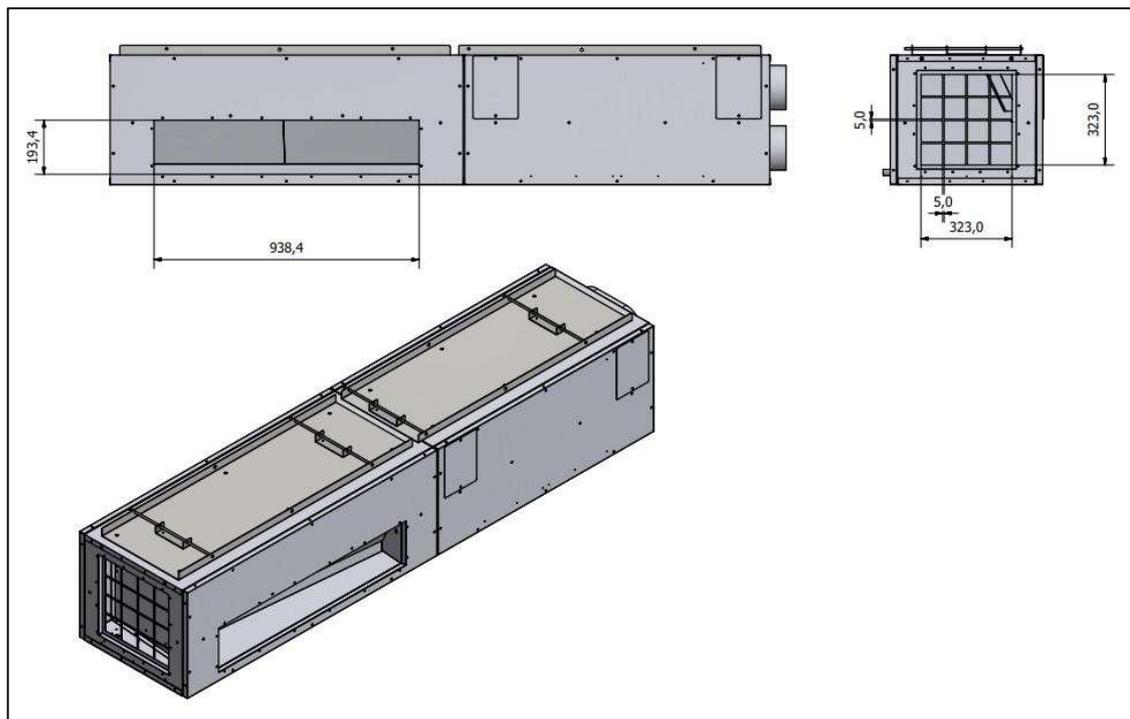


Figura 4.5 – Dimensioni aperture di immissione ed estrazione unità VMC SCOLARIA 800

4.2.2 Modellazione in ANSYS DesignModeler

Per la modellazione in ANSYS DesignModeler si semplifica la geometria dell'aula non considerando le rientranze che si trovano nella parete 1 (Figura 4.3 a).
La geometria con la quale si effettueranno le simulazioni è la seguente.

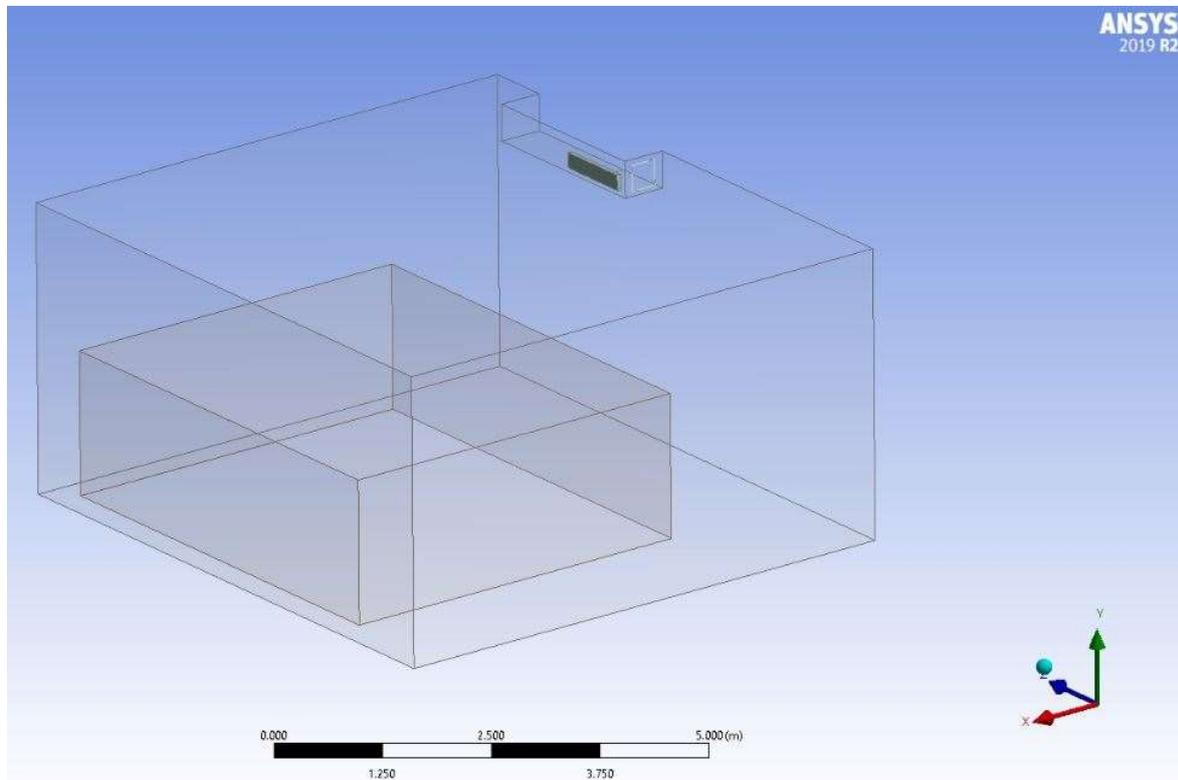


Figura 4.6 – Geometria dell'aula 3°B – ANSYS DesignModeler

Nella geometria ottenuta si possono individuare tre elementi:

- Aula: è la geometria più grande che rappresenta, appunto, il volume dell'aula. Di seguito viene evidenziato (Figura 4.5) e ne vengono mostrate le caratteristiche (Figura 4.6).

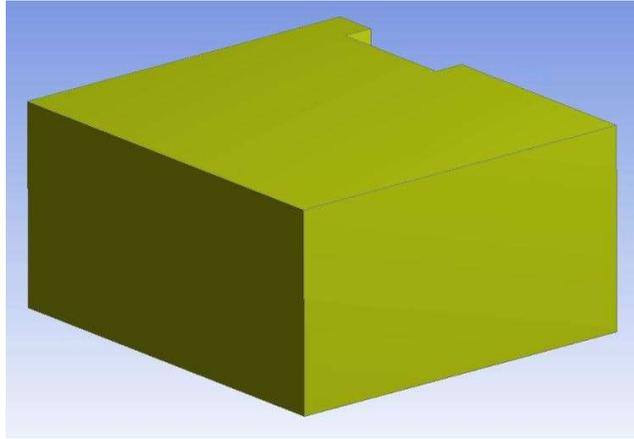


Figura 4.7 – Volume Aula – ANSYS DesignModeler

Details View	
Details of Body	
Body	Aula
Volume	128.37 m ³
Surface Area	230.58 m ²
Faces	17
Edges	44
Vertices	32
Fluid/Solid	Fluid
Shared Topology Method	Automatic
Geometry Type	DesignModeler
Dependencies	
Child 1	Studenti

Figura 4.8 - Caratteristiche volume Aula – ANSYS DesignModeler

- **Studenti:** è il volume che si trova internamente al volume dell'aula; rappresenta il volume di controllo degli studenti, il quale permette di valutare i valori delle varie grandezze da monitorare nello spazio occupato dagli studenti nell'aula. Il suo perimetro dista 0,5 m dalle pareti 2 e 3, ha il lato parallelo alla parete 2 di lunghezza pari a 5,3 m, il lato parallelo alla parete 3 di lunghezza pari a 4.5 m ed un'altezza di 1,8 m.

Il volume studenti è stato modellato con l'operazione *Slice Material*, grazie alla quale il volume di fluido interno ed esterno a tale elemento viene visualizzato come un materiale continuo; non crea quindi delle pareti solide di separazione. Di seguito viene evidenziato (Figura 4.7) e ne vengono mostrate le caratteristiche (Figura 4.8).

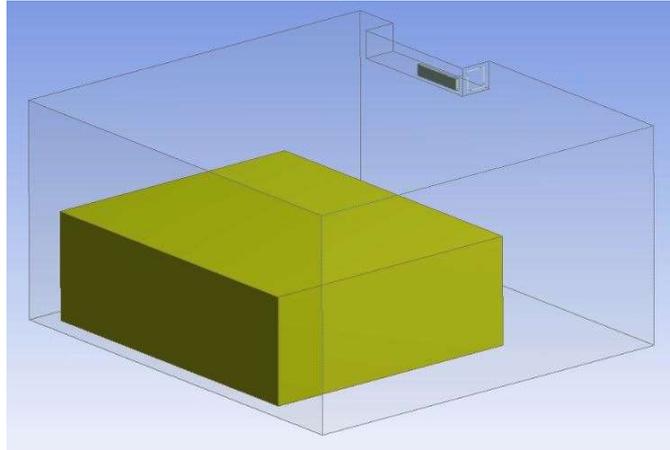


Figura 4.9 - Volume Studenti – ANSYS DesignModeler

Details View	
- Details of Body	
Body	Studenti
Volume	42.93 m ³
Surface Area	82.98 m ²
Faces	6
Edges	12
Vertices	8
Fluid/Solid	Fluid
Shared Topology Method	Automatic
Geometry Type	DesignModeler
- Dependencies	
Parent	Aula

Figura 4.10 - Caratteristiche volume Studenti – ANSYS DesignModeler

- Plenum VMC: è il volume che rappresenta il plenum dell'unità di ventilazione meccanica. Ovviamente, come si può notare dalla Figura 4.9 non è modellato con le effettive dimensioni in quanto non risulta necessario; è però necessario inserirlo nella geometria per la sua utilità nelle simulazioni di analisi delle particelle di CO₂. Di seguito viene evidenziato (Figura 4.9) e ne vengono mostrate le caratteristiche (Figura 4.10).

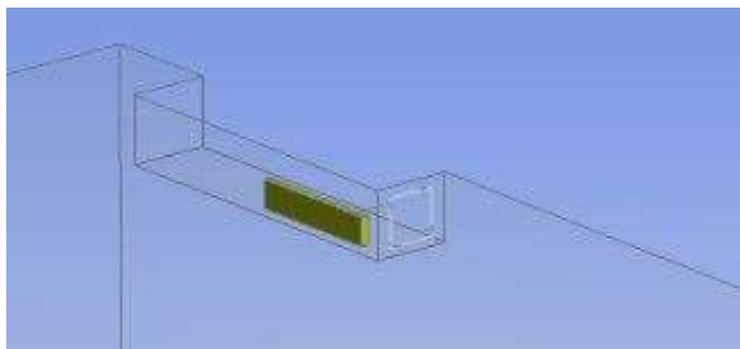


Figura 4.11 – Volume Plenum VMC – ANSYS DesignModeler

Details View	
Details of Body	
Body	Plenum_vmc
Volume	0.0090743 m ³
Surface Area	0.47615 m ²
Faces	6
Edges	12
Vertices	8
Fluid/Solid	Fluid
Shared Topology Method	Automatic
Geometry Type	DesignModeler

Figura 4.12 – Caratteristiche volume Plenum VMC – ANSYS DesignModeler

Una volta modellata la geometria sono state definite le due superfici che rappresentano rispettivamente la bocchetta di immissione e di estrazione dell'unità VMC. Per semplicità non sono state modellate le griglie che ricoprono le bocchette di ventilazione, anche se il dispositivo di ventilazione installato nell'aula ne è dotato.

La superficie di immissione (I, dalla Figura 4.10) ha le due dimensioni di 0,1934 m e 0,9384 m, come da scheda tecnica del produttore, con un'area di 0,181 m².

La superficie di estrazione (E, dalla Figura 4.10) ha le due dimensioni di 0,323 m e 0,323 m, come da scheda tecnica del produttore, con un'area di 0,104 m².

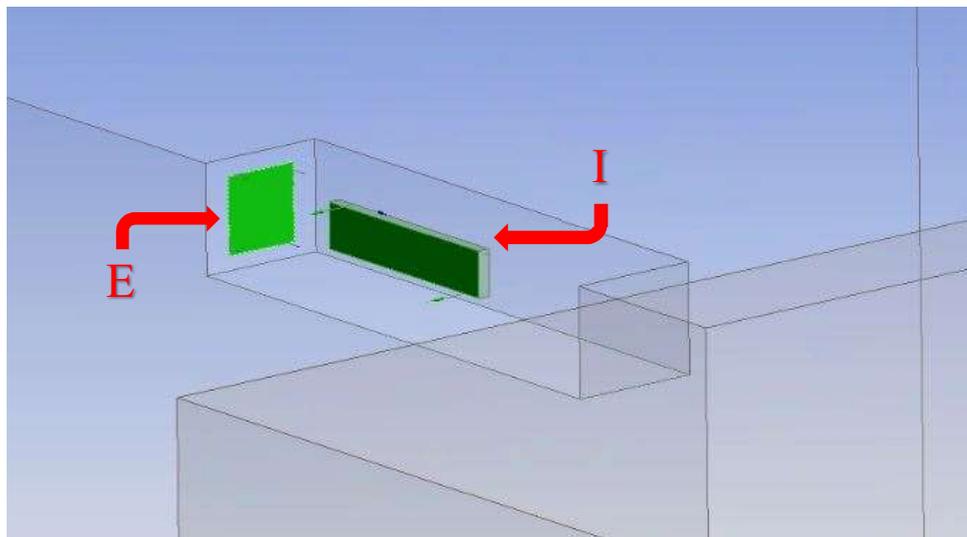


Figura 4.13 – Superfici di immissione ed estrazione – ANSYS DesignModeler

4.3 Studio della convergenza della griglia

Prima di procedere con l'indagine relativa all'impianto di ventilazione dell'aula scolastica, come per ogni studio fluidodinamico computazionale da svolgere, bisogna effettuare lo studio dell'influenza della griglia di calcolo scelta sulla veridicità dei risultati numerici che si ottengono.

L'obiettivo di tale indagine consiste nel determinare la griglia di calcolo ottimale in grado di garantire il miglior compromesso tra onere computazione richiesto e accuratezza dei risultati.

L'indagine è stata condotta generando dieci griglie di calcolo, via via sempre più fitte, confrontando i risultati ottenuti per poi scegliere la mesh ritenuta migliore.

4.3.1 Generazione delle mesh

Nella generazione di una griglia di calcolo è di fondamentale importanza adottare i controlli, per la definizione della stessa, che più si addicono al problema in questione e che meglio discretizzano il volume trattato. Nel caso in esame è stato ritenuto di maggiore importanza adottare una mesh più fine, e quindi con elementi di dimensione minore, in corrispondenza delle superfici che delimitano il volume di calcolo; tale controllo è utile per rappresentare al meglio lo strato limite del flusso di fluido che si ha in vicinanza delle superfici. Mentre per il volume interno gli elementi della mesh possono essere di dimensioni maggiori.

Nel caso in esame sono stati adottati due controlli: il *Method* ed il *Face Sizing*.

Col controllo *Method* si è scelto di generare una mesh tetraedrica, la quale si adatta bene alla geometria.

Col controllo *Face Sizing*, selezionando tutte le superfici che delimitano il volume, è stata impostata una dimensione delle celle delle superfici stesse inferiore a quella delle celle interne.

Infine il *Growth Rate*, che definisce il tasso di crescita delle celle è stato impostato ad 1,1.

Nella seguente tabella vengono mostrate le caratteristiche delle dieci mesh create; vengono indicati il numero degli elementi della griglia, la dimensione minima, che corrisponde alla dimensione adottata per le superfici esterne mediante il *Face Sizing* e la dimensione massima, cioè quella impostata per le celle interne.

Tabella 4.1 – Caratteristiche delle mesh create

Mesh	n° di elementi	Dim. minima	Dim. massima
		[m]	[m]
A	675.238	0,10	0,15
B	1.667.606	0,08	0,10
C	2.332.332	0,07	0,09
D	3.405.902	0,06	0,08
E	5.213.147	0,05	0,07
F	8.613.876	0,04	0,06
G	12.287.858	0,03	0,06
H	15.849.602	0,03	0,05
I	22.644.742	0,02	0,07
L	27.275.277	0,02	0,05

4.3.2 Setup di simulazione

Per effettuare le simulazioni è stato utilizzato un cluster, reso disponibile dal DIISM, col quale è stato possibile impiegare 16 processori in parallelo, così da velocizzare i tempi computazionali. Successivamente si espone il settaggio delle impostazioni per le simulazioni in Fluent.

Per prima cosa è stato impostato il setup del risolutore o *Solver* come indicato dalla seguente immagine.

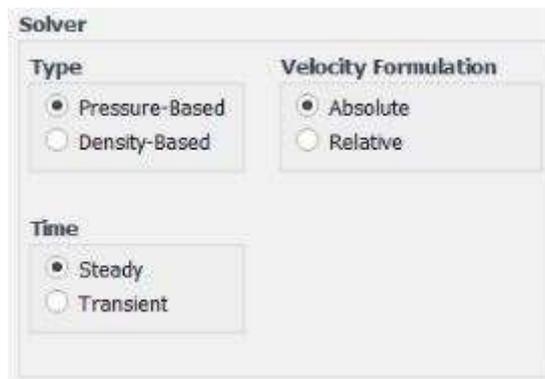


Figura 4.14 – Setup del Solver

È stato impostato un risolutore *Pressure-Based*, più indicato per le simulazioni da effettuare e si considera il fenomeno come stazionario o *Steady*, con il quale è possibile analizzare le condizioni nell'aula a regime.

Si passa poi all'impostazione delle caratteristiche del modello. In questa fase è stata abilitata l'equazione dell'energia, con la quale si tiene conto degli scambi termici nel volume di calcolo. È stato poi adottato il modello di turbolenza *k-epsilon Standard* per modellare gli

effetti della turbolenza sulla fluidodinamica del problema; è stata poi settata l'impostazione *Enhanced Wall Treatment* per il *Near-Wall Treatment*, cioè per il trattamento del flusso in vicinanza delle pareti. Questa impostazione è adatta alla risoluzione dello strato limite per il modello di turbolenza *k-epsilon*, indipendentemente dal valore del fattore y^+ , come suggerito da ANSYS Fluent Tutorial Guide [56].

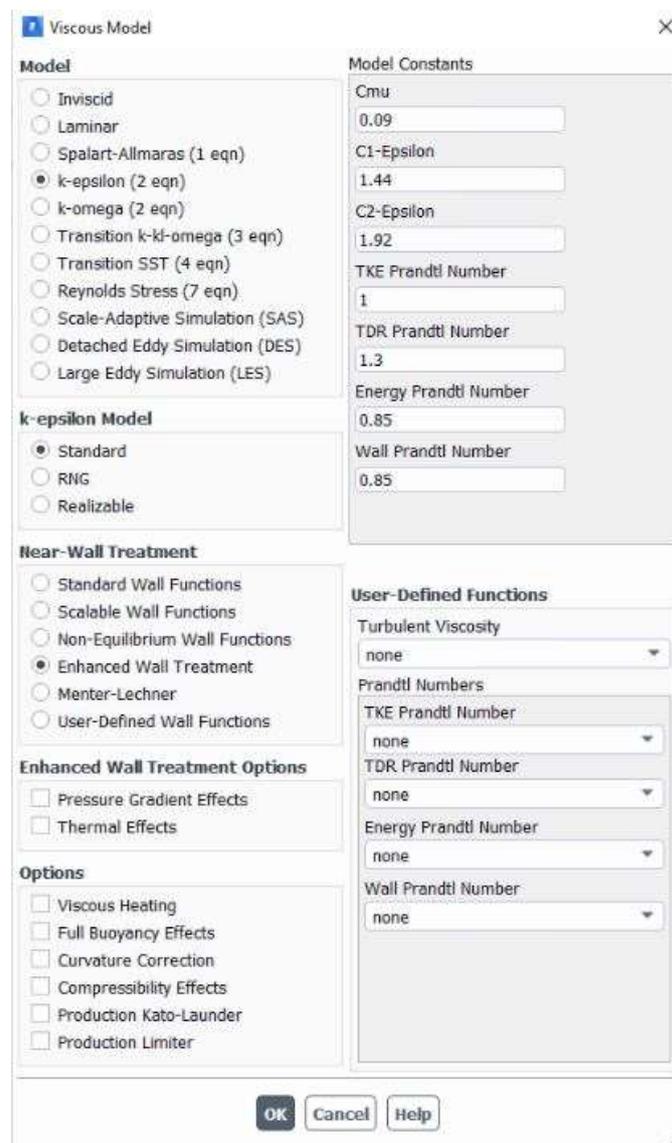


Figura 4.15 – Setup del modello viscoso

Successivamente si procede con la definizione dei materiali da assegnare al dominio e delle loro caratteristiche. Per il materiale fluido nel volume dell'aula è stata scelta l'aria, mantenendo costanti, in via approssimativa, tutte le sue proprietà.

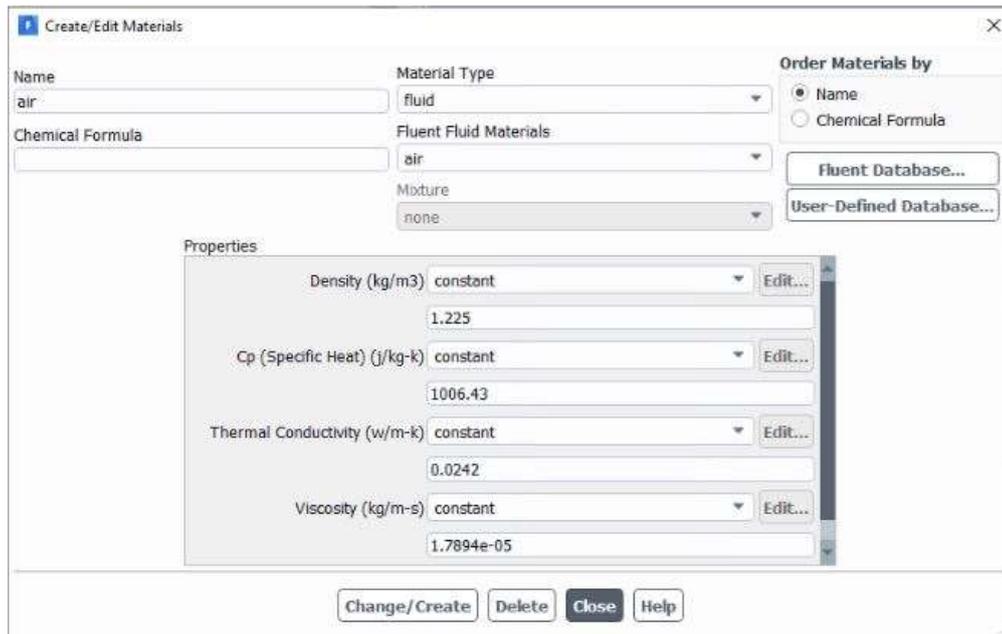


Figura 4.16 – Proprietà dell'aria

Per il materiale solido delle superfici che delimitano il volume sono stati scelti il gesso, per le superfici dell'aula, e l'alluminio, per le superfici della macchina VMC.

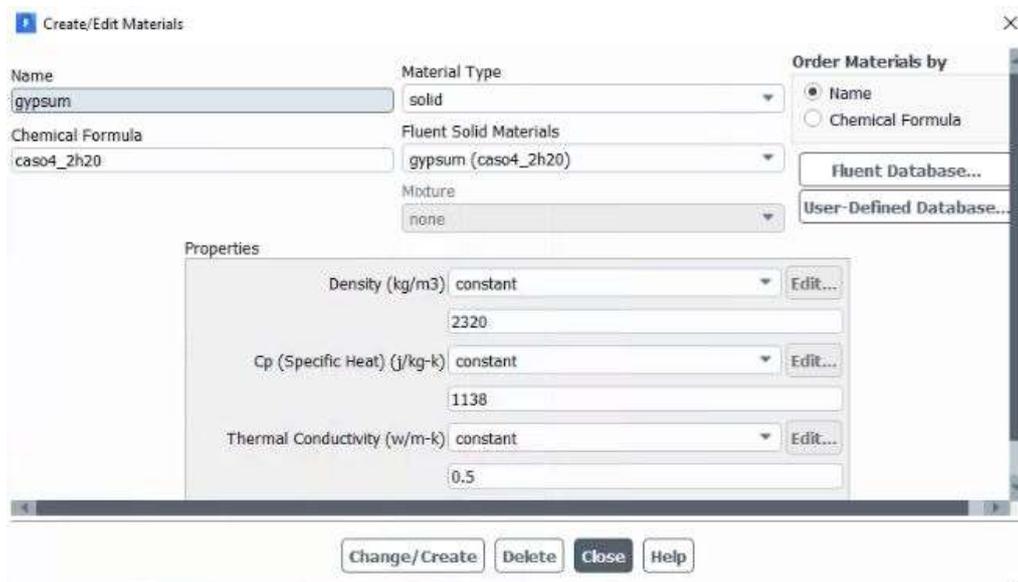


Figura 4.17 – Proprietà del gesso

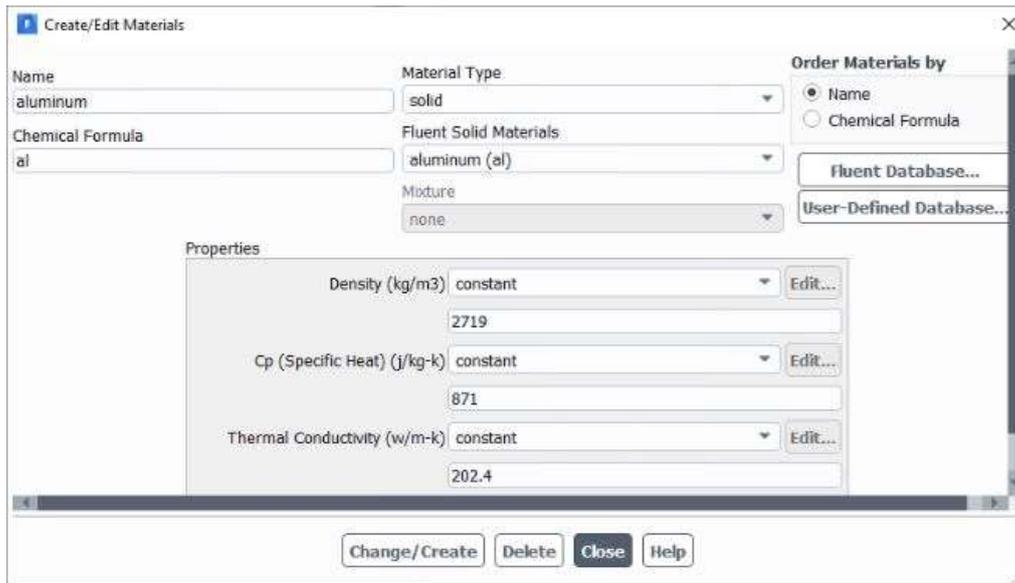


Figura 4.18 – Proprietà dell'alluminio

In seguito sono stati impostati i parametri delle condizioni operative del modello, dalla finestra di dialogo *Operating Conditions*.

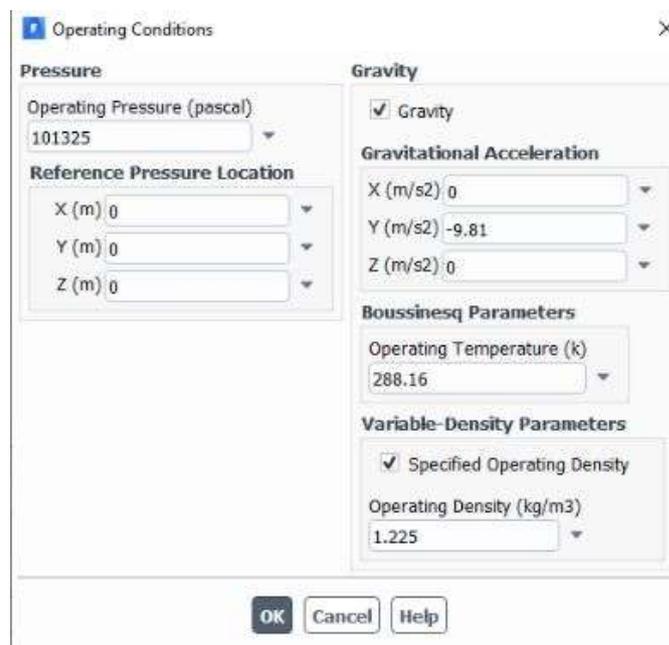


Figura 4.19 – Condizioni operative

Nel dettaglio è stata impostata una pressione operativa pari a 101325 Pa, un'accelerazione gravitazionale di $9,81 \text{ m/s}^2$ nella direzione negativa dell'asse Y, una temperatura operativa di 288,16 K (di default) e una densità operativa specifica di $1,225 \text{ kg/m}^3$, per i parametri del

modello Buossinesq, attivatosi dal momento in cui si inserisce l'equazione dell'energia e la gravità nel modello.

Considerare una densità dell'aria costante, per questo caso da analizzare, risulta essere un'approssimazione al limite dell'applicabilità in quanto il suo valore è influenzato dalla temperatura; si specifica però che, ai fini dello studio dell'indipendenza dei risultati dalla mesh, si analizza la loro convergenza all'infittirsi della griglia di calcolo e che una valutazione approfondita delle prestazioni dell'impianto di ventilazione verrà fatta successivamente, modificando alcune proprietà in modo tale da avvicinarsi al comportamento reale.

Successivamente sono state settate le condizioni al contorno del modello, ovvero le *Boundary Conditions*.

Per la superficie della macchina VMC di immissione dell'aria è stato scelto *mass-flow-inlet*, come tipo di condizione al contorno, impostando le seguenti caratteristiche.

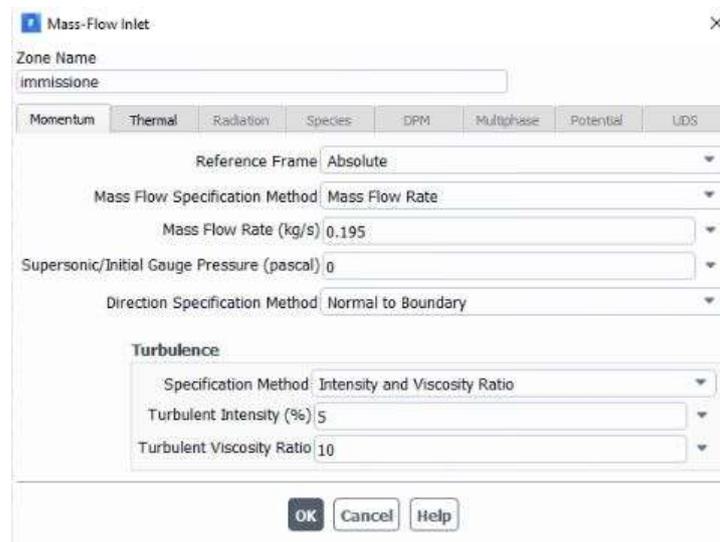


Figura 4.20 – Condizione al contorno immissione-Momentum

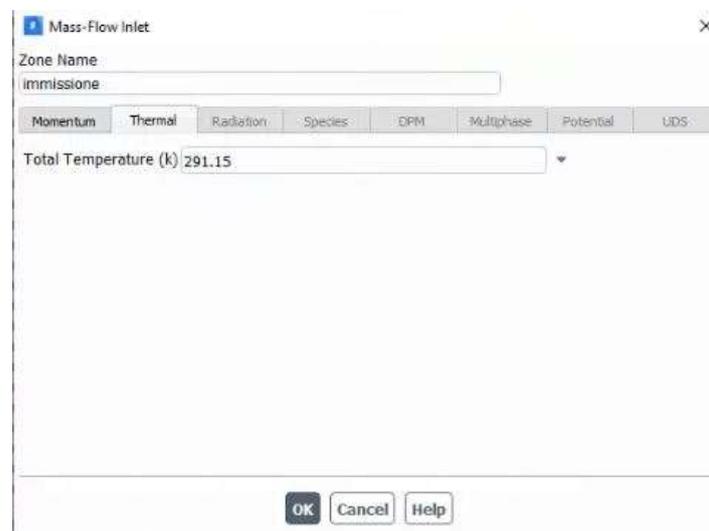


Figura 4.21 – Condizione al contorno immissione-Thermal

La portata, di valore pari a 0,195 kg/s, deriva dal calcolo effettuato col D.M. 18/12/1975; mentre la temperatura del flusso d'aria è stata fissata a 291,15 K, cioè 18 °C ed il getto è in direzione normale alla superficie di immissione.

Per la superficie della macchina VMC di estrazione dell'aria è stato scelto *pressure-outlet*, come tipo di condizione al contorno, impostando le seguenti caratteristiche.

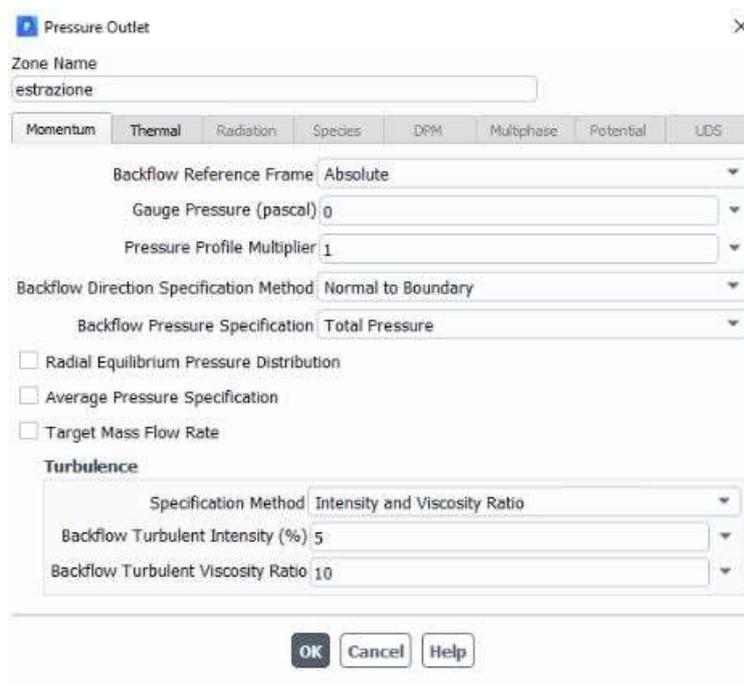


Figura 4.22 – Condizione al contorno estrazione-Momentum

Per le superfici di confine del volume di calcolo, tra le quali si distingue la superficie dell'aula, la superficie esterna, cioè corrispondente al solaio, del volume di controllo degli studenti e la superficie delle pareti della macchina di ventilazione, è stato scelto *wall*, come tipo di condizione al contorno, impostando le seguenti caratteristiche termiche.

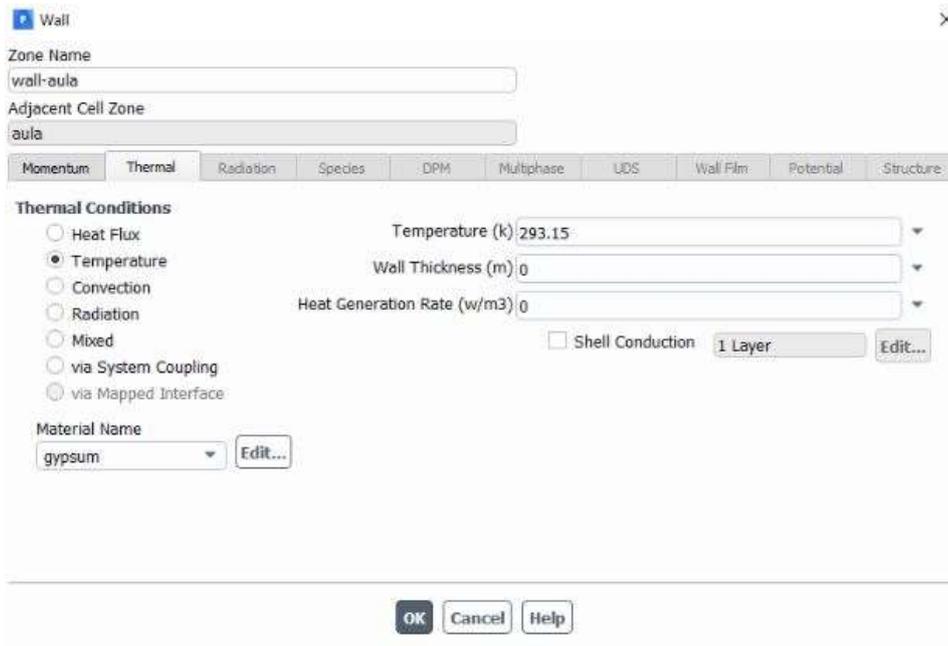


Figura 4.23 – Condizione al contorno superficie dell'aula-Thermal

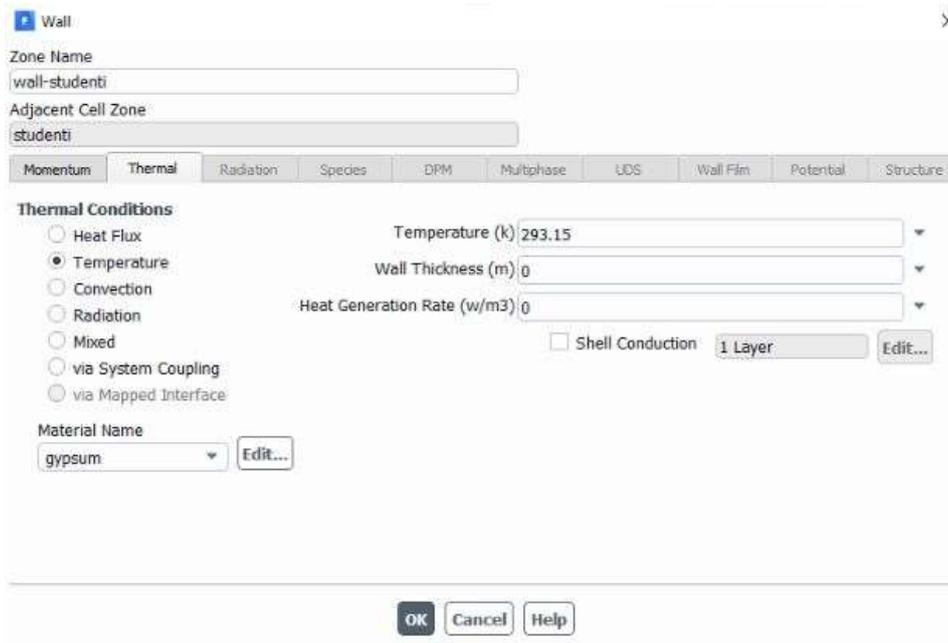


Figura 4.24 – Condizione al contorno superficie del volume di controllo degli studenti-Thermal

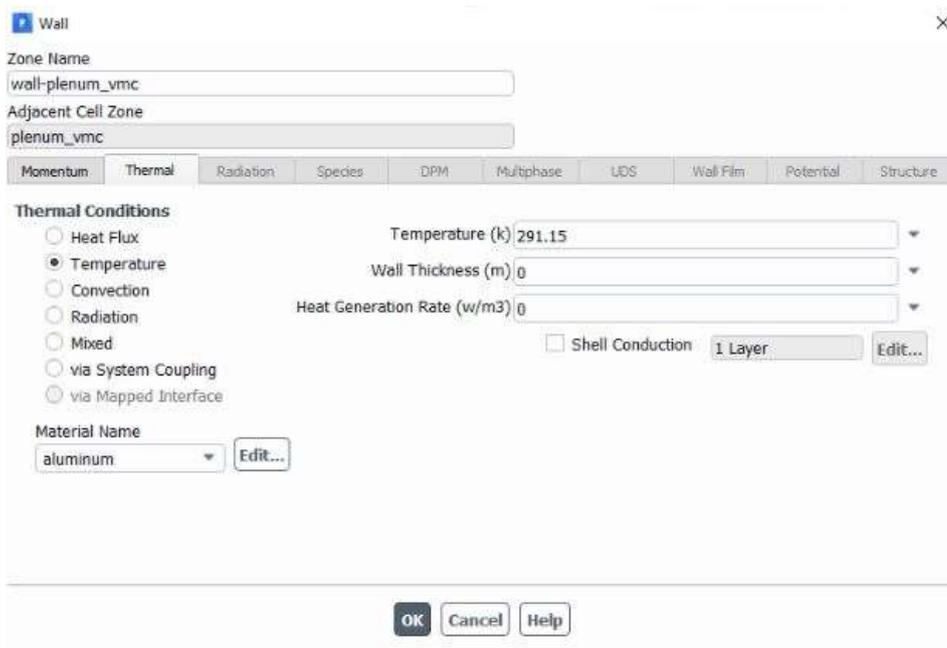


Figura 4.25 – Condizione al contorno superficie del plenum VMC-Thermal

Dopo aver settato le condizioni al contorno si passa all'impostazione del metodo risolutivo, nella finestra *Solution Methods*; in particolare è stato scelto lo schema numerico *Simple* e, dalle impostazioni di default, è stato cambiato il *Gradient method* in *Green-Gauss Node Based*, suggerito dalla guida ANSYS [56] per la mesh tetraedrica. A questo punto si inizializza e avvia la simulazione.

4.3.3 Risultati e scelta della mesh

Una volta avviata la simulazione è importante capire quando la soluzione del problema arriva a convergenza, così da poter stoppare la simulazione e visualizzare i risultati, sia numerici che grafici. La convergenza delle simulazioni effettuate è stata valutata tramite i residui e l'andamento di due grandezze ritenute fondamentali per il caso in esame, ovvero la temperatura media e la velocità media dell'aria nel volume di controllo degli studenti, definite mediante i *Report-plot* in fase di settaggio della simulazione.

Il solo monitoraggio dei residui non è sufficiente per affermare che la simulazione abbia raggiunto la convergenza; è dunque necessario monitorare la variazione, tra un'iterazione e quella successiva, di alcune grandezze ritenute significative riguardo al problema che si sta affrontando.

Detto ciò tutte le simulazioni effettuate sono state stoppate quando le due grandezze monitorate assumevano un valore pressoché costante all'aumentare delle iterazioni di calcolo, il che, come appena specificato, è segno del raggiungimento della convergenza della simulazione.

Per effettuare lo studio della convergenza della griglia di calcolo e, quindi, assicurare l'indipendenza dei risultati ottenuti dalla mesh scelta, si è svolta una simulazione per ogni mesh prodotta, dieci in totale, fino ad arrivare al punto in cui, confrontando i valori di temperatura media e velocità media dell'aria nel volume di controllo degli studenti, questi ultimi non variavano significativamente tra una mesh e quella precedente.

Nella simulazione con la prima griglia, denominata mesh A, non si è raggiunta la convergenza dei parametri monitorati, come si può notare dai seguenti report.

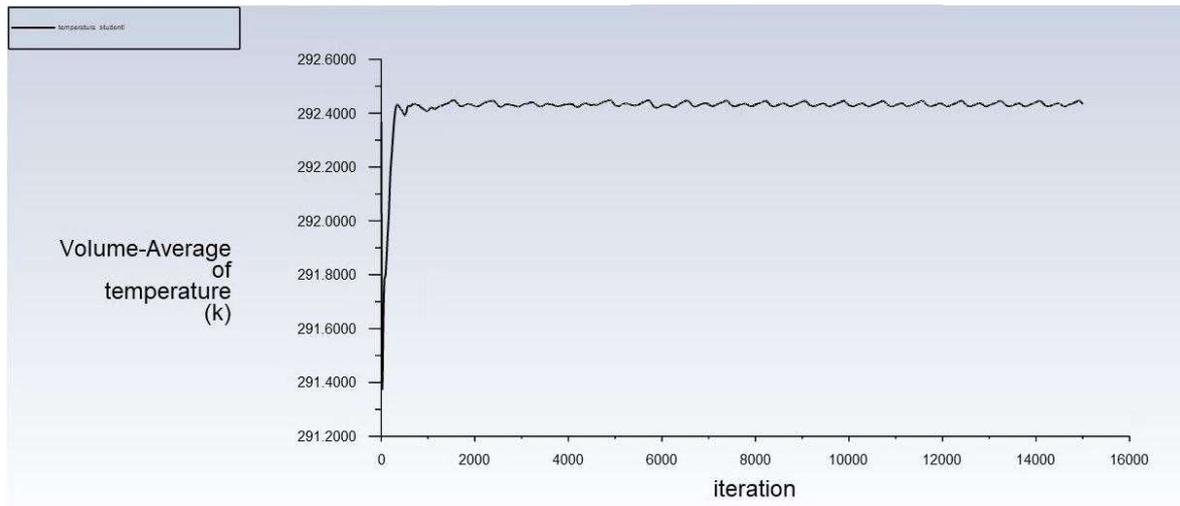


Figura 4.26 – Temperatura media dell'aria nel volume di controllo degli studenti - Mesh A

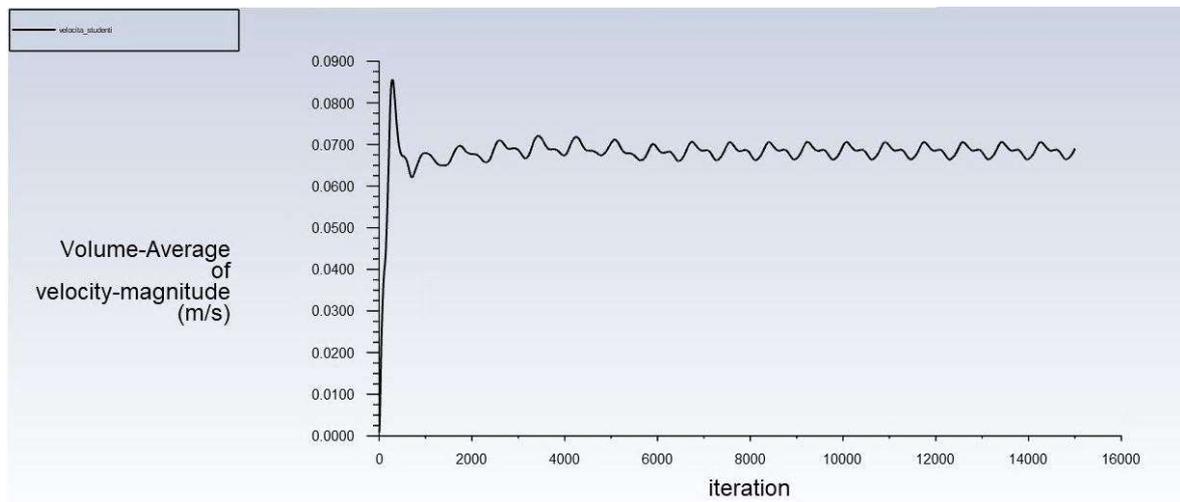


Figura 4.27 – Velocità media dell'aria nel volume di controllo degli studenti - Mesh A

Dalla visualizzazione dei report ottenuti si conclude che la mesh A può essere scartata dal successivo confronto dei risultati.

Si procede quindi con l'infittimento della griglia ottenendo la mesh B e procedendo poi con la simulazione; con questa mesh si riesce raggiungere la convergenza, come si può notare dai seguenti report.

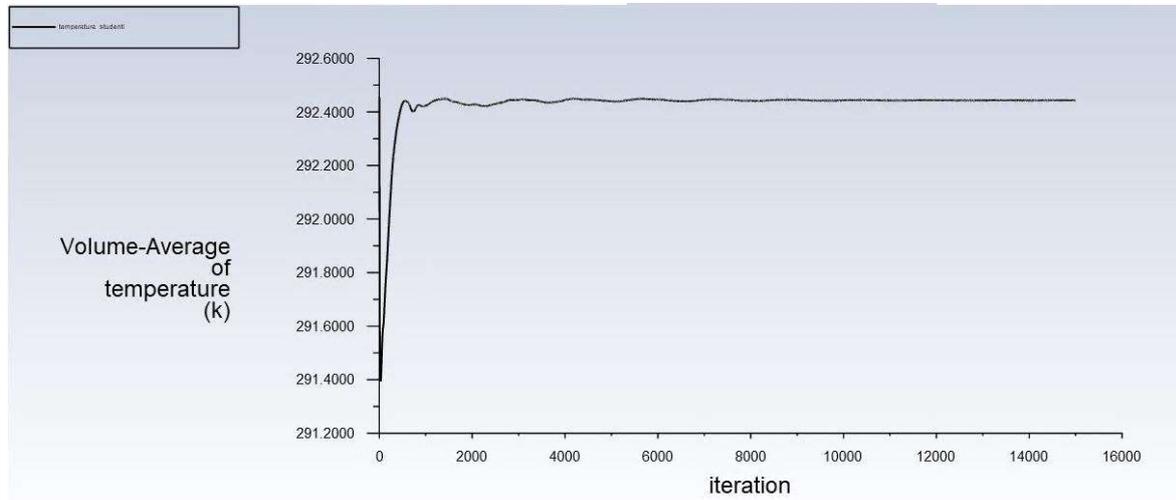


Figura 4.28 – Temperatura media dell'aria nel volume di controllo degli studenti - Mesh B

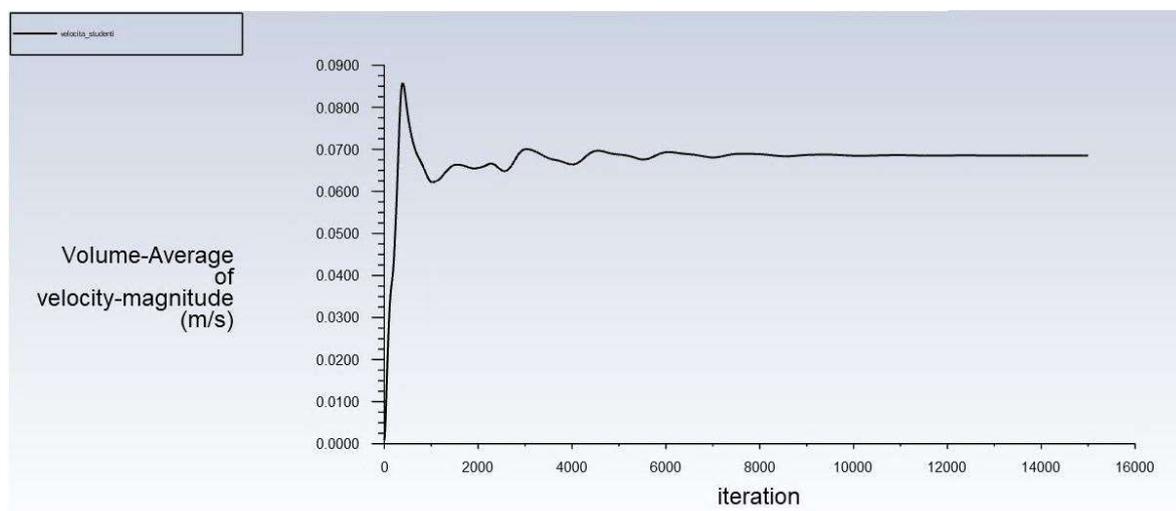


Figura 4.29 – Velocità media dell'aria nel volume di controllo degli studenti - Mesh B

La mesh B è considerata quindi la prima da poter considerare per il successivo confronto dei risultati.

Si procede dunque ad effettuare le simulazioni per tutte le successive griglie create, stoppandole solamente dopo aver raggiunto la convergenza, come fatto per la mesh B.

Di seguito si riportano i grafici dei valori di temperatura media dell'aria nel volume di controllo degli studenti e dell'errore relativo corrispondente, calcolato con la Formula 4.1, ottenuti effettuando le simulazioni del modello con le mesh dalla B alla L.

$$err_{rel,T} = \frac{|T_{mesh\ i} - T_{mesh\ L}|}{T_{mesh\ L}} \quad (4.1)$$

Grafico 4.1 – Valori di temperatura media dell'aria nel volume di controllo degli studenti per ogni simulazione

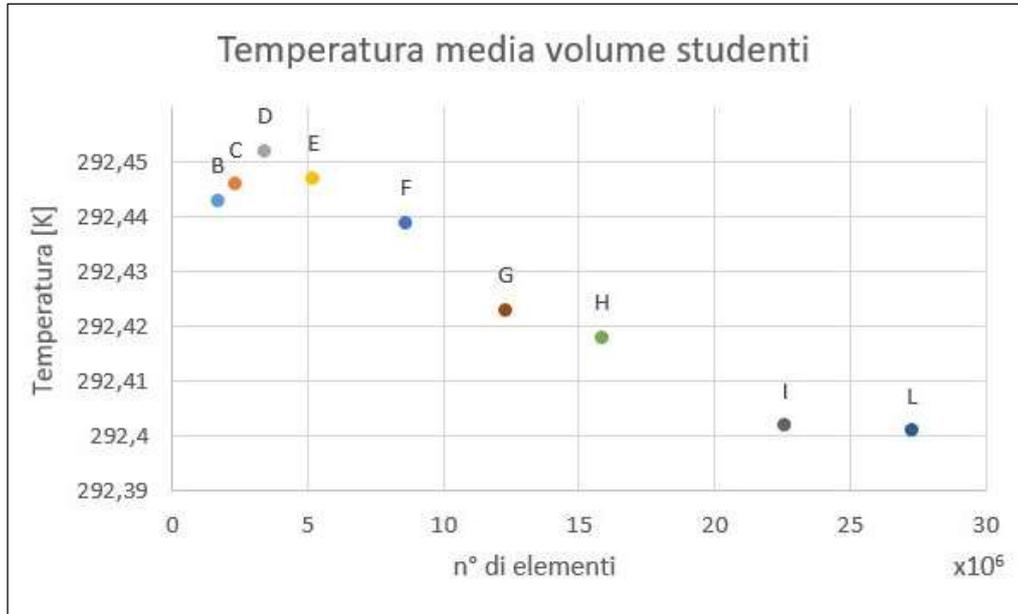
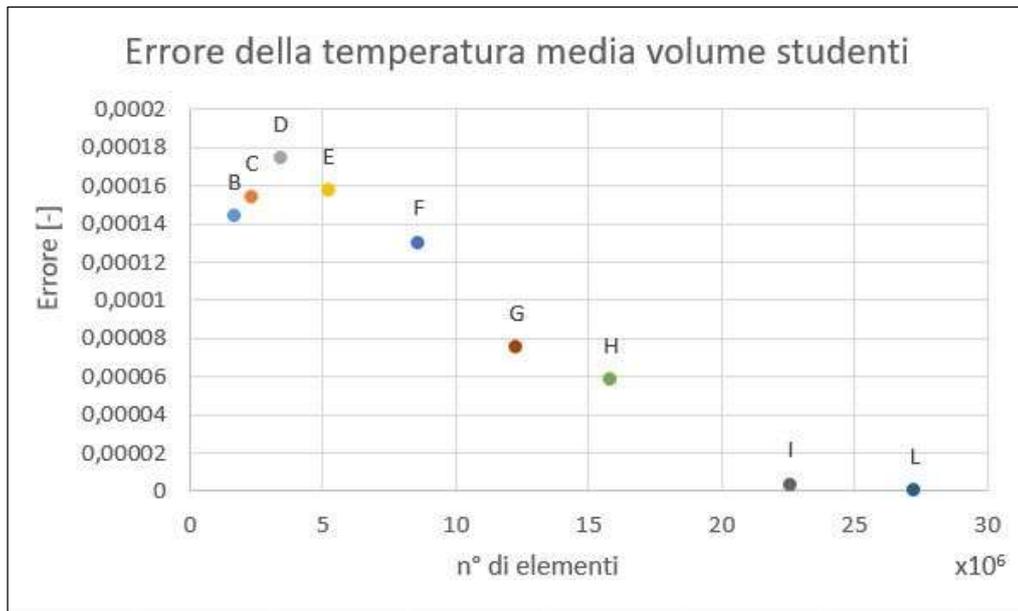


Grafico 4.2 – Errore relativo dei valori di temperatura media dell'aria nel volume di controllo degli studenti per ogni simulazione



Come si può notare, dalla mesh I in poi, i valori di temperatura media dell'aria tendono ad assumere un valore pressoché costante, mentre il corrispondente errore relativo tende a zero. Di seguito si riportano i grafici dei valori di velocità media dell'aria nel volume di controllo degli studenti e dell'errore relativo corrispondente, calcolato con la Formula 4.2, ottenuti effettuando le simulazioni del modello con le mesh dalla B alla L.

$$err_{rel,v} = \frac{|v_{mesh\ i} - v_{mesh\ L}|}{v_{mes\ L}} \quad (4.2)$$

Grafico 4.3 – Valori di velocità media dell'aria nel volume di controllo degli studenti per ogni simulazione

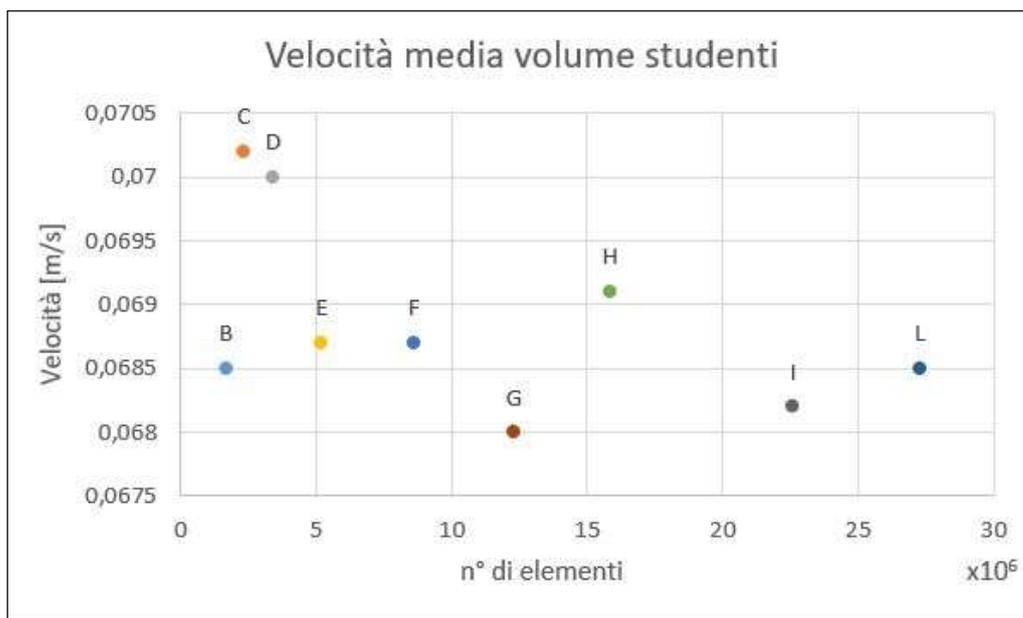
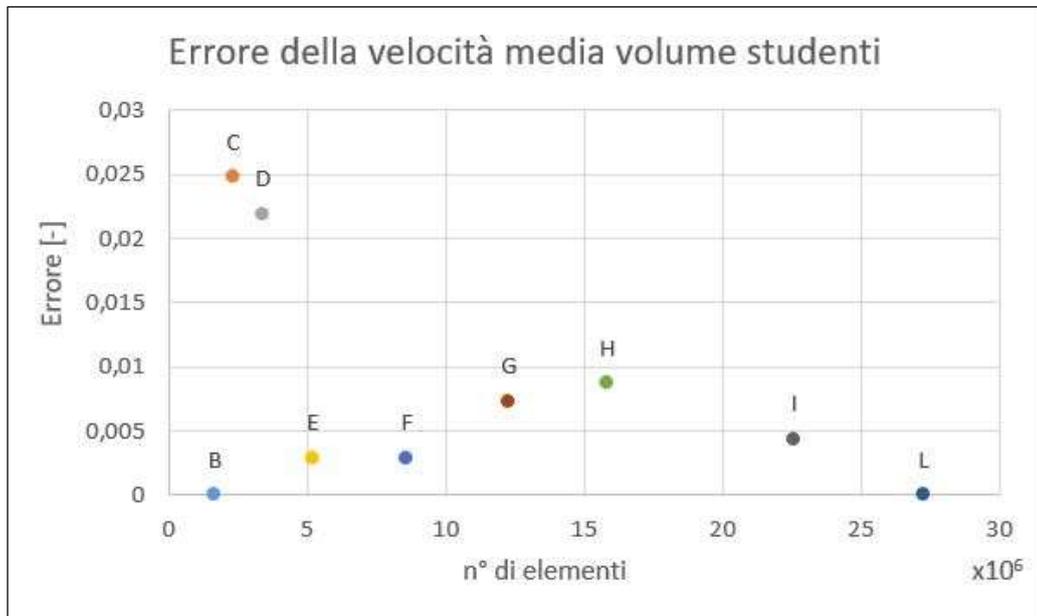


Grafico 4.4 – Errore relativo dei valori di velocità media dell'aria nel volume di controllo degli studenti per ogni simulazione



Come si può notare dai grafici riportati anche i valori della velocità media dell'aria tendono a convergere dalla mesh I in poi, ma in modo meno accentuato rispetto ai valori di temperatura media.

Tuttavia, dall'analisi del confronto dei risultati ottenuti si è scelto di assumere la mesh I per le future simulazioni, la quale assicura una buona qualità dei risultati e tempi computazionali non eccessivi.

In aggiunta al confronto dei risultati numerici si riporta di seguito il confronto dei risultati grafici ottenuti dalle simulazioni con le griglie E, F, G, H, I ed L, così da avere un ulteriore elemento di riscontro e verifica sulla scelta della mesh effettuata.

Per il confronto grafico vengono creati due piani; il primo è un piano verticale in corrispondenza del centro della superficie di immissione, mentre il secondo è un piano orizzontale anch'esso in corrispondenza del centro della superficie di immissione.

Vengono analizzati i risultati mediante i *Contour* di velocità e temperatura, con i quali è possibile osservare i valori nel piano dei due parametri scelti.

Per primo si analizzano i *Contour* di velocità (Figura 4.30) e di temperatura (Figura 4.31) nel piano verticale delle sei mesh sopra indicate.

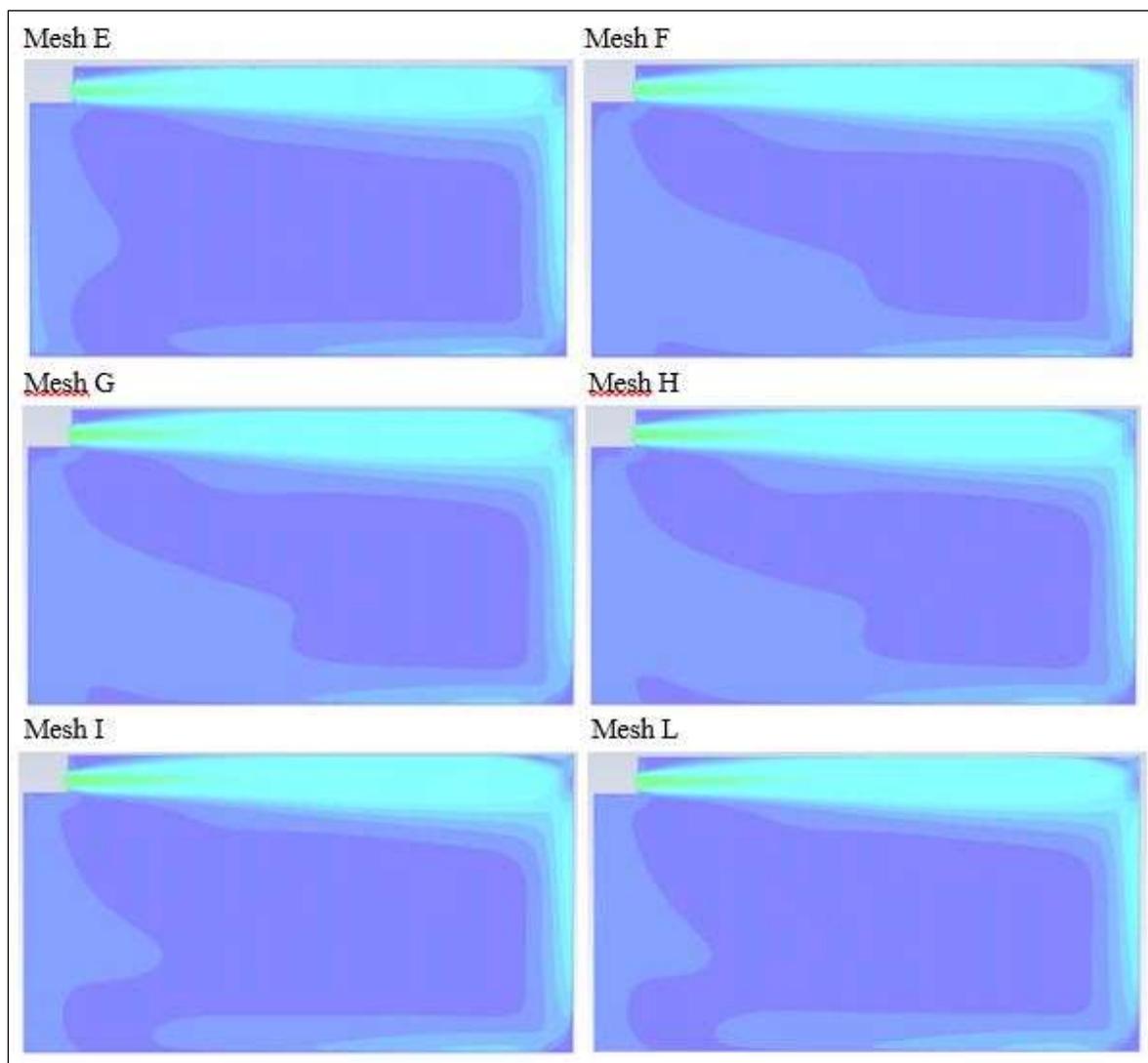


Figura 4.30 – Confronto del profilo di velocità sul piano verticale

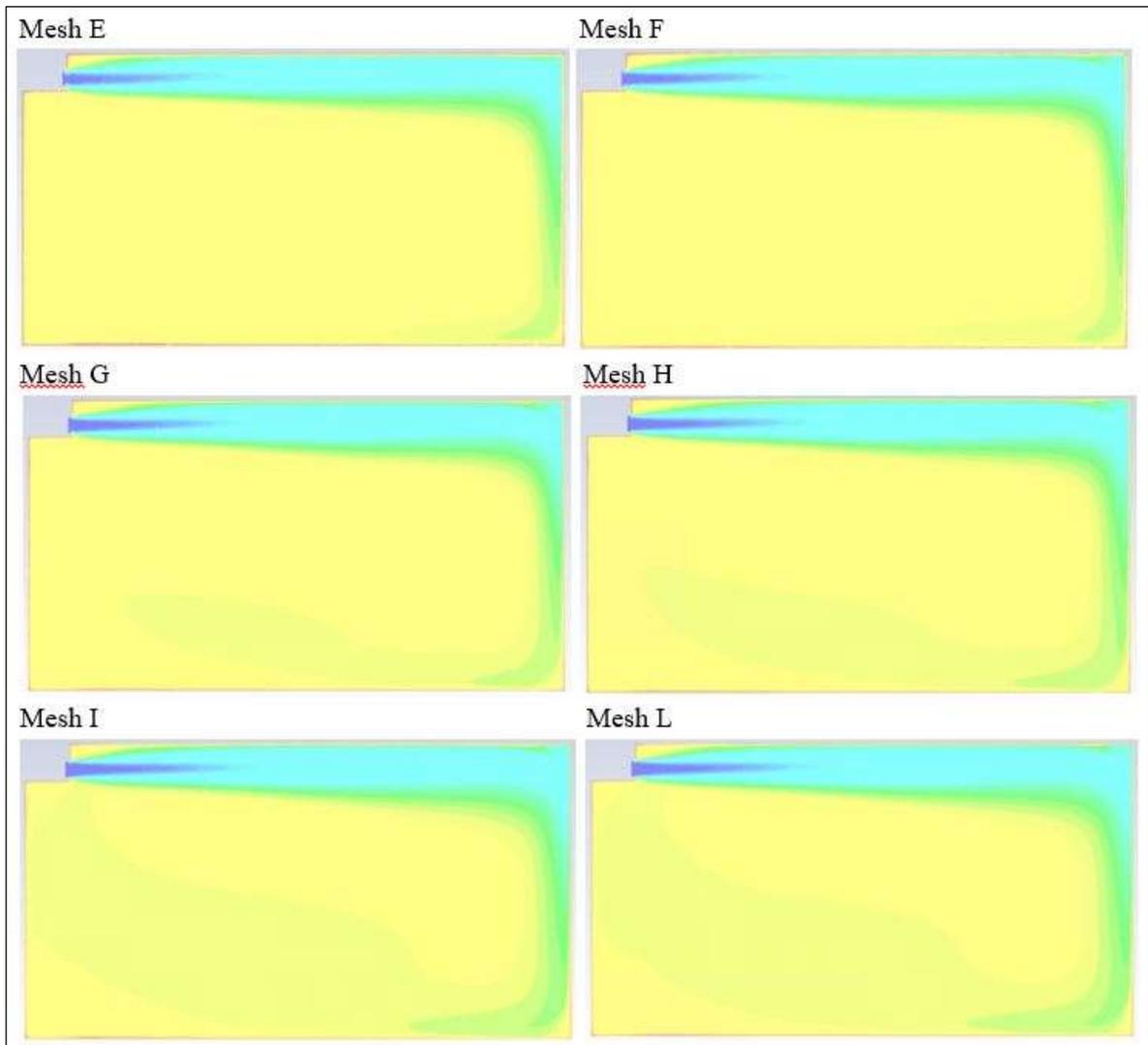


Figura 4.31 – Confronto del profilo di temperatura sul piano verticale

Guardando attentamente i report grafici si può osservare come i valori sia delle velocità che delle temperature tendono ad avere la stessa tendenza, ovvero gli stessi contorni dei valori del parametro in esame, tra la mesh I ed L, mentre per le griglie precedenti i due profili variano.

Si analizzano poi i *Contour* di velocità (Figura 4.32) e di temperatura (Figura 4.33) nel piano orizzontale delle sei mesh sopra indicate.

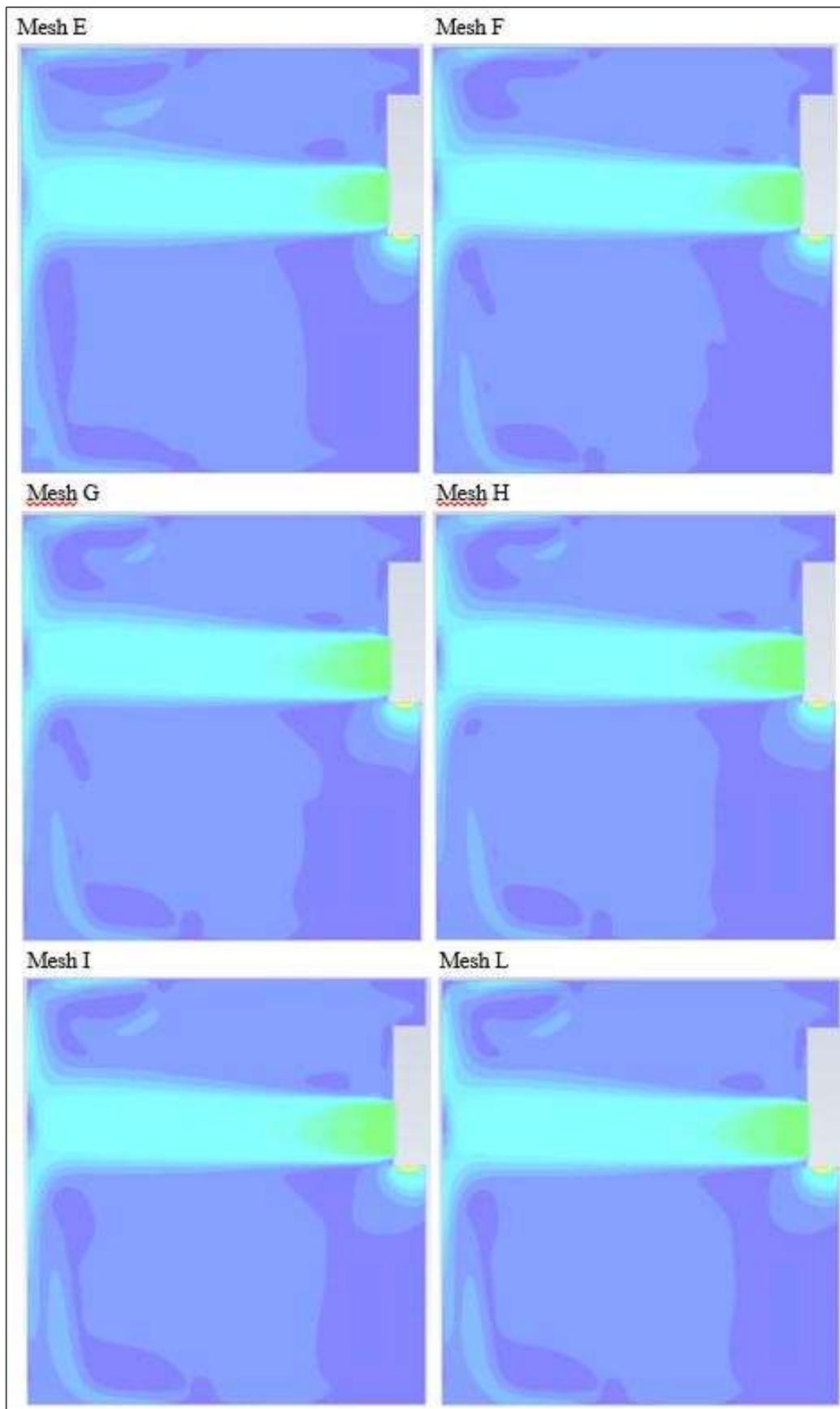


Figura 4.32 – Confronto del profilo di velocità sul piano orizzontale

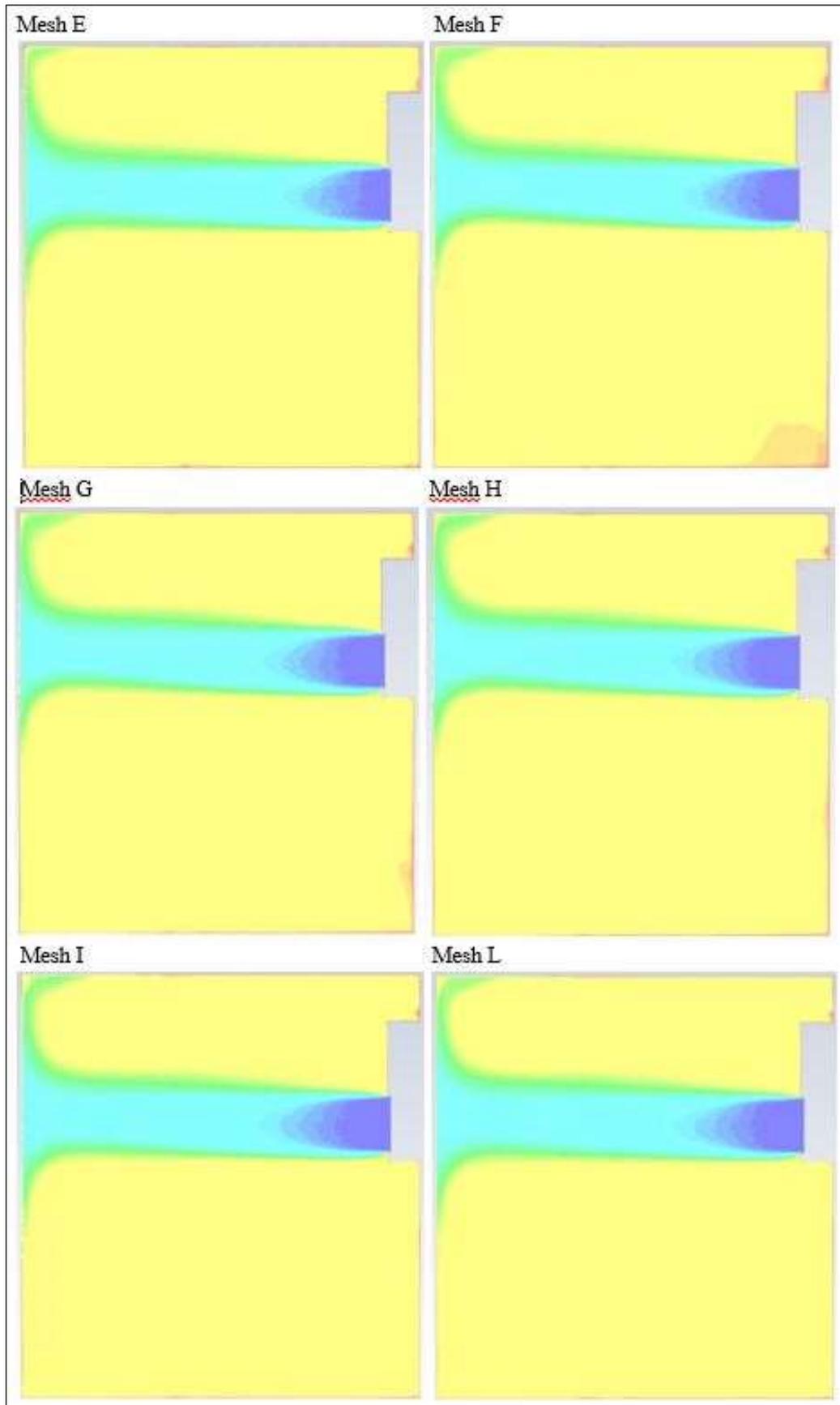


Figura 4.33 – Confronto del profilo di temperatura sul piano orizzontale

Guardando attentamente i report grafici si può osservare come i valori sia delle velocità che delle temperature tendono ad avere la stessa tendenza, ovvero gli stessi contorni dei valori del parametro in esame, tra la mesh I ed L, mentre per le griglie precedenti i due profili variano, così come visto per i report sul piano verticale.

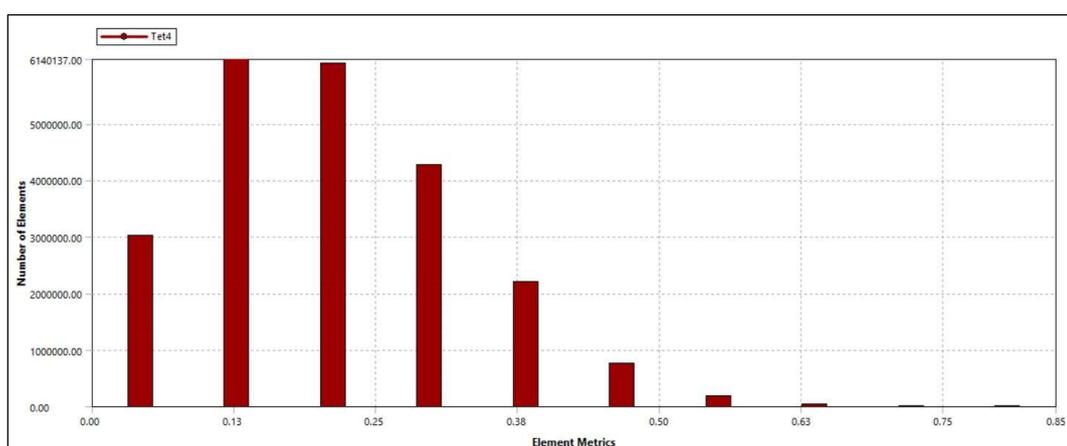
Analizzando i risultati sia numerici che grafici dello studio della convergenza della griglia di calcolo si arriva dunque alla conferma della mesh I per le future simulazioni.

4.3.4 Qualità della mesh scelta

Una volta aver eseguito lo studio di convergenza della griglia di calcolo ed aver individuato la mesh I come la più appropriata per le successive simulazioni, in termini di qualità dei risultati e di costi computazionali, si riportano di seguito i parametri che ne quantifica la sua qualità. Tra i vari indicatori da poter analizzare per definire la qualità della mesh, quelli di maggiore importanza sono:

- Skewness: è l'asimmetria delle celle, tipicamente indicata con il termine inglese skewness; la skewness di una cella è un indicatore che misura quanto la geometria reale della cella si discosti dalla corrispondente geometria ideale. Per avere una mesh di qualità "eccellente" tale parametro deve essere al di sotto di 0,25. Come si può vedere dal seguente grafico la mesh scelta rispetta, per la gran maggioranza degli elementi, i requisiti di buona pratica.

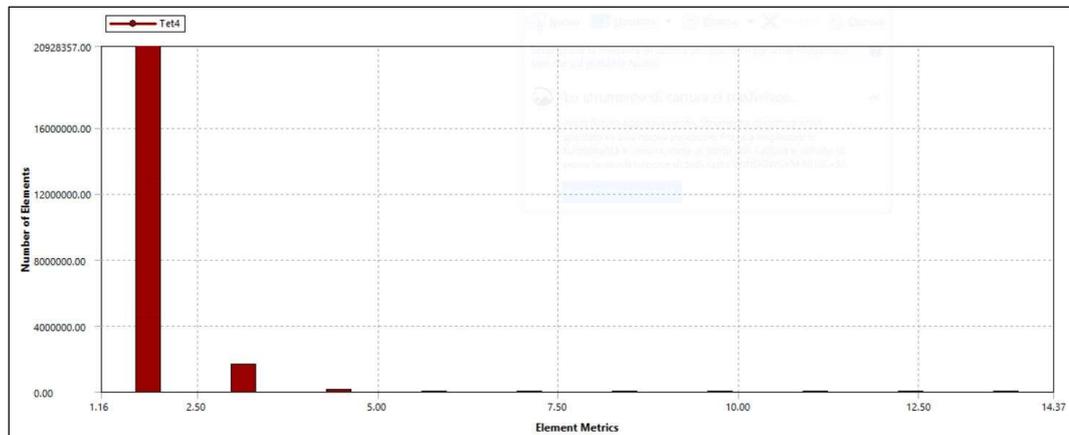
Grafico 4.5 – Valori di Skewness della mesh I



- Aspect Ratio: rappresenta il rapporto tra la dimensione massima e la dimensione minima di una cella; valori ridotti di AR contribuiscono alla stabilità della soluzione. Generalmente, si può assumere che un Aspect Ratio inferiore a 20 non dia alcun

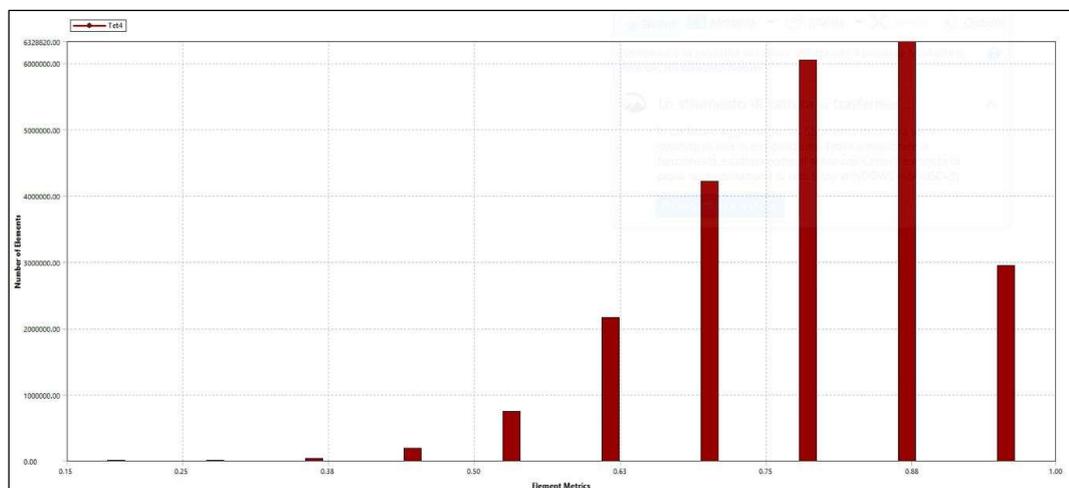
problema di convergenza della soluzione, indipendentemente dalle caratteristiche del flusso di fluido. Come si può vedere dal seguente grafico la mesh scelta rispetta i requisiti di buona pratica.

Grafico 4.6 – Valori di Aspect Ratio della mesh I



- **Orthogonal Quality:** formalmente, l'ortogonalità della mesh è la deviazione angolare tra il segmento che connette i centri di due celle e la normale alla faccia condivisa; la non-ortogonalità di una cella è pertanto un indicatore che misura quanto l'angolo formato da due celle adiacenti si discosti dal suo valore ideale. Valori di OQ maggiori di 0,75 sono ottimali e permettono di utilizzare in tranquillità schemi risolutivi del secondo ordine, ottenendo soluzioni molto precise ed attendibili. Come si può vedere dal seguente grafico la mesh scelta rispetta, per la gran maggioranza degli elementi, i requisiti di buona pratica.

Grafico 4.7 – valori di Orthogonal Quality della mesh I



Si riportano di seguito anche delle illustrazioni della mesh I ottenute da un piano di taglio verticale fatto in corrispondenza della mezzeria della superficie di immissione dell'aria della macchina VMC e da un ingrandimento in corrispondenza di un angolo.



Figura 4.34 – Illustrazione della mesh I in un piano di taglio

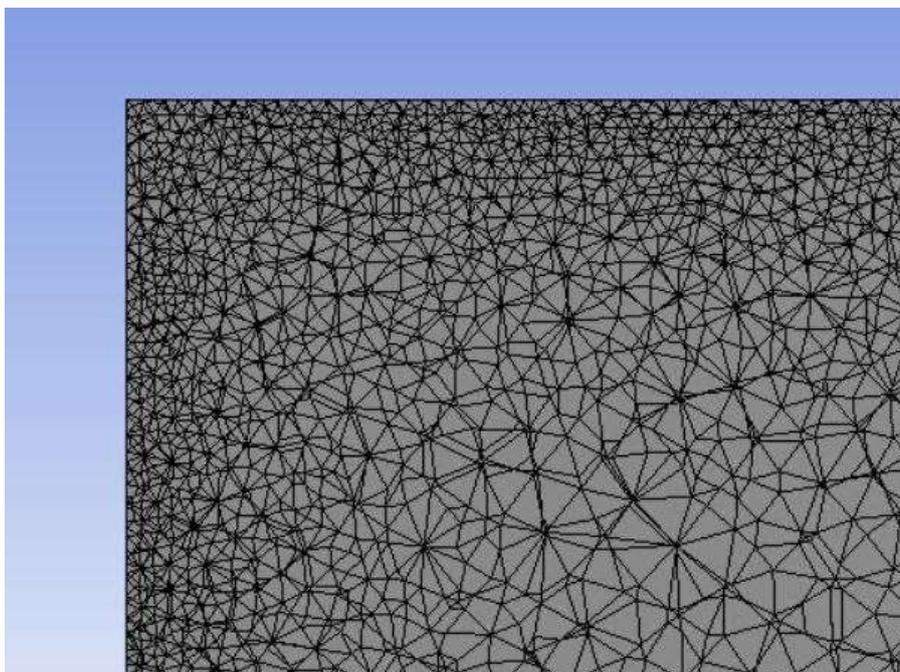


Figura 4.35 – Illustrazione della mesh I in un angolo del piano di taglio

4.4 Analisi unità VMC – Configurazione installata

Una volta aver eseguito lo studio della convergenza della griglia ed aver appunto scelto la mesh da utilizzare per effettuare le successive simulazioni, si passa all'analisi dell'unità di ventilazione installata.

Nello specifico le prestazioni della macchina VMC vengono valutate analizzando l'aspetto termico e fluidodinamico dell'aula. Si analizzano quindi i valori che le varie grandezze di interesse, come temperatura e velocità dei flussi d'aria, assumono all'interno del volume di controllo degli studenti e l'andamento dei flussi d'aria nell'aula, al fine di valutare graficamente il comportamento dell'impianto installato e poterlo poi confrontare con eventuali miglioramenti.

4.4.1 Setup di simulazione

Il settaggio del risolutore o *Solver* è rimasto invariato da quello impostato per lo studio di convergenza della griglia; quindi si utilizza un risolutore *Pressure-Based*, più indicato per le simulazioni da effettuare e si considera il fenomeno come stazionario o *Steady*, con il quale è possibile analizzare le condizioni nell'aula a regime.

Anche le caratteristiche del modello restano invariate. Rimane quindi abilitata l'equazione dell'energia, con la quale si tiene conto degli scambi termici nel volume di calcolo, ed il modello di turbolenza *k-epsilon Standard* per modellare gli effetti della turbolenza sulla fluidodinamica del problema, con l'impostazione *Enhanced Wall Treatment* per il *Near-Wall Treatment*, cioè per il trattamento del flusso in vicinanza delle pareti.

Successivamente si passa alla definizione dei materiali da assegnare al dominio e delle loro caratteristiche. Per il materiale fluido nel volume dell'aula è stata scelta l'aria variando, rispetto alle simulazioni precedenti, l'impostazione relativa alla densità; al fine di tener conto della variabilità della densità dell'aria con la temperatura e, quindi, per avere dei risultati più vicini alle condizioni reali, è stata selezionata l'impostazione di *incompressible-ideal-gas*.

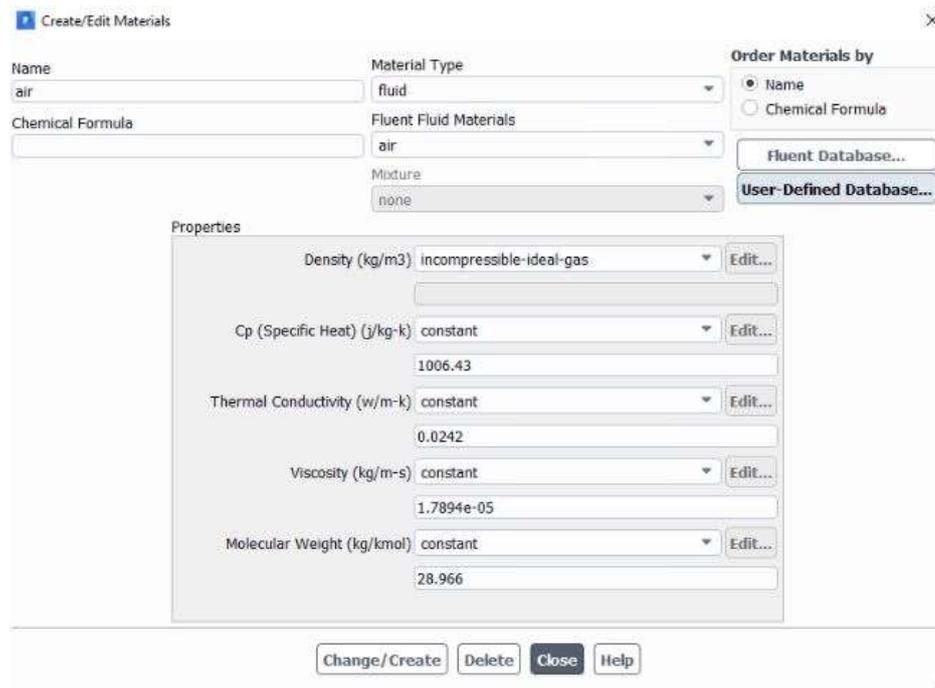


Figura 4.36 – Proprietà dell'aria

Con tale impostazione il risolutore calcola la densità dell'aria mediante la Formula 4.3, estrapolata dalla guida ANSYS [56].

$$\rho = \frac{p_{op}}{\frac{R}{M_w} T} \quad (4.3)$$

Dove:

p_{op} = pressione di esercizio

R = costante universale dei gas

M_w = peso molecolare del gas

T = temperatura del fluido

In questa forma la densità dell'aria è funzione solamente della temperatura, in quanto la pressione di esercizio viene definita con un valore costante nelle *Operating Conditions* e gli altri due parametri sono valori costanti.

I materiali solidi rimangono gli stessi, così come le loro caratteristiche.

Anche i parametri delle condizioni operative del modello rimangono invariati; si ha quindi una pressione operativa pari a 101325 Pa, un'accelerazione gravitazionale di 9,81 m/s² nella direzione negativa dell'asse Y, una temperatura operativa di 288,16 K (di default) e una densità operativa specifica di 1,225 kg/m³, per i parametri del modello Buossinesq.

Inoltre anche le condizioni al contorno del modello, ovvero le *Boundary Conditions*, restano invariate; per la superficie della macchina VMC di immissione dell'aria si ha *mass-flow-inlet*, come tipo di condizione al contorno, ed una portata di 0,195 kg/s alla temperatura di 291,15 K, cioè 18 °C, col getto in direzione normale alla superficie di immissione.

Per la superficie della macchina VMC di estrazione dell'aria resta *pressure-outlet*, come tipo di condizione al contorno.

Infine le impostazioni delle superfici di confine del volume di calcolo, tra le quali si distingue la superficie dell'aula, la superficie esterna, cioè corrispondente al solaio, del volume di controllo degli studenti e la superficie delle pareti della macchina di ventilazione, rimangono invariate.

Come ultimo punto il metodo risolutivo rimane invariato sullo schema numerico *Simple* ed il settaggio di *Green-Gauss Node Based* resta come *Gradient method*.

A questo punto si inizializza e avvia la simulazione.

4.4.2 Analisi dei risultati

Una volta conclusa la simulazione si analizzano i risultati degli aspetti termici e fluidodinamici dell'unità di ventilazione meccanica controllata installata, sia dal punto di vista numerico che grafico.

Sotto il profilo numerico, nel volume di controllo degli studenti, si ha una temperatura media dell'aria di 292,32 K, cioè circa 19 °C, ed una velocità media dell'aria di 0,08 m/s, valore che risulta essere al di sotto del limite invernale di 0,10 m/s per la categoria I di qualità dell'ambiente termico secondo la norma UNI EN 16798 (descritta nel Capitolo 2.1.1.1).

Si analizzano quindi graficamente i profili di temperatura e velocità dell'aria; per fare ciò si creano delle superfici, o piani, dove plottare i valori delle variabili di interesse.

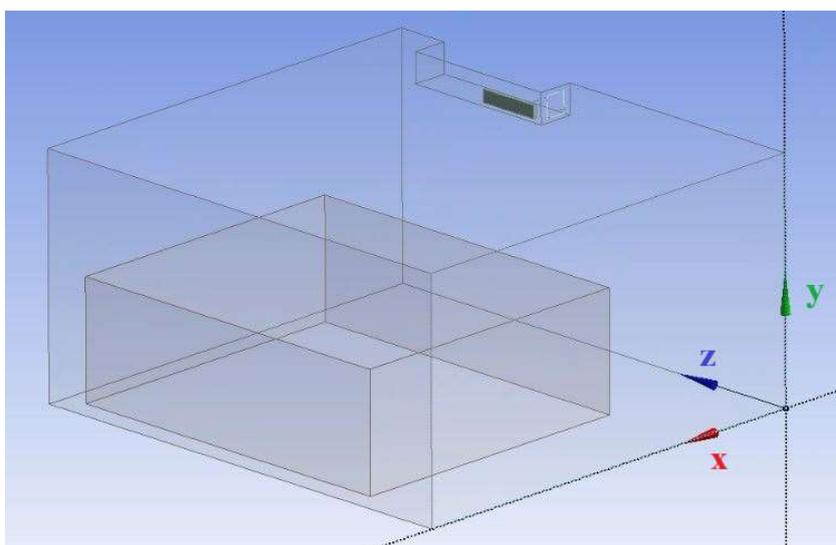


Figura 4.37 – Origine di riferimento per la creazione dei piani

Considerando l'immagine precedente ed il sistema di riferimento scelto, si creano le seguenti superfici, o piani:

- Superfici nel piano x-y con le seguenti coordinate z: $z = 3,6$ m; $z = 4,6$ m; $z = 5,6$ m;
- Superfici nel piano z-y con le seguenti coordinate x: $x = 2,0$ m; $x = 3,5$ m; $x = 5,0$ m;
- Superfici nel piano x-z con le seguenti coordinate y: $y = 1,0$ m; $y = 1,7$ m; $y = 3,3$ m.

Si esaminano quindi i contorni, o *Contour*, di temperatura rispettivamente nei piani x-y, z-y e x-z.

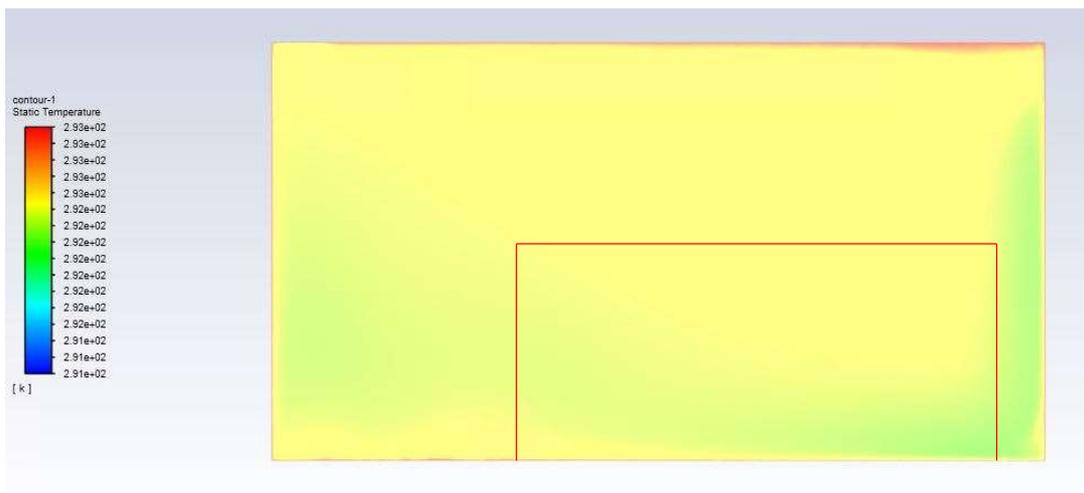


Figura 4.38 – Contour di temperatura dell'aria: piano x-y, $z = 3,6$ m

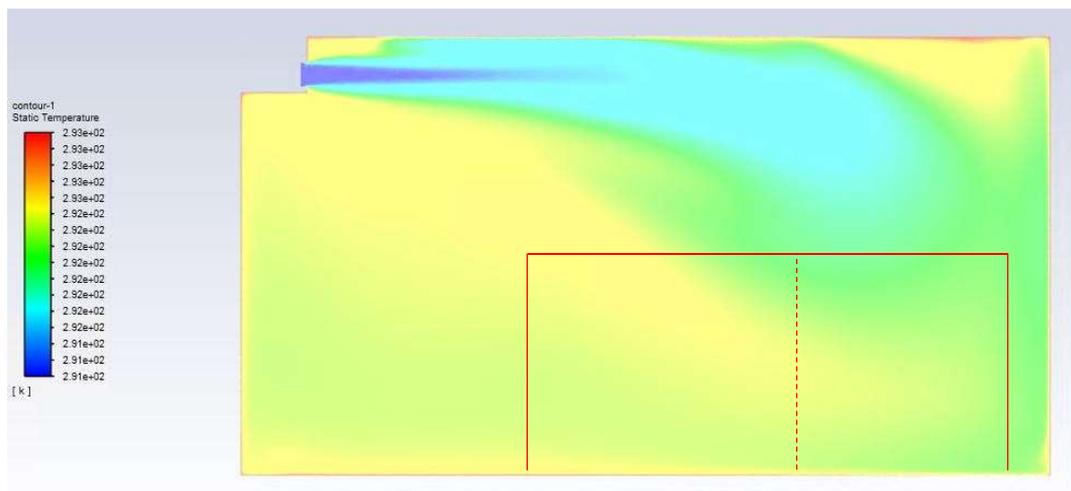


Figura 4.39 – Contour di temperatura dell'aria: piano x-y, $z = 4,6$ m

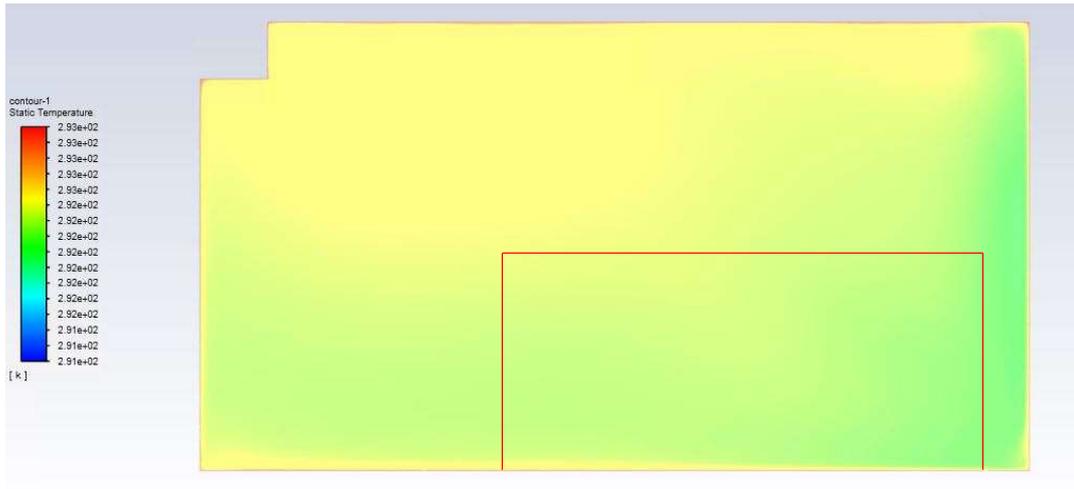


Figura 4.40 – Contour di temperatura dell'aria: piano x-y, $z = 5,6$ m



Figura 4.41 – Contour di temperatura dell'aria: piano z-y, $x = 2,0$ m

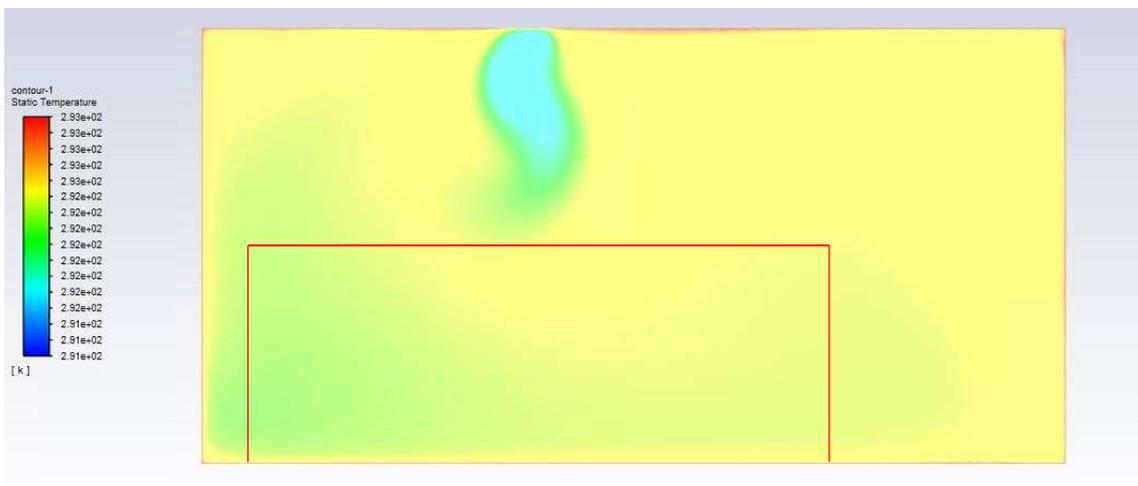


Figura 4.42 – Contour di temperatura dell'aria: piano z-y, $x = 3,5$ m

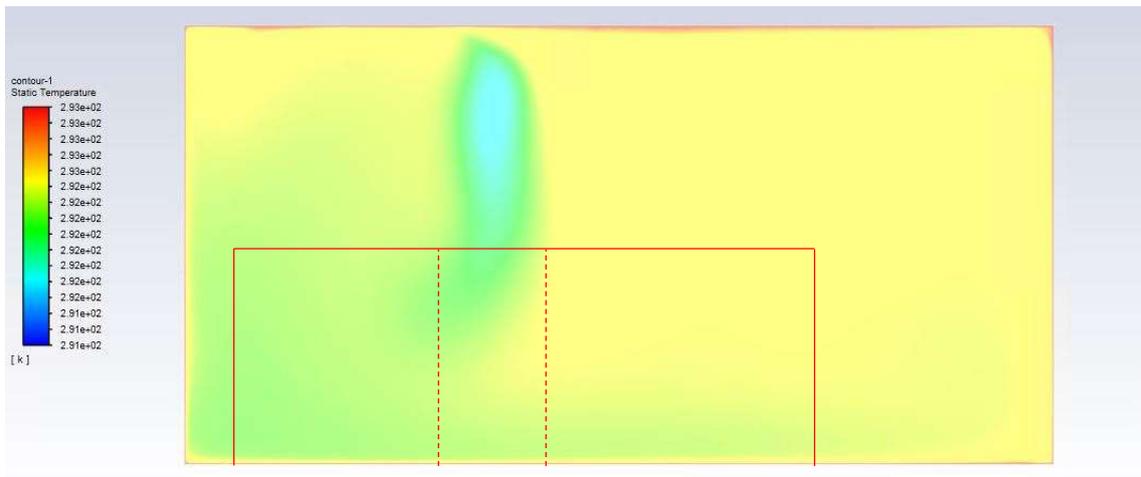


Figura 4.43 – Contour di temperatura dell'aria: piano z-y, $x = 5,0$ m

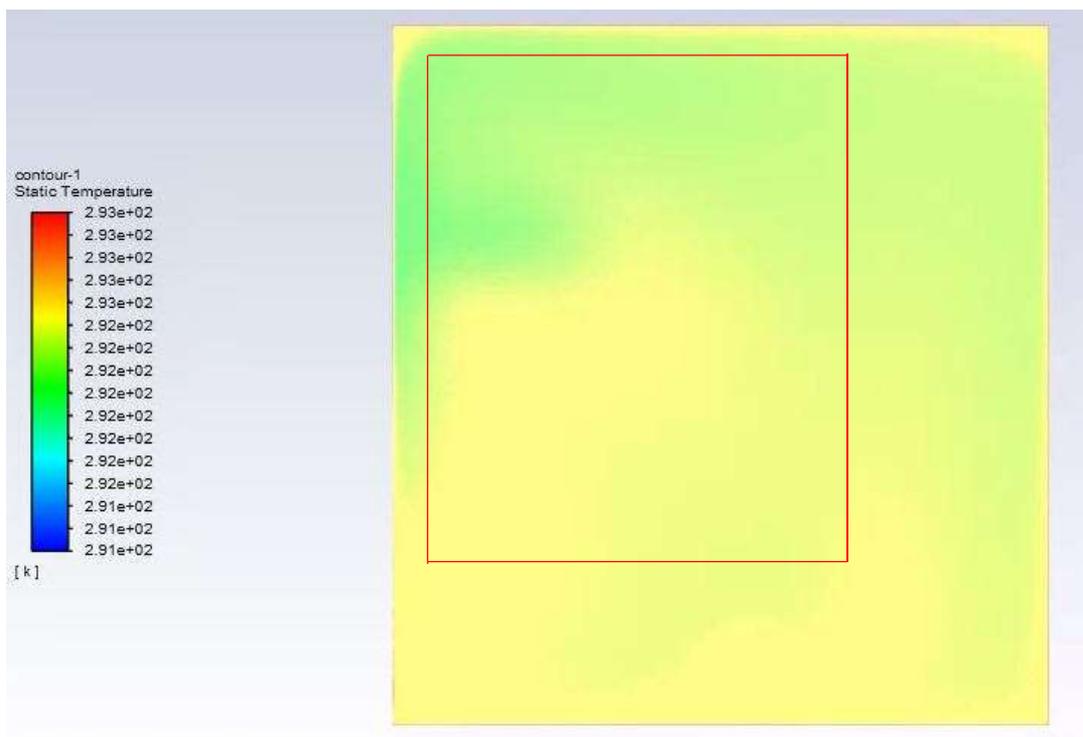


Figura 4.44 – Contour di temperatura dell'aria: piano x-z, $y = 1,0$ m

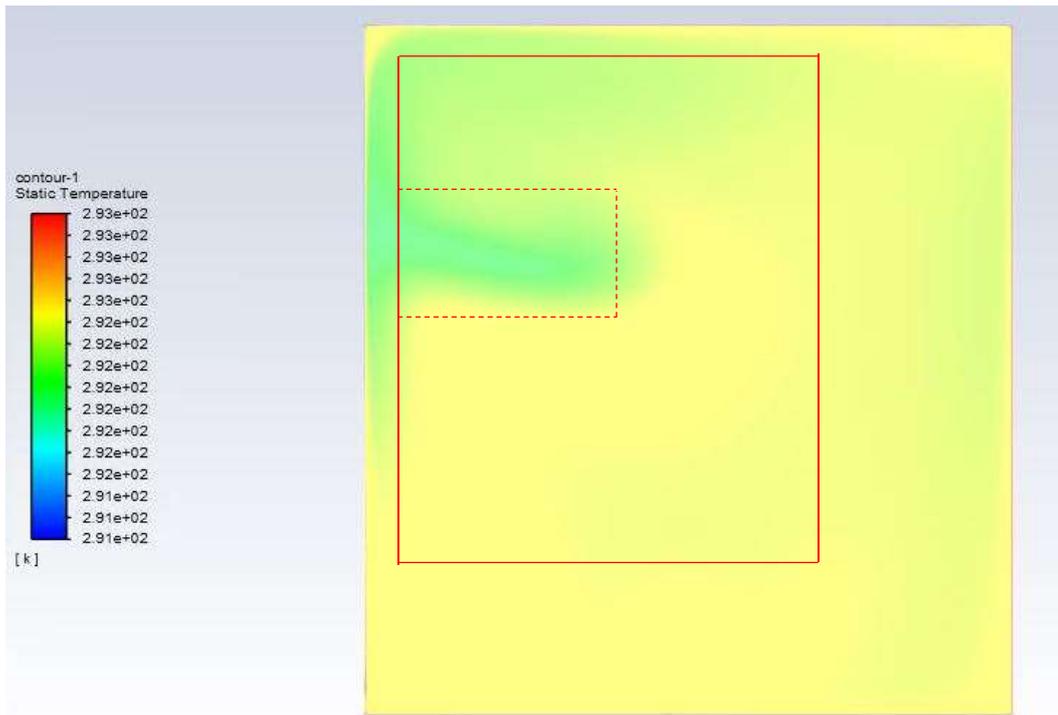


Figura 4.45 – Contour di temperatura dell'aria: piano x-z, $y = 1,7\text{ m}$

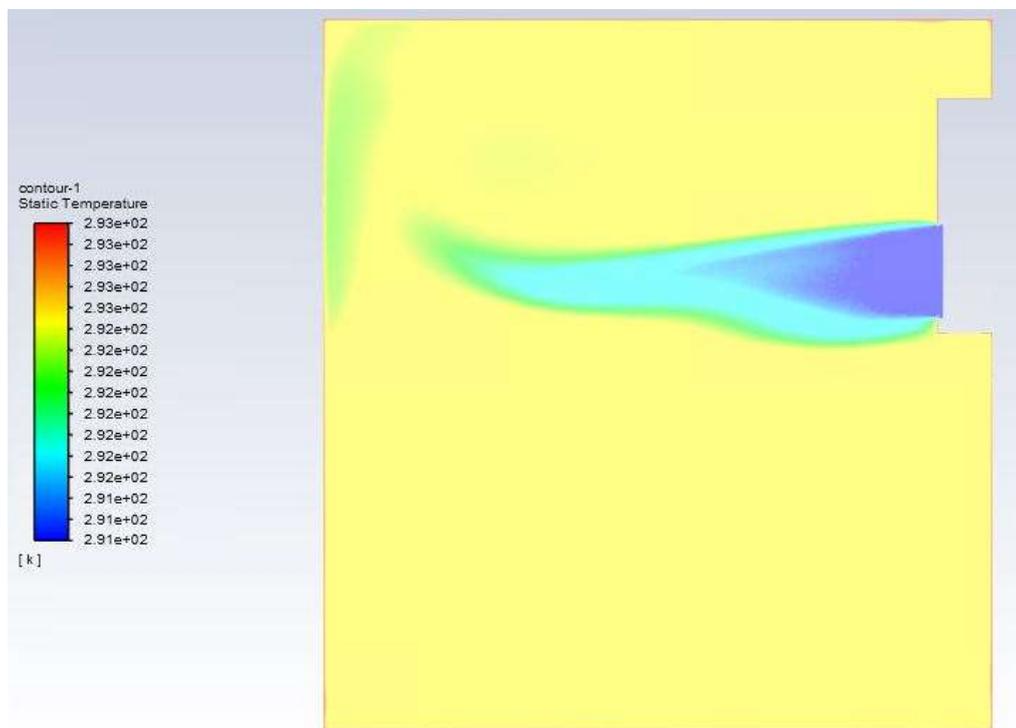


Figura 4.46 – Contour di temperatura dell'aria: piano x-z, $y = 3,3\text{ m}$

Dai report grafici si può osservare come gli studenti seduti in corrispondenza della griglia di immissione dell'unità VMC e nei pressi della parete opposta alla griglia stessa, ovvero la parete 2, risentono maggiormente dell'abbassamento di temperatura, anche se di circa 1 °C, dovuto al flusso d'aria immesso; tale conclusione si può riscontrare dalle Figure 4.39, 4.43 e 4.45, dove la porzione di aula tra le linee tratteggiate rappresenta la zona dove si percepisce maggiormente l'abbassamento della temperatura dovuto al flusso d'aria immesso.

Si esaminano poi i contorni, o *Contour*, di velocità rispettivamente nei piani x-y, z-y e x-z. Vengono esaminati solamente i piani ritenuti significativi successivamente all'analisi dei *Contour* di temperatura.

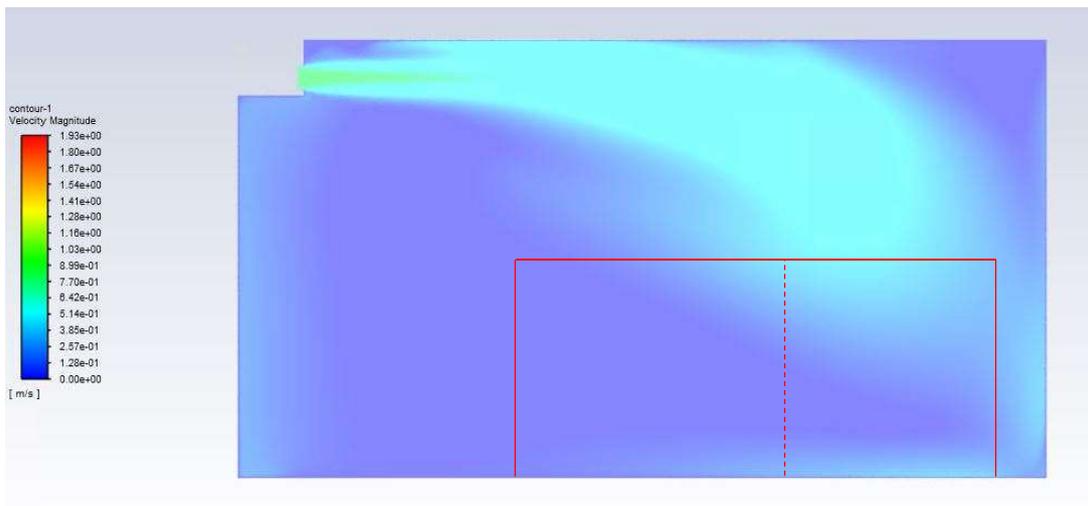


Figura 4.47 – Contour di velocità dell'aria: piano x-y, $z = 4,6$ m

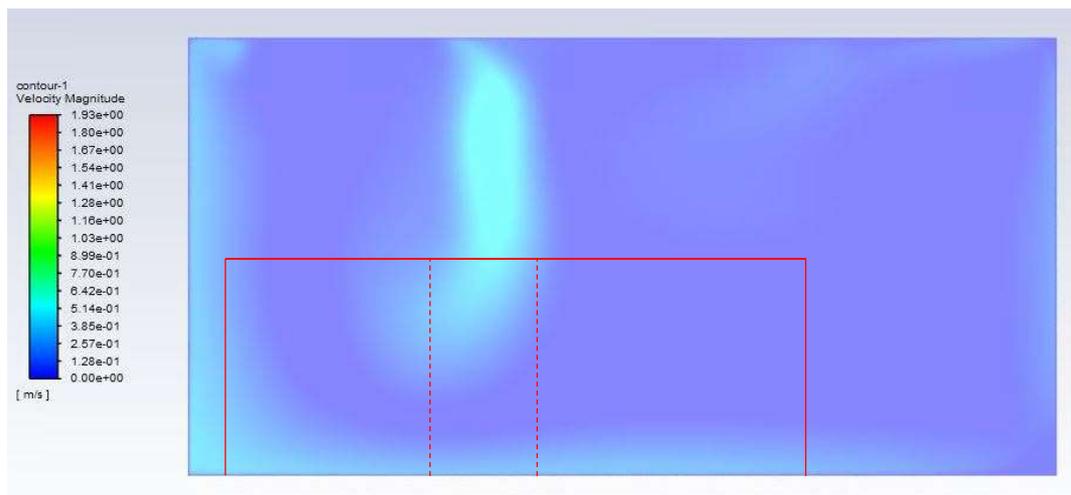


Figura 4.48 – Contour di velocità dell'aria: piano z-y, $x = 5,0$ m

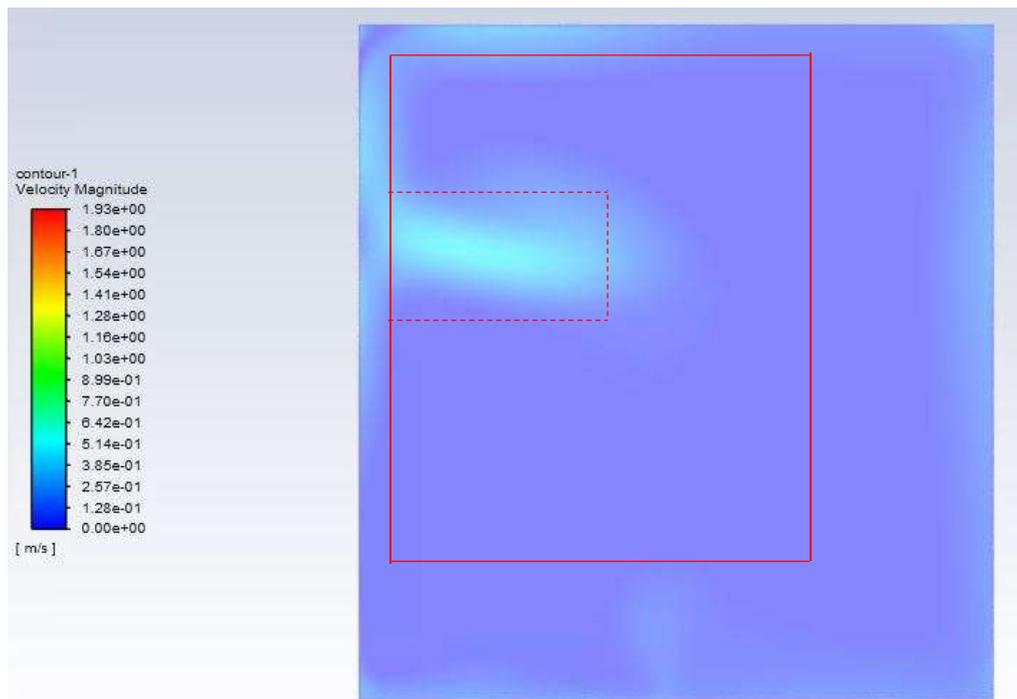


Figura 4.49 – Contour di velocità dell'aria: piano x-z, $y = 1,7$ m

Anche dai report grafici della velocità, così come riscontrato da quelli della temperatura, si può osservare come gli studenti seduti in corrispondenza della griglia di immissione dell'unità VMC e nei pressi della parete opposta alla griglia stessa, ovvero la parete 2, risentono maggiormente della velocità del flusso d'aria immesso; tale conclusione si può riscontrare dalle Figure 4.47, 4.48 e 4.49, dove la porzione di aula tra le linee tratteggiate rappresenta la zona dove si percepisce il flusso d'aria immesso.

In particolare la velocità dell'aria in corrispondenza della superficie orizzontale critica evidenziata (Figura 4.49), a quota $y = 1,7$ m, assume valori maggiori di $0,3$ m/s, che sono ben al di sopra del limite minimo di qualità dell'aria imposto dalla UNI EN 16798 e pari a $0,21$ m/s, corrispondente alla categoria III.

Inoltre si può notare come il flusso d'aria immesso tende a verticalizzare, come si vede dai *Contour* di temperatura e velocità perpendicolari all'asse x (rispettivamente con la coordinata x pari a $2,0$ m, $3,5$ m e $5,0$ m), favorendo un maggiore ricambio d'aria agli studenti presenti all'interno delle linee tratteggiate di Figura 4.49.

Per visualizzare i valori che temperatura e velocità dell'aria assumono all'altezza di $1,7$ m da terra si riportano i *Contour* delle due variabili con una scala dei valori locali, cioè relativi al piano di interesse.

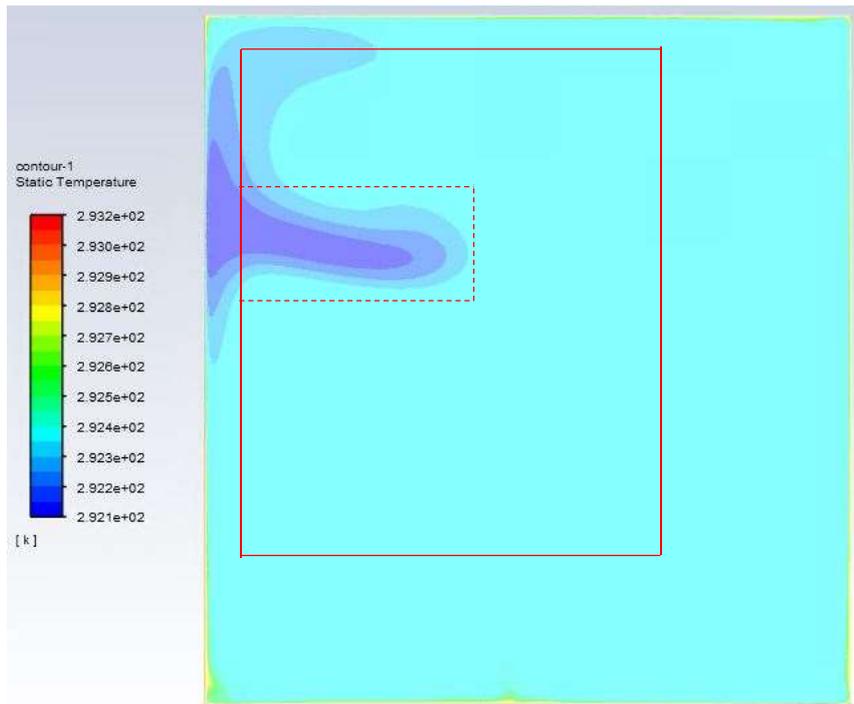


Figura 4.50 – Contour di temperatura dell'aria con scala locale: piano x-z, $y = 1,7$ m

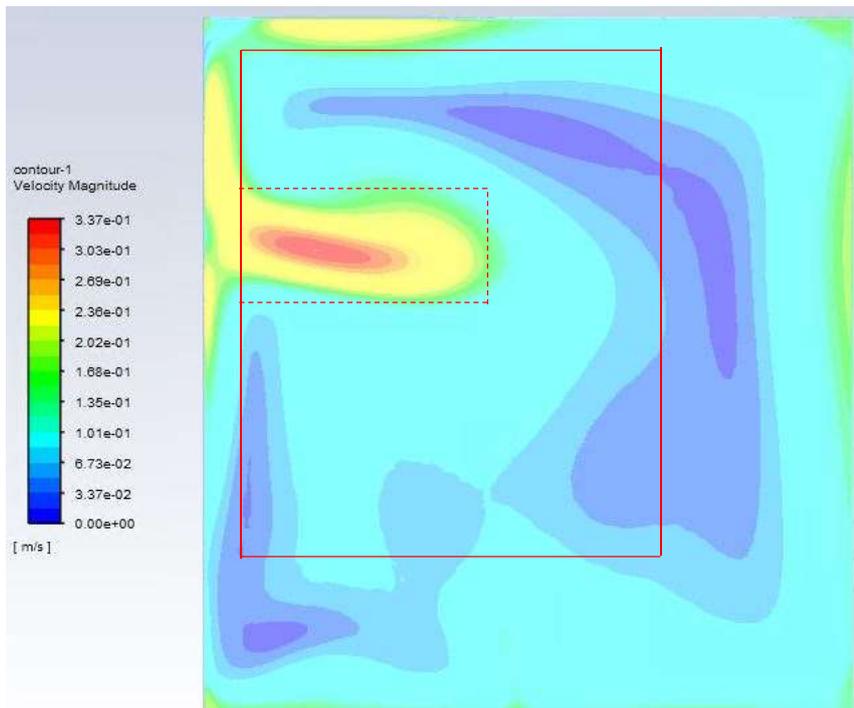


Figura 4.51 – Contour di velocità dell'aria con scala locale: piano x-z, $y = 1,7$ m

Nel piano orizzontale, ad un'altezza di 1,7 m da terra, si registrano una temperatura minima di 292,10 K ed una velocità massima dell'aria di 0,34 m/s.

Altro aspetto interessante da analizzare è l'andamento dei flussi d'aria mediante il plottaggio dei *Vectors*; in particolare è utile plottare i vettori delle velocità del flusso d'aria nel piano x-y ad una quota $z = 4,6$ m.

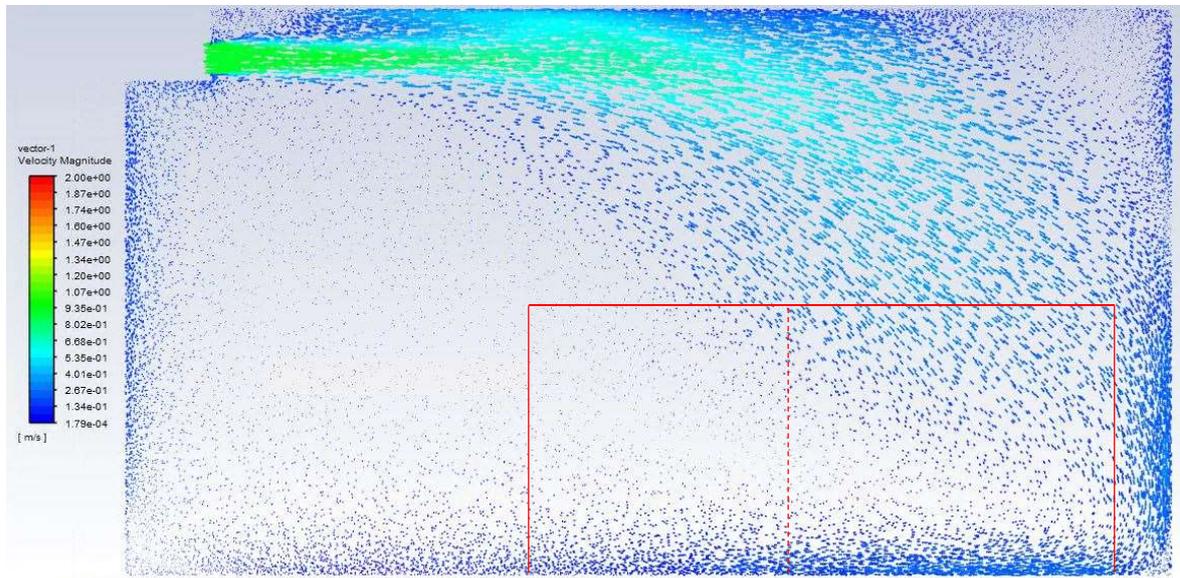


Figura 4.52 – *Vectors di velocità dell'aria: piano x-y, $z = 4,6$ m*

Si può riscontrare come il flusso d'aria tende a scendere, e quindi entrare nel volume occupato dagli studenti, nella parte posteriore dell'aula, per poi ricircolare andando verso la bocchetta di estrazione; mentre l'aria nella parte anteriore occupata dagli studenti rimane quasi ferma.

Da tale risultato grafico si evince come il sistema di ventilazione installato sia in grado di diluire e rimuovere con maggiore efficacia gli inquinanti, quindi anche la CO_2 , presenti nella parte posteriore dell'aula, mentre l'aria presente nella parte anteriore del volume occupato dagli studenti non viene diluita con la stessa efficacia in quanto le velocità dei flussi sono molto basse.

Di seguito vengono riportate delle *Pathline*, ovvero delle linee che rappresentano il percorso del flusso d'aria immesso, così da avere una rappresentazione tridimensionale del sistema in esame.



Figura 4.53 – Pathline di velocità dell'aria

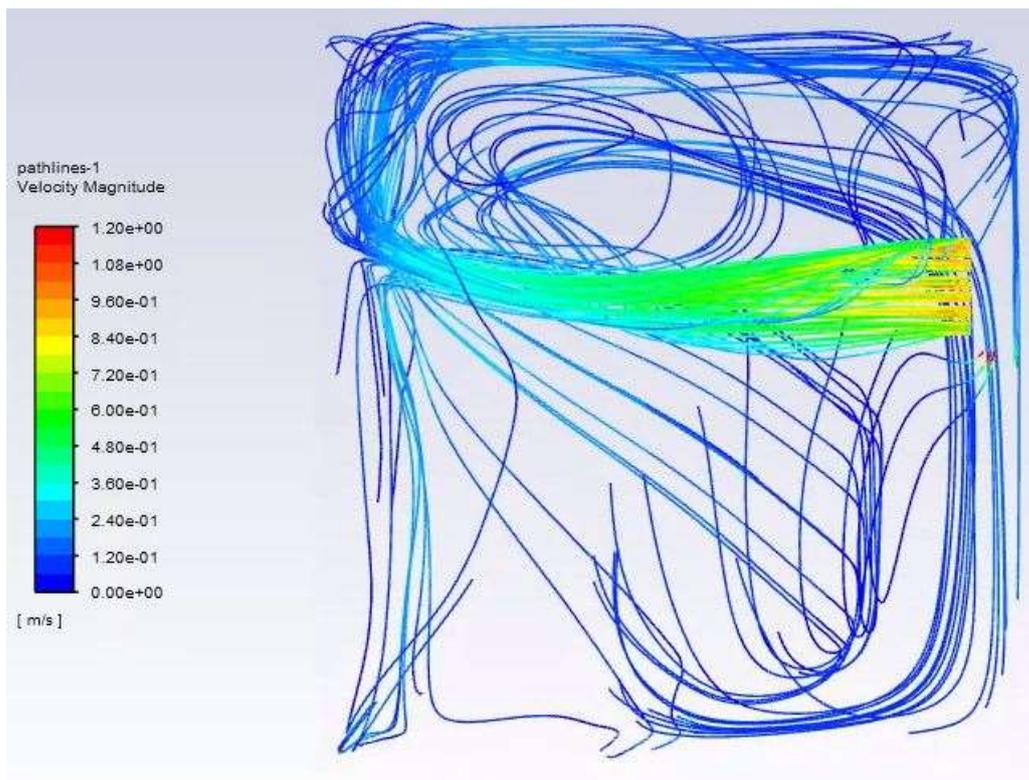


Figura 4.54 – Pathline di velocità dell'aria – vista dall'alto



Figura 4.55 – Pathline di velocità dell'aria – vista frontale

Anche dalla rappresentazione tridimensionale della configurazione in esame si può notare come solo parte del flusso immesso interessa il volume degli studenti, in quanto una porzione viene estratto senza interessare il volume di controllo.

4.5 Analisi unità VMC – Configurazione 2: angolo di mandata dell'aria a 10°

Una volta aver analizzato il comportamento dell'unità VMC installata nell'aula, si cerca di migliorarne le prestazioni apportando delle modifiche all'unità stessa.

Le modifiche non devono però riguardare la variazione della portata d'aria o dell'efficienza dello scambiatore di calore in quanto sono dei parametri da mantenere invariati ai fini dell'individuazione di un eventuale miglioramento.

Alla luce di ciò la prima modifica che viene apportata all'unità di ventilazione riguarda le alette della bocchetta di immissione; nello specifico si imposta un'inclinazione delle alette, o, in modo equivalente, del flusso d'aria immesso, di 10° verso il basso.

In seguito quindi si valuteranno le prestazioni della macchina VMC, con la modifica apportata, analizzando l'aspetto termico e fluidodinamico nell'aula.

4.5.1 Setup di simulazione

Il setup delle impostazioni di calcolo restano identiche a quelle descritte per l'analisi termica e fluidodinamica dell'unità VMC installata nel Capitolo 4.4.1.

L'unico cambiamento apportato, come appena specificato, è l'inclinazione del flusso d'aria immesso di 10° verso il basso, come si nota dalla seguente immagine.

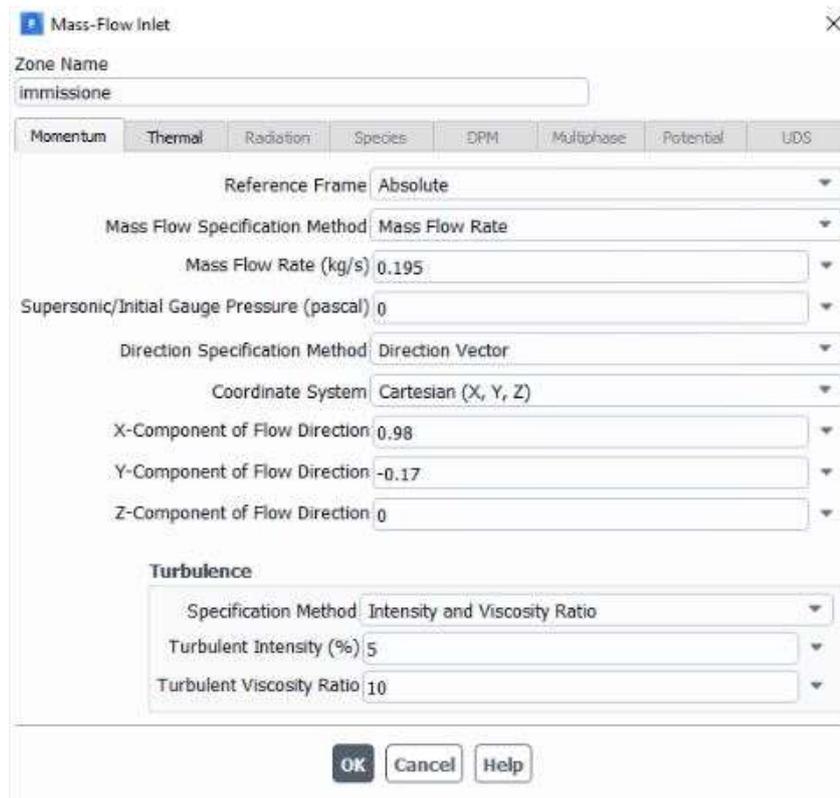


Figura 4.56 – Condizione al contorno immissione-Momentum

Per settare il flusso di immissione ad un'inclinazione di 10° è necessario specificare le componenti vettoriali della direzione del flusso rispettivamente a 0,98 per la direzione x e a -0,17 per la direzione y.

Come detto il resto delle impostazioni restano invariate; si procede quindi con l'avvio della simulazione.

4.5.2 Analisi dei risultati

Una volta conclusa la simulazione si analizzano i risultati degli aspetti termici e fluidodinamici della configurazione 2 dell'unità di ventilazione meccanica controllata, sia dal punto di vista numerico che grafico.

Sotto il profilo numerico, nel volume di controllo degli studenti, si ha una temperatura media dell'aria di 292,26 K, cioè circa 19 °C, ed una velocità media dell'aria di 0,08 m/s, valore che risulta essere al di sotto del limite invernale di 0,10 m/s per la categoria I di qualità dell'ambiente termico secondo la norma UNI EN 16798 (descritta nel Capitolo 2.1.1.1).

Si nota come sia la temperatura che la velocità media dell'aria restano pressoché simili ai valori ottenuti per l'unità VMC installata.

Si analizzano quindi graficamente i profili di temperatura e velocità dell'aria mediante il plottaggio dei *Contour*.

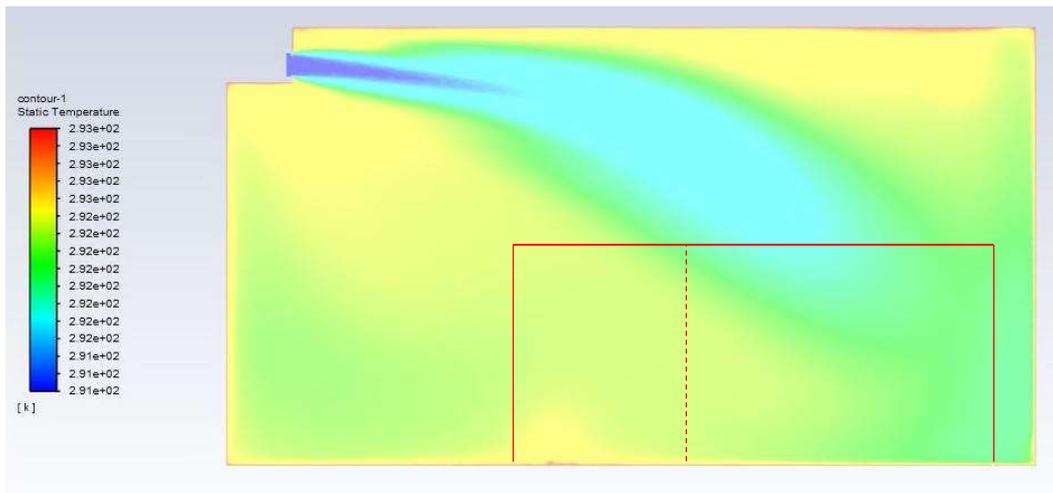


Figura 4.57 – Contour di temperatura dell'aria: piano x-y, $z = 4,6$ m



Figura 4.58 – Contour di temperatura dell'aria: piano z-y, $x = 2,0$ m

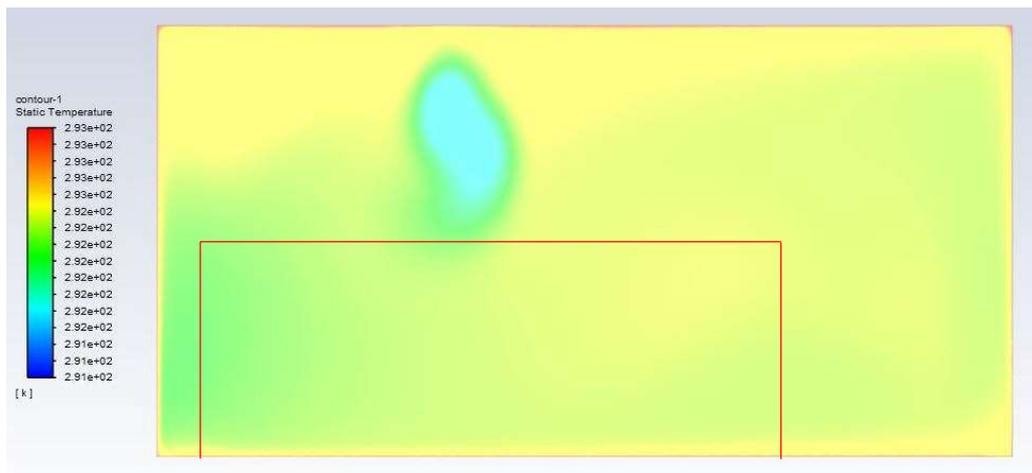


Figura 4.59 – Contour di temperatura dell'aria: piano z-y, $x = 3,5$ m

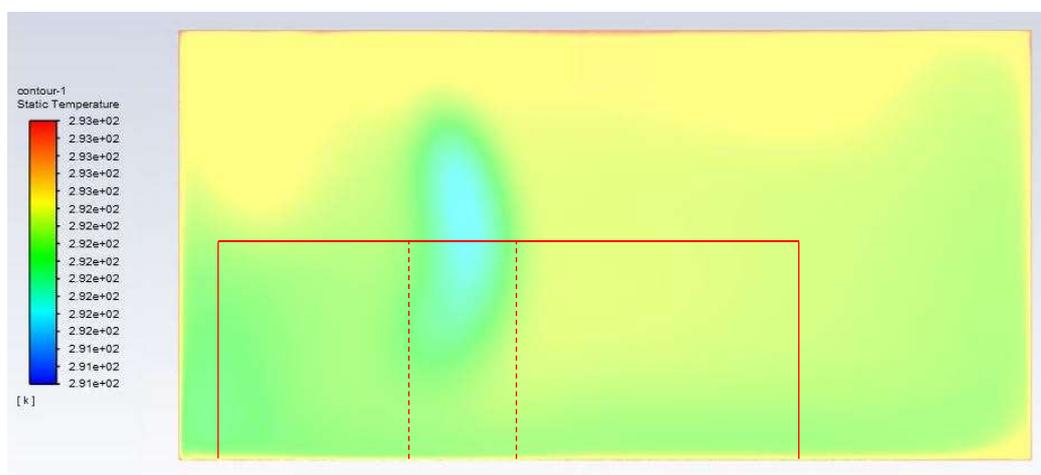


Figura 4.60 – Contour di temperatura dell'aria: piano z-y, $x = 5,0$ m

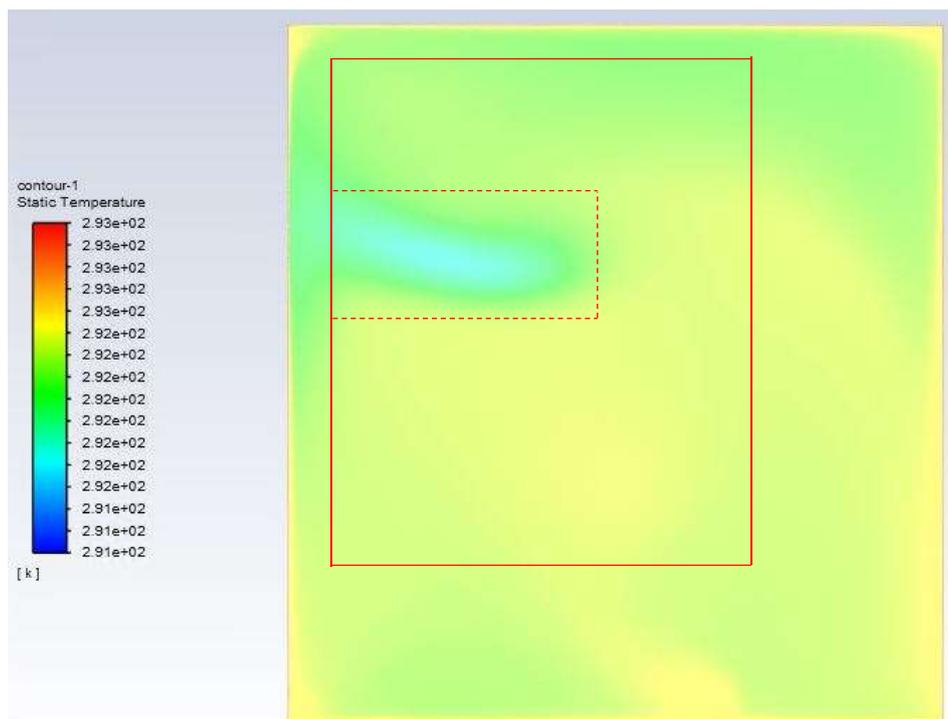


Figura 4.61 – Contour di temperatura dell'aria: piano x-z, $y = 1,7\text{ m}$

Dai report grafici si può osservare come gli studenti seduti in corrispondenza della griglia di immissione dell'unità VMC e nei pressi della parete opposta alla griglia stessa, ovvero la parete 2, risentono maggiormente dell'abbassamento di temperatura, anche se di circa $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, dovuto al flusso d'aria immesso; tale conclusione si può riscontrare dalle Figure 4.39, 4.43 e 4.45, dove la porzione di aula tra le linee tratteggiate rappresenta la zona dove si percepisce maggiormente l'abbassamento della temperatura dovuto al flusso d'aria immesso.

Rispetto però alla configurazione installata, con l'inclinazione di 10° del flusso immesso, una porzione maggiore di studenti risentono dell'abbassamento di temperatura, come si nota confrontando le Figure 4.39 e 4.57 e le Figure 4.45 e 4.61.

Si esaminano poi i contorni, o *Contour*, di velocità rispettivamente nei piani x-y, z-y e x-z. Vengono esaminati solamente i piani ritenuti significativi successivamente all'analisi dei *Contour* di temperatura.

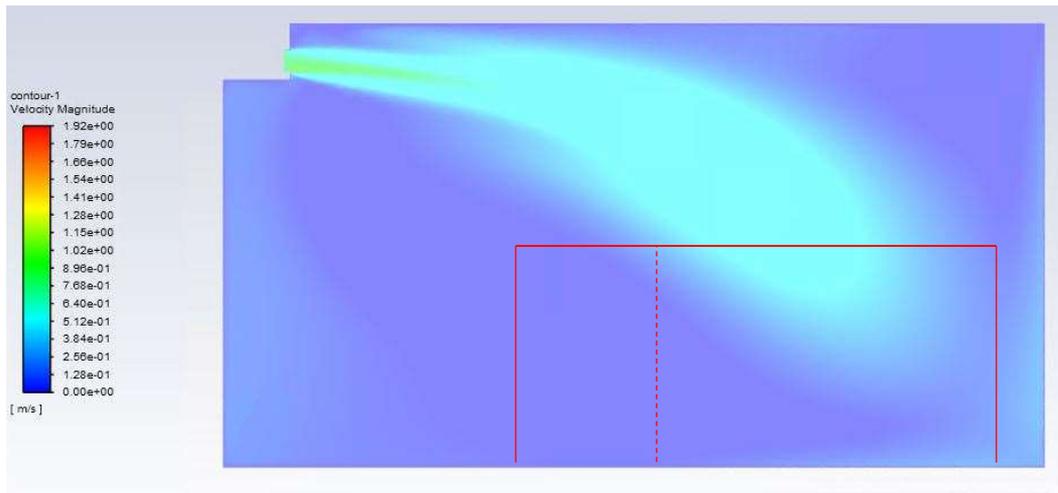


Figura 4.62 – Contour di velocità dell'aria: piano x-y, $z = 4,6$ m

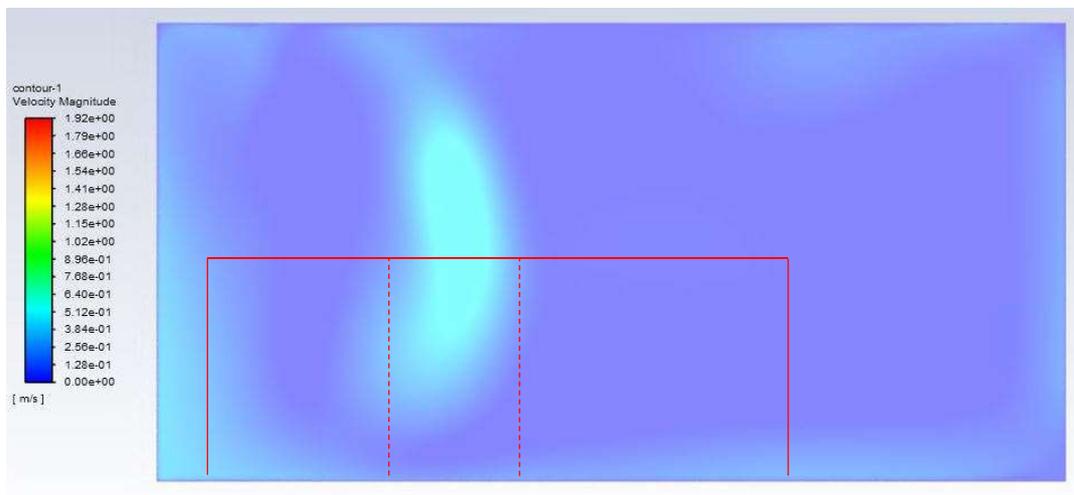


Figura 4.63 – Contour di velocità dell'aria: piano z-y, $x = 5,0$ m

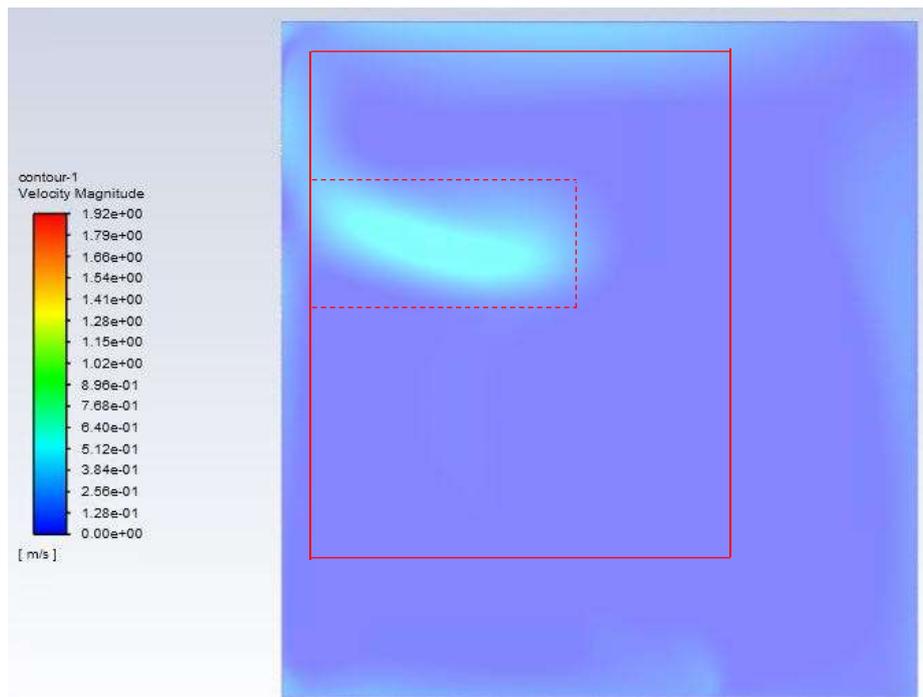


Figura 4.64 – Contour di velocità dell'aria: piano x-z, $y = 1,7$ m

Anche dai report grafici della velocità, così come riscontrato da quelli della temperatura, si può osservare come gli studenti seduti in corrispondenza della griglia di immissione dell'unità VMC e nei pressi della parete opposta alla griglia stessa, ovvero la parete 2, risentono maggiormente della velocità del flusso d'aria immesso; tale conclusione si può riscontrare dalle Figure 4.47, 4.48 e 4.49, dove la porzione di aula tra le linee tratteggiate rappresenta la zona dove si percepisce il flusso d'aria.

In particolare la velocità dell'aria in corrispondenza della superficie orizzontale critica evidenziata (Figura 4.49), a quota $y = 1,7$ m, assume valori maggiori di $0,40$ m/s, che sono ben al di sopra del limite minimo di qualità dell'aria imposto dalla UNI EN 16798 e pari a $0,21$ m/s, corrispondente alla categoria III, e maggiori di quelli ottenuti per la configurazione installata.

Quindi, rispetto alla configurazione installata, con l'inclinazione di 10° delle alette una porzione maggiore di studenti risentono del flusso d'aria immesso, come si nota confrontando le Figure 4.47 e 4.62, 4.48 e 4.63 e le Figure 4.49 e 4.64.

Inoltre si può notare come il flusso d'aria immesso tende a verticalizzare, come si vede dai *Contour* di temperatura e velocità perpendicolari all'asse x (rispettivamente con la coordinata x pari a $2,0$ m, $3,5$ m e $5,0$ m), favorendo un maggiore ricambio d'aria agli studenti presenti all'interno delle linee tratteggiate di Figura 4.64.

Per visualizzare i valori che temperatura e velocità dell'aria assumono all'altezza di $1,7$ m da terra si riportano i *Contour* delle due variabili con una scala dei valori locali, cioè relativi al piano di interesse.

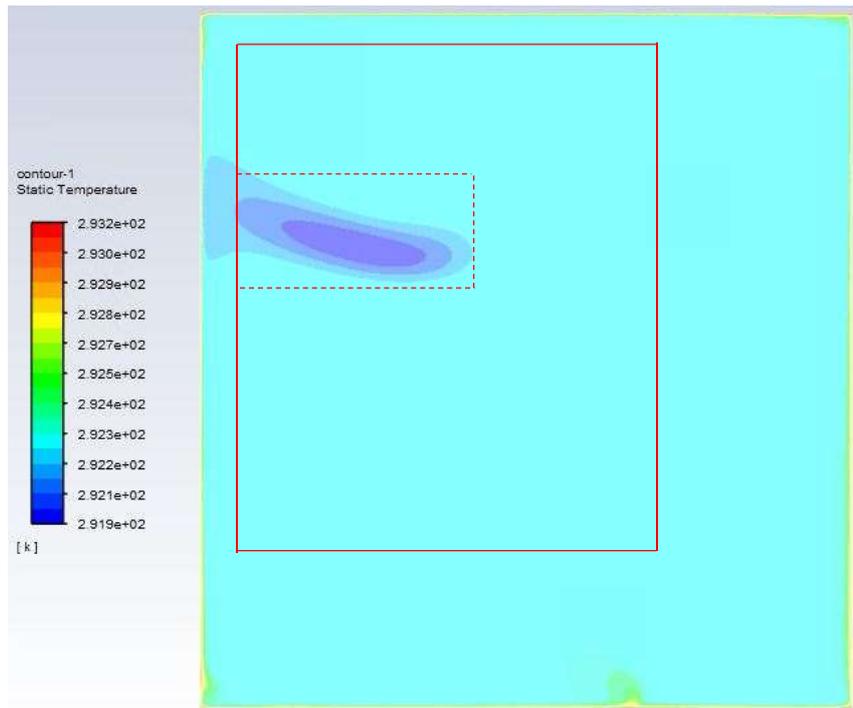


Figura 4.65 – Contour di temperatura dell'aria con scala locale: piano x-z, $y = 1,7$ m

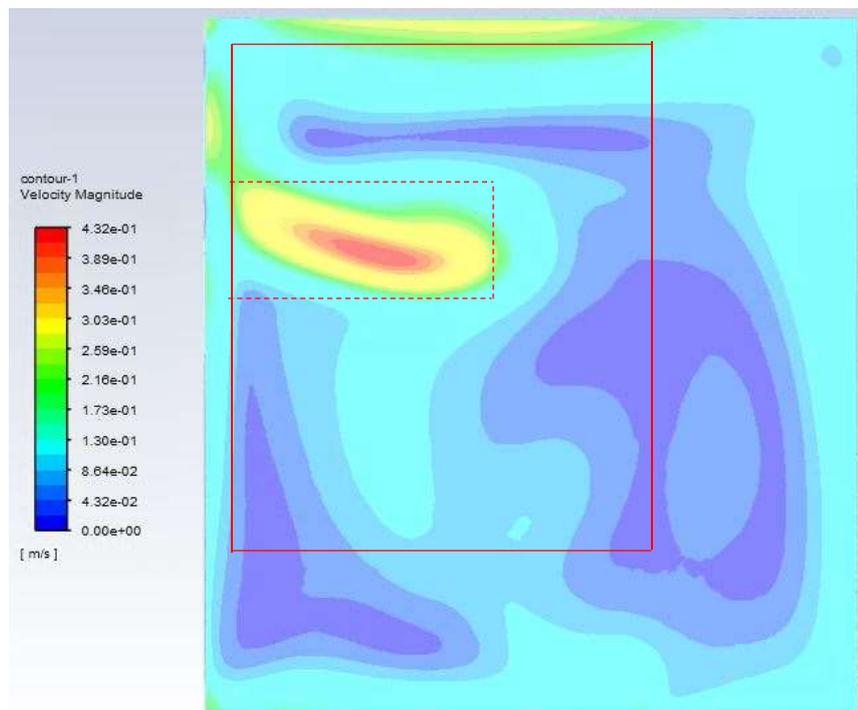


Figura 4.66 – Contour di velocità dell'aria con scala locale: piano x-z, $y = 1,7$ m

Nel piano orizzontale, ad un'altezza di 1,7 m da terra, si registrano una temperatura minima di 291,90 K ed una velocità massima dell'aria di 0,43 m/s. Rispetto alla configurazione

installata gli studenti risentono maggiormente del flusso d'aria immesso ma, in compenso, il sistema interessa una porzione maggiore di volume d'aria occupato, come già riscontrato dai precedenti *Contour* visualizzati, riuscendo quindi a diluire una maggior quantità di CO₂. Altro aspetto interessante da analizzare è l'andamento dei flussi d'aria mediante il plottaggio dei *Vectors*; in particolare è utile plottare i vettori delle velocità del flusso d'aria nel piano x-y ad una quota z = 4,6 m.

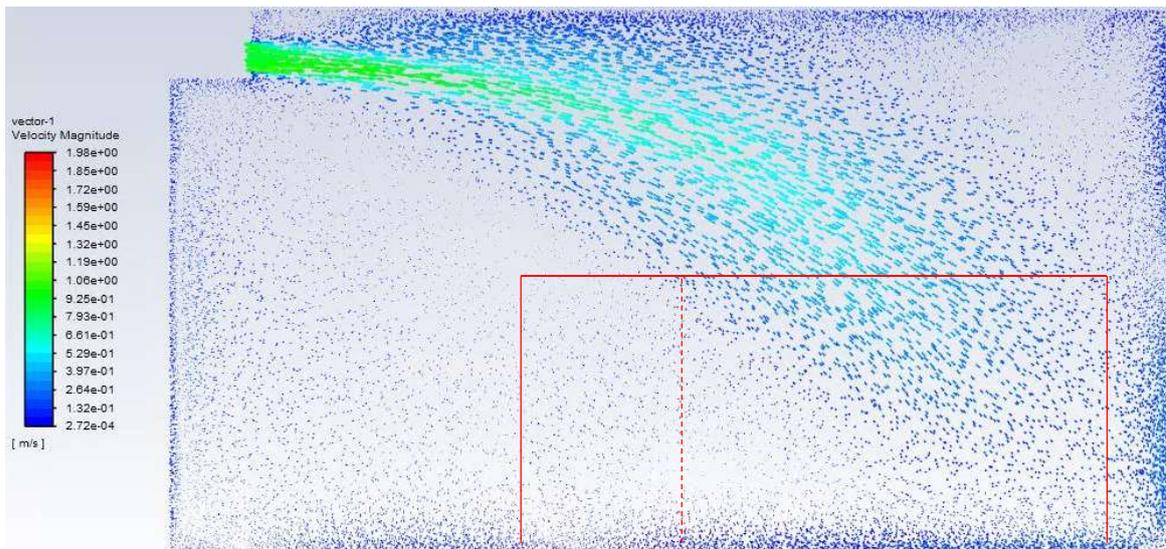


Figura 4.67 – *Vectors di velocità dell'aria: piano x-y, z = 4,6 m*

Si può riscontrare come il flusso d'aria tende a scendere, e quindi entrare nel volume occupato dagli studenti, nella parte posteriore dell'aula, per poi ricircolare andando verso la bocchetta di estrazione; mentre l'aria nella parte anteriore occupata dagli studenti rimane quasi ferma. Da tale risultato grafico si evince come il sistema di ventilazione installato sia in grado di diluire e rimuovere con maggiore efficacia gli inquinanti, quindi anche la CO₂, presenti nella parte posteriore dell'aula, mentre l'aria presente nella parte anteriore del volume occupato dagli studenti non viene diluita con la stessa efficacia in quanto le velocità dei flussi sono quasi nulle.

Comunque, rispetto alla configurazione originale, il flusso d'aria immesso interessa una porzione maggiore di studenti come si nota per i *Contour* precedentemente analizzati e dal confronto della precedente immagine con la 4.50.

Dai risultati grafici ottenuti della configurazione dell'unità VMC modificata ci si può aspettare un decadimento maggiore della CO₂ rispetto alla configurazione installata, proprio per il fatto che una maggiore porzione di studenti è interessata dal flusso d'aria immesso.

Di seguito vengono riportate delle *Pathline*, ovvero delle linee che rappresentano il percorso del flusso d'aria immesso, così da avere una rappresentazione tridimensionale del sistema in esame.

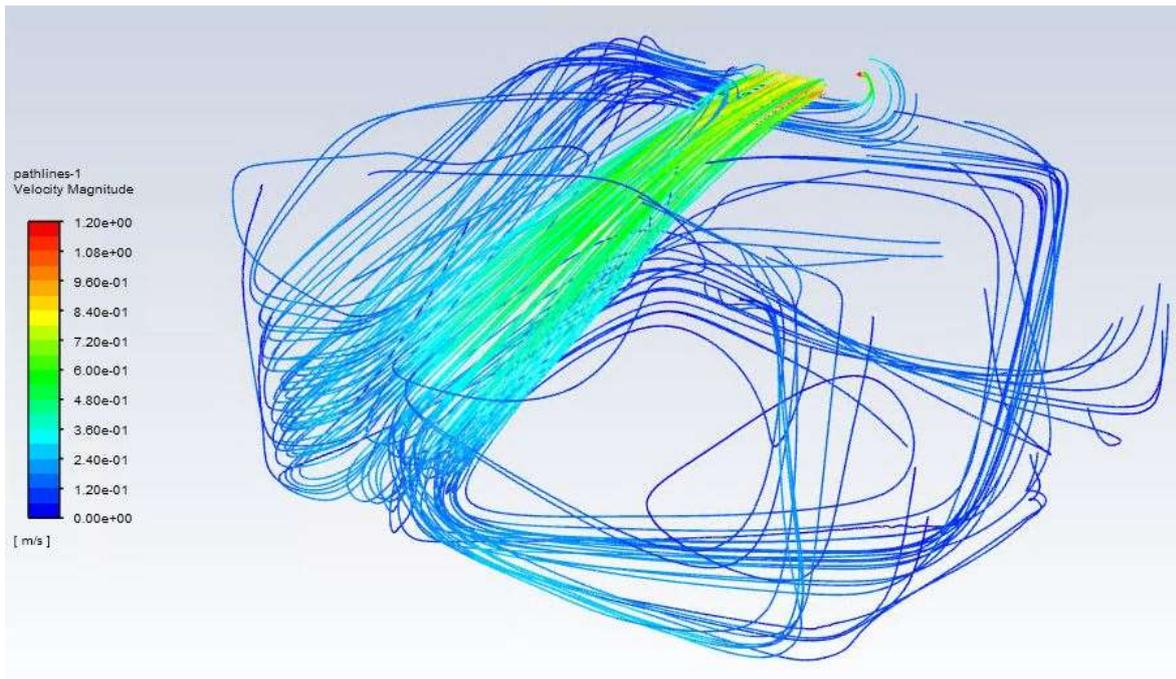


Figura 4.68 – Pathline di velocità dell'aria

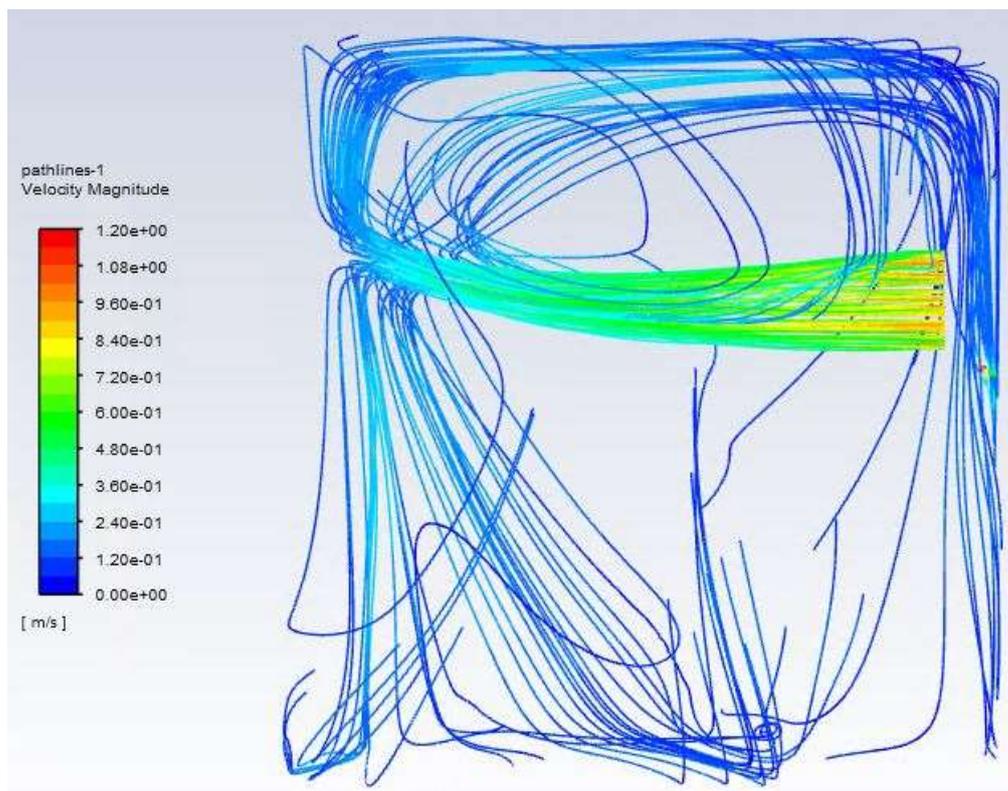


Figura 4.69 – Pathline di velocità dell'aria – vista dall'alto

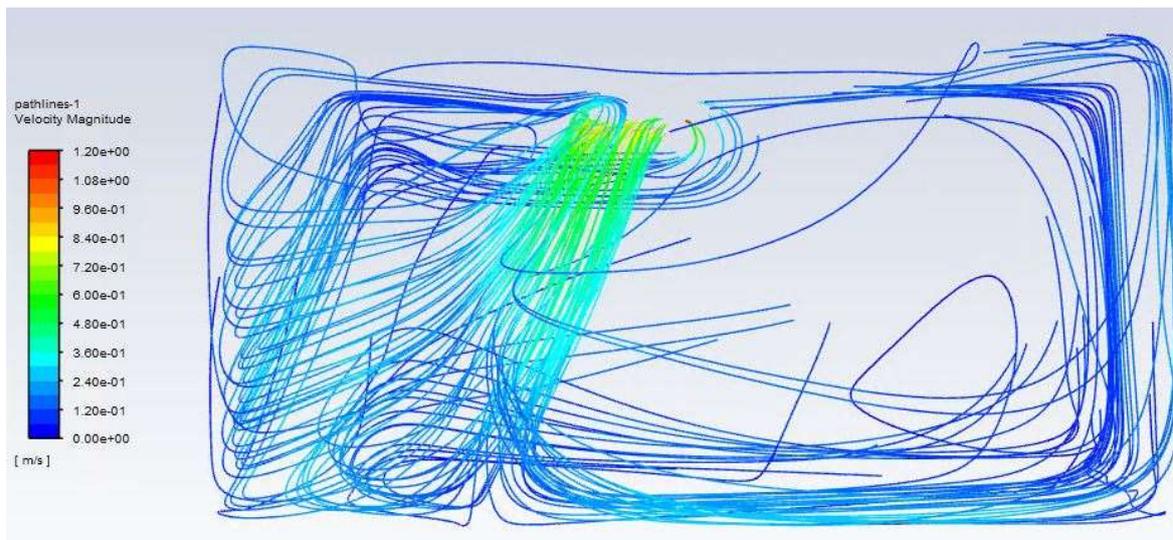


Figura 4.70 – Pathline di velocità dell’aria – vista frontale

Dalla rappresentazione tridimensionale della configurazione in esame si può notare come una maggior parte del flusso immesso interessa il volume degli studenti, rispetto alla configurazione installata, promuovendo quindi un ricambio d’aria più efficace.

4.6 Analisi unità VMC – Configurazione 3: angolo di mandata dell’aria a 20°

Una volta aver analizzato il comportamento dell’unità VMC con un’inclinazione del flusso di immissione dell’aria pari a 10°, si studia il comportamento della macchina apportando una diversa modifica.

La terza configurazione scelta, quindi, è caratterizzata da un’inclinazione delle alette, o, in modo equivalente, del flusso d’aria immesso, di 20° verso il basso.

In seguito quindi si valuteranno le prestazioni della terza configurazione scelta per la macchina VMC, analizzando l’aspetto termico e fluidodinamico nell’aula.

4.6.1 Setup di simulazione

Il setup delle impostazioni di calcolo restano identiche a quelle descritte per l’analisi termica e fluidodinamica dell’unità VMC installata nel Capitolo 4.4.1.

L’unico cambiamento apportato, come appena specificato, è l’inclinazione del flusso d’aria immesso di 20°, come si nota dalla seguente immagine.

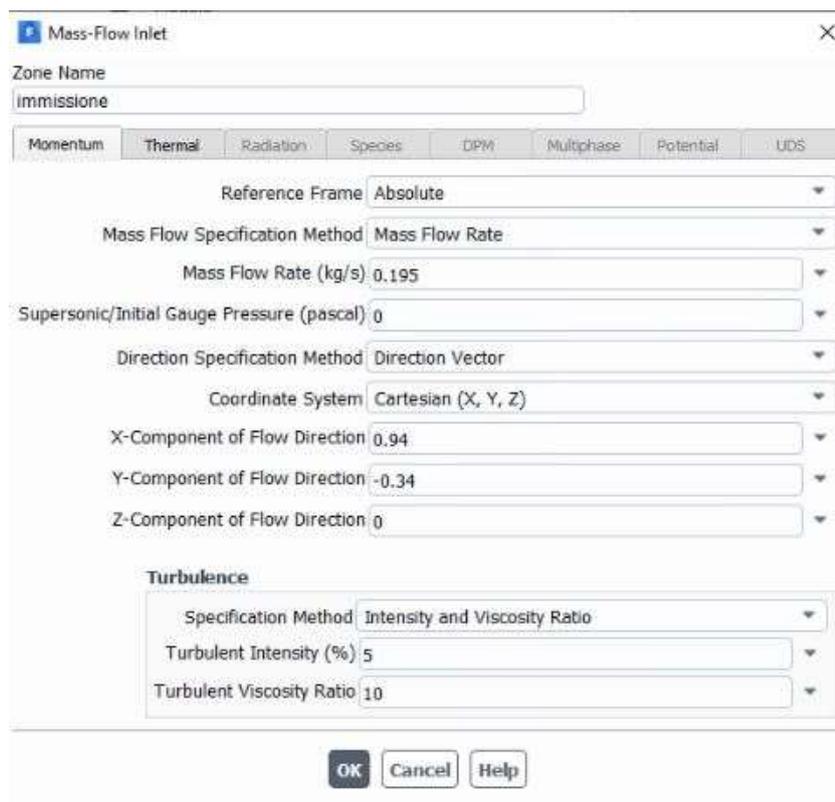


Figura 4.71 – Condizione al contorno immissione-Momentum

Per settare il flusso di immissione ad un'inclinazione di 20° è necessario specificare le componenti vettoriali della direzione del flusso rispettivamente a 0,94 per la direzione x e a -0,34 per la direzione y.

Come detto il resto delle impostazioni restano invariate; si procede quindi con l'avvio della simulazione.

4.6.2 Analisi dei risultati

Una volta conclusa la simulazione si analizzano i risultati degli aspetti termici e fluidodinamici della configurazione 3 dell'unità di ventilazione meccanica controllata, sia dal punto di vista numerico che grafico.

Sotto il profilo numerico, nel volume di controllo degli studenti, si ha una temperatura media dell'aria di 292,29 K, cioè circa 19°C , ed una velocità media dell'aria di 0,081 m/s, valore che risulta essere al di sotto del limite invernale di 0,10 m/s per la categoria I di qualità dell'ambiente termico secondo la norma UNI EN 16798 (descritta nel Capitolo 2.1.1.1).

Si nota come sia la temperatura che la velocità media dell'aria restano pressoché simili ai valori ottenuti per l'unità VMC installata.

Si analizzano quindi graficamente i profili di temperatura e velocità dell'aria mediante il plottaggio dei *Contour*.

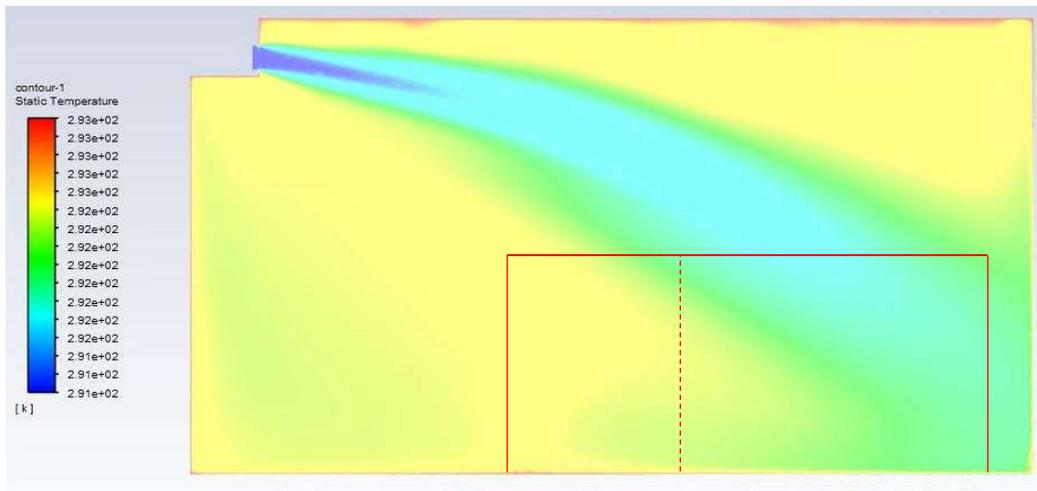


Figura 4.72 – Contour di temperatura dell'aria: piano x-y, $z = 4,6$ m

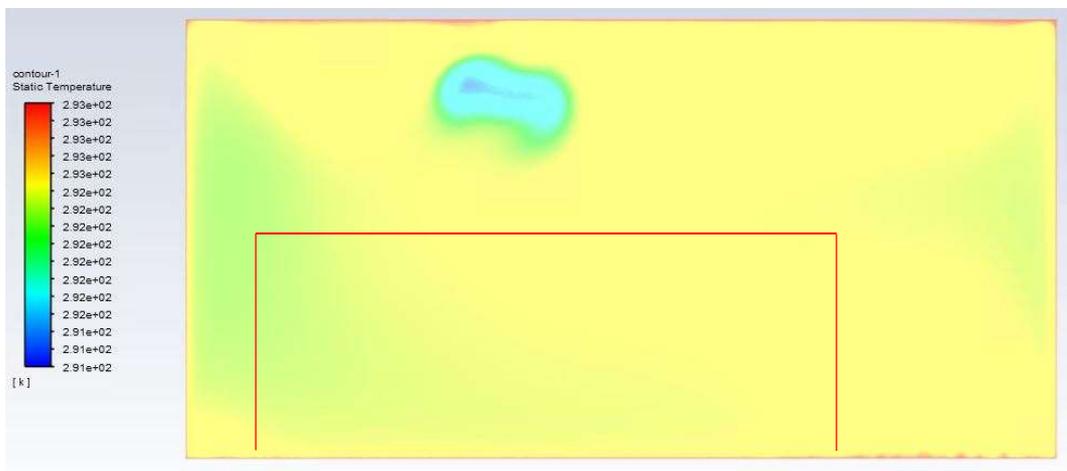


Figura 4.73 – Contour di temperatura dell'aria: piano z-y, $x = 2,0$ m

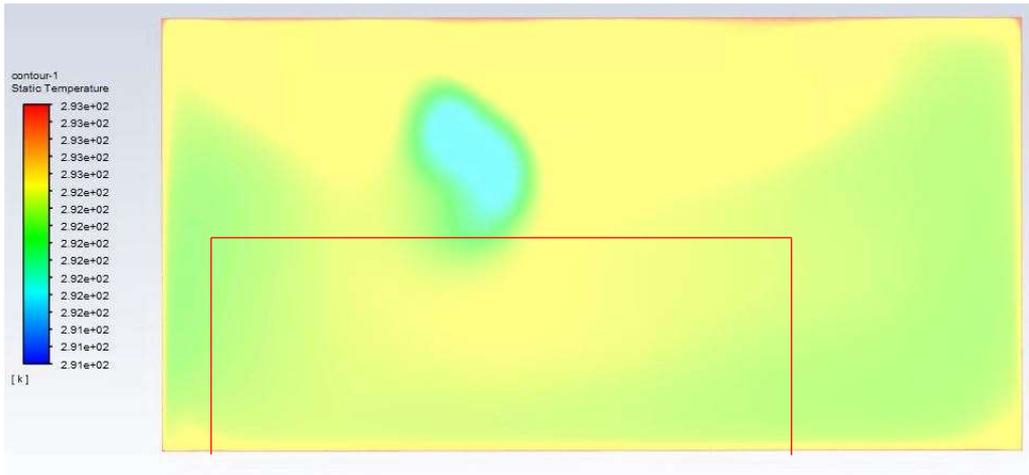


Figura 4.74 – Contour di temperatura dell'aria: piano z-y, $x = 3,5$ m

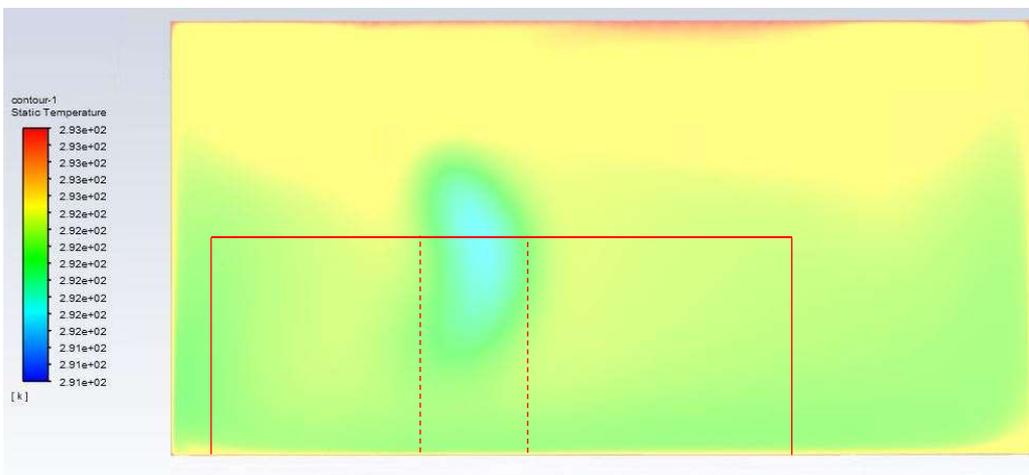


Figura 4.75 – Contour di temperatura dell'aria: piano z-y, $x = 5,0$ m

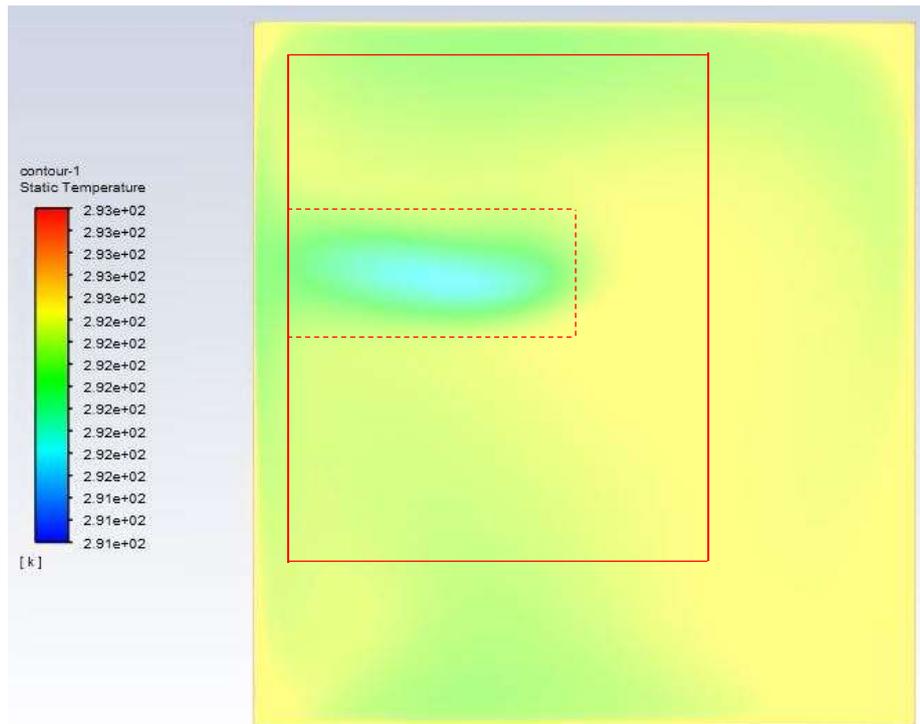


Figura 4.76 – Contour di temperatura dell'aria: piano x-z, $y = 1,7\text{ m}$

Dai report grafici si può osservare come gli studenti seduti in corrispondenza della griglia di immissione dell'unità VMC, risentono maggiormente dell'abbassamento di temperatura, anche se di circa $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, dovuto al flusso d'aria immesso, così come accade anche per le altre configurazioni; tale conclusione si può riscontrare dalle Figure 4.72, 4.75 e 4.76, dove la porzione di aula tra le linee tratteggiate rappresenta la zona dove si percepisce maggiormente l'abbassamento della temperatura dovuto al flusso d'aria immesso.

Rispetto però alla configurazione con l'inclinazione di 10° del flusso immesso, gli studenti risentono maggiormente dell'abbassamento di temperatura, come si nota confrontando le Figure 4.57 e 4.72 e le Figure 4.61 e 4.76.

Si esaminano poi i contorni, o *Contour*, di velocità rispettivamente nei piani x-y, z-y e x-z. Vengono esaminati solamente i piani ritenuti significativi successivamente all'analisi dei *Contour* di temperatura.

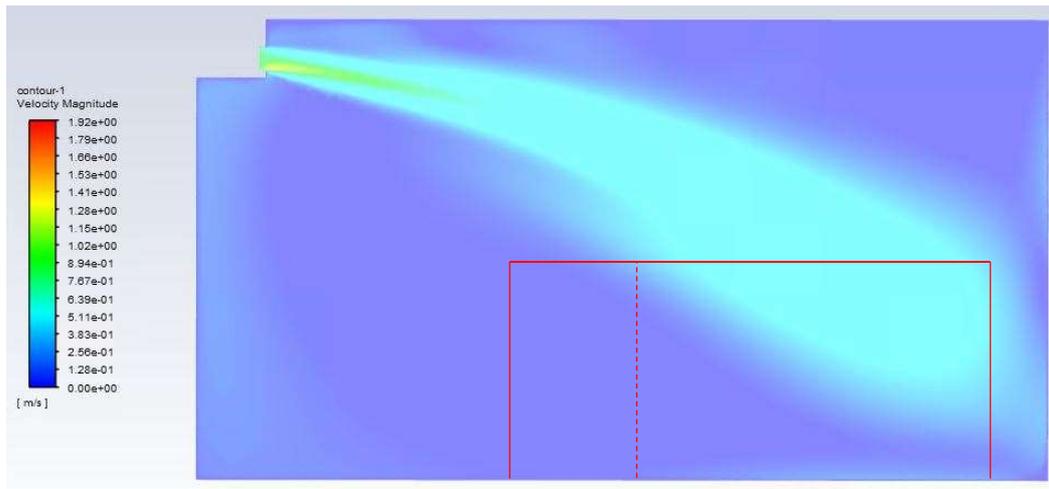


Figura 4.77 – Contour di velocità dell'aria: piano x-y, $z = 4,6$ m

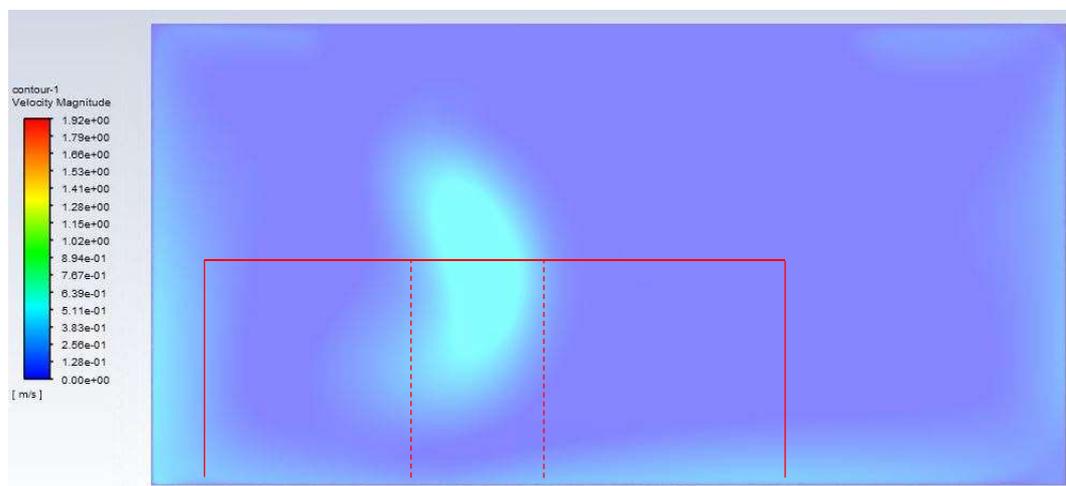


Figura 4.78 – Contour di velocità dell'aria: piano z-y, $x = 5,0$ m

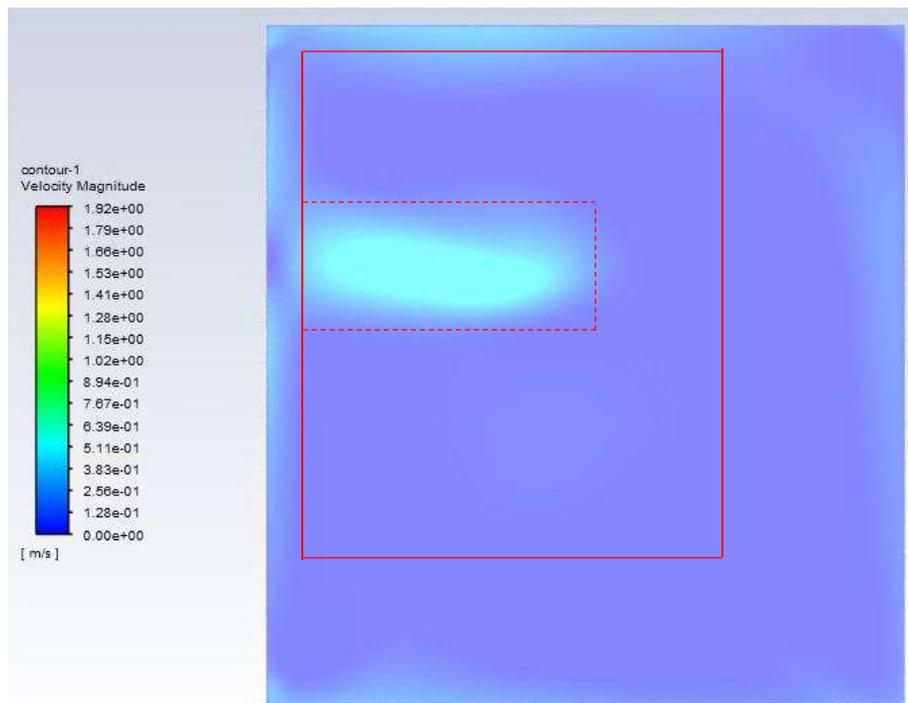


Figura 4.79 – Contour di velocità dell'aria: piano x-z, $y = 1,7$ m

Anche dai report grafici della velocità, così come riscontrato da quelli della temperatura, si può osservare come gli studenti seduti in corrispondenza della griglia di immissione dell'unità VMC e nei pressi della parete opposta alla griglia stessa, ovvero la parete 2, risentono maggiormente della velocità del flusso d'aria immesso; tale conclusione si può riscontrare dalle Figure 4.77, 4.78 e 4.79, dove la porzione di aula tra le linee tratteggiate rappresenta la zona dove si percepisce il flusso d'aria immesso.

In particolare la velocità dell'aria in corrispondenza della superficie orizzontale critica evidenziata (Figura 4.79), a quota $y = 1,7$ m, assume valori di circa 0,50 m/s, che sono ben al di sopra del limite minimo di qualità dell'aria imposto dalla UNI EN 16798 e pari a 0,21 m/s, corrispondente alla categoria III, e maggiori di quelli ottenuti per la configurazione installata.

Quindi, rispetto alla configurazione con l'inclinazione di 10° delle alette, gli studenti risentono maggiormente del flusso d'aria immesso, come si nota confrontando le Figure 4.62 e 4.77, 4.63 e 4.78 e le Figure 4.64 e 4.79.

Inoltre si può notare come il flusso d'aria immesso tende a verticalizzare, come si vede dai *Contour* di temperatura e velocità perpendicolari all'asse x (rispettivamente con la coordinata x pari a 2,0 m, 3,5 m e 5,0 m), favorendo un maggiore ricambio d'aria agli studenti presenti all'interno delle linee tratteggiate di Figura 4.79.

Per visualizzare i valori che temperatura e velocità dell'aria assumono all'altezza di 1,7 m da terra si riportano i *Contour* delle due variabili con una scala dei valori locali, cioè relativi al piano di interesse.

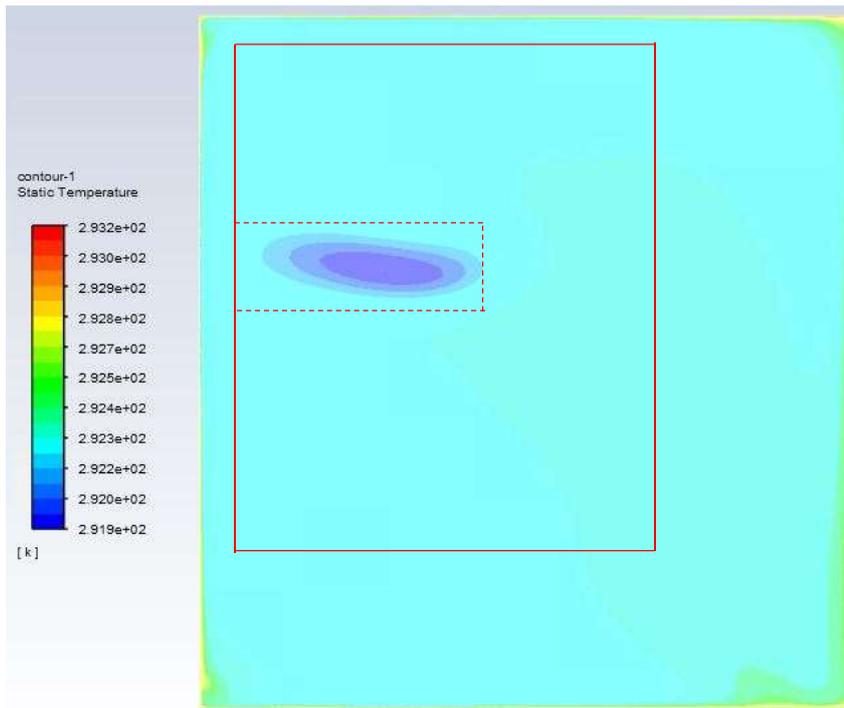


Figura 4.80 – Contour di temperatura dell'aria con scala locale: piano x-z, $y = 1,7$ m

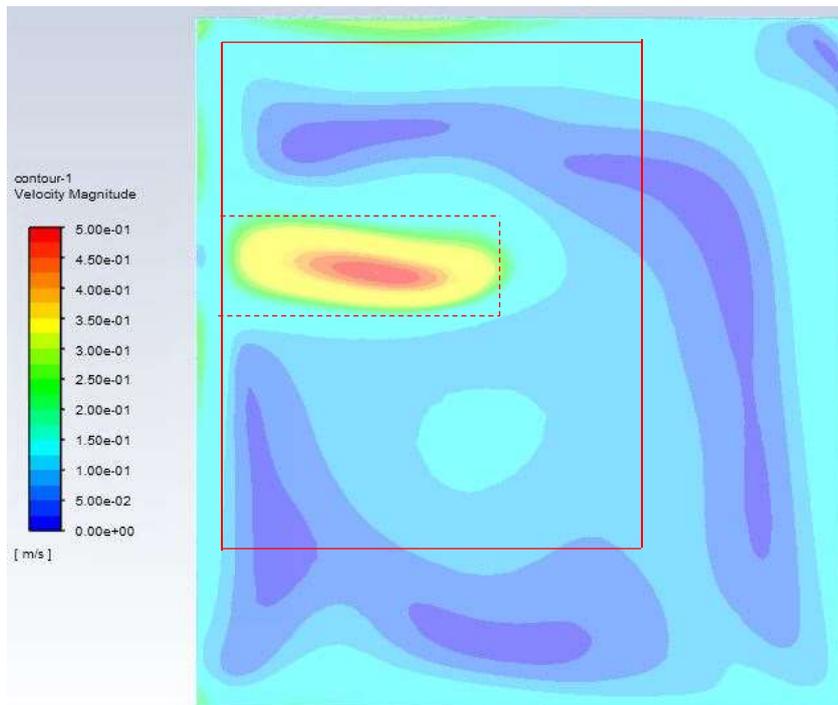


Figura 4.81 – Contour di velocità dell'aria con scala locale: piano x-z, $y = 1,7$ m

Nel piano orizzontale, ad un'altezza di 1,7 m da terra, si registrano una temperatura minima di 291,90 K ed una velocità massima dell'aria di 0,50 m/s. Rispetto alla configurazione 2,

ovvero con inclinazione delle alette di 10° , gli studenti risentono maggiormente del flusso d'aria immesso, come già riscontrato dai precedenti *Contour* visualizzati. Inoltre la porzione d'aria interessata dal flusso di rinnovo diminuisce rispetto alla configurazione precedente; tale risultato si ha in conseguenza dell'eccessiva inclinazione del flusso immesso.

Altro aspetto interessante da analizzare è l'andamento dei flussi d'aria mediante il plottaggio dei *Vectors*; in particolare è utile plottare i vettori delle velocità del flusso d'aria nel piano x-y ad una quota $z = 4,6$ m.

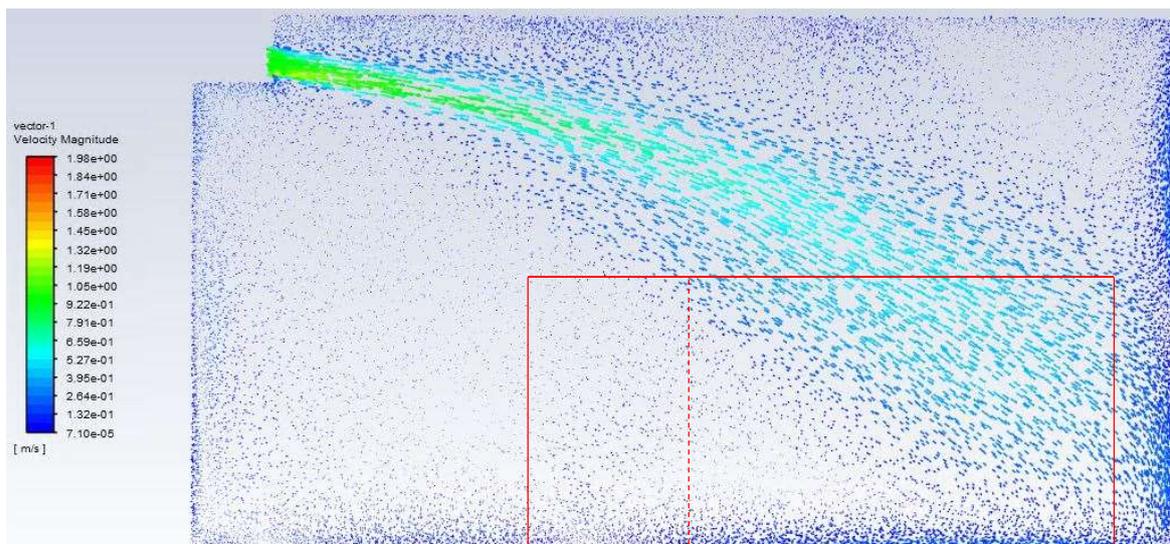


Figura 4.82 – *Vectors di velocità dell'aria: piano x-y, $z = 4,6$ m*

Si può riscontrare come il flusso d'aria tende a scendere, e quindi entrare nel volume occupato dagli studenti, nella parte posteriore dell'aula, per poi ricircolare andando verso la bocchetta di estrazione; mentre l'aria nella parte anteriore occupata dagli studenti rimane quasi ferma. Da tale risultato grafico si evince come il sistema di ventilazione installato sia in grado di diluire e rimuovere con maggiore efficacia gli inquinanti, quindi anche la CO_2 , presenti nella parte posteriore dell'aula, mentre l'aria presente nella parte anteriore del volume occupato dagli studenti non viene diluita con la stessa efficacia in quanto le velocità dei flussi sono quasi nulle.

Tuttavia, rispetto alla configurazione 2, il flusso d'aria immesso arriva in maniera più diretta sugli studenti, i quali sono investiti da aria a velocità più alte.

Dai risultati grafici ottenuti della configurazione dell'unità VMC modificata ci si può aspettare un decadimento maggiore della CO_2 rispetto alla configurazione installata, ma inferiore rispetto alla configurazione 2.

Di seguito vengono riportate delle *Pathline*, ovvero delle linee che rappresentano il percorso del flusso d'aria immesso, così da avere una rappresentazione tridimensionale del sistema in esame.

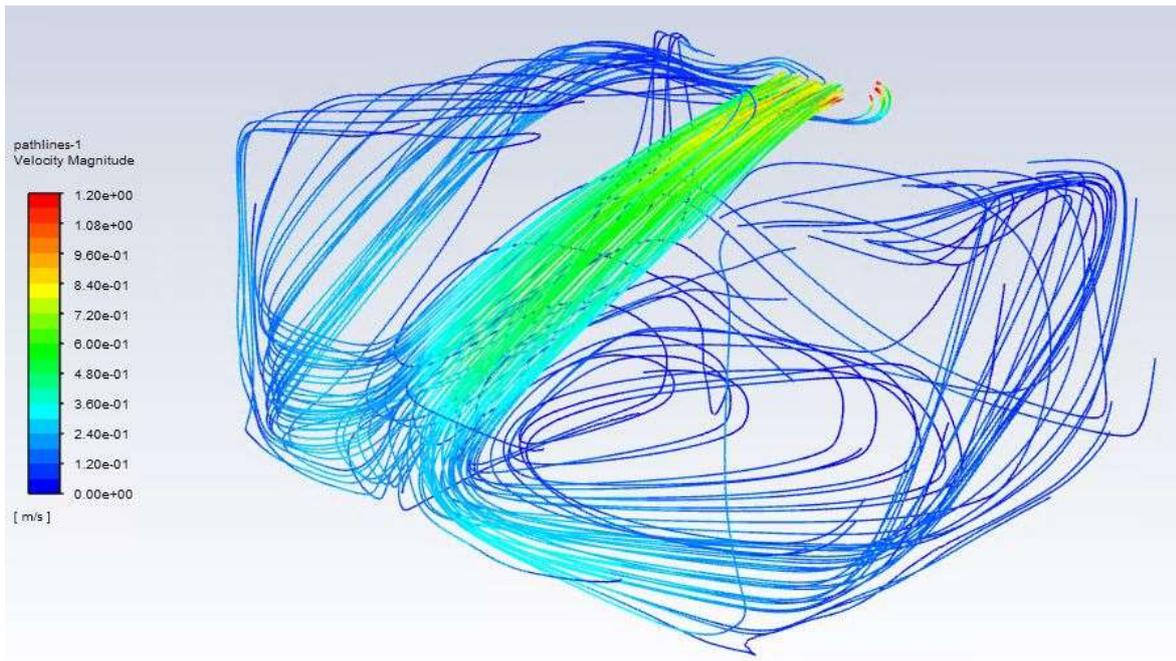


Figura 4.83 – Pathline di velocità dell'aria

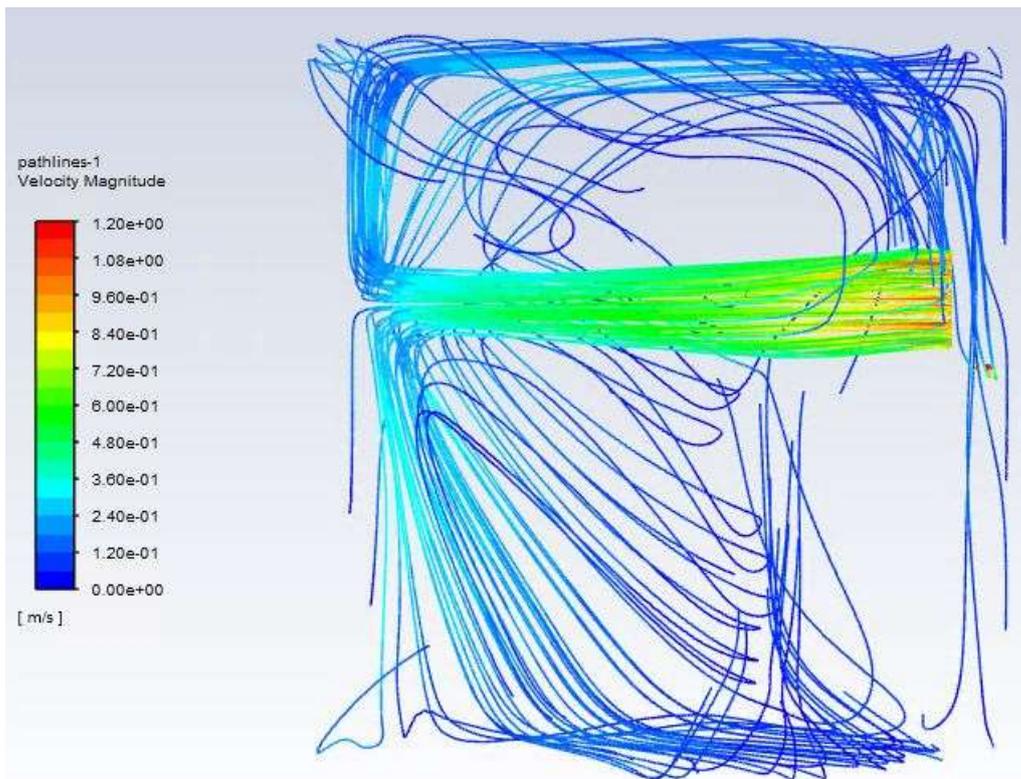


Figura 4.84 – Pathline di velocità dell'aria – vista dall'alto

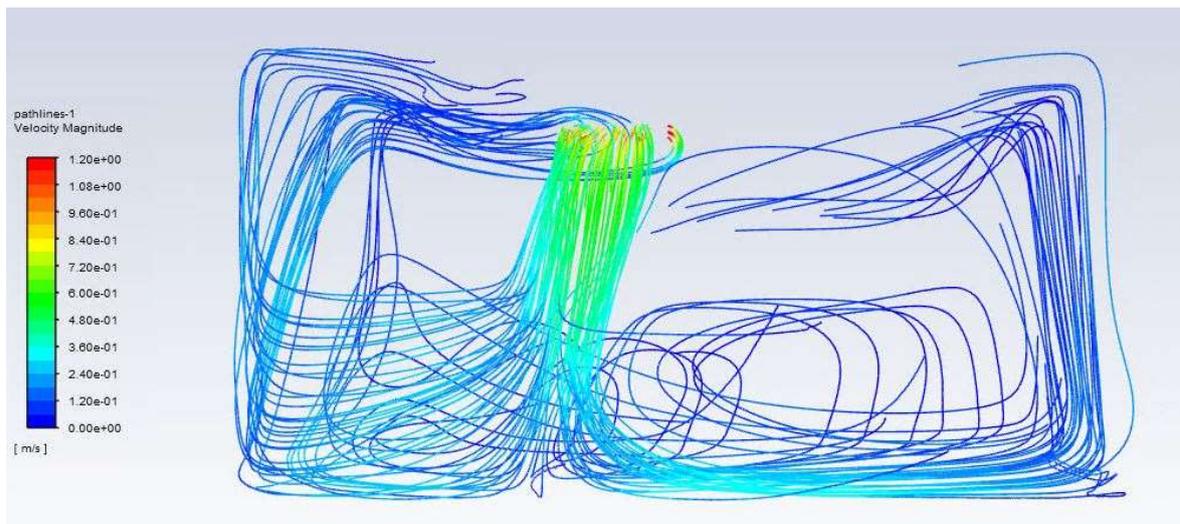


Figura 4.85 – Pathline di velocità dell'aria – vista frontale

Dalla rappresentazione tridimensionale della configurazione in esame si può notare come il flusso d'aria immesso investe il volume di controllo con velocità maggiori, rispetto alla configurazione 2, generando delle situazioni di maggior discomfort per gli studenti.

4.7 Valutazione delle analisi e scelta della configurazione migliore dell'unità VMC

Dopo aver analizzato la configurazione installata dell'unità di ventilazione meccanica controllata e le due successive ottenute variando l'angolo di inclinazione del flusso immesso, ovvero agendo sull'inclinazione delle alette della griglia, si procede con una valutazione delle analisi effettuate al fine di scegliere la configurazione che garantisca una migliore efficienza del sistema di ventilazione.

Dal confronto dei *Contour* di temperatura e velocità dell'aria nel piano x-y ad una quota $z = 4,6$ m delle tre configurazioni, rispettivamente osservabili dalle Figure 4.39, 4.57 e 4.72 e dalle Figure 4.47, 4.62 e 4.77, si deduce che la configurazione migliore è la 2; tale tesi può essere sostenuta dal fatto che nella configurazione 2 il flusso d'aria immesso interessa una parte maggiore dello spazio occupato dagli studenti rispetto alla configurazione installata ma con velocità dell'aria minori rispetto alla terza opzione, nella quale gli studenti sono investiti da un flusso più diretto e, quindi, con velocità maggiori.

Lo stesso risultato può essere osservato dal plottaggio dei *Vectors*, o vettori di velocità, nello stesso piano, dalle Figure 4.52, 4.67 e 4.82.

Analizzando poi i *Contour* di temperatura e velocità nel piano x-z ad una quota $y = 1,7$ m, corrispondente in via approssimativa all'altezza degli studenti, con una scala dei valori dei parametri rapportata alle quantità minima e massima nel medesimo piano, si può osservare

come nella configurazione 2 si hanno valori di temperatura minima e velocità massima, rispettivamente pari a 291,90 K e 0,43 m/s, compresi tra i valori degli stessi parametri nella configurazione installata e nella terza, rispettivamente pari a 292,10 K e 0,34 m/s e 291,90 K e 0,50 m/s. Inoltre si osserva anche come nella seconda configurazione il flusso d'aria immesso interessa una maggiore porzione di volume occupato dagli studenti; nella configurazione installata il flusso d'aria è indirizzato per lo più nella parete opposta dell'unità VMC, ricambiando con minore efficacia l'aria esausta del volume di controllo, invece nella terza opzione il flusso d'aria immesso, a causa della sua elevata inclinazione, risulta essere troppo diretto investendo, con velocità più alte, una porzione minore di volume degli studenti.

Tutte le osservazioni fatte si possono riscontrare osservando i report tridimensionali, o *Pathline*, del flusso d'aria immesso dalle tre configurazioni, i quali permettono di avere un quadro grafico complessivo dei sistemi analizzati.

Dopo aver analizzato e valutato le tre configurazioni dell'unità VMC trattata si conclude che la migliore risulta essere la seconda, ovvero l'opzione con l'inclinazione delle alette della griglia di immissione di 10° verso il basso.

4.8 Analisi unità VMC – Miglioramento della configurazione 2

Una volta aver analizzato il comportamento dell'unità VMC installata nell'aula e delle due ulteriori configurazioni ottenute variando l'inclinazione delle alette della griglia di immissione ed aver successivamente individuato, nella seconda opzione, la migliore in termini di efficacia della ventilazione, si cerca di migliorarne le prestazioni apportando delle modifiche all'unità stessa.

Le modifiche non devono però riguardare, come specificato in precedenza, la variazione della portata d'aria o dell'efficienza dello scambiatore di calore in quanto sono dei parametri da mantenere invariati ai fini dell'individuazione di un eventuale miglioramento.

Alla luce di quanto appena detto la modifica che viene apportata alla configurazione 2 dell'unità VMC riguarda la tipologia, o configurazione, della griglia di immissione dell'aria. Viene quindi adottata una griglia come quella in Figura 4.86, formata da due filari: il primo, quello posteriore, composto da alette orizzontali inclinate di 10° (come nella configurazione 2), mentre il secondo, quello anteriore, composto da alette verticali orientabili per metà verso destra e per l'altra metà verso sinistra, in modo da garantire una distribuzione più uniforme del flusso d'aria. L'inclinazione delle alette verticali verrà specificata nel setup di simulazione.



Figura 4.86 – Griglia di immissione regolabile a doppio filare

In seguito quindi si valuteranno le prestazioni della configurazione 2 della macchina VMC, con la modifica apportata alla bocchetta di immissione, analizzando l'aspetto termico e fluidodinamico nell'aula.

4.8.1 Setup di simulazione

Si precisa che prima di passare al setup delle impostazioni di simulazione si è modificata la geometria dell'aula separando in due parti uguali la superficie di immissione del plenum, così da poter orientare una parte del flusso verso la parete 1 dell'aula, mediante la superficie denominata "immissione_1", e una parte del flusso verso la parete 3 dell'aula, mediante la superficie denominata "immissione_2".

Il setup delle impostazioni di calcolo restano identiche a quelle descritte per l'analisi termica e fluidodinamica dell'unità VMC installata nel Capitolo 4.4.1.

L'unico cambiamento apportato, come prima specificato, è l'inclinazione del flusso d'aria immesso, come si nota dalle seguenti immagini.

Mass-Flow Inlet ✕

Zone Name
immissione_1

Momentum
 Thermal
 Radiation
 Species
 DPM
 Multiphase
 Potential
 UDS

Reference Frame: Absolute

Mass Flow Specification Method: Mass Flow Rate

Mass Flow Rate (kg/s): 0,0975

Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal): 0

Direction Specification Method: Direction Vector

Coordinate System: Cartesian (X, Y, Z)

X-Component of Flow Direction: 0,98

Y-Component of Flow Direction: -0,17

Z-Component of Flow Direction: -0,09

Turbulence

Specification Method: Intensity and Viscosity Ratio

Turbulent Intensity (%): 5

Turbulent Viscosity Ratio: 10

Figura 4.87 – Condizione al contorno immissione_1-Momentum

Mass-Flow Inlet ✕

Zone Name
immissione_2

Momentum
 Thermal
 Radiation
 Species
 DPM
 Multiphase
 Potential
 UDS

Reference Frame: Absolute

Mass Flow Specification Method: Mass Flow Rate

Mass Flow Rate (kg/s): 0,0975

Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal): 0

Direction Specification Method: Direction Vector

Coordinate System: Cartesian (X, Y, Z)

X-Component of Flow Direction: 0,98

Y-Component of Flow Direction: -0,17

Z-Component of Flow Direction: 0,09

Turbulence

Specification Method: Intensity and Viscosity Ratio

Turbulent Intensity (%): 5

Turbulent Viscosity Ratio: 10

Figura 4.88 – Condizione al contorno immissione_2-Momentum

Il flusso in uscita dalla superficie “immissione_1” è caratterizzato da una portata pari alla metà di quella totale e da un’inclinazione di 10° verso il basso e di 5° verso la parete 1 dell’aula.

Il flusso in uscita dalla superficie “immissione_2” è caratterizzato da una portata pari alla metà di quella totale e da un’inclinazione di 10° verso il basso e di 5° verso la parete 3 dell’aula.

Come detto il resto delle impostazioni restano invariate; si procede quindi con l’avvio della simulazione.

4.8.2 Analisi dei risultati

Una volta conclusa la simulazione si analizzano i risultati degli aspetti termici e fluidodinamici dell’unità di ventilazione meccanica controllata, sia dal punto di vista numerico che grafico.

Sotto il profilo numerico, nel volume di controllo degli studenti, si ha una temperatura media dell’aria di 292,30 K, cioè circa 19 °C, ed una velocità media dell’aria di 0,076 m/s, valore che risulta essere al di sotto del limite invernale di 0,10 m/s per la categoria I di qualità dell’ambiente termico secondo la norma UNI EN 16798 (descritta nel Capitolo 2.1.1.1).

Si nota un leggero miglioramento sia per quanto riguarda la temperatura media sia per la velocità media dell’aria rispetto alla configurazione 2.

Si analizzano quindi graficamente i profili di temperatura e velocità dell’aria mediante il plottaggio dei *Contour*.



Figura 4.89 – Contour di velocità dell’aria: piano z-y, $x = 2,0$ m

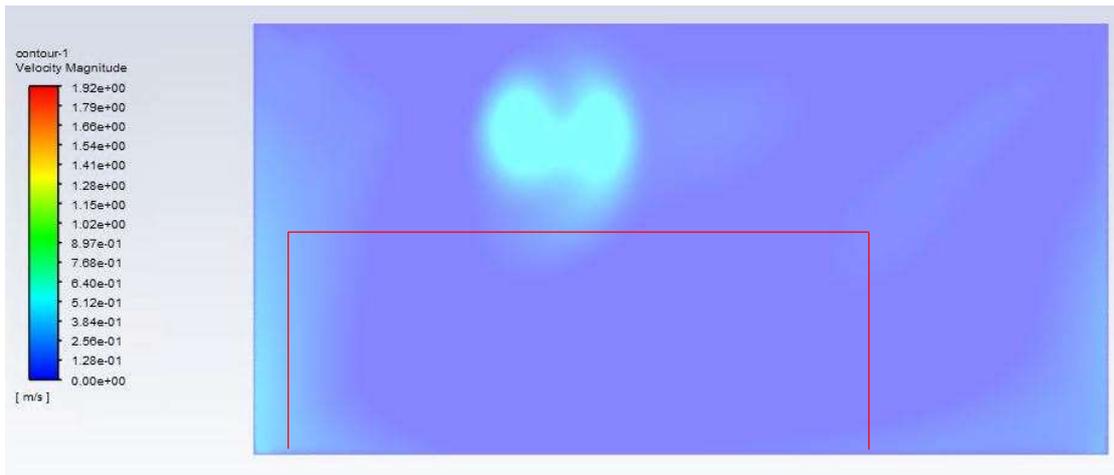


Figura 4.90 – Contour di velocità dell'aria: piano z-y, $x = 3,5\text{ m}$

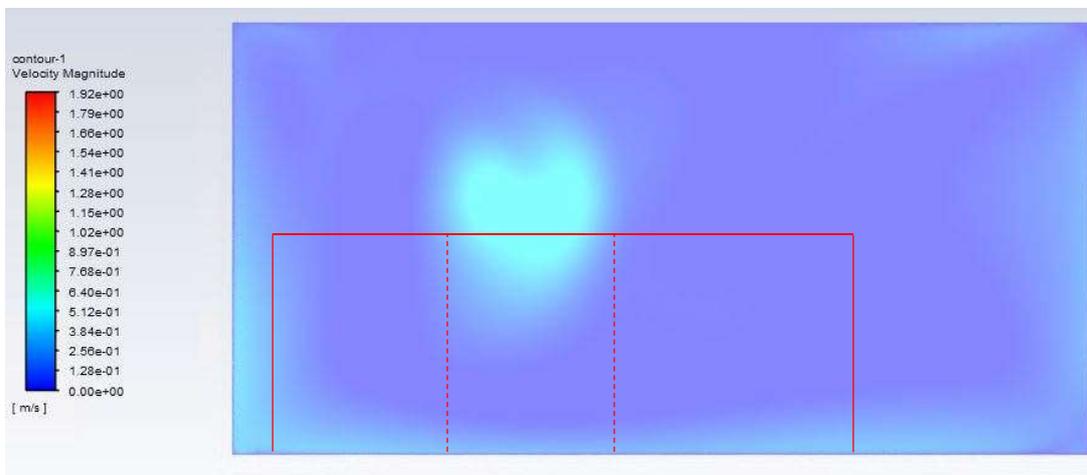


Figura 4.91 – Contour di velocità dell'aria: piano z-y, $x = 5,0\text{ m}$

Osservando i tre *Contour* si nota come il flusso d'aria tende ad essere più orizzontale rispetto al flusso della configurazione 2, interessando una porzione maggiore di spazio occupato dagli studenti, come si nota dal confronto tra la Figure 4.63 e 4.91.

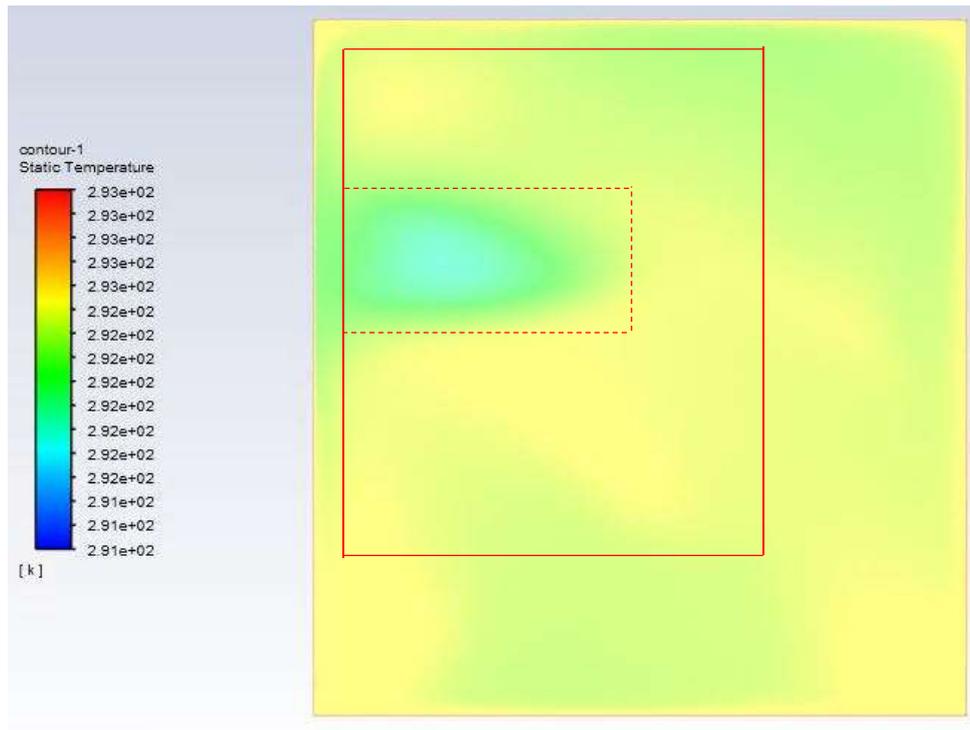


Figura 4.92– Contour di temperatura dell'aria: piano x-z, $y = 1,7$ m

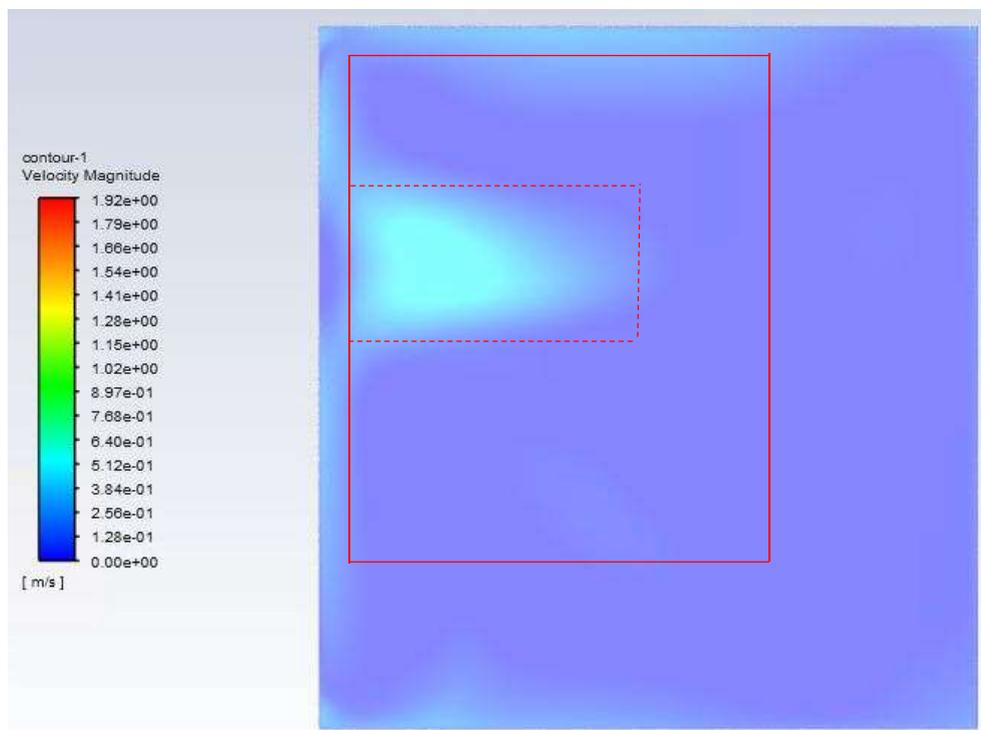


Figura 4.93 – Contour di velocità dell'aria: piano x-z, $y = 1,7$ m

Osservando i due *Contour* si nota come il flusso d'aria immesso interessa una porzione maggiore di spazio occupato dagli studenti rispetto al flusso della configurazione 2, come si nota dal confronto tra la Figure 4.61 e 4.92 e tra le Figure 4.64 e 4.93.

Per visualizzare i valori che temperatura e velocità dell'aria assumono all'altezza di 1,7 m da terra si riportano i *Contour* delle due variabili con una scala dei valori locali, cioè relativi al piano di interesse.

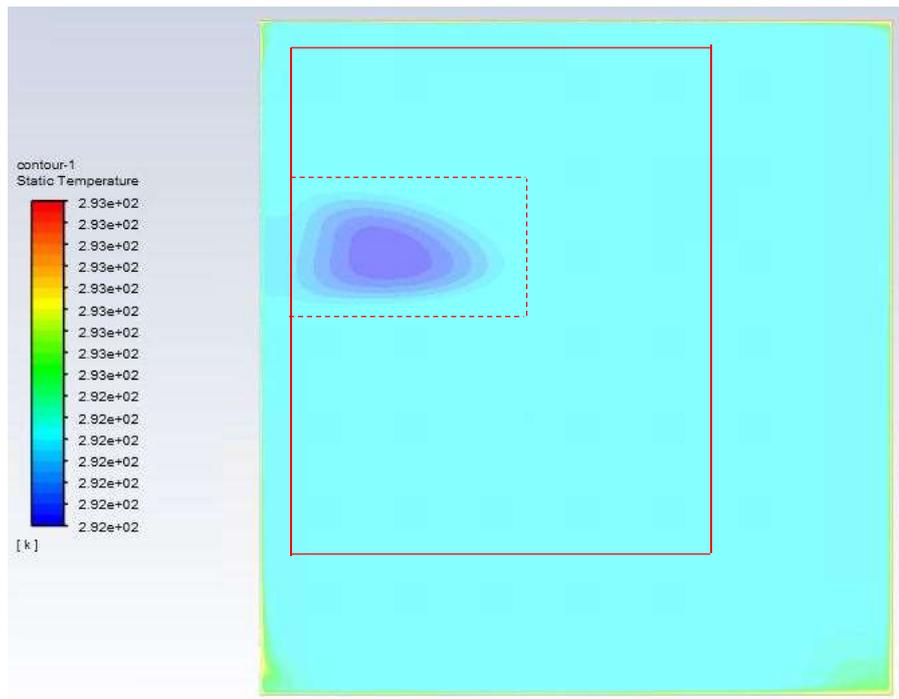


Figura 4.94 – *Contour di temperatura dell'aria con scala locale: piano x-z, $y = 1,7$ m*

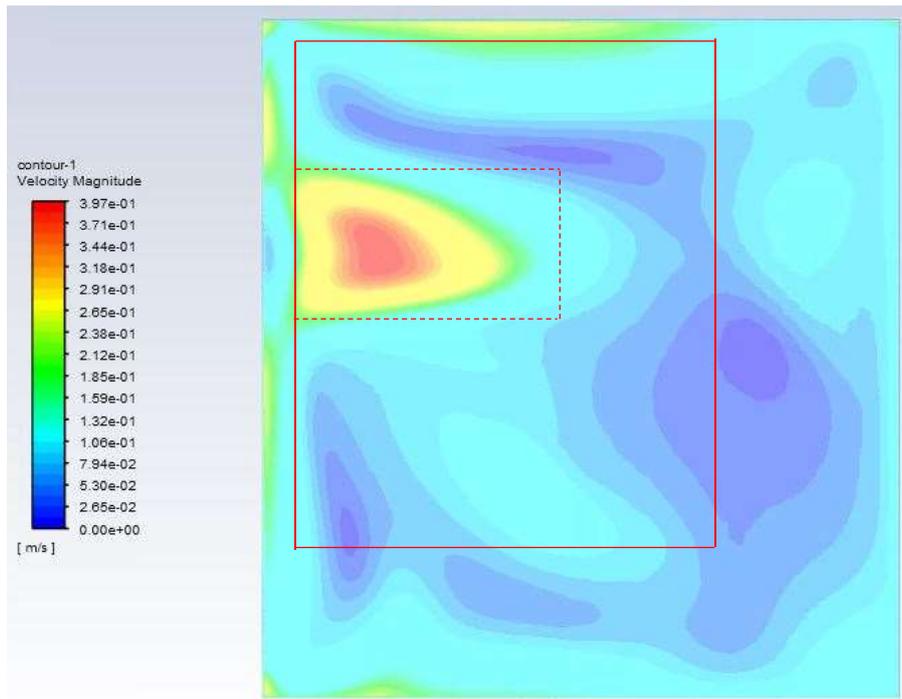


Figura 4.95 – Contour di velocità dell'aria con scala locale: piano x-z, $y = 1,7$ m

Nel piano orizzontale, ad un'altezza di 1,7 m da terra, si registrano una temperatura minima di 292,00 K ed una velocità massima dell'aria di 0,39 m/s.

Rispetto alla configurazione 2 il flusso d'aria immesso interessa una porzione maggiore di volume d'aria occupato, come già riscontrato dai precedenti *Contour* visualizzati, riuscendo quindi a diluire una maggior quantità di CO₂. Inoltre gli studenti risentono in minor modo del flusso grazie alle minori velocità con cui arriva all'interno del volume di controllo.

Di seguito vengono riportate delle *Pathline*, ovvero delle linee che rappresentano il percorso del flusso d'aria immesso, così da avere una rappresentazione tridimensionale del sistema in esame.

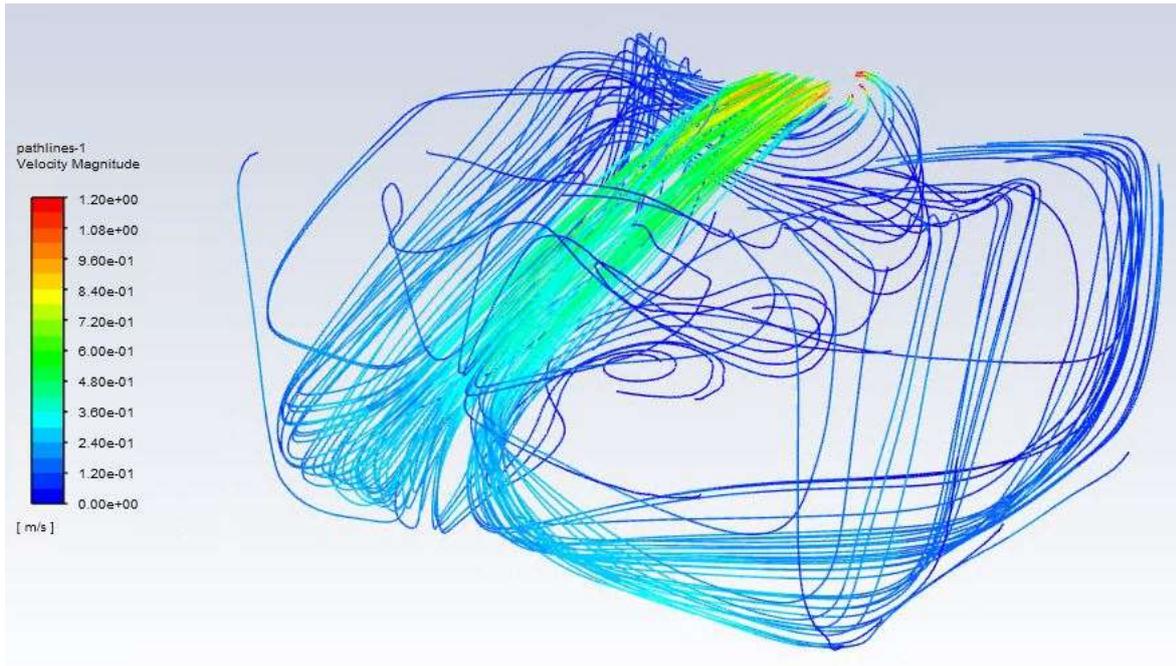


Figura 4.96 – Pathline di velocità dell'aria

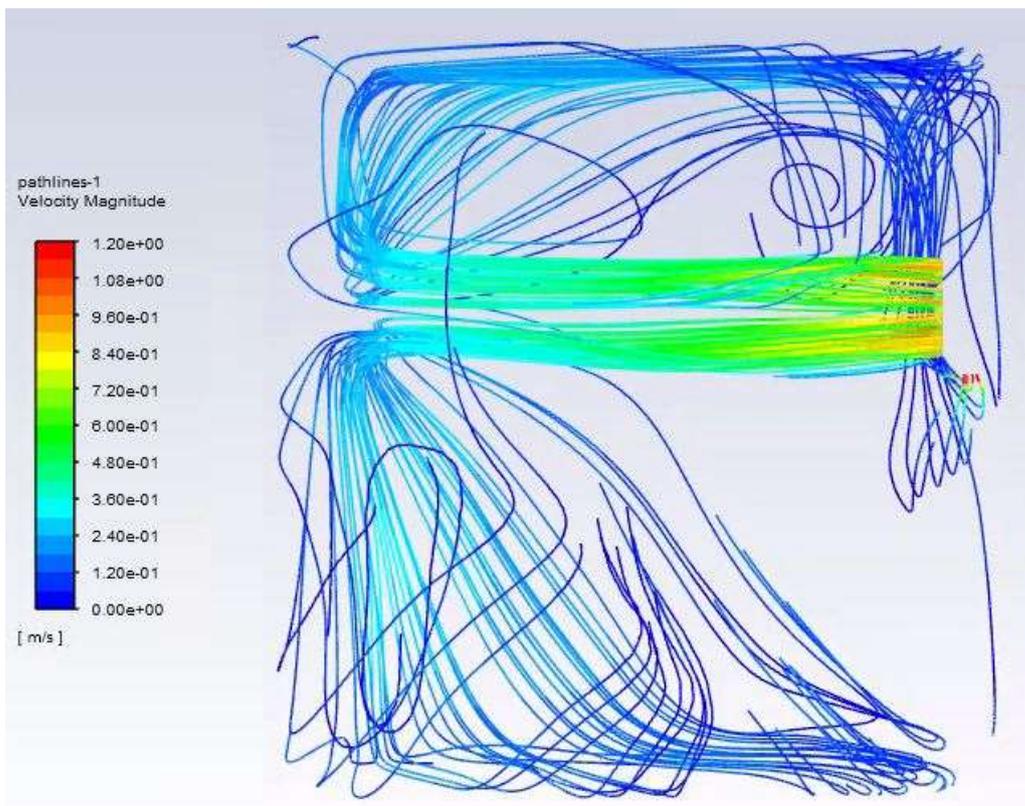


Figura 4.97 – Pathline di velocità dell'aria – vista dall'alto

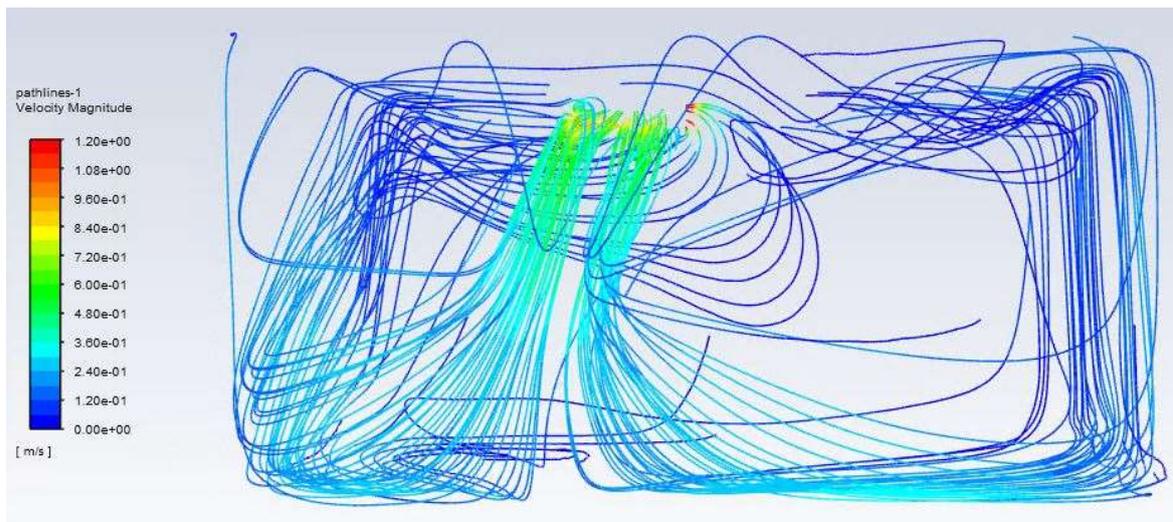


Figura 4.98 – Pathline di velocità dell'aria – vista frontale

Sostanzialmente, adottando una griglia di immissione dotata di un ulteriore filare di alette verticali anteriori in grado di convogliare il flusso immesso in parte verso la parete 1 ed in parte verso la parete 3, con un'inclinazione di 5° ognuno, si ha un miglioramento delle condizioni termiche e di qualità dell'aria all'interno dell'aula rispetto alla condizione iniziale, ovvero la configurazione 2, dotata di una griglia di immissione con un solo filare di alette orizzontali inclinate di 10° .

5 Conclusioni

In questo lavoro di tesi vengono trattati i temi della qualità dell'aria e del benessere termigrometrico all'intero delle aule scolastiche, analizzando i parametri ad essi correlati mediante dei monitoraggi sperimentali e studi fluidodinamici computazionali.

L'obiettivo del presente lavoro è quello di monitorare dapprima le prestazioni degli impianti di ventilazione meccanica controllata installati in due scuole, per poi prenderne in esame una tipologia e migliorarne le prestazioni mediante uno studio CFD.

Il monitoraggio sperimentale delle prestazioni degli impianti di ventilazione riguarda le macchine installate nella scuola secondaria di I grado G. Ferraris e nella scuola primaria I.C. Luca Della Robbia. Le analisi prevedevano lo svolgimento di diverse prove: il monitoraggio dell'andamento di tre parametri principali della qualità dell'aria e del benessere termigrometrico, ovvero la temperatura dell'aria interna, l'umidità relativa e la concentrazione di CO₂, la misurazione della portata immessa ed estratta dalla macchina VMC, lo svolgimento della prova con generatore di fumo, lo svolgimento del blower door test e l'esecuzione di prove acustiche. Di seguito si riportano i risultati ottenuti dalle prove nelle due scuole.

Scuola secondaria di I grado G. Ferraris:

- Prove termiche e qualità dell'aria: la temperatura dell'aria interna varia tra i 22.6°C e i 15.9°C nell'intero periodo di monitoraggio, mentre durante l'orario scolastico, escludendo le domeniche, si ha in media una temperatura idonea di circa 20.5°C. L'umidità relativa varia tra il 23.2% e il 51.7%, mentre durante l'orario scolastico ad esclusione delle domeniche assume un valore medio idoneo pari al 40.5%. La concentrazione di CO₂ varia tra i 366 ppm e i 3111 ppm, arrivando ad un valore medio di 1116.2 ppm durante l'orario scolastico; ad eccezione delle giornate del 23 e 24 febbraio, la concentrazione di CO₂ supera durante l'orario scolastico il valore di riferimento di 1250 ppm dato dalla norma UNI EN 16798-1:2019.
- Prove fluidodinamiche
 - Misurazione portata unità VMC: la portata media di immissione dell'aria, di valore pari a 378,33 m³/h all'impostazione di velocità 3, non rispetta né la portata calcolata col D.M. 18/12/1975, pari a 577,5 m³/h, né la portata calcolata con la norma UNI 10339, pari a 457,8 m³/h. Inoltre la portata non raggiunge il valore dichiarato nella scheda tecnica alle condizioni di prova della macchina. Dalla media tra la portata immessa e quella estratta il sistema risulta abbastanza bilanciato, avendo una variazione massima pari al 4,19%.
 - Prove con generatore di fumo: osservando il decadimento delle particelle nel tempo è possibile notare che alla fine della prova (dopo circa 45 minuti dall'accensione del generatore) si è quasi raggiunta la condizione stazionaria che si aveva prima dell'inizio della prova. L'unità VMC installata, alla terza impostazione di velocità, effettua un ricambio d'aria di circa 1 volume ogni ora. Per quanto riguarda la valutazione inerente all'influenza dell'aria espulsa sulla presa d'aria esterna, si è notato che una parte dei fumi espulsi è stata

prelevata e immessa nuovamente nell'ambiente interno; tale fenomeno è dovuto alla vicinanza tra la presa dell'aria estratta e la presa dell'aria esterna.

- Blower Door Test: il massimo valore di pressione raggiunto durante la prova è pari a 31,06 Pa; l'involucro dell'aula non ha permesso di raggiungere il valore di 50 Pa richiesto. Tramite il software si è ricavato il valore della portata a 50 Pa e il relativo valore di n_{50} pari a 6.85 1/h. Tale valore risulta molto elevato, ciò significa che l'aula è molto permeabile.
- Prove acustiche: i valori dello STI non sono verificati né a VMC accesa, né a VMC spenta. I valori dello C50 non sono verificati. Il tempo di riverbero non è verificato. Il livello di rumore degli impianti non è verificato.

Scuola primaria I.C. Luca Della Robbia:

- Prove termiche e qualità dell'aria: la temperatura dell'aria interna varia tra i 23.93°C, registrata nell'Aula 4 (2°A), e i 10.64°C, registrata nell'Aula 1 (3°B), nell'intero periodo di monitoraggio, mentre durante l'orario scolastico, escludendo le domeniche, si ha una temperatura media minima di 19.55°C, nell'Aula 1 (3°B), e media massima di 22.14 °C, nell'Aula 14 (Laboratorio Ceramica). L'umidità relativa varia tra il 34.94%, nell'Aula 10 (5°B), e il 66.67%, nell'Aula 1 (3°B), mentre durante l'orario scolastico ad esclusione delle domeniche assume un valore medio minimo pari al 44.7%, nell'Aula 14 (Laboratorio Ceramica), e medio massimo pari al 56.05%, nell'Aula 1 (3°B). La concentrazione di CO₂ varia tra i 402 ppm, nell'Aula 9 (1°B), e i 4070 ppm, nell'Aula 1 (3°B), arrivando ad un valore medio minimo di 1019.22 ppm, nell'Aula 15 (Laboratorio Informatica), e medio massimo di 1813.25 ppm, nell'Aula 4 (2°A), durante l'orario scolastico; ad eccezione dell'Aula 14 (Laboratorio Ceramica) nella giornata del 17 gennaio, la concentrazione di CO₂ supera durante l'orario scolastico il valore di riferimento di 1250 ppm dato dalla norma UNI EN 16798-1:2019.
- Prove fluidodinamiche
 - Misurazione portata unità VMC: la portata di immissione dell'aria, di valore pari a 380 m³/h all'impostazione di velocità 3, rispetta sia la portata calcolata col D.M. 18/12/1975, pari a 367,41 m³/h, sia la portata calcolata con la norma UNI 10339, pari a 366,28 m³/h. Le portate raggiungono i valori dichiarati nella scheda tecnica alle condizioni di prova della macchina. Dalla media tra la portata immessa e quella estratta il sistema risulta sbilanciato, avendo una variazione massima pari al 60,53%. L'ambiente risulta sempre in pressione.
 - Prove con generatore di fumo: osservando il decadimento delle particelle nel tempo è possibile notare che alla fine della prova (dopo circa 45 minuti dall'accensione del generatore) la concentrazione delle particelle è diminuita di poco, avendo una condizione lontana da quella stazionaria iniziale. L'unità VMC installata, alla terza impostazione di velocità, effettua un ricambio d'aria stimato di circa 1 volume ogni tre ore. Per quanto riguarda la valutazione inerente all'influenza dell'aria espulsa sulla presa d'aria esterna, si è notato che una parte dei fumi espulsi è stata prelevata e immessa nuovamente nell'ambiente interno; tale fenomeno è dovuto alla vicinanza tra la presa dell'aria estratta e la presa dell'aria esterna.

- Blower Door Test: il massimo valore di pressione raggiunto durante la prova è pari a 54,80 Pa; l'involucro dell'aula ha permesso di raggiungere il valore di 50 Pa richiesto. Tramite il software si è ricavato il valore della portata a 50 Pa e il relativo valore di n_{50} pari a 4.74 l/h.
- Prove acustiche: il tempo di riverbero non è verificato. Il livello di rumore degli impianti non è verificato.

Una volta aver eseguito le misurazioni sperimentali ed aver valutato le prestazioni degli impianti, si è scelto di studiare più approfonditamente la macchina VMC installata nell'aula 3°B della scuola secondaria di I grado G. Ferraris, mediante il supporto della fluidodinamica computazionale (CFD).

In primo luogo è stato svolto lo studio della convergenza della griglia di calcolo, così da individuare una mesh abbastanza fine da non compromettere la veridicità dei risultati; dall'analisi si ricava quindi una griglia avente circa 22,6 milioni di elementi, denominata mesh I.

Le simulazioni successivamente effettuate hanno lo scopo di analizzare l'impianto VMC del caso dal punto di vista grafico e numerico.

Nella prima simulazione si analizza l'impianto VMC installato, caratterizzato da un flusso d'aria immesso orizzontale (configurazione installata). Nel piano orizzontale, ad un'altezza di 1,7 m da terra, si registrano una temperatura minima di 292,10 K ed una velocità massima dell'aria di 0,34 m/s.

Nella seconda simulazione si analizza l'impianto VMC variando l'inclinazione del flusso d'aria immesso e ponendolo pari a 10° verso il basso (configurazione 2). Nel piano orizzontale, ad un'altezza di 1,7 m da terra, si registrano una temperatura minima di 291,90 K ed una velocità massima dell'aria di 0,43 m/s.

Nella terza simulazione si analizza l'impianto VMC variando l'inclinazione del flusso d'aria immesso e ponendolo pari a 20° verso il basso (configurazione 3). Nel piano orizzontale, ad un'altezza di 1,7 m da terra, si registrano una temperatura minima di 291,90 K ed una velocità massima dell'aria di 0,50 m/s.

Si analizzano poi le tre configurazioni per scegliere la migliore.

Dalla comparazione sia dei risultati numerici che grafici delle tre opzioni si deduce che la configurazione migliore è la seconda. Tale risultato è stato dedotto dal fatto che nella configurazione 2 il flusso d'aria immesso interessa una maggiore porzione del volume occupato dagli studenti rispetto alla configurazione installata, da cui si può prevedere un ricambio d'aria più efficace e, quindi, un maggior decadimento della CO₂, ma con velocità dell'aria minori rispetto alla terza opzione nella quale, a causa dell'elevata inclinazione delle alette, gli studenti sono investiti da un flusso più diretto e, quindi, con velocità maggiori.

Dopo aver trovato la giusta inclinazione delle alette si procede col miglioramento della configurazione variando la tipologia della griglia di immissione. La griglia scelta è formata da due filari di alette: il primo, quello posteriore, composto da alette orizzontali inclinate di 10° (come nella configurazione 2), mentre il secondo, quello anteriore, composto da alette verticali orientate per metà verso destra di 5° e per l'altra metà verso sinistra di 5°, in modo da garantire una distribuzione più uniforme del flusso d'aria. Nel piano orizzontale, ad un'altezza di 1,7 m da terra, si registrano una temperatura minima di 292,00 K ed una velocità massima dell'aria di 0,39 m/s.

Rispetto alla configurazione 2 il flusso d'aria immesso interessa una porzione maggiore di volume d'aria occupato, riuscendo quindi a diluire una maggior quantità di CO₂. Inoltre gli studenti risentono in minor modo del flusso grazie alle minori velocità con cui arriva all'interno del volume di controllo. Si è quindi ottenuto un miglioramento delle condizioni termiche e di qualità dell'aria all'interno dell'aula rispetto alla condizione iniziale.

Il processo di analisi fluidodinamica computazionale ha dimostrato l'efficacia di tale approccio per lo studio di un impianto di ventilazione confermando dunque come l'ausilio di una procedura CFD consenta di supportare validamente i tecnici nel progetto evidenziando eventuali criticità o aspetti altrimenti difficili da individuare nella progettazione standard.

Bibliografia

- [1] Definizione inquinamento indoor, Ministero della Salute.
[https://www.salute.gov.it/portale/temi/p2_6.jsp?lingua=italiano&id=4385&area=indor&menu=vuoto#:~:text=L'inquinamento%20indoor%20\(indoor%20pollution,di%20salubrit%C3%A0%20dell'aria%20stessa](https://www.salute.gov.it/portale/temi/p2_6.jsp?lingua=italiano&id=4385&area=indor&menu=vuoto#:~:text=L'inquinamento%20indoor%20(indoor%20pollution,di%20salubrit%C3%A0%20dell'aria%20stessa)
- [2] Gruppo Lavoro GARD-I, Progetto n°1 "Programma di prevenzione per le scuole dei rischi indoor per malattie respiratorie e allergiche"
- [3] HESE. Health Effects of School Environment (HESE) Final Scientific Report, (2006)
- [4] Interreg. Progetto QAES (Qualità dell'Aria negli Edifici Scolastici). Task 3.1, 2019
- [5] Smedje G, Norbäck D, Edling C. Asthma among secondary school children in relation to the school environment. *Clin Exp Allergy*, 27 (1997).
- [6] Kim JL, Elfman L, Mi Y, Wieslander G, Smedje G, Norbäck D. Indoor molds, bacteria, microbial volatile organic compounds and plasticizers in schools - associations with asthma and respiratory symptoms in pupils. *Indoor Air*, 17 (2007).
- [7] Dorizas, P. V., Assimakopoulos, M. N., & Santamouris, M. (2015). A holistic approach for the assessment of the indoor environmental quality, student productivity, and energy consumption in primary schools. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(5), 1–18.
- [8] Twardella, D., Matzen, W., Lahrz, T., Burghardt, R., Spiegel, H., Hendrowarsito, L., ... Fromme, H. Effect of classroom air quality on students' concentration: Results of a cluster-randomized cross-over experimental study. *Indoor Air*, 22(5) (2012)
- [9] Haverinen-Shaughnessy, Ulla, Shaughnessy, R. J., Cole, E. C., Toyinbo, O., & Moschandreas, D. J. An assessment of indoor environmental quality in schools and its association with health and performance. *Building and Environment*, 93(P1) (2015)
- [10] BPIE. Building 4 People: Quantifying the benefits of energy renovation investments in schools , offices and hospitals. (2018)
- [11] Mohai, P., Kweon, B. S., Lee, S., & Ard, K. Air pollution around schools is linked to poorer student health and academic performance. *Health Affairs*, 30(5) (2011)
- [12] World Health Organization. *WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants*. (2010)

- [13] Regolamento (UE) n. 305/2011 del Parlamento Europeo e del Consiglio, 9 marzo 2011
- [14] Ministero della Salute, Direzione generale della prevenzione sanitaria (2015). *Formaldeide*.
https://www.salute.gov.it/imgs/C_17_opuscoliPoster_283_ulterioriallegati_ulterioreallegato_5_alleg.pdf
- [15] Legge 27 marzo 1992, n. 257 – Norme relative alla cessazione dell’impiego dell’amianto.
https://www.salute.gov.it/resources/static/primopiano/amianto/normativa/Legge_27_marzo_1992.pdf
- [16] Consiglio dell'Unione Europea (2013). *Direttiva 2013/59/Euratom del Consiglio del 5 dicembre 2013 che stabilisce norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione contro i pericoli derivanti dall’esposizione alle radiazioni ionizzanti, e che abroga le direttive 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom e 2003/122/Euratom*. In Gazzetta ufficiale dell'Unione europea, L 13/1 del 17 gennaio 2014.
- [17] Decreto 10 settembre 1998, n. 381. Regolamento recante norme per la determinazione dei tetti di radiofrequenza compatibili con la salute umana.
<https://www.isprambiente.gov.it/contentfiles/00003800/3864-rapporti-01-06.pdf>
- [18] Circolare Ministero della Sanità 25 novembre 1991, n. 23. Uso delle fibre di vetro isolanti – Problematiche igienico-sanitarie – Istruzioni per il corretto impiego.
<https://www.vedani.it/public/normative/circolare%20ministero%20sanit%C3%A0%2025%20novembre%201991,%20n.%2023.pdf>
- [19] CH Cheng, CL Chow, WK Chow. Traiettorie di grandi goccioline respiratorie in ambiente indoor: un approccio semplificato. *Costruire. Ambiente*, 183 (2020)
- [20] van Doremalen N, Bushmaker T, Morris DH, Holbrook MG, Gamble A, Williamson BN, *et al.* Aerosol and surface stability of SARS-CoV-2 as compared with SARS-CoV-1. *New England Journal of Medicine*, (2020)
- [21] Morawska L, Buonanno G. The physics of particle formation and deposition during breathing. *Nature Reviews Physics*, (2021)
- [22] Rapporto ISS COVID-19 n. 33/2020. Indicazioni sugli impianti di ventilazione/climatizzazione in strutture comunitarie non sanitarie e in ambienti domestici in relazione alla diffusione del virus SARS-CoV-2. Versione del 25 maggio 2020.
- [23] Rapporto ISS COVID-19 n. 12/2021. Raccomandazioni ad interim sulla sanificazione di strutture non sanitarie nell’attuale emergenza COVID-19: ambienti/superfici. Versione del 20 maggio 2021.

- [24] WHO. Roadmap to improve and ensure good *indoor* ventilation in the context of COVID-19. Geneva: World Health Organization; 2021.
- [25] Rapporto ISS COVID-19 n. 11/2021. Indicazioni ad interim per la prevenzione e gestione degli ambienti indoor in relazione alla trasmissione dell'infezione da virus SARS-CoV-2. Versione del 18 aprile 2021.
- [26] Federazione Regionale degli Ordini degli Ingegneri della Toscana. Stato dell'arte sulle principali tecniche di purificazione dell'aria per agenti patogeni nei condotti di areazione. Rendimenti e sostenibilità. 15-22 giugno 2021.
- [27] J. Curtius , M. Granzin , J. Schrod. Testing mobile air purifiers in a school classroom: Reducing the airborne transmission risk for SARS-CoV-2. (2021)
- [28] N. Mao, M. Song, M. Chan, D. Pan, S. Deng. Computational fluid dynamics (CFD) modelling of air flow field, mean age of air and CO distributions inside a bedroom with different heights of conditioned air supply outlet. Appl. Energy, 164 (2016)
- [29] H. Chen, S. Janbakhsh, U. Larsson, B. Moshfegh. Numerical investigation of ventilation performance of different air supply devices in an office environment. Building and Environment, 90 (2015)
- [30] Jianqiang Mou, Shan Cui, David Wee, Yang Khoo. Computational fluid dynamics modelling of airflow and carbon dioxide distribution inside a seminar room for sensor placement. Measurement: sensors, 23 (2022)
- [31] KC No, JS Jang, MD Oh. Thermal comfort and indoor air quality in the lecture room with 4-way cassette air-conditioner and mixing ventilation system. Build Environ, 42 (2007)
- [32] T. Yao, Z. Lin. An experimental and numerical study on the effect of air terminal types on the performance of stratum ventilation. Building and Environment, 82 (2014)
- [33] P. Kehler, C. Chaves, A. García, H. Centurion, A. Escobar, L. Lopes, S. Aquino, N. Ferreira, J. Kurita. Ventilation CFD Analysis at an Classroom as a Tool for Air Safety Verification Under COVID19 Context, a Case Study. ASME 2021 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 10 (2022)
- [34] G. Efen, A. Rodriguez-Leon, S. Luz, M. Hernandez-Ordonez, M. Diaz-Gonzalez, F. de Jesus. Computational Study of Thermal Comfort and Reduction of CO₂ Levels inside a Classroom. Environmental Research and Public Health, 19(5) (2022)
- [35] F. Ascione , R. Francesca De Masi , M. Mastellone , G. Peter Vanoli. The design of safe classrooms of educational buildings for facing contagions and transmission of diseases:

A novel approach combining audits, calibrated energy models, building performance (BPS) and computational fluid dynamic (CFD) simulations. *Energy and Buildings*, 230 (2021)

[36] H. Arjmandi , R. Amini , F. khani , M. Fallahpour. Minimizing the respiratory pathogen transmission: Numerical study and multi-objective optimization of ventilation systems in a classroom. *Thermal Science and Engineering Progress*, 28 (2022)

[37] S-H Park, K-R Lee, S-J Yook, H. Bon Koo. Enhancement and Homogenization of Indoor Air Quality in a Classroom Using a Vertical Airflow Ventilation Scheme. *Toxics*, 10 (2022)

[38] UNI EN 16798-1:2019. *Prestazione energetica degli edifici - Ventilazione per gli edifici - Parte 1: Parametri di ingresso dell'ambiente interno per la progettazione e la valutazione della prestazione energetica degli edifici in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica - Modulo M1-6*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.

[39] UNI EN 16798-3:2018. *Prestazione energetica degli edifici - Ventilazione per gli edifici - Parte 3: Per gli edifici non residenziali - Requisiti prestazionali per i sistemi di ventilazione e di condizionamento degli ambienti (Moduli M5-1, M5-4)*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.

[40] UNI 10339:1995. *Impianti aeraulici ai fini di benessere. Generalità, classificazione e requisiti. Regole per la richiesta d'offerta, l'offerta, l'ordine e la fornitura*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.

[41] Decreto Ministeriale 18 dicembre 1975. Norme tecniche aggiornate relative all'edilizia scolastica, ivi compresi gli indici di funzionalità didattica, edilizia ed urbanistica, da osservarsi nella esecuzione di opere di edilizia scolastica.

[42] Direttiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio, del 19 maggio 2010, sulla prestazione energetica nell'edilizia.

[43] Decreto 4 giugno 2013, n. 63. Disposizioni urgenti per il recepimento della Direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010, sulla prestazione energetica nell'edilizia per la definizione delle procedure d'infrazione avviate dalla Commissione europea, nonché' altre disposizioni in materia di coesione sociale.

<https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2013/06/05/13G00107/sg>

[44] UNI EN 15251:2008. *Criteri per la progettazione dell'ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.

[45] Direttiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio, del 16 dicembre 2002, sul rendimento energetico nell'edilizia.

[46] UNI EN ISO 7730:2006. *Ergonomia degli ambienti termici - Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.

[47] UNI EN 13779:2008. *Ventilazione degli edifici non residenziali - Requisiti di prestazione per i sistemi di ventilazione e di climatizzazione*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.

[48] World Health Organization. *WHO Air Quality Guidelines, Global Update*. (2005)

[49] EN 779:2012. *Particulate air filters for general ventilation - Determination of the filtration performance*. Comitato Europeo di Normazione.

[50] UNI EN ISO 7726:2002. *Ergonomia degli ambienti termici - Strumenti per la misurazione delle grandezze fisiche*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.

[51] UNI EN ISO 16000-26:2012. *Aria in ambienti confinati - Parte 26: Strategia di campionamento per l'anidride carbonica (CO₂)*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.

[52] UNI EN 12599:2012. *Ventilazione per edifici - Procedure di prova e metodi di misurazione per la presa in consegna di impianti di ventilazione e di condizionamento dell'aria*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.

[53] UNI EN ISO 9972:2015. *Prestazione termica degli edifici - Determinazione della permeabilità all'aria degli edifici - Metodo di pressurizzazione mediante ventilatore*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.

[54] UNI 11532-2:2020. *Caratteristiche acustiche interne di ambienti confinati - Metodi di progettazione e tecniche di valutazione - Parte 2: Settore scolastico*. Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano.

[55] DPCM 5/12/1997. Requisiti acustici passivi degli edifici.

[56] ANSYS. ANSYS Fluent Tutorial Guide. Release 18.0. Gennaio 2017.

Ringraziamenti

Giunto al termine del mio percorso di studi colgo l'occasione per ringraziare tutte le persone che, durante questi anni universitari, sono state di supporto.

In primo luogo vorrei ringraziare il professore Costanzo Di Perna per avermi dato l'opportunità di approfondire delle tematiche interessanti nel campo dell'analisi prestazionale degli impianti di ventilazione meccanica e, soprattutto, per la disponibilità mostrata durante lo svolgimento del lavoro di tesi.

Ringrazio tutti i compagni di università, delle fantastiche persone, con i quali si è creato un rapporto straordinario. Abbiamo condiviso tanto, le partite a carte durante la pausa pranzo, il caffè, la confusione più totale dopo una spiegazione teorica, l'ansia pre-esame e la leggerezza post-esame, i progetti di gruppo, i pranzi, le cene e molto altro. Grazie per aver reso indimenticabili questi anni; li ricorderò sempre con felicità ed un filo di malinconia perché da oggi, quei momenti, fanno parte del passato.

Ringrazio gli amici di una vita, quelli che sai ci saranno sempre. Sarò sempre grato ai momenti di svago e spensieratezza che abbiamo vissuto, e che vivremo, essenziali per staccare la spina e alleggerire le giornate pesanti.

Il ringraziamento più importante va alla mia famiglia senza la quale tutto questo non sarebbe stato possibile. Grazie per avermi supportato e sopportato nei momenti più difficili, per essere sempre dalla mia parte. Grazie a mio fratello che ad ogni esame andato bene mostrava più felicità di me, spronandomi a fare sempre meglio e ad essere da esempio.

Infine vorrei ringraziare me stesso per aver sempre creduto in me, per non essermi fermato alla prima difficoltà, per l'impegno e la dedizione mostrati.