



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE E SCIENZE
MATEMATICHE**

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA

**Sviluppo di un modello per la valutazione della
fitodepurazione di una parete verde in un ambiente confinato**
**Development of a model for assessing the phytoremediation
capacity of a green wall in a confined environment**

Relatore:

Prof. Gianluca Coccia

Candidato:

Elia Carsetti

Correlatore:

Ing. Falcone Feliciano

Anno Accademico 2025/2026

Indice

Introduzione	ix
1 Stato dell'arte	1
1.1 Qualità dell'aria e agenti inquinanti	1
1.2 Sistemi di Ventilazione e Ricambi d'Aria	4
1.2.1 Ventilazione naturale	4
1.2.2 Ventilazione meccanica	5
1.3 Normativa UNI EN 16798 e calcolo portate	7
1.3.1 Portata di rinnovo	10
1.3.2 Metodi di calcolo portata di rinnovo	10
1.3.3 Metodo 2: concentrazione di sostanze inquinanti di riferimento	14
1.4 Pareti Verdi (Green Walls) e Tecnologie di Fitorimediazione	18
1.4.1 Fitorimediazione	20
1.4.2 Pareti verdi	21
2 Introduzione a TRNSYS	24
2.1 Simulation Studio	25
2.2 Interfaccia visualizzazione struttura	26
2.3 Realizzazione di un progetto in TRNSYS	26
3 Caso studio	31
3.1 Ipotesi progettuali	31
3.2 Realizzazione modello	34
3.2.1 Schema logico modello	34
3.2.2 Blocco 1: definizione aula e parametri ambientali	34
3.2.3 Blocco 2: radiazione solare	42
3.2.4 Blocco 3: calcolo portata di rinnovo	43
3.2.5 Blocco 4: equazione di bilancio della CO ₂	49
3.2.6 Blocco 5: calcolo portata regolata da controllore, prevalenze e potenze	58
3.2.7 Blocco 6: elaborazione risultati simulazione	66

3.2.8	Schema finale progetto	69
4	Analisi dei risultati	71
4.1	Caso senza PLW	73
4.2	PLW piccola	78
4.3	PLW media	85
4.4	PLW grande	91
4.5	Grafici comparativi	96
4.5.1	Grafico comparativo portate medie	97
4.5.2	Grafico comparativo concentrazioni CO2	97
4.5.3	Grafico comparativo energia di ventilazione	98
4.5.4	Grafico comparativo energia termica	99
4.5.5	Grafico comparativo del costo totale di riscaldamento	100
4.5.6	Grafico comparativo del costo totale della ventilazione	101
5	Conclusioni	103
	Bibliografia	105

Lista immagini

1.1	Relazione tra il voto medio previsto (PMV) e la percentuale predetta di insoddisfatti (PPD) [14].	8
1.2	Schema di funzionamento di un sistema di ventilazione meccanica controllata (VMC) a doppio flusso con recuperatore di calore [18].	10
1.3	Modulo di parete verde indoor (<i>living wall</i>) utilizzato per il biofiltraggio dell'aria [24].	19
1.4	Schema di funzionamento di un sistema di biofiltrazione a parete attiva (Active Green Wall/PLW): l'aria viziata attraversa la parete vegetata che agisce come filtro biologico,irrigata da un sistema di ricircolo idrico con pompa [27].	22
1.5	Schema di funzionamento di un sistema attivo di biofiltrazione a parete vegetata (Active Living Wall). Il sistema utilizza un ventilatore per forzare l'aria viziata attraverso il substrato vegetato, che agisce come filtro biologico, garantendo aria pulita e rinfrescata [30].	23
2.1	Schermata Simulation Studio TRNSYS [32].	25
2.2	Schermata TRNBuild TRNSYS [31].	26
2.3	Schermata nuovo progetto TRNSYS [32].	27
2.4	Icona funzione collegamento TRNSYS [32].	28
2.5	Icona Control Cards TRNSYS [32].	29
2.6	Menù Control Cards TRNSYS [32].	29
2.7	Icona funzione avvio simulazione TRNSYS [32].	30
3.1	Schema geometrico e tridimensionale dell'aula con relative quotature (8.00 m × 5.00 m × 3.00 m).	32
3.2	Macchina <i>RPLI_L</i> Aermec [13].	33
3.3	Type 15 TRNSYS progetto.	35
3.4	Menù Type 15 TRNSYS.	36
3.5	Schermata Type 56 TRNSYS.	37
3.6	secondo menù Type 56 TRNSYS.	38
3.7	Termostato inverno - Componente 1502 della libreria TESS TRNSYS.	38

3.8	Blocco Equazione TRNSYS.	39
3.9	Componente Type 65d di TRNSYS.	40
3.10	Blocco definizione aula e parametri ambientali.	41
3.11	Schema del blocco dati per la radiazione solare.	42
3.12	Componente Type 14h Trnsys.	43
3.13	Definizione dell'equazione per l'area dell'aula in base all'affollamento.	44
3.14	Interfaccia dei parametri del Type 14h in TRNSYS.	45
3.15	Andamento temporale della funzione definita nel Function Editor del Type 14h.	45
3.16	Configurazione delle equazioni in TRNSYS per il calcolo della portata di rinnovo, con definizione degli ingressi (parametri ambientali e occupazione) e delle variabili di output.	47
3.17	Schema del blocco di calcolo della portata di rinnovo.	48
3.18	Schema del blocco regolatore PID (Type 23) utilizzato nell'ambiente di simula- zione TRNSYS.	50
3.19	Configurazione dei parametri di input per il modulo PID.	50
3.20	Dispositivo output ritardato - Type 661 libreria TESS TRNSYS.	51
3.21	Interfaccia di configurazione equazioni in TRNSYS per il calcolo del volume dell'ambiente ($V_{aula} = area \cdot altezza$).	51
3.22	Configurazione dell'equazione in TRNSYS per la determinazione della concen- trazione di CO ₂ in uscita (C_{co2_usc}) e dei relativi limiti operativi.	53
3.23	Finestra delle equazioni in TRNSYS per la definizione delle variabili geometri- che della parete verde ($area_LW, L_LW, H_LW$).	54
3.24	Interfaccia di TRNSYS per la definizione dei parametri e delle variabili dell'e- quazione differenziale di bilancio della CO ₂ ($eq_bilancio_massa$).	57
3.25	Schema del blocco per il calcolo del bilancio di massa della CO ₂ in ambiente indoor, includendo l'effetto della parete verde e il controllo tramite regolatore PID.	58
3.26	Interfaccia equazioni TRNSYS per la modulazione della portata di mandata ($W_{ae_mandata}$) in funzione del segnale di controllo.	59
3.27	Grafico portata-prevalenza e perdite di carico per l'unità RPLI100L (Aermec).	61
3.28	Interfaccia per il calcolo della prevalenza utile.	62
3.29	Interfaccia di definizione delle equazioni per le potenze e il rendimento sensibile (Aermec RPLI-L 100).	64
3.30	Schema del blocco per il calcolo della portata di mandata ($W_{ae_mandata}$), delle prevalenze e delle potenze d'impianto.	65
3.31	Icona del componente Type25c (Printer) in TRNSYS.	66
3.32	Schermata di configurazione dei parametri del componente Type25c in TRNSYS.	67

3.33	Andamento temporale delle portate e della concentrazione di CO ₂ (ppm) ottenuto dalla simulazione TRNSYS.	68
3.34	Schema del blocco di estrazione dei risultati di simulazione con Type25c, dati meteo e diagrammi di output.	68
3.35	Schema logico e d'interconnessione finale del progetto in TRNSYS.	70
4.1	Tabella riepilogativa degli indici PUN per i mesi di novembre e dicembre 2025.	72
4.2	Andamento del Prezzo Unico Nazionale (PUN) nel corso dell'anno 2026.	72
4.3	Andamento temporale della temperatura esterna del primo giorno di ogni mese (Caso senza PLW).	73
4.4	Andamento temporale della portata d'aria di ventilazione del primo giorno di ogni mese (Caso senza PLW).	73
4.5	Andamento temporale della concentrazione di CO ₂ (ppm) del primo giorno di ogni mese (Caso senza PLW).	74
4.6	Andamento della potenza termica del primo giorno di ogni mese (Caso senza PLW).	74
4.7	Andamento temporale della potenza di ventilazione del primo giorno di ogni mese (Caso senza PLW).	75
4.8	Andamento temporale della prevalenza utile ΔP (Pa) del primo giorno di ogni mese (Caso senza PLW).	75
4.9	Portate di ventilazione medie registrate per ciascun mese di simulazione (Caso senza PLW).	76
4.10	Energia di Ventilazione totale spesa ogni mese (Caso senza PLW)	76
4.11	Energia Termica totale spesa ogni mese (Caso senza PLW)	77
4.12	Costo totale della ventilazione elettrica per ogni mese di simulazione (Caso senza PLW).	77
4.13	Costo totale del riscaldamento termico per ogni mese di simulazione (Caso senza PLW).	78
4.14	Andamento della temperatura esterna del primo giorno di ogni mese (Caso con parete verde - PLW Piccola).	79
4.15	Andamento temporale della portata d'aria di ventilazione del primo giorno di ogni mese (Caso con parete verde - PLW Piccola).	79
4.16	Andamento temporale della concentrazione di CO ₂ (ppm) del primo giorno di ogni mese (Caso con parete verde - PLW Piccola).	80
4.17	Andamento della potenza termica (W) del primo giorno di ogni mese (Caso con parete verde - PLW Piccola).	80
4.18	Andamento della potenza elettrica di ventilazione (W) del primo giorno di ogni mese (Caso con parete verde - PLW Piccola).	81

4.19 Andamento della prevalenza utile ΔP (Pa) del primo giorno di ogni mese (Caso con parete verde - PLW Piccola).	81
4.20 Portate di ventilazione medie mensili registrate (Caso con parete verde- PLW Piccola).	82
4.21 Energia di Ventilazione totale spesa ogni mese (Caso con parete verde- PLW Piccola).	82
4.22 Energia Termica totale spesa ogni mese ((Caso con parete verde- PLW Piccola).	83
4.23 Costo totale della ventilazione elettrica mensile (Caso con parete verde- PLW Piccola).	83
4.24 Costo totale del riscaldamento termico mensile (Caso con parete verde- PLW Piccola).	84
4.25 Andamento temporale della temperatura esterna del primo giorno di ogni mese (Caso con parete verde- PLW Media).	85
4.26 Andamento temporale della portata d'aria di rinnovo del primo giorno di ogni mese (Caso con parete verde- PLW Media).	85
4.27 Andamento temporale della concentrazione di CO ₂ (ppm) del primo giorno di ogni mese (Caso con parete verde- PLW Media).	86
4.28 Andamento della potenza termica (W) del primo giorno di ogni mese (Caso con parete verde- PLW Media).	86
4.29 Andamento della potenza elettrica di ventilazione (W) del primo giorno di ogni mese (Caso con parete verde- PLW Media).	87
4.30 Andamento della prevalenza utile ΔP (Pa) del primo giorno di ogni mese (Caso con parete verde- PLW Media).	87
4.31 Portate di ventilazione medie registrate per ciascun mese (Caso con parete verde- PLW Media).	88
4.32 Energia di Ventilazione totale spesa ogni mese (Caso con parete verde- PLW Media).	88
4.33 Energia Termica totale spesa ogni mese (Caso con parete verde- PLW Media).	89
4.34 Costo totale della ventilazione elettrica mensile (Caso con parete verde- PLW Media).	89
4.35 Costo totale del riscaldamento termico mensile (Caso con parete verde- PLW Media).	90
4.36 Andamento temporale della temperatura esterna del primo giorno di ogni mese (Caso con parete verde - PLW Grande).	91
4.37 Andamento temporale della portata d'aria del primo giorno di ogni mese (Caso con parete verde - PLW Grande).	91

4.38	Andamento temporale della concentrazione di CO ₂ (ppm) del primo giorno di ogni mese (Caso con parete verde - PLW Grande).	92
4.39	Andamento della potenza termica (W) del primo giorno di ogni mese (Caso con parete verde - PLW Grande).	92
4.40	Andamento della potenza elettrica di ventilazione (W) del primo giorno di ogni mese (Caso con parete verde - PLW Grande).	93
4.41	Andamento della prevalenza utile ΔP (Pa) del primo giorno di ogni mese (Caso con parete verde - PLW Grande).	93
4.42	Portate di ventilazione medie mensili registrate (Caso parete verde - PLW Grande).	94
4.43	Energia di Ventilazione totale spesa ogni mese (Caso parete verde - PLW Grande).	94
4.44	Energia Termica totale spesa ogni mese (Caso parete verde - PLW Grande).	95
4.45	Costo totale della ventilazione elettrica mensile (Caso parete verde - PLW Grande).	95
4.46	Costo totale del riscaldamento termico mensile (Caso parete verde - PLW Grande).	96
4.47	Confronto Portata d'Aria Media Mensile (Tutti i casi).	97
4.48	Andamento Mensile Concentrazione CO ₂ (Tutti i casi).	98
4.49	Confronto Energia di Ventilazione Mensile (Tutti i Casi).	99
4.50	Confronto Energia termica Mensile (Tutti i Casi).	100
4.51	Confronto Costi di riscaldamento totali mensili (Tutti i Casi).	101
4.52	Confronto Costi di Ventilazione totali mensili (Tutti i Casi).	102

Lista delle tabelle

1.1	Classificazione degli ambienti termici e delle categorie di comfort in base agli indici PPD e PMV (EN ISO 7730) [16].	8
1.2	Classificazione dei livelli di emissione degli inquinanti indoor per gli edifici (EN ISO 7730) [16].	8
1.3	Portate d'aria per persona in base alla categoria dell'edificio e alla destinazione d'uso (UNI EN 16798) [15].	11
1.4	Portate d'aria per unità di superficie in base alla categoria dell'edificio e alla destinazione d'uso per medio inquinamento (EN 16798-1) [15].	13
1.5	Coefficienti di occupazione predefiniti in base alla tipologia di edificio e alla destinazione d'uso (EN 16798-1) [15].	15
1.6	Tasso metabolico, area corporea e carichi termici sensibili e latenti per persona in base alla tipologia di edificio e alla destinazione d'uso (EN 16798-1) [15]. . .	16
1.7	Valori limite di concentrazione degli inquinanti nell'aria indoor in base alla categoria dell'edificio (EN 16798-1) [15].	17
3.1	Parametri di configurazione e input del regolatore PID (Type 23) in TRNSYS. .	55
4.1	Quadro riassuntivo mensile dei costi di ventilazione, riscaldamento e delle portate medie registrate (Caso senza PLW).	78
4.2	Quadro riassuntivo mensile dei costi di ventilazione, riscaldamento e delle portate medie registrate (Caso con PLW Piccola).	84
4.3	Quadro riassuntivo mensile dei costi di ventilazione, riscaldamento e delle portate medie registrate (Caso con LW media).	90
4.4	Quadro riassuntivo mensile dei costi di ventilazione, riscaldamento e delle portate medie registrate (Caso con PLW Grande).	96

Introduzione

L'obiettivo della tesi qui proposta è quello di poter fornire un modello matematico attuo a prevedere e valutare gli effetti di una Parete Verde Passiva (PVP o PLW in inglese) nel contesto di mantenimento della CO_2 entro i valori di legge. In particolare, dato l'elevato numero di variabili partecipanti all'interno del caso studio, si è scelto di circoscrivere gli effetti della citata parete all'interno di un'aula ipotetica di un istituto scolastico di Roma in varie casistiche.

- Nel primo capitolo, dedicato allo Stato dell'arte (1) vengono esposti gli elementi principali su cui si basa questa tesi, ovvero: definizione degli inquinanti (i loro rischi e fonti di produzione), teoria sulla ventilazione e tipi di impianti, teoria sulle pareti verdi (tipologie e principio di funzionamento) e inquadramento della normativa regolatrice dei parametri di ventilazione e qualità dell'aria nei locali.
- Il secondo capitolo (2) fornisce l'introduzione del programma TRNSYS usato per realizzare il modello di calcolo capace di analizzare i dati fornitigli per poter quantificare gli effetti della PLW in vari scenari.
- All'interno del terzo capitolo (3) verrà mostrato e spiegato il modello realizzato su TRNSYS relativo al caso studio, descrivendone il funzionamento logico, il metodo di stesura e comprensione dei dati.
- Conseguente al terzo capitolo, il capitolo quarto (4) contiene l'esposizione dei risultati del modello in vari scenari di funzionamento differenti, ognuno con i suoi relativi commenti e considerazioni.
- L'ultimo capitolo (5) presenterà le conclusioni di questa tesi fornendo valutazioni riguardo le PLW e il loro sviluppo futuro.

Capitolo 1

Stato dell'arte

Da tempo la comunità scientifica ha evidenziato e documentato i severi rischi legati agli inquinanti atmosferici immessi quotidianamente nell'ambiente. Sebbene le sorgenti naturali contribuiscano a tali emissioni, esse non rappresentano un rischio sistemico; al contrario, le sorgenti antropiche sono le principali responsabili del progressivo e marcato incremento dei fattori inquinanti. Enti di ricerca specializzati nel monitoraggio dei gas inquinanti (come Xclimate, per citarne uno) registrano aumenti storici delle concentrazioni di anidride carbonica decisamente significativi. Nonostante l'evidenza di tale incremento, la crescente divulgazione scientifica e le intense campagne di sensibilizzazione hanno favorito una maggiore consapevolezza sociale sul tema. Ciò ha guidato lo sviluppo di tecnologie innovative dedicate alla mitigazione e all'abbattimento delle emissioni. Parallelamente all'ambito macro-ambientale, è emersa la stringente necessità di monitorare e mantenere entro standard di sicurezza i livelli di inquinanti all'interno dei luoghi di lavoro e degli spazi pubblici confinati (Indoor Air Quality – IAQ) [1]. Tale tematica, sebbene già affrontata a partire dagli inizi degli anni '70, era originariamente circoscritta alla medicina del lavoro per la definizione dei parametri di infortunio o malattia professionale. Oggi, invece, l'attenzione si è estesa a tutti gli ambienti indoor nei quali la popolazione transita o trascorre la maggior parte del proprio tempo; l'impatto degli inquinanti atmosferici e la qualità dell'aria interna riescono infatti a influenzare notevolmente la produttività e il benessere degli occupanti [2].

1.1 Qualità dell'aria e agenti inquinanti

I rischi derivanti dall'inquinamento atmosferico sono ormai acclarati e il loro impatto sulla salute globale diventa di anno in anno più critico: l'esposizione prolungata comporta un incremento nell'incidenza di patologie oncologiche, disturbi respiratori, allergie e un generale indebolimento del sistema immunitario. Il peso epidemiologico di tale fenomeno supera i confini professionali, colpendo in modo sproporzionato le popolazioni più vulnerabili.

Circa 3 miliardi di persone, principalmente nelle regioni a basso e medio reddito, utilizzano tuttora combustibili e sistemi di cottura inefficienti e inquinanti. Questi ultimi emettono elevate quantità di particolato fine ($PM_{2.5}$) e sostanze tossiche in ambienti domestici non ventilati. Le analisi epidemiologiche rivelano che, tra i rischi più seri per la salute associati all'inquinamento indoor e outdoor, circa il 27% è attribuibile alla polmonite, il 18% all'ictus, il 27% alla cardiopatia ischemica, il 20% alla broncopneumopatia cronica ostruttiva (BPCO) e l'8% al carcinoma polmonare [2].

I principali agenti inquinanti rilevabili nell'aria includono:

- **CO₂ (Anidride carbonica):** Prodotta da tutti i processi di combustione, dalla respirazione aerobica e dalla quasi totalità delle attività antropiche. I livelli di fondo nell'ambiente esterno si attestano oggi intorno alle 430 ppm, mentre l'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) suggerisce un limite massimo indoor di 1000 ppm per garantire il comfort e la salubrità. Concentrazioni moderatamente superiori a tale soglia causano cefalea, stanchezza e riduzione delle capacità cognitive; a concentrazioni critiche (10-20%), subentrano rapidamente il rischio di sincope e il soffocamento per asfissia [3] [4].
- **CO (Monossido di carbonio):** Gas tossico derivante da combustioni incomplete in difetto di ossigeno. L'OMS ha fissato un valore di soglia massimo raccomandato di circa 6 ppm (su esposizioni prolungate). Essendo un gas completamente inodore e incolore, risulta estremamente pericoloso, poiché si lega stabilmente all'emoglobina provocando la morte per ipossia tissutale [3] [4].
- **PM_{2.5} e PM₁₀ (Particolato atmosferico):** Insieme di particelle solide o liquide sospese nell'aria con un diametro aerodinamico medio inferiore o uguale, rispettivamente, a 2.5 μm e 10 μm . OMS fissa i limiti di esposizione media a tutela della salute entro i 15 $\mu g/m^3$. Gli effetti nocivi sono strettamente legati alla loro dimensione: le frazioni più fini riescono a penetrare in profondità nell'apparato respiratorio fino agli alveoli polmonari, causando irritazioni, bronchiti croniche e, nel lungo termine, l'insorgenza di neoplasie [3] [4].
- **Formaldeide:** Composto organico volatile (VOC) caratterizzato da un'elevata tossicità. Viene rilasciato comunemente da resine e collanti presenti in legni compositi di scarsa qualità, tessuti sintetici, vernici e solventi chimici. Il valore limite di esposizione indoor consigliato dall'OMS è di 0.1 ppm, essendo la sostanza formalmente classificata come cancerogena per l'uomo [3] [4].
- **VOC (Composti Organici Volatili):** Sotto questa denominazione ricade qualsiasi composto organico che contenga almeno l'elemento carbonio (C) e uno o più tra idrogeno (H), ossigeno (O), fluoro (F), cloro (Cl), bromo (Br), iodio (I), zolfo (S), fosforo (P), silicio (Si) o azoto (N), ad eccezione degli ossidi di carbonio (CO₂ e CO) e dei carbonati e

bicarbonati inorganici [5]. L'OMS fissa una soglia di attenzione per i VOC totali (TVOC) intorno a 0.1 ppm, poiché l'esposizione a tali composti può provocare irritazioni oculari e cutanee, eritemi, oltre a presentare, per alcune specifiche molecole, spiccati effetti tossici e mutageni [3] [5].

Tutti gli inquinanti sopracitati possono originare da due macro-tipologie di sorgenti:

- **Sorgenti esterne:** Risultano tutte le attività antropiche e naturali che vanno a produrre inquinanti (combustione e polveri sottili da lavorazioni per trasporti, metano da allevamenti, generazione di CO₂ per semplice respirazione degli esseri viventi, ecc.). I contaminanti provenienti da fonti esterne subiscono un effetto di mitigazione naturale dovuto all'interfaccia con un volume d'aria estremamente vasto che ne favorisce la diluizione.
- **Sorgenti interne:** Materiali edili utilizzati nell'edificio, gli arredi, la presenza eventuale di impianti di ventilazione non mantenuti a norma e il suo tipo, di macchinari ed elettrodomestici, gli occupanti e le relative attività che vi svolgono (uso di fornelli a gas, ecc.) risultano essere le principali fonti di inquinanti interni [1]. In ambienti confinati e in assenza di un adeguato ricambio d'aria, gli inquinanti possono accumularsi rapidamente, conducendo in breve tempo a concentrazioni ben superiori ai limiti di sicurezza stabiliti dalle linee guida internazionali.

La normativa di riferimento che si occupa della valutazione della qualità dell'aria all'interno dei locali e che fornisce i metodi per il dimensionamento degli impianti è la **UNI EN 16798-3**. Tale norma stabilisce la classificazione dell'aria esterna ed interna secondo il seguente schema ordinato:

Aria esterna (Outdoor Air – ODA)

- ODA 1:** Aria pura, conforme alle linee guida dell'OMS e a tutti gli standard o regolamenti nazionali sulla qualità dell'aria esterna. L'aria è solo temporaneamente contaminata da polveri come il polline ed è priva di gas nocivi [6].
- ODA 2:** Aria con concentrazioni di inquinanti superiori alle linee guida dell'OMS e agli standard nazionali fino a 1.5 volte. Questo scenario include masse d'aria con un'elevata concentrazione di particolato e/o inquinanti gassosi [6].
- ODA 3:** Aria fortemente compromessa, che supera tutte le direttive, gli standard o i regolamenti di oltre 1.5 volte; include concentrazioni estremamente elevate di inquinanti gassosi e particolato [6].

Aria interna di immissione (Supply Air – SUP)

Fa riferimento alla qualità dell'aria di mandata quando essa rispetta i vincoli dell'OMS, a cui vengono associati degli specifici moltiplicatori di target legati all'efficienza di abbattimento richiesta:

SUP 1: Elevatissima qualità dell'aria (Fattore moltiplicativo 0.25) [6].

SUP 2: Alta qualità dell'aria (Fattore moltiplicativo 0.5) [6].

SUP 3: Media qualità dell'aria (Fattore moltiplicativo 0.75) [6].

SUP 4: Qualità moderata (Fattore moltiplicativo 1 – conformità diretta) [6].

SUP 5: Bassa qualità dell'aria (Fattore moltiplicativo 1.5) [6].

Solo dopo aver definito la classe di aria esterna (ODA) e il livello di aria interna richiesto (SUP) si potrà proseguire, tramite i coefficienti e le matrici d'efficienza fornite dalla UNI EN 16798-3, con il corretto dimensionamento e la scelta dell'impianto di ventilazione meccanica.

1.2 Sistemi di Ventilazione e Ricambi d'Aria

Elemento fondamentale per la corretta realizzazione di un edificio, sia esso pubblico o privato, risulta essere lo studio dettagliato di come l'aria venga immessa all'interno dei vari locali e di come essa si muova al loro interno. Il suo scopo è quello di poter effettuare la ventilazione dei locali, ovvero l'immissione di aria pulita nel locale in modo da ridurre la concentrazione degli inquinanti interni. Le metodologie di ventilazione impiegate nella pratica costruttiva degli edifici risultano essere ventilazione naturale e meccanica.

1.2.1 Ventilazione naturale

Tale sistema di ventilazione può rivelarsi effettivamente efficace in determinati casi come zone rurali o con basso livello di urbanizzazione permettendo non solo un corretto controllo della qualità dell'aria per via del ricircolo continuo che abbassa la concentrazione degli inquinanti, ma anche perché riesce a lavorare bene sulla temperatura del locale [7] [8]. I limiti che però più rendono l'utilizzo della ventilazione naturale poco utilizzata in contesti urbani e per edifici di grandi dimensioni sono legati alla strettissima dipendenza del sistema di ventilazione da parametri come la presenza di edifici avanti il nostro che vanno ad ostacolare il flusso d'aria, velocità del vento, temperature e pressioni interne ed esterne al locale oltre che alla posizione ed orientamento del locale stesso [8].

1.2.2 Ventilazione meccanica

Questo metodo di ventilazione dei locali si basa sull'utilizzo di macchinari appositi che permettono di poter movimentare quantitativi di aria molto elevati così da poter far fronte alla richiesta dell'edificio a cui sono collegate. Il loro vantaggio è il quasi completo distacco da quelle che erano i parametri fondamentali di impiego della ventilazione naturale in quanto, usando macchine apposite, l'unico parametro che risulterà fondamentale sarà la portata richiesta mentre i limiti di impiego saranno gli spazi di installazione e l'energia richiesta dalle macchine.

Per la realizzazione di abitazioni civili risulta ed è di norma l'utilizzo della ventilazione naturale in quanto non si è vincolati da normative specifiche così strette, mentre per edifici pubblici o ad elevato tasso di occupazione le normative vigenti vincolano all'uso obbligatorio dei sistemi di ventilazione meccanici [9] [10]. Il motivo per cui si usa tale metodologia e del perché essa sia regolamentata da un vasto numero di norme risiede nella sua versatilità che le permette di poter essere utilizzata per:

- **ricambio aria:** E' lo scopo principale della ventilazione meccanica ed è grazie ad esso che si può effettuare il controllo della IAQ nel locale. I metodi più usati per poter effettuare il ricambio d'aria è tramite l'utilizzo di VMC centralizzata con canalizzazione e VMC localizzata o puntuale [11] e consistono in un' unità che preleva contemporaneamente aria dal locale interno e dall'ambiente esterno con la stessa portata, filtrando l'aria esterna così da immetterla con una concentrazione di inquinanti ridotta in modo da miscelare quella presente nel locale abbassando complessivamente la concentrazione di inquinati.
- **riscaldamento:** viene effettuato andando ad implementare sulla VMC una o più batterie di riscaldamento che andranno a riscaldare l'aria immessa nel locale così da raggiungere la temperatura target in ambiente [11].
- **raffreddamento:** stesso principio del riscaldamento ma al posto della batteria di riscaldamento si ha un gruppo frigorifero che sfrutta fluidi bifasici per raffreddare l'aria immessa nel locale [11].

La fisica che risulta essere dietro la ventilazione meccanica si basa sui varie grandezze fisiche di riferimento:

- **Portata d'aria:** si definisce portata come il volume di fluido V che attraversa una sezione A in un determinato intervallo di tempo Δt .

$$Q = \frac{V}{\Delta t} \quad (1.1)$$

Q = portata (m^3/s) o (l/s). Per la realizzazione di impianti si preferisce utilizzare i (m^3/h) in quanto unità più pratica.

- **Ricambi d'aria:** indicano in numero di volte all'ora che il volume d'aria viziata del locale viene completamente rinnovato con aria pulita.

$$N = \frac{Q}{V} \quad (1.2)$$

N = numero ricambi, Q = portata (m^3/s) o (l/s) e V = volume aria (m^3), notando quindi lo stretto legame tra portata e ricambi ora. Dal punto di vista progettistico N viene preso tipicamente come valore tabulato in seguito a vari parametri e principalmente in situazione di verifica della portata [10].

- **Prevalenza:** È la quantità di energia (riferita all'unità di massa o di peso) che una pompa deve cedere al fluido per permettergli di circolare nel circuito. Questo valore include la compensazione di tutte le perdite di carico che il fluido incontra lungo il suo tragitto. Se riferita all'unità di peso si indica con H (m), se riferita all'unità di volume la si indica come ΔP (Pa). La relazione tra le due è

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot H \quad (1.3)$$

ρ = densità del fluido (kg/m^3), g = accelerazione di gravità (m/s^2), H = prevalenza (m), ΔP = prevalenza (Pa). Il delta serve ad esprimere come la prevalenza venga trovata andando ad effettuare la differenza di pressione tra la sezione di mandata e quella di aspirazione della macchina, tale dato è spesso usato dai costruttori di come dato di targa per la scelta del corretto macchinario [12].

- **Potenza:** è la grandezza che permette di esprimere la quantità di lavoro svolto in un determinato intervallo di tempo, si indica con P e la sua espressione più generale è:

$$P = \frac{W}{t} \quad (1.4)$$

P = potenza (watt o W), W = energia o lavoro (J) e t = tempo (s).

Esistono varie declinazioni della (1.4) in base al contesto in cui ci troviamo, ma per uniformità di trattazione verrà definita la formula della potenza usata nei sistemi di movimentazione del fluido, introducendo il concetto di Potenza utile e Potenza assorbita:

$$P_{\text{utile}} = \gamma \cdot Q \cdot H \quad (1.5)$$

P_{utile} (W), γ = peso specifico (N/m^3), Q = portata volumetrica (m^3/s), H = prevalenza (m). Con questa formula si esprime il legame tra potenza portata e prevalenza e si definisce la potenza utile come la potenza effettivamente fornita al fluido lavorato dalla macchina. Variazione pratica

della (1.5) è:

$$P_{\text{assorbita}} = \frac{Q \cdot \Delta P}{\eta} \quad (1.6)$$

$P_{\text{assorbita}}$ = potenza assorbita (W), Q = portata volumetrica (m^3/s), ΔP = prevalenza (Pa), η = rendimento macchina. Ricaviamo così la potenza assorbita ovvero quella che la macchina assorbe dal sistema di alimentazione tenendo conto del suo rendimento.

1.3 Normativa UNI EN 16798 e calcolo portate

Questa norma è l'attuale norma di riferimento per la progettazione degli impianti di ventilazione e il controllo della IAQ nei locali, fornendo i valori di riferimento per la ventilazione in modo da permettere sia la corretta ventilazione che mantenere un comfort ottimale nel locale. In riferimento al comfort la UNI EN 16798 si riferisce alle due grandezze indice determinate da Fanger per poter valutare se le condizioni termoigrometriche, di qualità dell'aria e velocità dell'aria immessa nel locale sono conformi a quelle di benessere. Queste grandezze sono:

- **Predicted mean vote (PMV):** rappresenta il voto medio predetto che serve per esprimere l'indice di gradimento delle condizioni di temperatura, umidità e velocità dell'aria all'interno del locale.

$$\text{PMV} = \left[0,303 \cdot e^{-0,036 \cdot M} + 0,028 \right] \cdot L \quad (1.7)$$

PMV= voto medio previsto, M = attività metabolica (met), L= carico termico sul corpo umano (W/m^2). Tale equazione viene fuori dall'equazione di bilancio termico del corpo umano di Fanger [13] [14].

- **Predicted percentage of dissatisfied (PPD):** rappresenta la percentuale di persone insoddisfatte dal punto di vista termico all'interno del locale.

$$\text{PPD} = 100 - 95 \cdot e^{-(0,03353 \cdot \text{PMV}^4 + 0,2179 \cdot \text{PMV}^2)} \quad (1.8)$$

Dove PPD= percentuale prevista di insoddisfatti (%) e PMV= voto medio previsto [14]. Questa formulazione mette in relazione l'equazione precedente con la presente, in quanto un valore di PPD inferiore al 10% rappresenta la condizione ottimale di benessere termoigrometrico per un ambiente interno [14].

La norma UNI EN ISO 16798 [15] fornisce la divisione degli ambienti in 4 fasce diverse seguendo la seguente tabella .

La norma UNI EN 16798 [15] fornisce anche la divisione dei locali in base al tasso di produzione degli inquinanti interni ad essi, riportando quindi la classificazione come segue. La norma UNI

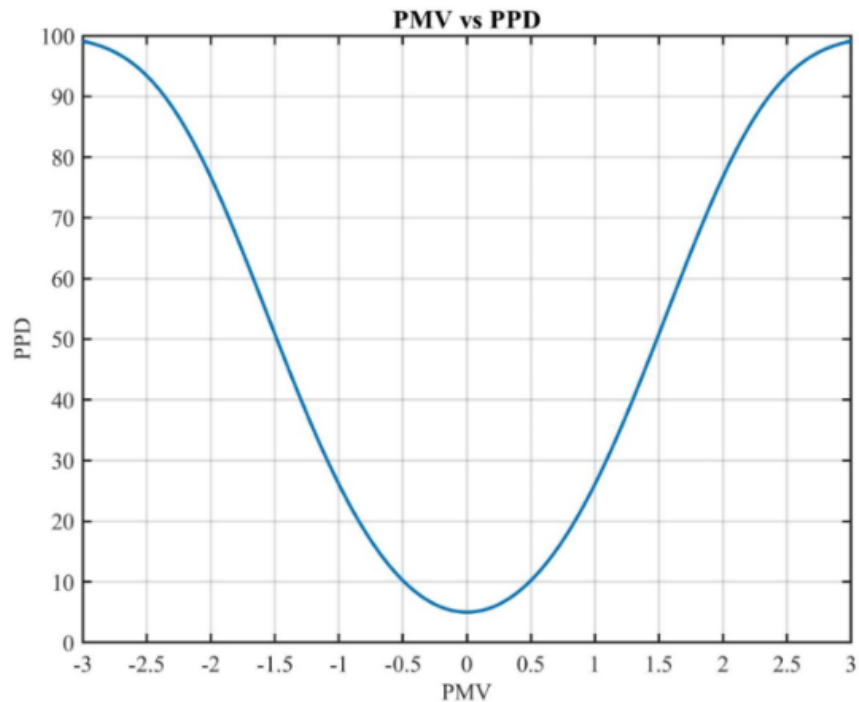


Figura 1.1: Relazione tra il voto medio previsto (PMV) e la percentuale predetta di insoddisfatti (PPD) [14].

Tabella 1.1: Classificazione degli ambienti termici e delle categorie di comfort in base agli indici PPD e PMV (EN ISO 7730) [16].

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

Tabella 1.2: Classificazione dei livelli di emissione degli inquinanti indoor per gli edifici (EN ISO 7730) [16].

Livello	Descrizione
I	Edificio ad emissione di inquinanti indoor molto bassa
II	Edificio ad emissione di inquinanti indoor bassa
III	Edificio ad emissione di inquinanti indoor non bassa

EN 16798 [15] riprende questi concetti applicandoli alla prestazione energetica degli edifici e specificando i tassi di ventilazione richiesti per ciascuna delle categorie sopra menzionate.

1.3.1 Portata di rinnovo

Si intende per portata di rinnovo la portata d'aria necessaria che serve per andare a ridurre la concentrazione degli inquinanti riportandola entro i valori da norma di legge. La valutazione verrà effettuata riferendosi ad ogni inquinante degno di nota presente nel locale e la portata che verrà presa come riferimento sarà quella maggiore tra le varie calcolate, permettendo così di rimuovere tutti gli inquinanti presenti [17]. Il calcolo della portata potrà seguire tre metodi che sono quelli prescritti dalla norma. Bisogna tenere presente che la portata trovata risulterà essere quella sufficiente esclusivamente per il rinnovo, qualora si dovesse procedere ad associare al sistema VMC eventuali batterie di riscaldamento o raffreddamento la portata dovrebbe tenere in considerazione anche l'esigenza di fare fronte ai carichi termici del locale.

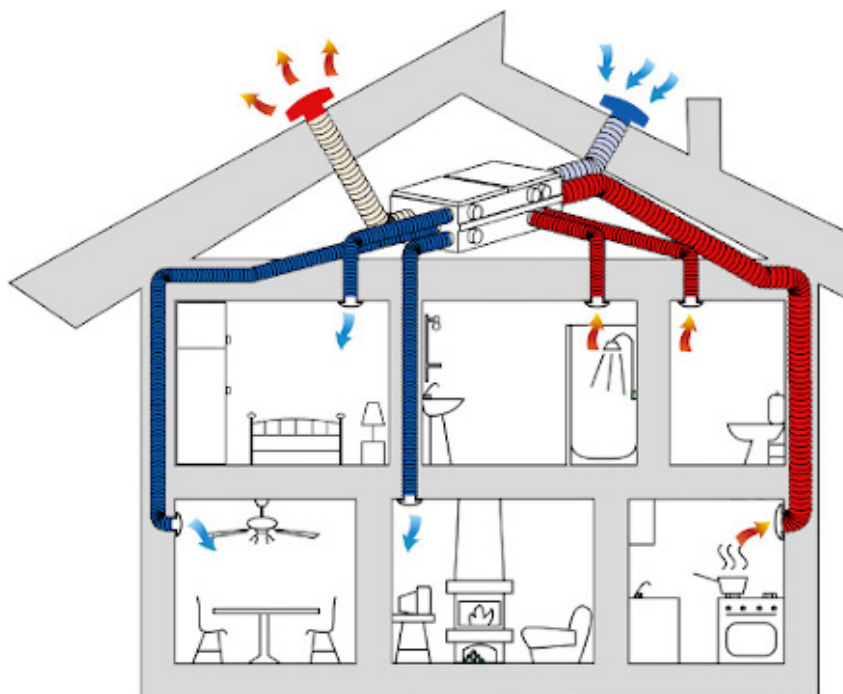


Figura 1.2: Schema di funzionamento di un sistema di ventilazione meccanica controllata (VMC) a doppio flusso con recuperatore di calore [18].

1.3.2 Metodi di calcolo portata di rinnovo

La UNI EN 16798 [15] fornisce 3 metodi di riferimento per il calcolo della portata di rinnovo, mentre l'Appendice nazionale sancisce la validità solo di due di questi [19].

Metodo 1: qualità dell'aria percepita

Tale metodo permette di trovare la portata necessaria per la ventilazione facendo riferimento a due portate distinte:

- **Portata per persona:** tiene conto degli inquinanti rilasciati dai singoli occupanti del locale in funzione del tipo di locale, della destinazione d'uso e del livello di comfort richiesto.

$$n \cdot Q_p \quad (1.9)$$

n = il numero di persone, Q_p = portata di ventilazione per persona (l/s) o (m^3/h). Il valore di Q_p viene ricavato da tabelle apposite fornite dalla UNI EN 16798 [15].

Tabella 1.3: Portate d'aria per persona in base alla categoria dell'edificio e alla destinazione d'uso (UNI EN 16798) [15].

Building	Type of space	q_p [l/(s pers.)]		
		I	II	III
Homes, apartments 1	Whole residential unit	10,0	7,0	4,0
Special residences	Dormitories, bedrooms 2 3	10,0	6,0	4,0
	Meeting rooms	8,5	7,0	5,0
Hotels	Hotel rooms	8,0	6,0	4,0
	Reception, Lobbies	8,5	7,0	5,0
	Conference Rooms	8,5	7,0	5,0
	Dining Rooms	8,5	7,0	5,0

1), 2) Values also based on CO₂ requirements.

3) Without bunkbeds; in such case the ventilation flow rate should be double.

- **Portata per superficie:** è la portata necessaria a diluire gli inquinanti provenienti dai componenti e dai materiali edili dell'edificio, basandosi sui livelli di emissione del locale e sulla destinazione d'uso.

$$A_R \cdot Q_b \quad (1.10)$$

A_R = superficie dell'ambiente (m^2) e Q_b = portata d'aria per gli inquinanti dell'edificio riferita alla superficie considerata ($l/(s \cdot m^2)$) o ($m^3/(h \cdot m^2)$). Il valore di Q_b viene definito tramite le tabelle fornite dalla UNI EN ISO 16798 [15]:

Tabella 1.4: Portate d'aria per unità di superficie in base alla categoria dell'edificio e alla destinazione d'uso per medio inquinamento (EN 16798-1) [15].

Building	Type of space	Airflow per floor area q_B (l/(s·m ²))		
		Category I	Category II	Category III
Offices	Small offices	0,50	0,40	0,30
	Open-space offices, Conference rooms	0,70	0,60	0,40
	Call center	0,80	0,70	0,50
Hospitals	Bedrooms, wards, diagnostic and examination rooms	0,50	0,40	0,30
	Treatment room	1,00	0,80	0,60
	Sitting rooms	0,75	0,60	0,45
Places of assembly	Auditoriums, cinemas, theaters, museums, exhibition halls, churches	0,50	0,40	0,30
	Libraries, reading rooms	0,63	0,50	0,30
	Games rooms, betting rooms	0,75	0,60	0,45
	Dance halls, discos	1,38	1,10	0,83
	Grocery stores, dry cleaning, pharmacies	1,00	0,80	0,60
Commercial	Barbers and beauty salons	0,60	0,50	0,40
	All other retail stores, department stores, supermarkets	0,50	0,40	0,30
Restaurants	Cafeterias, Bars, Dining rooms	1,25	1,00	0,75
	Kindergartens and nursery schools	1,25	1,00	0,75
Educational	Primary and high schools, university classrooms, labs and teachers' rooms	0,63	0,50	0,38
	Libraries, reading rooms	0,63	0,50	0,38
	Languages and music classrooms	0,38	0,30	0,23
	Covered sport facilities: play fields	0,75	0,60	0,45
Sport	Covered sport facilities: spectators areas	0,50	0,40	0,30
	Swimming Pools (water pool area)	0,75	0,60	0,45
	Locker rooms	0,38	0,30	0,23
General	Service rooms, Corridors	1,00	0,70	0,40

Sommando le due si ottiene l'equazione finale per la portata di rinnovo:

$$Q_{\text{tot}} = n \cdot Q_p + A_R \cdot Q_b \quad (1.11)$$

Q_{tot} = portata complessiva di rinnovo (m^3/h) o (l/s). Il metodo 1 risulta essere rapido da applicare ma poco adatto ad effettuare una corretta progettazione dell'impianto in quanto dà maggiore rilevanza ai parametri percettivi di chi entra nel locale rispetto alle concentrazioni stesse. Si può comunque usare per la progettazione di impianti residenziali e non residenziali [20] [19].

1.3.3 Metodo 2: concentrazione di sostanze inquinanti di riferimento

La portata di rinnovo viene calcolata facendo riferimento ai valori di concentrazione di inquinante presente nel locale e la concentrazione limite imposta da [3] per quell'inquinante stesso. Tale ragionamento deve quindi essere iterato per ogni singolo inquinante presente nel locale così da poter trovare la portata d'aria necessaria per poter rimuovere tutti gli inquinanti. La rimozione verrà fatta effettuando contemporaneamente un'estrazione di aria dal locale e una miscelazione della rimanente con aria pulita di rinnovo [15].

$$Q_{\text{tot}} = \frac{G_h}{C_{\text{limit}} - C_{\text{est}}} \cdot \frac{1}{\varepsilon_v} \quad (1.12)$$

Q_{tot} = portata complessiva di rinnovo (m^3/s), G_h = tasso di produzione inquinante da fonti interne ($\mu\text{g/s}$), C_{limit} = concentrazione limite inquinante interno ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), C_{est} = concentrazione inquinante esterno ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), ε_v = efficienza del sistema di ventilazione. Tramite la (1.12) è possibile così calcolare la portata di rinnovo necessaria per i vari inquinanti presenti nel locale, al patto che si conoscano le loro concentrazioni limite, le loro fonti di produzione e il tasso di produzione stesso.

Se si studia come inquinante di riferimento la CO_2 dovuta alla sola produzione degli occupanti [20] la (1.12) si può modificare, sempre seguendo la normativa UNI EN 16798 [15]. La prima modifica riguarda la fonte di inquinanti che, essendo le persone nel locale, permette di trovare una generazione di CO_2 pari a:

$$G_{\text{CO}_2, \text{oc}} = O_c \times \frac{58,2 \times M \times A_{\text{Du}} \times \text{RQ}}{5,88 \times (0,23 \times \text{RQ} + 0,77)} \quad (1.13)$$

Dove $G_{\text{CO}_2, \text{oc}}$ = portata di CO_2 prodotta dalla popolazione nel locale ($\text{l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$), O_c = fattore di occupazione locale (persone/ m^2) tabulato in tabella 1.8, M = attività metabolica (met) preso da tabelle 1.9, A_{Du} = area corporea (m^2), e RQ = quoziente di respirazione preso costante = 0,85.

Tabella 1.5: Coefficienti di occupazione predefiniti in base alla tipologia di edificio e alla destinazione d'uso (EN 16798-1) [15].

Building	Type of space	Occupancy O_c [Persons/m ²]
Places of assembly	Atriums, waiting rooms, adjoining bar area	0,3
	Auditoriums, cinemas, theatres, churches	0,7
	Games rooms, betting rooms	0,4
	Museums, exhibition's halls	0,4
	Libraries, reading rooms	0,3
	Dance halls, discos	0,7
Commercial	Grocery stores, pharmacies	0,2
	Barbers and beauty salons	0,2
	All other retail stores, department stores, supermarkets	0,2
	Dry cleaning	0,1
Restaurants	Bars, Cafeterias, self-service	0,8
	Dining rooms	0,6
Educational	Kindergartens and nursery schools	0,42
	Primary schools	0,52
	Secondary Schools	0,52
	High Schools	0,51
	University classroom	0,50
	Libraries, reading rooms	0,3
	Languages and music classrooms	0,2
	Labs	0,5
Sport	Teachers rooms	0,7
	Covered sport facilities: play fields	0,25
	Covered sport facilities: spectators areas	0,7
	Swimming Pools (water pool area)	0,5
	Locker rooms	0,2

Tabella 1.6: Tasso metabolico, area corporea e carichi termici sensibili e latenti per persona in base alla tipologia di edificio e alla destinazione d'uso (EN 16798-1) [15].

Building	Type of space	Met [Met]	Area [m ²]	$Q_{Sens,Conv}$ [W]	$Q_{Sens,Rad}$ [W]	Q_{lat} [W]	Q_{Total} [W]
Residential, Special residences, Hotels	All spaces	1,2	1,8	41	39	38	118
Offices	All spaces	1,2	1,8	41	39	38	118
Hospitals	All spaces (with exclusion of operating theatre)	1,2	1,8	41	39	38	118
Places of assembly	All spaces	1,6	1,8	39	37	82	158
Commercial	All spaces	1,6	1,8	39	37	82	158
Restaurants, Bars, Cafeterias	All spaces	1,2	1,8	41	39	38	118
Educational	nursery schools (2-4 yr.)	1,4	0,66	15,6	14,6	8,1	38,3
	kindergartens (5-6 yr.)	1,4	0,77	17,4	15,9	28,9	62,1
	Secondary Schools, High Schools, University classroom, libraries, reading rooms, languages and music classrooms, labs, teachers' rooms	1,2	1,8	41	39	38	118
Sport	All spaces	1,6	1,8	39,3	36,6	81,9	157,8

Implementando la (1.13) nella (1.12) con le considerazioni fatte si ottiene, sempre secondo norma UNI EN 16798 [15] :

$$Q_{tot} = \frac{1,96 \times G_{CO_2,oc} \times A_v}{C_{limit} - C_{est}} \cdot \frac{1}{\varepsilon_v} \quad (1.14)$$

Q_{tot} = portata di rinnovo (m³/h), $G_{CO_2,oc}$ = portata di CO₂ prodotta dalla popolazione nel locale (l/(m² · h)), C_{limit} = concentrazione limite inquinante interno (g/m³) , C_{est} = concentrazione inquinante esterno (g/m³), A_v = area del locale (m²), ε_v = efficienza sistema di ventilazione. Potendo prendere la differenza tra concentrazione interna ed esterna da tabella 1.8 la norma UNI [15] fornisce il metodo di conversione da ppm (usati in tabella) a g/m³: partendo dall'equazione di stato per la CO₂:

$$P \cdot V = m \cdot R \cdot T \quad (1.15)$$

dove P = pressione assoluta miscela (Pa), V = volume occupato dalla miscela (m³), m = massa della CO₂ (kg), R = costante della CO₂ (188,92 J/(kg · K)), T = temperatura assoluta (K). Volendo trovare i kg di CO₂ nel volume totale della miscela ricaviamo di fatto la densità ρ :

$$\rho_{CO_2} = \frac{P}{188,92 \times (273,15 + \vartheta)} \quad (1.16)$$

Dove ρ_{CO_2} = densità di massa della CO₂ pura (kg/m³), P = pressione assoluta (Pa), 188,92 = costante specifica dell'anidride carbonica (J/(kg · K)), 273,15 = valore di riferimento per la conversione di scala termometrica da gradi Celsius a Kelvin , e ϑ = temperatura dell'aria (°C).

Ultimo passaggio è moltiplicare tutto per i ppm così da convertirli ed applicare il fattore correttivo 10^{-3} così da ottenere la concentrazione in g/m^3 .

$$C_{\text{CO}_2} = 10^{-3} \times \frac{P}{188,92 \times (273,15 + \vartheta)} \times C_{\text{CO}_2, \text{ppm}} \quad (1.17)$$

Dove C_{CO_2} = concentrazione di CO_2 (g/m^3), $C_{\text{CO}_2, \text{ppm}}$ = concentrazione di CO_2 (ppm), P = pressione dell'aria (Pa), e ϑ = temperatura dell'aria ($^{\circ}\text{C}$).

In questo modo la (1.12) si riscrive come:

$$Q_{h, \text{CO}_2, \text{oc}} = \frac{1090 \times G_{\text{CO}_2, \text{oc}} \times A_v}{(C_{\text{limit}, \text{ppm}} - C_{\text{est}, \text{ppm}}) \cdot \varepsilon_v} \quad (1.18)$$

Dove $Q_{h, \text{CO}_2, \text{oc}}$ = portata totale di rinnovo (m^3/h), 1090 = coefficiente di conversione globale, $G_{\text{CO}_2, \text{oc}}$ = portata di prodotta C dal singolo individuo ($\text{l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$), A_v = area del locale (m^2), $C_{\text{limit}, \text{ppm}}$ = concentrazione di CO_2 nell'aria interna (ppm), $C_{\text{est}, \text{ppm}}$ = concentrazione di CO_2 nell'aria esterna e ε_v = efficienza del sistema di ventilazione.

Tabella 1.7: Valori limite di concentrazione degli inquinanti nell'aria indoor in base alla categoria dell'edificio (EN 16798-1) [15].

Substances	Unit	Concentration Limit Value in Air per Building Category		
		I	II	III
CO_2	ppm	$550 (10) \leq$	$\leq 800 (7)$	$\leq 1350 (4)$
CO	mg m^{-3}	$1 \leq$	$2 \leq$	$3 \leq$
PM10	$\mu\text{g m}^{-3}$	$9 \leq$	$14 \leq$	$23 \leq$
PM2.5	$\mu\text{g m}^{-3}$	$3 \leq$	$5 \leq$	$8 \leq$
Ozone	$\mu\text{g m}^{-3}$	$20 \leq$	$30 \leq$	$50 \leq$
VOC tot	$\mu\text{g m}^{-3}$	$100 \leq$	$150 \leq$	$250 \leq$
Radon	Bq m^{-3}	$100 \leq$	$150 \leq$	$200 \leq$

Questo metodo di calcolo risulta essere il più adeguato per la progettazione della ventilazione sia in ambito residenziale che non in quanto fa riferimento alle sole concentrazioni di inquinanti non andando a riferirsi a parametri soggettivi come il metodo 1.

Metodo 3: metodo flussi d'aria predefiniti

Metodo assai più rapido e prevede l'utilizzo di apposite tabelle (Tabella 1.3 e Tabella 1.4) che forniscono direttamente i valori di portata per persona Q_p e portata per superficie di locale Q_b , potendo determinare Q_{tot} con l'equazione (1.9) o l'equazione (1.10).

Anche se previsto come metodo applicabile per il calcolo della portata di rinnovo dalla UNI EN 16798-1, il metodo 3 non è riconosciuto come metodo valido dall'appendice nazionale NA [19] e per tale motivo non risulta applicato nella pratica progettuale [15].

1.4 Pareti Verdi (Green Walls) e Tecnologie di Fitorimedia

In seguito al grande sviluppo industriale degli ultimi 20 anni in tutto il mondo si è visto l'aumento del bisogno ambienti di lavoro sempre più grandi e prestanti dal punto di vista del comfort del lavoratore così da mantenere quest'ultimo il più produttivo possibile. Relativamente a ciò l'elemento che più in questi anni si è visto studiare e migliorare maggiormente è il microclima interno degli edifici con particolare attenzione nel controllo di temperatura ed umidità, portando ad una rapida evoluzione delle tecniche di controllo e dei macchinari di regolazione di tali fattori. Seppur tale rapida crescita sia benefica per il progresso, il suo riscontro negativo principale è anche l'aumento esponenziale del consumo di energia richiesta dai sistemi HVAC, richiesti sempre più preformanti, con quindi il conseguente aumento del costo dell'energia stesso. Per far fronte a tale aumento la tecnica costruttiva degli edifici di nuova generazione, e ammodernamento dei vecchi, prevede la sempre più elevata ermeticità termica e alle correnti d'aria dei locali così da mantenere il quanto più prestante ed utile l'impianto di climatizzazione [21] [22]. Ciò comporta un ricambio d'aria limitato, l'accumulo di inquinanti interni e uno squilibrio tra temperatura e umidità, fattori che compromettono l'ambiente termico e la qualità dell'aria interna. In quanto spazi caratterizzati da un'occupazione intermittente ad alta densità, le aule universitarie e di istituti di istruzione in generale risultano essere particolarmente vulnerabili: le sessioni didattiche prolungate determinano un calo dei livelli di ossigeno all'interno degli ambienti e un aumento delle concentrazioni di CO₂, che possono scatenare la sindrome da edificio malato, infiammazioni respiratorie, asma e reazioni allergiche [23]. Per fare fronte a tale problema i sistemi HVAC e VMC vengono muniti di sistemi di filtraggio dell'aria che permettono di ridurre la concentrazione degli inquinanti nel locale, a discapito di un conseguente aumento dei costi energetici per l'implementazione di tali metodi [24]. In parallelo allo studio di tali metodi di filtraggio si è iniziata a studiare attentamente la potenzialità dell'uso delle piante come sistema di filtraggio e purificazione dell'aria. La loro disamina partirà dai meccanismi di purifica dell'aria fino ai metodi di attuale implementazione delle piante all'interno degli ambienti lavorativi e pubblici.



Figura 1.3: Modulo di parete verde indoor (*living wall*) utilizzato per il biofiltraggio dell'aria [24].

1.4.1 Fitorimedia

Le piante d'appartamento contribuiscono alla rimozione degli inquinanti atmosferici attraverso l'azione sinergica di foglie e steli (fillosfera), radici e microrganismi associati a queste ultime (rizosfera). L'eliminazione dei contaminanti avviene combinando meccanismi di adsorbimento, assorbimento e trasformazione metabolica; in particolare, l'assorbimento dei VOC, come la formaldeide, si realizza attraverso gli stomi fogliari metabolizzandoli o immagazzinandoli.

La cattura del particolato (PM_{2,5} e PM₁₀) da parte delle foglie avviene principalmente attraverso la deposizione superficiale, un processo in cui caratteristiche fogliari come superficie, rugosità, tricoli e cere svolgono un ruolo fondamentale. Un meccanismo a più lungo termine per catturare e trattenere il particolato è offerto dalle piante sempreverdi, le quali mantengono il fogliame per lunghi periodi.

La rizosfera, grazie al suolo e ai suoi microrganismi, favorisce la fitorimediazione degradando i VOC che raggiungono la zona radicale. L'efficienza di rimozione viene aumentata da microrganismi come lo *Pseudomonas putida* (*P. putida*), presenti sia nelle foglie sia nelle radici delle piante, i quali si occupano di degradare tali composti organici volatili [2].

Attraverso la fotosintesi, le piante verdi da interno assorbono anidride carbonica (CO₂) e rilasciano ossigeno (O₂), contribuendo così a ridurre la concentrazione di CO₂ e ad aumentare quella di O₂. In condizioni di illuminazione diverse, le piante presentano tassi di fotosintesi variabili e, entro un certo intervallo, maggiore è l'intensità luminosa, maggiore è il tasso netto di fotosintesi e maggiore è il tasso di assorbimento di CO₂ [25][26]. I principali fattori che giocano un ruolo fondamentale per la corretta fitodepurazione delle piante sono:

- **Illuminazione:** l'influenza dell'esposizione delle piante alla luce solare o artificiale e il loro valore di densità di flusso luminoso ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) risulta essere fondamentale per l'efficienza del corretto assorbimento della CO₂ per mezzo della fotosintesi. Elevate fluttuazioni o bassi valori di densità di flusso possono comportare riduzioni nell'efficienza di assorbimento e un calo delle prestazioni di biofiltrazione delle piante [24].
- **Temperatura:** influenza la corretta salute delle piante andando quindi ad intaccare la capacità di assorbimento dell'inquinante e la corretta funzione di biofiltraggio.
- **Terreno:** la corretta scelta del terreno migliore e il mantenimento del suo corretto livello di irrigazione permette di mantenere le piante in vita il più a lungo possibile e al meglio delle loro capacità di biofiltrazione. Risulta importante anche per il mantenimento dei microrganismi viventi sulle radici della pianta, responsabili del processo di fitorimediazione essenziale per l'eliminazione dei VOC [24].
- **Flusso d'aria:** la velocità e la portata d'aria inquinata che fluisce verso le piante, nonché la disposizione di questo rispetto alla direzione del flusso, permette di avere un maggiore effetto di biofiltrazione e un miglioramento della IAQ.

- **Irrigazione:** il continuo e corretto flusso d'acqua, necessario alla crescita e al sostentamento della pianta, risulta necessario per poter ottenere il massimo dell'efficienza delle singole piante e della parete interna.
- **Illuminazione:** l'influenza dell'esposizione delle piante alla luce solare o artificiale e il loro valore di densità di flusso luminoso ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) risulta essere fondamentale per l'efficienza del corretto assorbimento della CO_2 per mezzo della fotosintesi. Elevate fluttuazioni o bassi valori di densità di flusso possono comportare riduzioni nell'efficienza di assorbimento e un calo delle prestazioni di biofiltrazione delle piante [24].

1.4.2 Pareti verdi

Con i primi studi di valutazione dell'efficacia delle piante come mezzo aggiuntivo per la purificazione dell'aria si è concluso che, seppur efficace, l'uso di singole piante in vaso riusciva a dare un aiuto minimo o quasi nullo al sistema di purificazione, a causa delle loro potenzialità molto limitate. Il crescente interesse di ricerca ha permesso di ideare sistemi indoor molto più efficaci e prestanti, migliorando l'impatto sulla IAQ e rendendo i sistemi di fitorimediazione un elemento di innovazione tecnologica.

I sistemi più evoluti sono oggi le Pareti Verdi o *Living Walls* (LW). Un sistema di parete verde è una parete parzialmente o interamente ricoperta da piante che necessitano di un substrato di coltivazione, come il terriccio. Molte pareti verdi dispongono di un sistema integrato di irrigazione e utilizzano sezioni continue o modulari. Si tratta di moduli verticali con telaio pre-vegetato o coperture piantumate che vengono fissati a strutture verticali esistenti. Le piante possono essere alloggiate in diversi modi: direttamente nel terreno, in vasi, fioriere o altre strutture di fissaggio [27].

Il principale vantaggio rispetto alle singole piante in vaso è l'elevato aumento della superficie disponibile e la maggiore densità di biomassa utilizzabile. Ciò rende il sistema significativamente più efficiente per la rimozione di CO_2 e dei principali VOC, permettendo inoltre di far fluire l'aria attraverso tutti gli strati della pianta, incrementando drasticamente l'efficienza del fitorimediazione. In base a tali caratteristiche, si distinguono due principali tipologie di LW: le PLW e le ALW.

Pareti verdi passive (PLW)

I sistemi passivi di pareti verdi, o sistemi di pareti viventi inattive, sono realizzati sotto forma di pannelli modulari quadrati o rettangolari. Questi pannelli contengono direttamente il substrato di coltivazione e sono fissati alla facciata o alla struttura di un edificio; solitamente si tratta di un sistema costruttivo leggero [27]. Nelle PLW, il flusso d'aria attraversa la parete dal lato "verde" sfruttando esclusivamente la ventilazione naturale o quella indotta dai sistemi HVAC presenti nell'ambiente. Questo sistema risulta essere economico dal punto di vista costruttivo

e di installazione, ma presenta capacità di biofiltrazione più ridotte, poiché il flusso d'aria che attraversa la parete potrebbe non essere sufficiente per una purificazione ottimale, a causa del limitato passaggio d'aria attraverso i vari strati vegetali. Un vantaggio specifico delle PLW è la maggiore sedimentazione di particolato (PM) sulle foglie. Tuttavia, questo aspetto può rivelarsi controproducente qualora non si effettui una corretta manutenzione: l'eccessivo accumulo di PM può portare a una nuova sospensione delle polveri nell'ambiente e a un drastico calo dell'efficienza di filtrazione [27].

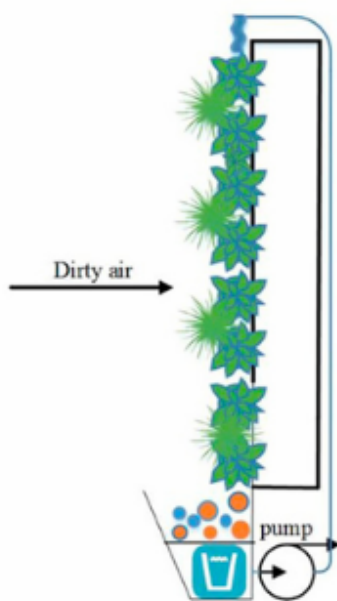


Figura 1.4: Schema di funzionamento di un sistema di biofiltrazione a parete attiva (Active Green Wall/PLW): l'aria viziata attraversa la parete vegetata che agisce come filtro biologico, irrigata da un sistema di ricircolo idrico con pompa [27].

Pareti verdi attive (ALW)

Le Pareti Verdi Attive (ALW) rappresentano il massimo livello di ingegnerizzazione nel settore, permettendo un elevato incremento delle capacità di fitorimediazione e biofiltrazione. Lo schema costruttivo segue quello delle PLW, ma le ALW integrano un sistema di ventilazione forzata che convoglia attivamente l'aria attraverso la vegetazione e i substrati di coltivazione, migliorandone le prestazioni grazie alla gestione di volumi d'aria significativamente maggiori [28]. L'aumento delle prestazioni è diretto conseguenza dell'incremento della portata d'aria trattata:

- **Azione della fillosfera:** una maggiore circolazione d'aria permette una più efficace cattura del PM e una riduzione più rapida della CO_2 .

- **Coinvolgimento della rizosfera:** il flusso forzato ottimizza il contatto dell'aria con l'apparato radicale e i microrganismi associati, favorendo un numero superiore di reazioni di scomposizione dei VOC in composti non nocivi.

Dal punto di vista dell'efficienza di filtrazione, le ALW costituiscono un netto miglioramento rispetto ai sistemi passivi. Tuttavia, il principale svantaggio è legato alla maggiore richiesta di energia elettrica necessaria per alimentare il sistema di ventilazione forzata; in alcuni casi, tale dispendio energetico potrebbe quasi azzerare i benefici ambientali netti ottenuti dal processo di purificazione [29].

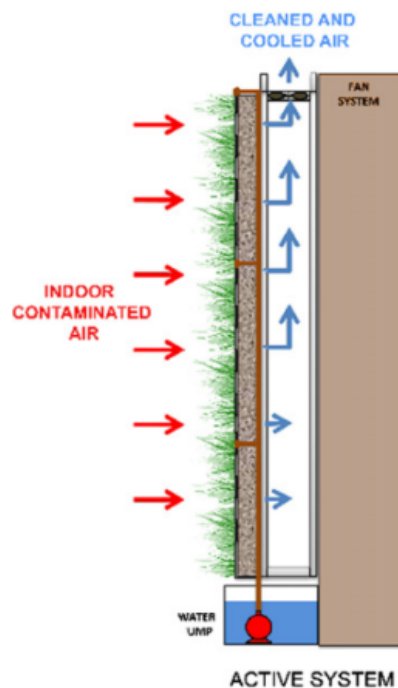


Figura 1.5: Schema di funzionamento di un sistema attivo di biofiltrazione a parete vegetata (Active Living Wall). Il sistema utilizza un ventilatore per forzare l'aria viziata attraverso il substrato vegetato, che agisce come filtro biologico, garantendo aria pulita e rinfrescata [30].

Capitolo 2

Introduzione a TRNSYS

TRNSYS è un ambiente di simulazione completo ed estendibile per la simulazione transitoria di sistemi, compresi gli edifici multizona. Viene utilizzato da ingegneri e ricercatori di tutto il mondo per convalidare nuovi concetti energetici, dai semplici impianti di acqua calda sanitaria alla progettazione e simulazione di edifici e delle relative apparecchiature, comprese le strategie di controllo, il comportamento degli occupanti, i sistemi energetici alternativi (eolici, solari, fotovoltaici, a idrogeno), ecc.

Uno dei fattori chiave del successo di TRNSYS negli ultimi 25 anni è la sua struttura aperta e modulare. Il codice sorgente del kernel (elemento centrale del codice del programma) e dei modelli dei componenti viene fornito agli utenti finali. Ciò semplifica l'estensione dei modelli esistenti per adattarli alle esigenze specifiche dell'utente. Le applicazioni di TRNSYS includono:

- Impianti solari (solari termici e fotovoltaici);
- Edifici a basso consumo energetico e impianti di climatizzazione con caratteristiche progettuali avanzate (ventilazione naturale, riscaldamento/raffreddamento a pavimento, doppia facciata, ecc.);
- Impianti di energia rinnovabile;
- Cogenerazione e celle a combustibile;
- Tutto ciò che richiede una simulazione dinamica.

TRNSYS è costituito da una suite di programmi: TRNSYS Simulation Studio, il motore di simulazione (TRNDll.dll) e il relativo eseguibile (TRNExe.exe), l'interfaccia grafica per l'inserimento dei dati relativi agli edifici (TRNBuild.exe) e l'editor utilizzato per creare programmi autonomi ridistribuibili noti come applicazioni TRNSED (TRNEdit.exe) [31].

2.1 Simulation Studio

L'interfaccia grafica principale è TRNSYS Simulation Studio. Da lì, è possibile creare progetti trascinando i componenti nell'area di lavoro, collegandoli tra loro e impostando i parametri globali di simulazione. Questo salva le informazioni relative al progetto in un file di progetto TRNSYS (*.tpf). Quando si esegue una simulazione, Studio crea anche un file di input TRN-SYS (un file di testo che contiene tutte le informazioni relative alla simulazione, ma nessuna informazione grafica). Simulation Studio include anche un gestore di output da cui è possibile

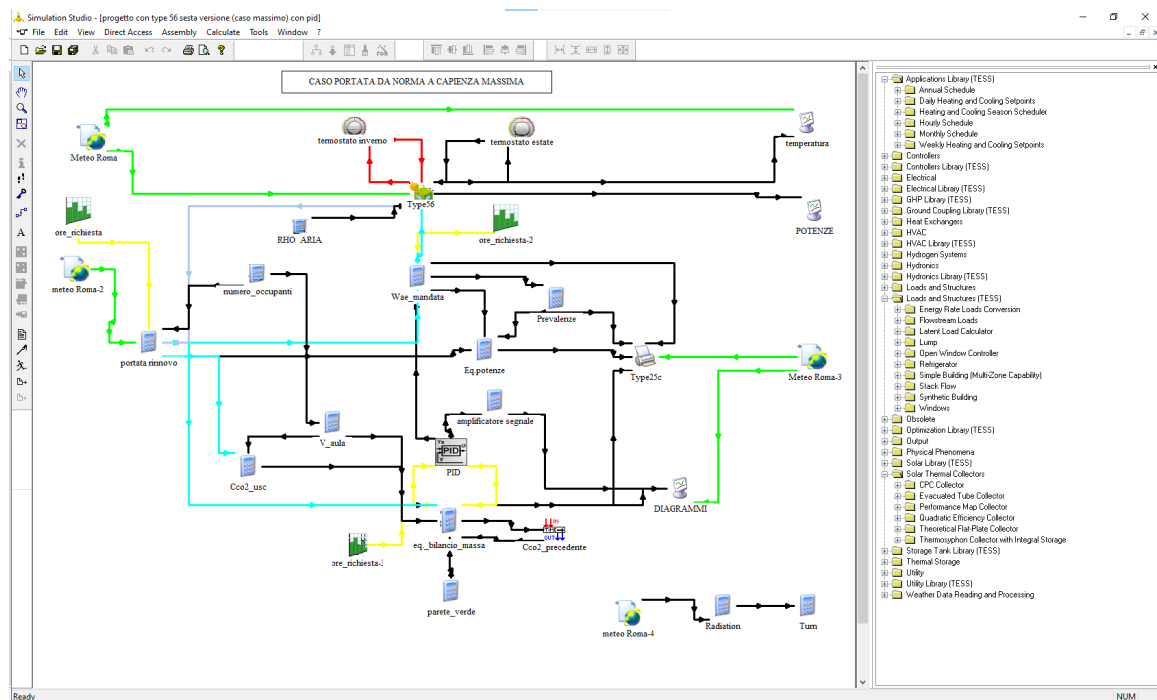


Figura 2.1: Schermata Simulation Studio TRNSYS [32].

controllare quali variabili vengono integrate, stampate e/o tracciate, e un gestore di log/errori che consente di studiare in dettaglio ciò che è accaduto durante una simulazione. È inoltre possibile eseguire numerose operazioni aggiuntive da Simulation Studio: generare progetti utilizzando la “Procedura guidata Nuovo progetto”, generare uno scheletro per nuovi componenti utilizzando la procedura guidata Fortran, visualizzare e modificare i proforma dei componenti (un proforma è la descrizione di input, output e parametri di un componente), visualizzare i file di output, ecc [31].

2.2 Interfaccia visualizzazione struttura

TRNBuild è lo strumento utilizzato per inserire i dati di input relativi agli edifici multizona. Esso consente di specificare tutti i dettagli relativi alla struttura dell'edificio, nonché tutte le informazioni necessarie per simulare il comportamento termico dell'edificio, quali le proprietà ottiche delle finestre, i programmi di riscaldamento e raffreddamento, ecc. TRNBuild crea un file di descrizione dell'edificio (*.bui) che contiene tutte le informazioni necessarie per simulare l'edificio [31].

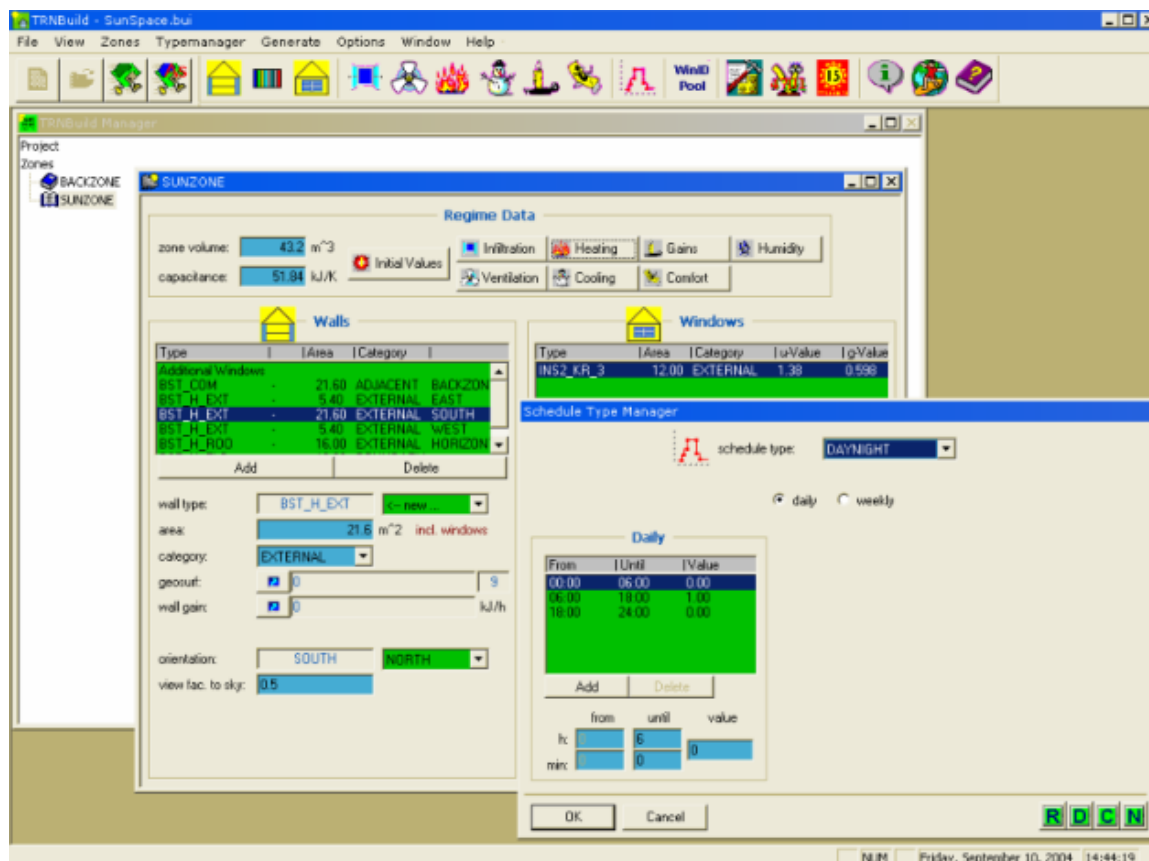


Figura 2.2: Schermata TRNBuild TRNSYS [31].

2.3 Realizzazione di un progetto in TRNSYS

In TRNSYS sono presenti complessivamente 150 componenti dalla libreria standard ed oltre 250 aggiungendo le librerie ausiliarie TESS [32]. Questo elevato numero di componenti, associato ad un'ulteriore elevato numero di funzioni di simulazione, dà la possibilità di realizzare un numero e tipologie di progetti pressoché illimitato. Nonostante ciò la realizzazione di base di un progetto di TRNSYS e i passaggi logici sono gli stessi.

- **Analisi del problema:** Sia che si tratti di effettuare una progettazione da zero o ricreare come modello sistemi già esistenti, l'analisi preliminare del problema permette di poter realizzare una mappa logica dei componenti da usare e delle relazioni che avranno tra di loro, oltre che conoscere quali dati usare.
- **Creazione di un progetto vuoto:** aprendo TRNSYS inizialmente si avrà una schermata vuota, da lì si va su File/Nuovo e si seleziona uno tra i modelli possibili di progetto, da quello completamente vuoto a progetti per ambienti mono-zona o multi-zona con possibilità di integrare un progetto 3D. Per impostazione predefinita, il progetto viene creato in una nuova cartella denominata Projectn, dove n è un numero (che viene omesso per il primo progetto creato, denominato semplicemente Project.tpf). In questo modo verrà creato un progetto vuoto [31].

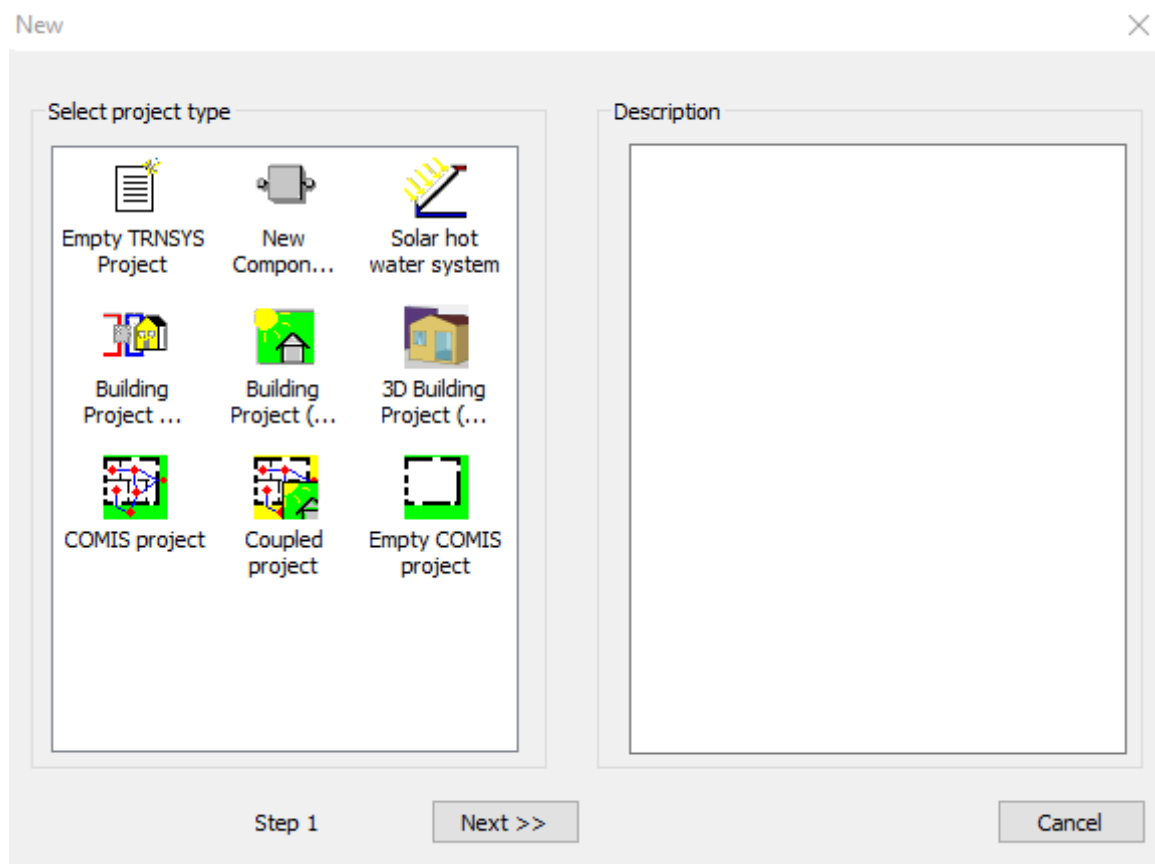


Figura 2.3: Schermata nuovo progetto TRNSYS [32].

- **Aggiunta componenti:** una volta scelto che tipo di progetto andare a realizzare si andranno ad aggiungere i vari componenti che serviranno per poter schematizzare al meglio il funzionamento del nostro sistema e permettendo così la corretta riuscita della simulazione. Tali componenti dovranno seguire come criterio quello di partire dal problema più generale

e man mano inserire quelli più specifici per il caso in esame, dividendosi così in componenti necessari per il modello fisico del sistema e componenti di servizio [31].

- **Collegamento componenti:** I componenti vengono collegati utilizzando lo strumento “Collegamento”, che si attiva premendo il pulsante “Collegamento” o tramite tasto destro sul componente e cliccando Sart Link. Quando si passa il mouse sull'icona di un componente, diventano visibili gli 8 punti di connessione disponibili. Fare clic su uno di essi per selezionare il punto di partenza, quindi spostarsi sul componente che si desidera collegare e selezionare nuovamente un punto di connessione. Fare clic per creare il collegamento. Il collegamento appena creato è vuoto, ovvero non collega ancora alcuna coppia (uscita; ingresso). Ciò è indicato da un colore diverso del collegamento (blu per impostazione predefinita, mentre i collegamenti con connessioni sono neri). Per collegare le uscite agli ingressi all'interno di un collegamento, è necessario tornare allo strumento di selezione premendo il tasto ESC. A questo punto è possibile fare doppio clic sul collegamento e modificare i collegamenti [31].

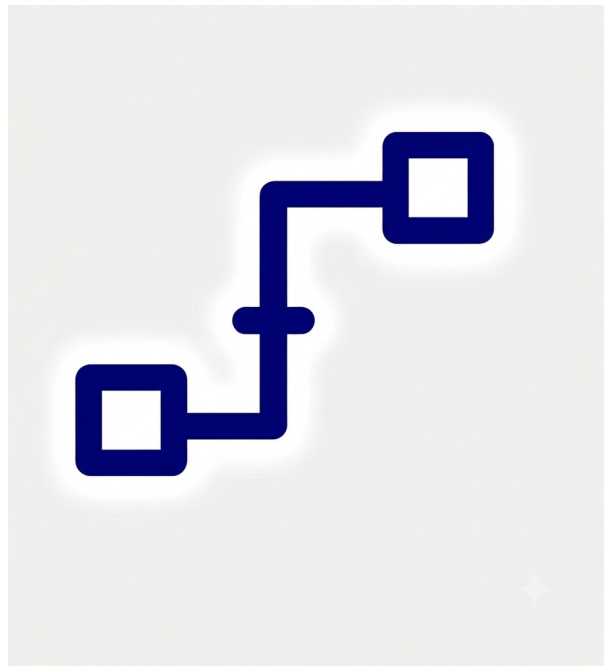


Figura 2.4: Icona funzione collegamento TRNSYS [32].

- **Nomenclatura output componenti:** questo passaggio non è richiesto per tutti i componenti ma solo per quelli che generano in uscita uno o più output che possono poi essere direttamente visualizzati o che vengono impiegati come ingresso in altri componenti [31].

- **Impostazione parametri simulazione:** una volta completato il collegamento dei componenti secondo lo schema migliore per il progetto si clicca su "Control Card", facendo comparire un menù dove verranno riportati tutta una serie di parametri che serviranno per definire la simulazione nel modo più accurato possibile (tempo di inizio e fine simulazione, passo temporale della simulazione saranno i fattori principali).



Figura 2.5: Icona Control Cards TRNSYS [32].

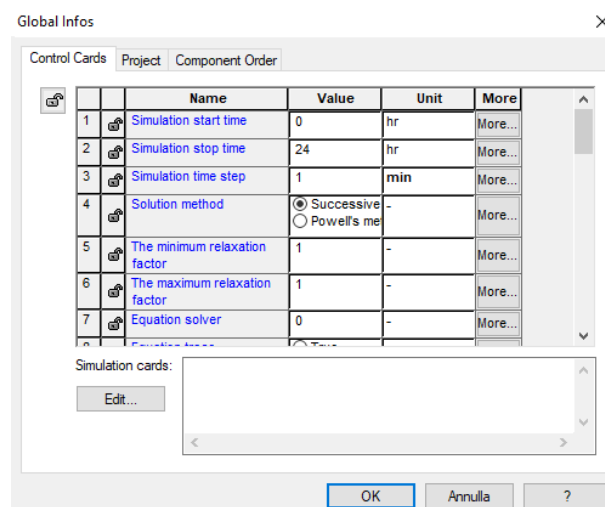


Figura 2.6: Menù Control Cards TRNSYS [32].

- **Avvio simulazione:** effettuate le opportune modifiche ai parametri di simulazione si clicca su Calcola / Esegui simulazione oppure F8 per eseguire la simulazione. L'online plotter visualizzerà i risultati della simulazione durante l'esecuzione e verranno generati i file di output. Se si verifica un errore durante l'elaborazione del file di input o l'esecuzione della simulazione, è possibile visualizzare i messaggi di errore dettagliati utilizzando il Gestore errori [31].

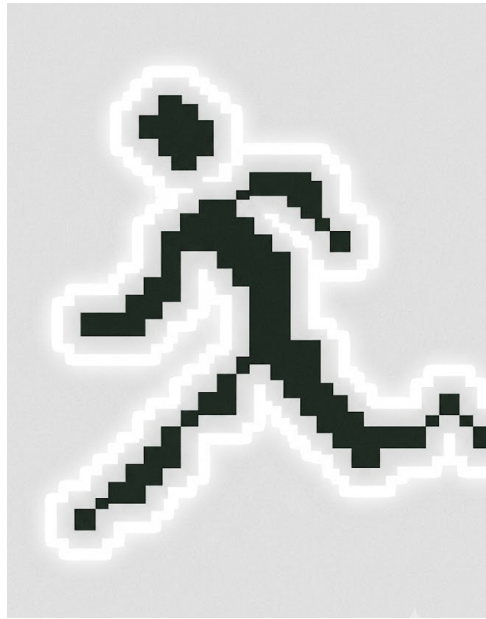


Figura 2.7: Icona funzione avvio simulazione TRNSYS [32].

Capitolo 3

Caso studio

Chiariti nei capitoli precedenti quali sono i vincoli da osservare nello studio degli inquinanti degli ambienti chiusi e cosa le normative nazionali ed europee impongono come vincoli per il corretto monitoraggio e smaltimento di tali inquinanti e quali sono i principali parametri da mantenere sotto osservazione, si passa a prendere in rassegna la realizzazione di un modello matematico per la valutazione dell'effetto di una PLW utilizzabile con il fine di ottenere un metodo alternativo ma comunque valido ai classici sistemi di filtrazione e purifica dell'aria. Si prenderanno in esame 4 varianti dell'aula: senza PLW, PLW piccola, PLW media, PLW grande. In questo capitolo verranno definite le ipotesi e le procedure impiegate per la realizzazione del modello di calcolo sviluppato tramite TRNSYS e i dati che si sono ottenuti verranno discussi nei capitoli successivi.

3.1 Ipotesi progettuali

Dato l'elevato numero di variabili che possono entrare in gioco nella corretta realizzazione e valutazione del modello per la valutazione dell'impatto della PLW sono state prese a monte delle ipotesi progettuali sempre idonee e coerenti con l'obiettivo della tesi, rendendo allo stesso tempo però lo studio e stesura del progetto più definita ed uniforme. Le ipotesi che sono state assunte in questo progetto sono:

- **CO_2 come inquinante di riferimento:** nell'analisi si è preso come inquinante di riferimento per formule e valutazioni finali la CO_2 , in quanto risulta essere il principale inquinante presente in locali adibiti allo stazionamento di persone senza però presenza di lavorazioni o particolari attività che possono dare origine ad altri inquinanti (lavorazioni meccaniche, realizzazione di miscele chimiche, ecc). Si prenderanno quindi come riferimento i dati relativi alla contrazione massima forniti dal WHO [3], mentre per i calcoli si prenderanno le formule e i valori limite forniti dalla UNI EN 16798 [15].

- **Roma come città riferimento:** si è scelta Roma come città di valutazione del caso studio in quanto TRNSYS forniva già completo il suo file climatico (spiegato in seguito) rendendo così la definizione dei parametri di contorno più rapida e più precisa.
- **Aula istituto superiore come riferimento:** la scelta di prendere come riferimento un'aula di un istituto di istruzione superiore standard è stata fatta in seguito ai dati raccolti in precedenza per lo studio della singola PLW, analizzata in condizioni di inquinamento dell'aria e produzione di CO_2 riconducibili a quelli di aule scolastiche superiori. Le dimensioni dell'aula in esame sono: larghezza 5 m, lunghezza 8 m e altezza 3 m per una superficie calpestabile di 40 m^2 e un volume complessivo di 120 m^3 .

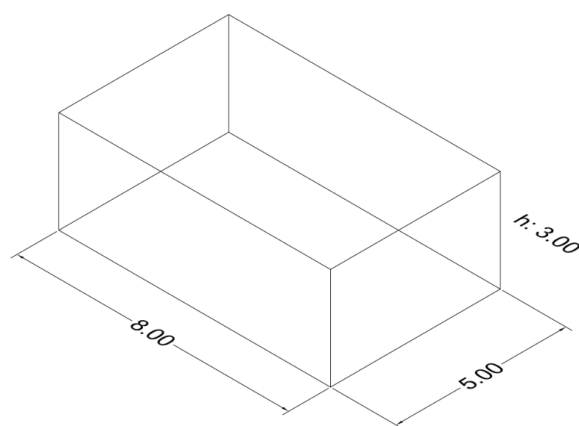


Figura 3.1: Schema geometrico e tridimensionale dell'aula con relative quotature (8.00 m $\times$ 5.00 m $\times$ 3.00 m).

- **Aula impermeabile all'aria:** l'aula è stata presa perfettamente ermetica e sono stati assunti come assenti eventuali infiltrazioni d'aria che andrebbero a variare la concentrazione di CO_2 e di conseguenza alterare la portata d'aria calcolata.
- **Valutazione solo periodo invernale:** il periodo preso come durata dell'intera simulazione è quello sancito dall'ordinanza 147 del comune di Roma [8] che, essendo in zona climatica D, va dal 15 Novembre 2025 all'8 di Aprile 2026. Nella simulazione vengono considerati anche i sabati e le domeniche come giorni di utilizzo aula.
- **Energia utile per riscaldamento:** si assume il mantenimento della temperatura interna a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. In questa analisi si è fatta una valutazione di massima per tenere conto dell'energia necessaria a riscaldare l'aria immessa negli ambienti.
- **Sistema ventilazione sopra il locale:** si è ipotizzata la posizione del sistema di ventilazione meccanica controllata (VMC) direttamente nel contro soffitto sopra l'aula così da diminuire al minimo le perdite nei condotti. Per la simulazione si è fatto riferimento alle caratteristiche

della macchina Aermec *RPLI_L*: macchina che lavora a bassa pressione così da far fronte anche al problema del rumore e che rispetta le grandezze trovate nella simulazione [13].

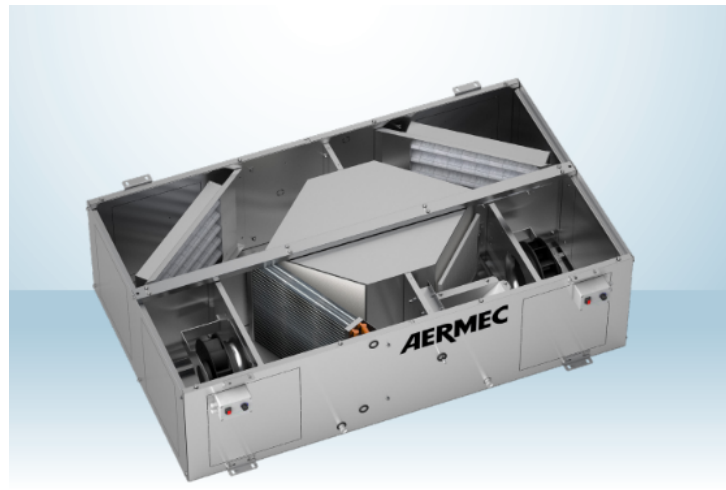


Figura 3.2: Macchina *RPLI_L* Aermec [13].

3.2 Realizzazione modello

In questa parte del capitolo verrà spiegato prima lo schema logico che si trova alla base del modello matematico e poi verranno introdotti i principali blocchi di componenti che vanno a costituire il modello complessivo. Per rendere la lettura più comprensibile per ogni blocco verrà fornito: lo scopo di quest'ultimo, i componenti (definiti Typs da TRNSYS) con il loro funzionamento e collegamenti tra quest'ultimi.

3.2.1 Schema logico modello

Nel modello sono presenti 6 blocchi principali che sono stati utilizzati per poter dividere in maniera opportuna le varie fasi di studio e realizzazione. I blocchi presentano al loro interno vari componenti, alcuni caratteristici del blocco stesso ed altri comuni a più o meno tutti in quanto necessari in più passaggi. I singoli blocchi, una volta realizzati, sono stati poi uniti tra di loro sempre seguendo un determinato ordine in modo da avere collegati solo uno stretto numero di componenti tramite parametri fondamentali che rappresentano quelli necessari per il funzionamento del blocco successivo. In questo modo si è ottenuto alla fine un modello che lavora in maniera sinergica sul controllo di più parametri e la loro regolazione con il fine ultimo di poter ottenere un livello di qualità dell'aria ottimale al locale. Per semplificare la trattazione dei vari blocchi i collegamenti tra componenti interni allo stesso blocco verranno definiti solo dal punto di vista logico, mentre eventuali collegamenti con componenti di altri blocchi verranno citati i colori del collegamento visibili sullo schema del progetto completo.

3.2.2 Blocco 1: definizione aula e parametri ambientali

Questo è il primo blocco in ordine di studio e realizzazione in TRNSYS. E' servito per poter inserire all'interno del progetto l'elemento dell'alula scolastica su cui sono stati fatti i vari studi e il file climatico contenente all'interno vari parametri relativi al meteo romano. I Types impiegati in questo blocco sono: il Type 15, il type 56, il Type 1502, il Type 1503, un blocco equazione e il Type 65d. I componenti logici di TRNSYS usati in questo blocco stati:

Type 15: Weather Data Processor

Questo componente legge e interpreta i dati meteorologici disponibili in una serie di formati standardizzati. I file di dati supportati sono: Anno Meteorologico Tipico (TMY), Anno Meteorologico Tipico versione 2 (TMY2), EnergyPlus Weather, Dati meteorologici internazionali per i calcoli energetici (IWECC), Dati meteorologici canadesi per i calcoli energetici (CWECC), Anno Meteorologico Tipico versione 3 (TMY3), TRY tedesco 2004 e TRY tedesco 2010. Oltre a leggere i file di dati, Type 15 calcola la radiazione solare totale, diretta, diffusa dal cielo e riflessa

dal suolo, l'angolo di incidenza della radiazione solare diretta, l'inclinazione e l'azimut di tutte le superfici che l'utente desidera definire. Il Type include inoltre il calcolo della temperatura effettiva del cielo per i calcoli di radiazione. Fornisce inoltre una serie di indicatori quali la stagione di riscaldamento e raffreddamento, le temperature massime, minime e medie mensili e annuali [33].



Figura 3.3: Type 15 TRNSYS progetto.

Il Type viene inizialmente fornito vuoto, per il collegamento del file meteo di Roma si fa doppio click sul Type, facendo aprire un menù con più pagine, si va su External Files e da lì si clicca brows. Così facendo si aprirà una cartella interna a TRNSYS in cui sono contenuti i vari file meteo.

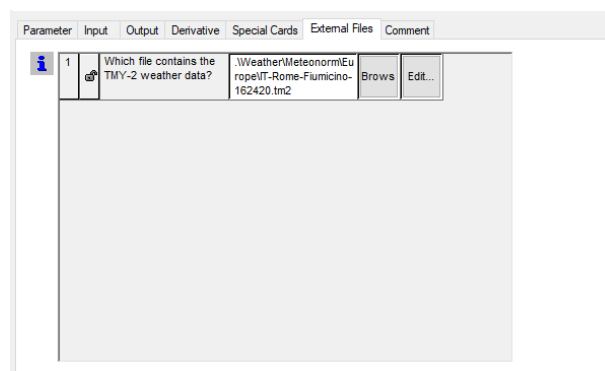


Figura 3.4: Menù Type 15 TRNSYS.

Type 56: Multizone Buliding

Questo componente modella il comportamento termico di un edificio suddiviso in diverse zone termiche. Per poter utilizzare questo componente, è necessario eseguire prima un programma di pre-elaborazione separato. Il programma TRNBUILD legge ed elabora un file contenente la descrizione dell'edificio e genera due file che verranno utilizzati dal componente Type 56 durante una simulazione TRNSYS [34]. Aprendo TRNBUILD o premendo il tasto destro sull'icona del Type 56 e premendo edit building si aprirà la schermata in cui sarà possibile modificare le varie zone del progetto che si vuole realizzare, nel nostro caso ci si è limitati ad un solo locale. Sulla schermata di controllo del Type 56 si apriranno due tendine, una definita project in cui è possibile inserire indicazioni relative al file creato (nome progetto, descrizione, autore, ecc) e una seconda tendina in cui si potranno andare a definire gli inputs ed outputs dal Type, l'orientazione del locale e proprietà delle pareti.

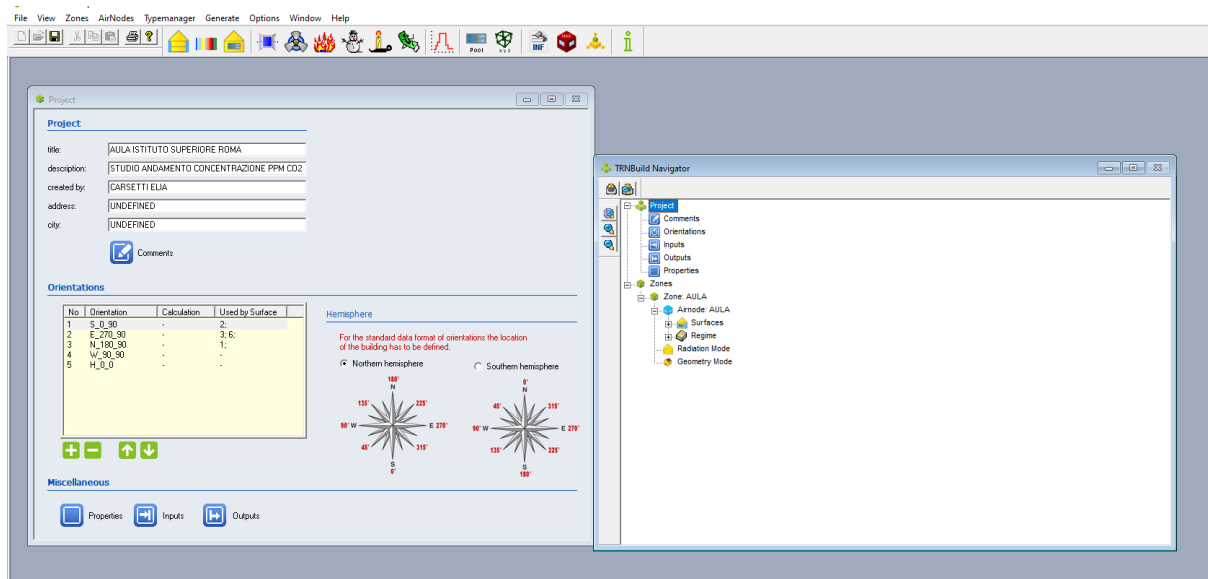


Figura 3.5: Schermata Type 56 TRNSYS.

Sempre nel secondo menù è inoltre possibile modificare per ogni zona del progetto (una nel caso studio) le dimensioni delle pareti e la loro stratigrafia (non studiata nel nostro caso), eventuale aggiunta finestre, l'area del pavimento e parametri per la ventilazione (nel nostro caso fatta esterna in quanto si sono usate norme specifiche), riscaldamento e raffreddamento del locale, apporti per via delle persone e delle loro attività svolte, umidità comfort e valori iniziali. Nel modello quello che è stato fatto è settare per il riscaldamento la temperatura a 20°C [35] dando come quantitativo di energia disponibile illimitato regolata da un segnale esterno dato da un termostato e definire la dimensione del locale fornendo un'area del pavimento di 40 m² ed altezza delle pareti di 3 m.

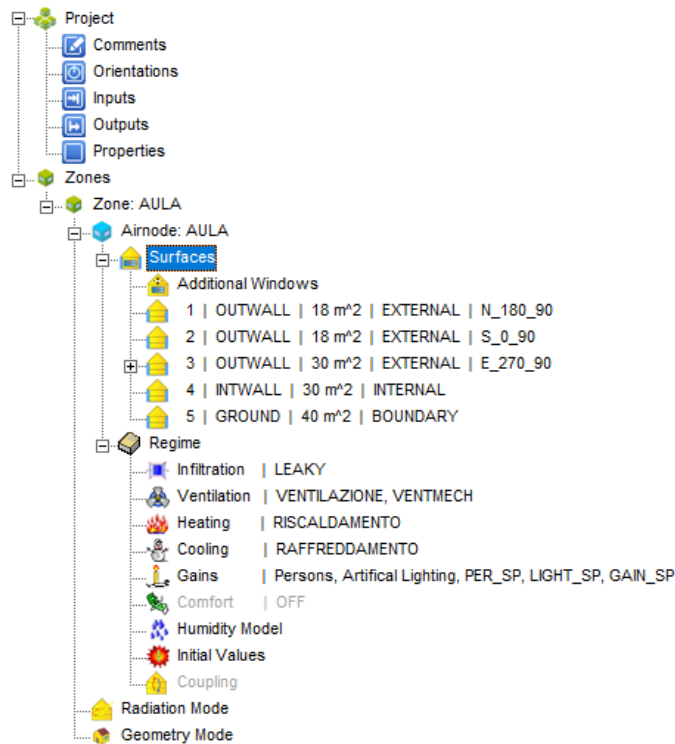


Figura 3.6: secondo menù Type 56 TRNSYS.

Type 1502: Simple Thermostat

Viene modellato termostato semplice in modo da fornire funzioni di controllo ON/OFF che possono essere utilizzate per controllare un sistema di raffreddamento a fluido dotato di una o più sorgenti di riscaldamento a più stadi [36]. Nel progetto questo Type è stato impiegato in quanto necessario al Type 56 per via del fatto che il riscaldamento ha sì energia illimitata ma viene fornita solo quando il termostato rileva una variazione dalla temperatura di setpoint.



Figura 3.7: Termostato inverno - Componente 1502 della libreria TESS TRNSYS.

Equazione

Il componente equazione non si trova direttamente nella libreria di TRNSYS ma si aggiunge premendo su Assembly in alto alla pagina e selezionando New Equation. A questo punto si creerà un nuovo blocco equazione vuoto all'interno del quale si potranno inserire le equazioni o costanti che servono per la simulazione. Aprendo il blocco equazione si aprirà il menù con a sinistra eventuali input che saranno dati uscenti da Types inseriti prima e sugli outputs si avranno le equazioni, che potranno far riferimento o parametri fissi inseriti anche essi negli outputs o prendere come dati gli input inseriti. In ogni blocco equazione si posso inserire più equazioni che usciranno come outputs.



Equa

...

Figura 3.8: Blocco Equazione TRNSYS.

Type 65d: Online Plotter without file

Il componente grafico online viene utilizzato per visualizzare le variabili di sistema selezionate a intervalli di tempo specificati durante lo svolgimento della simulazione. Questo componente è vivamente consigliato e ampiamente utilizzato poiché fornisce preziose informazioni sulle variabili e consente agli utenti di rendersi immediatamente conto se il sistema non sta funzionando come desiderato. Le variabili selezionate verranno visualizzate in una finestra di grafico separata sullo schermo [33]. Una volta inseriti gli inputs è poi possibile assegnare loro un nome che il Type andrà poi in automatico ad associare con un colore apposito del grafico, in modo da visualizzare ogni grandezza in maniera rapida. E' inoltre possibile settare più scale per i due assi verticali e si ha inoltre la possibilità di assegnare ad ogni asse la sua grandezza apposita.



Type65d

Figura 3.9: Componente Type 65d di TRNSYS.

Collegamenti e funzionamento

1. Il primo elemento ed essere stato inserito è stato il Type 15 in cui è stato poi definito come meteo di riferimento quello di Roma.
2. Il secondo componente ed essere stato inserito è stato il Type 56 che è stato usato per modellare l'aula scolastica del caso studio e per definire un sistema ideale di riscaldamento, a cui stato poi collegato poi al Type 15 così da fornirgli dati relativi a T_{esterna} , umidità relativa ed assoluta e irraggiamento solare.
3. Il terzo componente è stato il Type 1502, con l'obbiettivo di regolare la temperatura interna dell'aula così da averla sempre costate a 20 °C come da norma UNI TS 11300 [35]. Il termostato è stato collegato al Type 56 in quanto fornisce il segnale per il sistema di riscaldamento, mentre il Type 56 fornisce loro la temperatura del locale che è quella da monitorare.
4. Il quinto componente aggiunto è stato il blocco equazione che è servito per fornire al Type 56 la densità dell'aria (1,3 kg/m³).
5. Per ultimo componente (sesto) è stato inserito il Type 65d, a cui sono stati collegati come output la temperatura esterna ed interna all'aula.

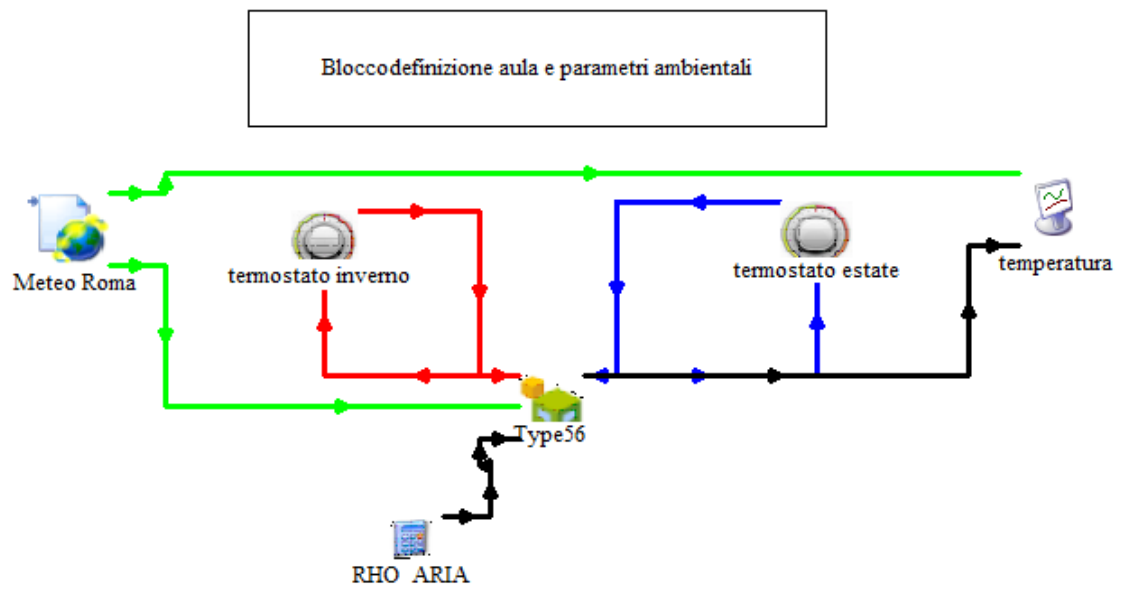


Figura 3.10: Blocco definizione aula e parametri ambientali.

3.2.3 Blocco 2: radiazione solare

E' il secondo blocco del progetto e la sua funzione è quella di fornire al Type 56 le informazioni relative alla radiazione solare e come questa investe l'aula della simulazione, con la possibilità di implementare eventuali apporti termici al locale che andrebbero quindi ad incidere sull'energia termica necessaria al riscaldamento. Dal punto di vista dei componenti sono stati usati il Type 15 e due blocchi equazione, entrambi già spiegati in paragrafo 3.2.2.

Collegamenti e funzionamento

1. Il primo Type inserito è il Type 15 a cui vengono presi i valori relativi ad irraggiamento solare, angolo di incidenza, Azimut, Zenit e tutti i valori di radiazione solare incidenti sulle pareti del progetto definite come esterne.
2. Il secondo elemento inserito è la calcolatrice Radiazione, in cui entrano gli input del Type 15 ed escono i valori di radiazione incidente per ogni superficie.
3. Il terzo componente è la calcolatrice Angoli incidenza radiazione in cui entrano i valori delle radiazioni incidenti della calcolatrice Radiazioni e fornisce i valori delle angolazioni delle varie superfici tenendo in considerazione parametri come l'emisfero.

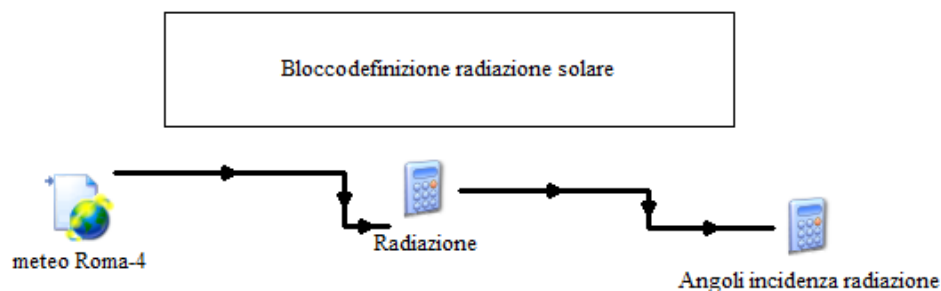


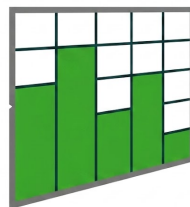
Figura 3.11: Schema del blocco dati per la radiazione solare.

3.2.4 Blocco 3: calcolo portata di rinnovo

Questo terzo blocco è servito per poter definire i parametri fondamentali per il calcolo della portata di rinnovo trovata con il metodo 2 fornito dalla UNI EN 16798 [15] disquisita nel paragrafo 1.3.2. I componenti utilizzati sono: il Type 15, due blocchi equazione (entrambi spiegate in paragrafo 3.2.2) e il componente Type14h.

Type 14h: General Forcing Functions

La forcing function è dipendente dal tempo il cui andamento è caratterizzato da uno schema ricorrente. Lo scopo di questa routine è quello di fornire uno strumento per generare una funzione di forzante di questo tipo. Lo schema della forcing function è determinato da una serie di punti dati discreti che ne indicano i valori in vari istanti nel corso di un ciclo. Viene fornita l'interpolazione lineare al fine di generare una funzione di forzante continua a partire da questi dati discreti [33]. Il corretto settaggio della forcing function avviene facendo doppio click su di essa con il tasto sinistro, facendo comparire un menù in cui si andranno a modificare i valori della scheda Parameters in cui è riportato l'istante iniziale e il valore della funzione in tale istante. Quello che si può fare è aggiungere un numero n di time step ed attribuire ad ogni intervallo un dato valore della funzione così da darle l'andamento voluto.



ore_richiesta

Figura 3.12: Componente Type 14h Trnsys.

Collegamenti e funzionamento

1. Il primo Type inserito è il Type 15 dal quale viene presa la temperatura esterna e la pressione atmosferica impiegate poi nel blocco equazione "portata_rinnovo".
2. Il secondo elemento inserito è stato il blocco funzione numero_occupanti in cui in cui sono presenti:

Numero occupanti : si è scelto come valore di riferimento un affollamento di 20 persone.

Area_aula_ : trovata dalla formula $\text{Area_aula} = \text{Numero_occupanti} / 0.5$ con 0.5 indice di affollamento per locali adibiti ad aule di istituti superiori secondo norma UNI EN 16978 [15].

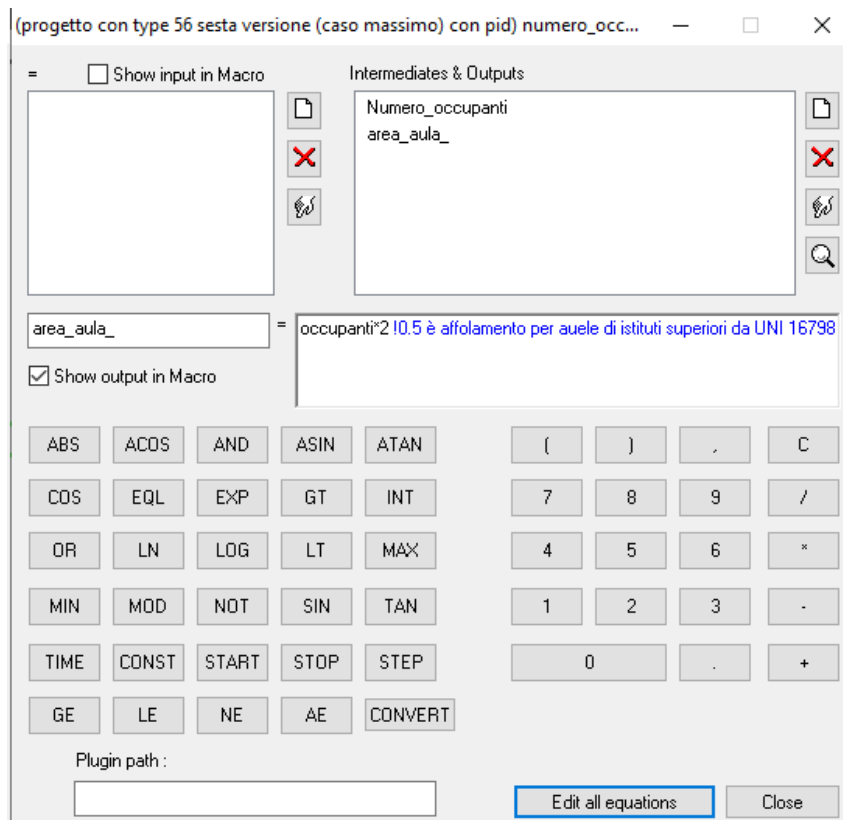


Figura 3.13: Definizione dell'equazione per l'area dell'aula in base all'affollamento.

3. Il terzo Type inserito è il Type 14h, utilizzato per definire le ore di occupazione dell'aula e definito come ore richiesta. Il profilo è stato realizzato imponendo un'occupazione graduale dalle 8:00 alle 8:30, per poi avere un'occupazione massima dalle 8:30 alle 13:30 e poi lento declino fino a riavere 0 alle 13:30.

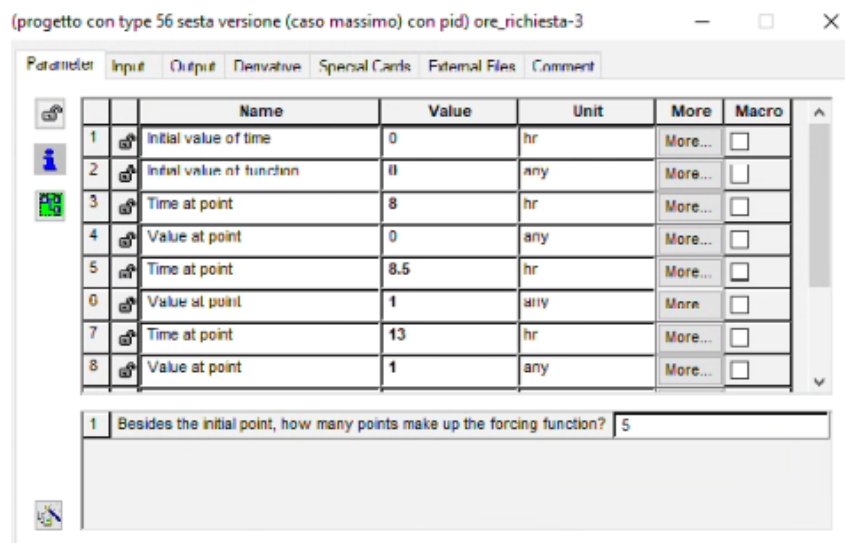


Figura 3.14: Interfaccia dei parametri del Type 14h in TRNSYS.

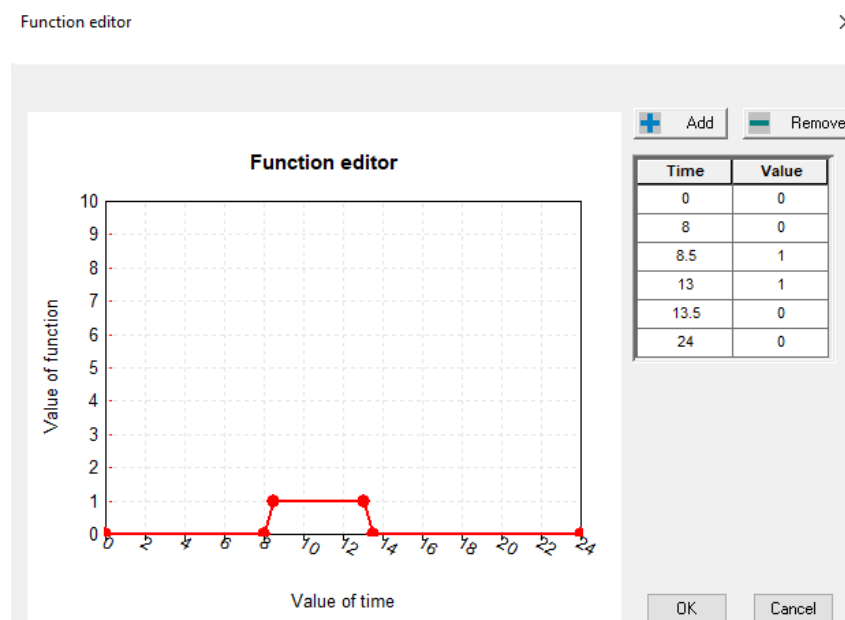


Figura 3.15: Andamento temporale della funzione definita nel Function Editor del Type 14h.

4. L'ultimo Type inserito è il blocco equazione nominato Portata_rinnovo nel quale troviamo:

TestK = temperatura dell'aria esterna all'aula in kelvin (K). Trovata come $\text{TestK} = \text{Test} + 273.15$ con Test temperatura esterna presa dal Type 15 che è collegato e fornita in °C e 273.15 è la costante di conversione dai °C ai K.

TintK = temperatura dell'aria interna all'aula in kelvin (K). Trovata come $\text{TintK} = \text{Tint} + 273.15$ con Tint temperatura interna presa dal Type 56 che è collegato e fornita in °C e 273.15 è la costante di conversione dai °C ai K. Il collegamento con il Type 56 è visibile come linea fucsia nello schema del progetto completo.

$C_{\text{CO}_2, \text{est}}$ = fornisce la concentrazione di CO_2 dell'aria esterna. Si trova come

$$C_{\text{CO}_2, \text{est}} = 10^{-3} \times \frac{101.325}{188.92 \times T_{\text{estK}}} \times 400 \quad [\text{g/m}^3] \quad (3.1)$$

400 sono i ppm standard di concentrazione dell'aria esterna [15], 101.325= pressione atmosferica (kPa). Riprende l'equazione 1.17 sulla conversione della concentrazione da ppm a g/m^3 fornita dalla UNI EN 16798 [15].

$C_{\text{CO}_2, \text{int}}$ = fornisce la concentrazione di CO_2 dell'aria interna. Si trova come

$$C_{\text{CO}_2, \text{int}} = 10^{-3} \times \frac{101.325}{188.92 \times T_{\text{intK}}} \times 1000 \quad [\text{g/m}^3] \quad (3.2)$$

1000 sono i ppm di CO_2 limite che si possono avere nel locale [3], 101.325 = pressione atmosferica (kPa). Riprende l'equazione 1.17 sulla conversione della concentrazione da ppm a g/m^3 fornita dalla UNI EN 16798 [15].

G_{inq} = permette di trovare la produzione di CO_2 interna al locale.

$$G_{\text{inq}} = \frac{20 \times 20 \times 101.325}{T_{\text{intK}} \times 0.18892} \quad [\text{g/m}^3] \quad (3.3)$$

con 20 = produzione media di CO_2 a persona (l/h), 20 = numero occupanti preso dall'equazione numero_occupanti, 101.325 = pressione atmosferica (kPa). Questa formula riprende in maniera più semplificata ma comunque valida la 1.13 fornita dalla UNI EN 16798 [15].

ε_v = efficienza del sistema di ventilazione, presa come $\varepsilon_v = 0.9$ in quanto si assume un sistema di diffusione dell'aria a miscelazione totale.

W_{ae} = fornisce la portata necessaria per poter effettuare il rinnovo d'aria.

$$W_{ae} = \frac{1}{\text{effVent}} \times \text{ore_richiesta} \times \left(\frac{G_{\text{inq}}}{C_{\text{CO}_2_int} - C_{\text{CO}_2_est}} \right) \quad [\text{m}^3] \quad (3.4)$$

ore_richiesta = periodo di occupazione del locale presa come istantaneous time step dal Type 14h. Questa equazione riprende l'equazione di calcolo della portata della CO₂ del metodo 2 fornito dalla UNI EN 16798 [15] [20].

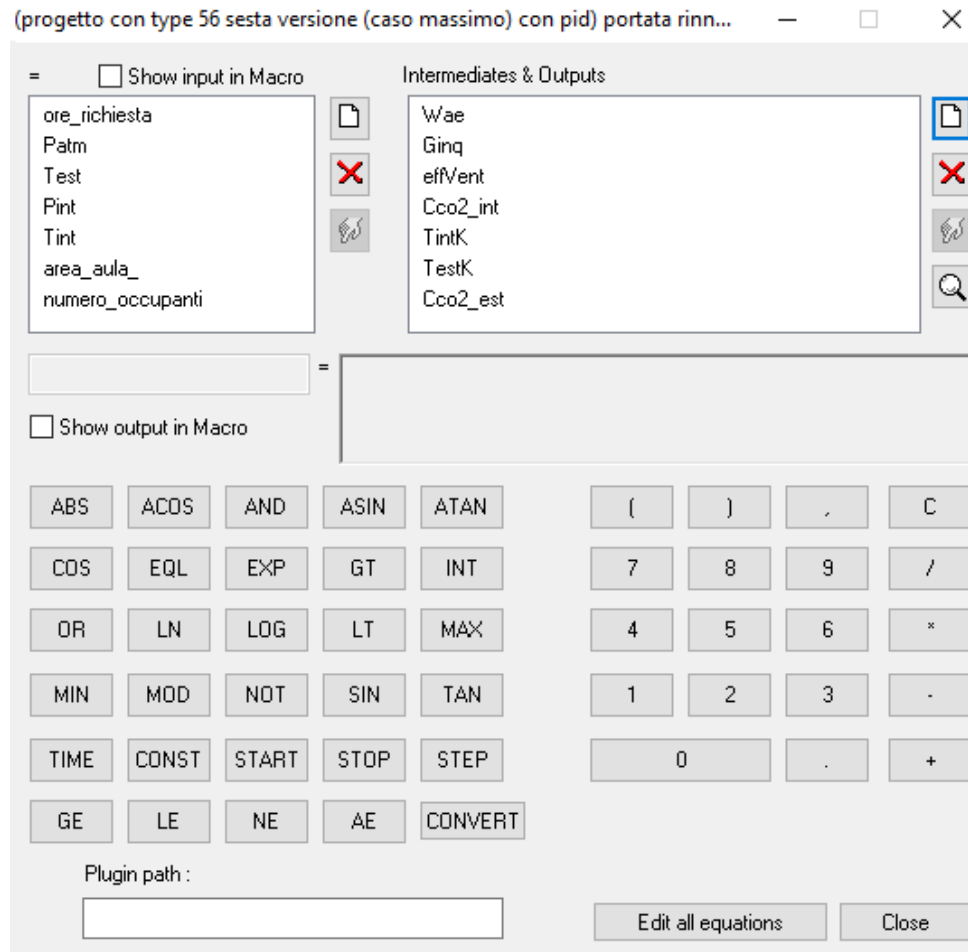


Figura 3.16: Configurazione delle equazioni in TRNSYS per il calcolo della portata di rinnovo, con definizione degli ingressi (parametri ambientali e occupazione) e delle variabili di output.

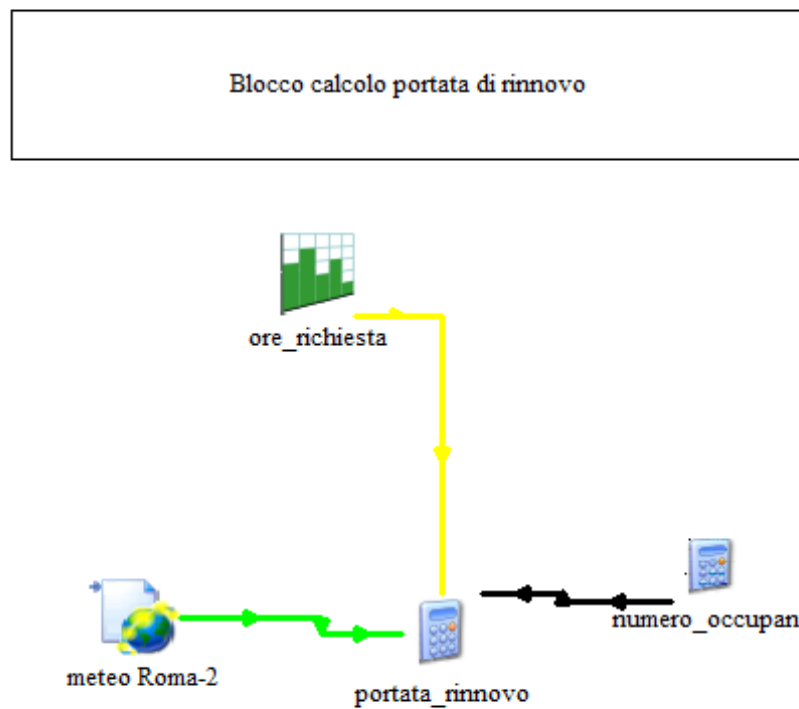


Figura 3.17: Schema del blocco di calcolo della portata di rinnovo.

3.2.5 Blocco 4: equazione di bilancio della CO₂

Con questo blocco si è realizzata l'equazione di bilancio della CO₂ all'interno del locale, valutando gli apporti di CO₂ delle fonti interne e dell'inquinante esterna e le sottrazioni dovute all'impianto di ventilazione e alla PLW. PLW e controllore PID (responsabile della regolazione della CO₂) sono stati entrambi definiti e modellati in questo blocco. I Type utilizzati in questo blocco sono: il Type 14h (già piegato in paragrafo 3.2.4), 4 blocchi equazione, il Type 23 e il Type 661.

Type 23:PID Controller

Il Type 23 implementa un regolatore proporzionale, integrale e derivativo (PID), calcola il segnale di comando necessario per mantenere la variabile controllata al valore di setpoint. Tale segnale di comando è proporzionale all'errore di tracciamento, nonché all'integrale e alla derivata di tale errore di tracciamento. Il Type 23 implementa un algoritmo discreto all'avanguardia con funzione anti-windup. L'algoritmo PID è il seguente [33]:

$$v(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) = P + I + D \quad (3.5)$$

P = termine proporzionale all'errore, I = termine proporzionale all'integrale dell'errore, D = termine proporzionale alla derivata dell'errore. In controlli di regolazione dove si vuole riottenere una situazione di equilibrio in seguito a variazioni di Input la risposta che si vuole studiare prevalentemente è la integrale [33]. L'azione derivativa può determinare variazioni molto ampie della variabile di controllo ed è quasi sempre consigliabile limitare il guadagno ad alta frequenza del termine derivativo. Le variabili di controllo sono solitamente limitate da un limite superiore e da uno inferiore che rappresentano i limiti fisici dell'attuatore. Quando la variabile di controllo raggiunge uno di questi limiti, il circuito di retroazione si interrompe poiché l'attuatore rimarrà al proprio limite indipendentemente dall'uscita del sistema. Un controllore con azione integrante continuerà a integrare l'errore. In tale situazione, il termine integrale può diventare molto grande (si verifica il "wind-up"). È quindi necessario che l'errore di tracciamento abbia segno opposto per un periodo di tempo molto lungo prima che il regolatore torni a uno stato "normale". L'accumulo dell'integratore può essere evitato ricalcolando a ritroso il valore integrale che porterebbe la variabile di controllo esattamente al limite di saturazione. È inoltre vantaggioso azzerare l'integratore verso tale valore ricalcolato non istantaneamente, ma con una costante di tempo [33]. L'implementazione di un sistema PID permette di poter ottenere un controllo molto più accurato del classico ON-OFF, permettendo una modulazione delle grandezze più efficaci. Per fare questo però è necessario settare bene i parametri che servono per regolare il controllore PID.



progetto con type 56 sesta versione (caso massimo) con pid PID

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
Name	Value	Unit	More	Macro		
1 Setpoint	950	any	More...	☒		
2 Controlled variable	0	any	More...	☒		
3 On / Off signal	1	-	More...	☒		
4 Minimum control signal	0	any	More...	☒		
5 Maximum control signal	1	any	More...	☒		
6 Threshold for non-zero output	0	any	More...	☒		
7 Gain constant	-0.1	any	More...	☒		
8 Integral time	15	min	More...	☒		

50

Type 661:Delayed Output Device

Questo componente simula un regolatore “sticky”, in cui le uscite sono impostate sui valori di ingresso provenienti da un passo temporale precedente definito dall’utente. Ad esempio, l’utente potrebbe decidere che le uscite verso un altro componente si basino sulle temperature delle zone dell’ora precedente o addirittura del giorno precedente [36].

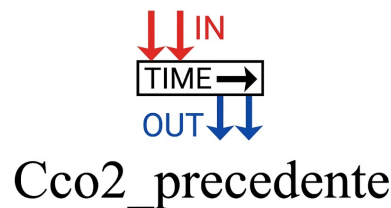


Figura 3.20: Dispositivo output ritardato - Type 661 libreria TESS TRNSYS.

Collegamenti e funzionamento

1. il primo Type inserito è il blocco equazione nominato "V_aula". Il volume si è trovato tramite la formula $V_{aula} = \text{altezza} \cdot \text{area_aula_}$ (m^3) prendendo altezza = 3 m come da Decreto legislativo 81/2008 [10] e l’input Area_aula_ dal blocco equazione numero_occupanti trattato in paragrafo 3.2.4.

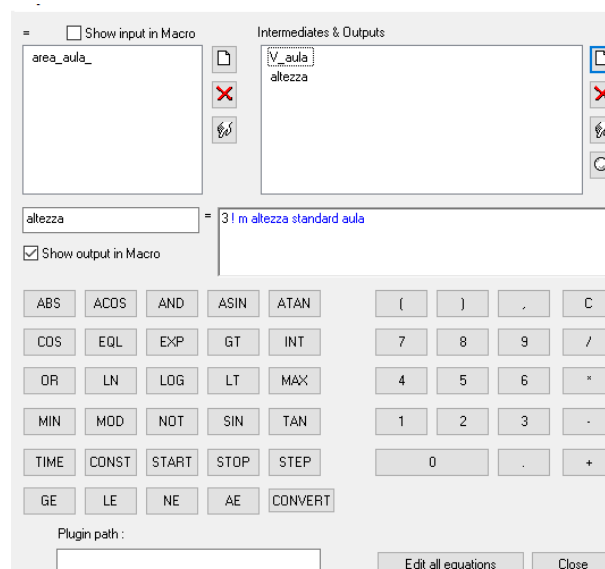


Figura 3.21: Interfaccia di configurazione equazioni in TRNSYS per il calcolo del volume dell’ambiente ($V_{aula} = \text{area} \cdot \text{altezza}$).

2. Il secondo Type inserito è stato il blocco equazione nominato " $C_{CO_2_usc}$ " usato per definire la quantità di CO_2 estratta dal locale. Contiene due equazioni:

$C_{CO_2\text{limit}}$ = concentrazione massima che si può avere all'interno del locale per la CO_2 secondo le direttive WHO [3] e norma UNI EN 16798 [15]. è trovata come:

$$C_{CO_2, \text{limit}} = 10^{-3} \times \frac{101.325}{188.92 \times T_{\text{intK}}} \times 1000 \quad [\text{g/m}^3] \quad (3.6)$$

coincidente esattamente con l'equazione 3.2 del blocco equazione portata_rinnovo, al quale è collegato per avere come inputs la T_{intK} e la $C_{CO_2\text{est}}$. $C_{CO_2\text{usc}}$ = concentrazione di CO_2 che viene estratta dal locale. Ricavata come:

$$C_{CO_2, \text{usc}} = C_{CO_2, \text{est}} + \varepsilon_v \cdot (C_{CO_2, \text{limit}} - C_{CO_2, \text{est}}) \quad [\text{g/m}^3] \quad (3.7)$$

$C_{CO_2\text{est}}$ = concentrazione CO_2 esterna presa dal blocco equazione portata_rinnovo e definita dalla 3.1, ε_v = efficienza di ventilazione presa dal blocco equazione portata_rinnovo, $C_{CO_2\text{limit}}$ = concentrazione limite presa dalla 3.7. I collegamenti con il blocco "portata_rinnovo" sono tutti visibili come lines celesti sul grafico del progetto completo.

3. Il terzo Type inserito è stato il Type 14h, con stessa funzione definita del paragrafo 3.2.4
4. Il quarto Type modellato è stato il Type del blocco equazione nominato "parete_verde". Al suo interno troviamo due costanti ed una equazione:

H_{LW} = altezza parete verde, presa come dato fisso pari a 2.7 m.

L_{LW} = larghezza parete verde, preso tra uno di 4 valori (0 m, 2.35 m, 4.5 m, 7.5 m)

area_{LW} = superficie della parete verde definita come:

$$A_{\text{LW}} = L_{\text{LW}} \cdot H_{\text{LW}} \cdot 2 \quad [\text{m}^2] \quad (3.8)$$

2 = coefficiente LAI, coefficiente che tiene conto della tridimensionalità delle foglie.

5. Il quinto Type inserito è stato il Type 23, controllore PID che è servito per andare ad effettuare il controllo della CO_2 nel locale. I collegamenti del Type 23 prevedono in ingresso al PID il valore di concentrazione di CO_2 ist ottenuta dall'equazione di bilancio e in uscita da esso l'output segnale, usato sia nell'equazione di bilancio sia che dalla portata

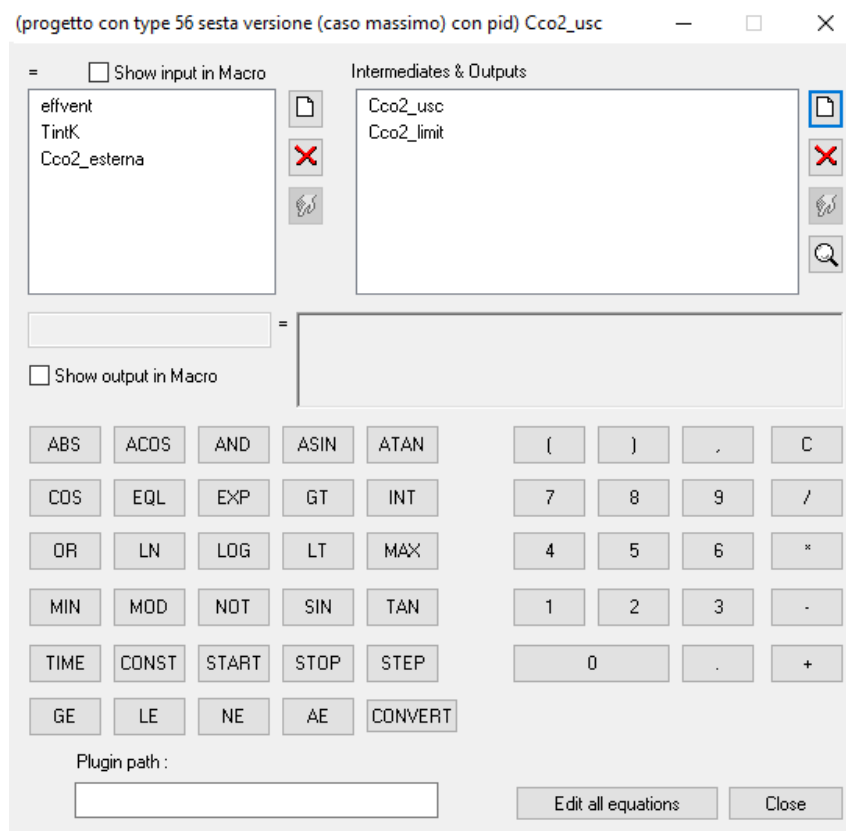


Figura 3.22: Configurazione dell'equazione in TRNSYS per la determinazione della concentrazione di CO₂ in uscita (C_{co2_usc}) e dei relativi limiti operativi.

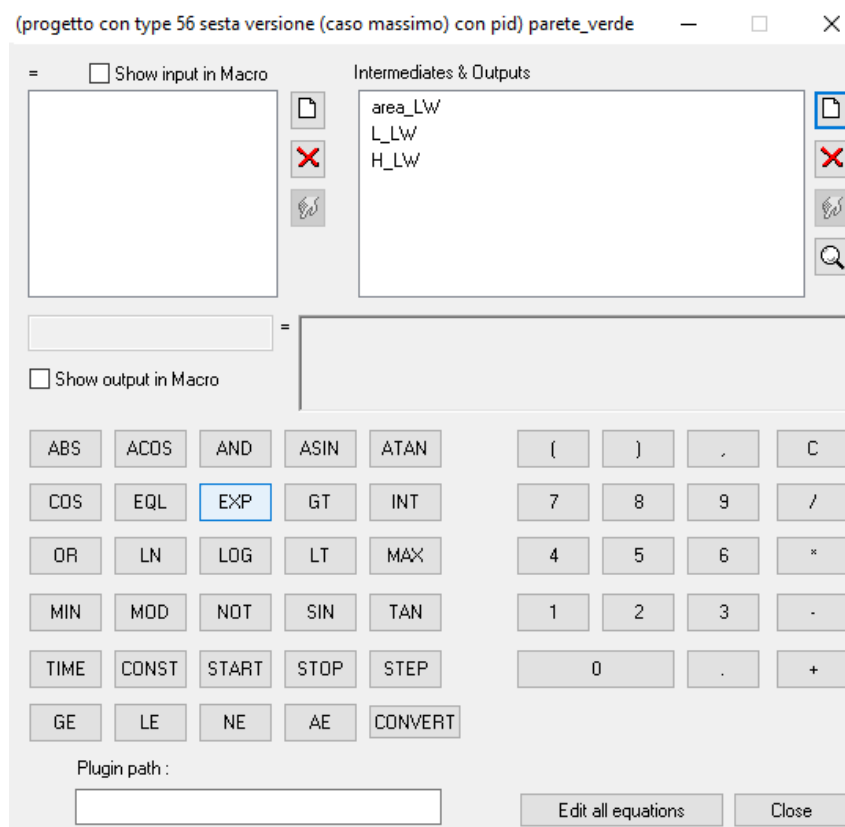


Figura 3.23: Finestra delle equazioni in TRNSYS per la definizione delle variabili geometriche della parete verde (*area_LW*, *L_LW*, *H_LW*).

di mandata definita nel blocco "calcolo portata di mandata regolata da controllore, calcolo prevalenze e potenze", collegamento visibile come una linea arancione sul grafico del progetto . I parametri usati per regolare il controllore PID sono:

Tabella 3.1: Parametri di configurazione e input del regolatore PID (Type 23) in TRNSYS.

Parameter / Input Name	Value	Unit
Setpoint	950	any
Controlled variable	0	any
On / Off signal	1	-
Minimum control signal	0	any
Maximum control signal	1	any
Threshold for non-zero output	0	any
Gain constant	-0.1	any
Integral time	15	min
Derivative time	0	min
Tracking time for anti-windup	15	min
Fraction of ySet for proportional effect	0	-
Fraction of ySet for derivative effect	0	-
High-frequency limit on derivative	100	-

- Il sesto Type configurato è stato il Type 661, che è stato usato per prendere la CO_2 ist al suo istante temporale precedente in quanto dato necessario per poter effettuare correttamente il bilancio di massa della CO_2 . L'input in questo Type è CO_2 ist e l'output che ridà è $C_{CO_2}precedente$, che è anche il nome con cui rinominato il componente.

7. L'ultimo Type inserito è il blocco equazione intitolato "eq._bilancio_massa", usato per calcolare la concentrazione di CO_2 nell'aula istante per istante. In questo blocco troviamo quattro costanti e quattro equazioni:

g_min = $1.23E - 07$, portata di CO_2 minima assorbita dalla LW, $kg/(s \cdot m^2)$.

g_max = $8.49798E - 07$, portata di CO_2 massima assorbita dalla LW, $kg/(s \cdot m^2)$.

K = 0.005, flesso curva usata per modellare l'andamento dell'assorbimento della PLW.

C0 = 1512, concentrazione iniziale rilevata nell'aula, ppm.

C = Cco2_precedente, ppm.

Cassorbita_LW = concentrazione di CO_2 assorbita dalla parete verde. Viene calcolata come:

$$3600 \times 1000 \times \left(g_{\min} + \frac{g_{\max} - g_{\min}}{1 + \exp(-K \cdot (C - C_0))} \right) \quad [g/(h \cdot m^2)] \quad (3.9)$$

in cui il *3600000 serve per portare da $kg/(s \cdot m^2)$ ai $g/(h \cdot m^2)$.

CO2ist = concentrazione di inquinante che si ha per ogni istante di tempo della simulazione nell'aula. Si trova come:

$$C_{CO_2,ist} = \left[\frac{W_{ae} \cdot \Phi \cdot (C_{CO_2,est} - C_{CO_2,usc}) + G_{inq} \cdot ore_{richiesta} - C_{assorbita,LW} \cdot A_{LW}}{V_{aula}} + C_{CO_2,prec} \right] \cdot ore_{richiesta} \quad (3.10)$$

- $C_{CO_2,est}$ = concentrazione esterna presa dal blocco equazione "portata_rinnovo" $g/(m^3 \cdot h)$ e visibile come collegamento azzurro nel file finale del progetto.
- W_{ae} = portata di rinnovo presa dal blocco equazione "portata_rinnovo" e visibile come collegamento azzurro nello schema finale del progetto.
- $ore_{richiesta}$ = presa dal Type 14h, $C_{assorbita,LW}$ = definita in equazione 3.9 interna alla calcolatrice.
- A_{LW} = definita dalla 3.8 e presa dal blocco equazione "parete_verde".
- $C_{CO_2,usc}$ = definita dalla 3.7 e presa dal blocco equazione " $C_{CO_2,usc}$ ".

- $C_{CO_2,prec}$ = presa dal Type 661 che ha in ingresso CO_{2ist} e ridà come output il suo valore all'istante precedente.
- Φ = termine usato per modulare il segnale così che sia sempre mantenuta un minimo di portata per ventilare. E' espresso come:

$$\Phi = 0.25 \cdot ore_{richiesta} + (1 - 0.25 \cdot ore_{richiesta}) \cdot segnale \quad (3.11)$$

$ore_{richiesta}$ = profilo occupazione preso dal Type 14, segnale= output preso dal PID.

$CO_{2ist,ppm}$ = concentrazione istantanea della CO_2 espressa in ppm. Si ricava come:

$$C_{CO_2,ist,ppm} = \frac{\left(\frac{C_{CO_2,ist}}{60} \cdot 1000 \cdot T_{int,K} \cdot 0.1889 \right)}{101.325} + 400 \quad [ppm] \quad (3.12)$$

C_{CO_2ist} = presa dalla 3.10 ed interna alla calcolatrice, il fratto 60 serve per passare da $g/(m^2 \cdot h)$ a $g/(m^3 \cdot min)$ in modo da avere i ppm/min che, dato l'intervallo di campionamento di un minuto, ridà i soli ppm. La 3.11 altro non è che la formula inversa della 1.17, in quanto passiamo dai g/m^3 ai ppm. Il valore di $CO_{2ist,ppm}$ è il valore che il PID prende come input come variabile di controllo, in quanto è in base a quanto vale la 3.11 che il PID modula la risposta.

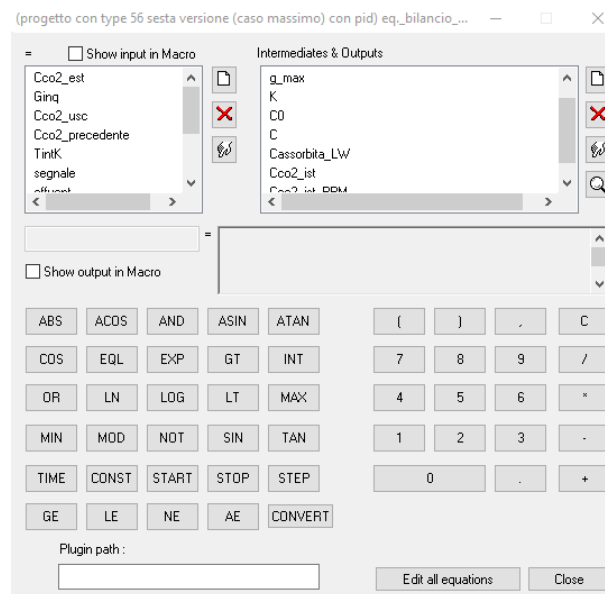


Figura 3.24: Interfaccia di TRNSYS per la definizione dei parametri e delle variabili dell'equazione differenziale di bilancio della CO_2 ($eq_bilancio_massa$).

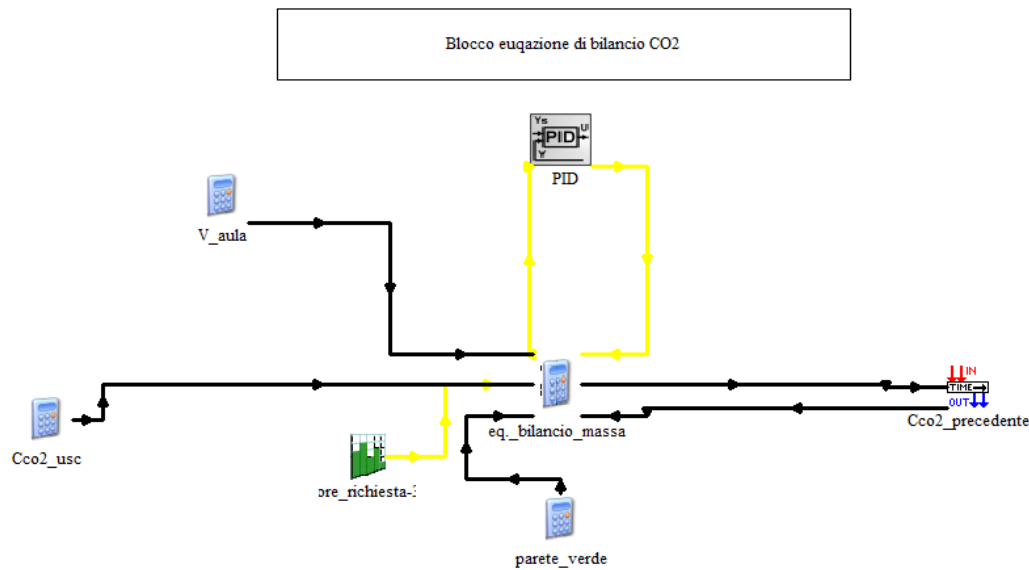


Figura 3.25: Schema del blocco per il calcolo del bilancio di massa della CO_2 in ambiente indoor, includendo l'effetto della parete verde e il controllo tramite regolatore PID.

3.2.6 Blocco 5: calcolo portata regolata da controllore, prevalenze e potenze

In questo blocco sono state implementate le equazioni che sono servite a determinare l'effettiva portata di mandata all'aula, le prevalenze dell'impianto di ventilazione e le potenze termiche e di ventilazione in gioco. I componenti utilizzati sono: il Type 14h e tre blocchi equazione, tutti già spiegati nei paragrafi precedenti.

Collegamenti e funzionamento

1. Primo Types inserito è il Types 14h con stessa funzione definita del paragrafo 3.2.4.
2. Secondo Types inserito è il blocco equazione nominato " $W_{ae_mandata}$ ", utilizzato per effettuare la corretta modulazione della portata di rinnovo W_{ae} trovata nel blocco equazione "portata_rinnovo" del blocco 3 con equazione 3.4. Nella calcolatrice sono presenti 2 equazioni:

$W_{ae_mandata}$ = portata modulata che va a svolgere la funzione di ventilazione. Si ricava come:

$$W_{ae,mandata} = W_{ae} \cdot \Phi \quad [m^3/h] \quad (3.13)$$

W_{ae} = presa dal blocco equazione "portata_rinnovo" e definita tramite la 3.4. Φ = fattore di modulazione del segnale, inserito direttamente nell'equazione. $W_{ae_mandata}$ è presa come input per la portata in ingresso nel Type 56 e visibile come collegamento verde scuro tra i due nello schema finale del progetto. **signal** = riprende il segnale del PID, visibile come collegamento arancione nello schema finale del progetto.

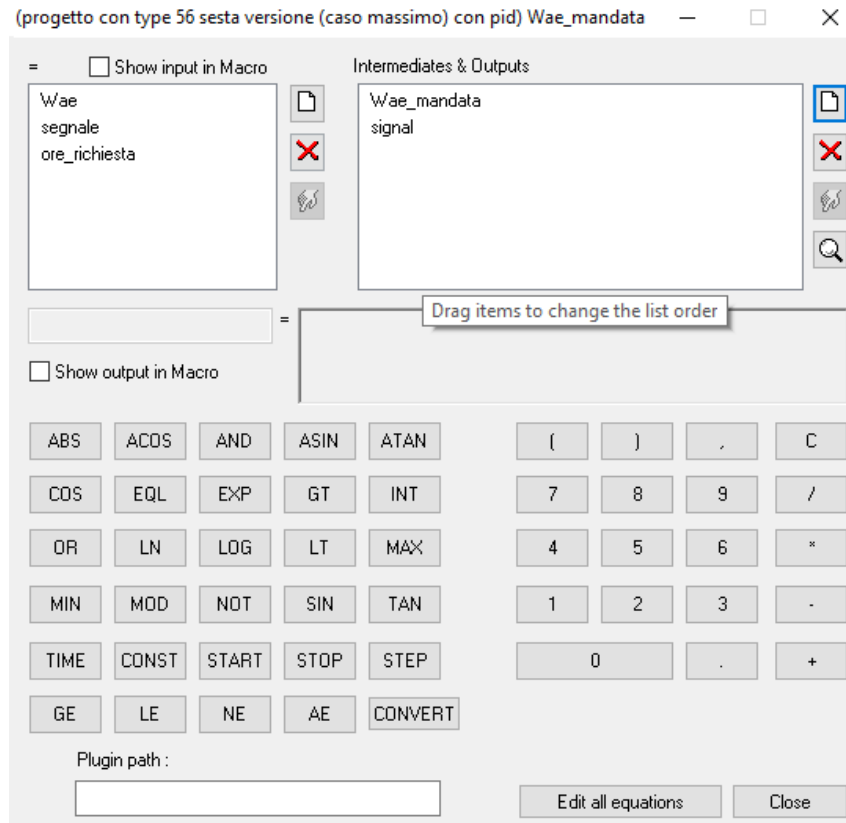


Figura 3.26: Interfaccia equazioni TRNSYS per la modulazione della portata di mandata ($W_{ae_mandata}$) in funzione del segnale di controllo.

3. Il terzo Type inserito è il blocco equazione nominato "Prevalenze", usato per modellare l'andamento della prevalenza della VMC al variare della portata. La curva della prevalenza è stata presa dalle tabelle Aermec della macchina RPLI100L [13] da cui si è ricavata l'equazione implementata poi nella calcolatrice su TRNSYS. La formula della retta è definita come:

$$y = m \cdot x + q \quad (3.14)$$

Si identificano due punti dal grafico per calcolare la pendenza m :

- $A = (550, 560)$
- $B = (950, 140)$

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{140 - 560}{950 - 550} = -1.05 \quad (3.15)$$

Sostituendo il punto $A(550, 560)$ e la pendenza $m = -1.05$ nella formula, si ricava l'intercetta q :

$$560 = (-1.05 \cdot 550) + q \quad (3.16)$$

$$q = 560 + 577.5 = 1137.5 \quad (3.17)$$

L'equazione finale della retta è:

$$\text{Prevalenza [Pa]} = -1.05 \cdot \text{Portata [m}^3/\text{h]} + 1137.5 \quad (3.18)$$

RPLI100L

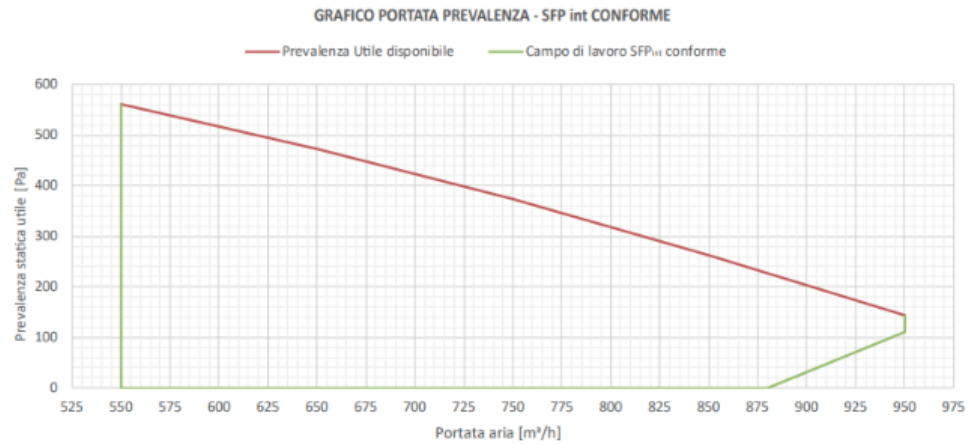


Figura 3.27: Grafico portata-prevalenza e perdite di carico per l'unità RPLI100L (Aermec).

La 3.17 viene infine modificata ottenendo:

$$\text{prevalenza_utile} = -1.05 \cdot W_{ae_mandata} + 1137.5 \cdot \text{signal} \quad [\text{Pa}] \quad (3.19)$$

$W_{ae_mandata}$ = è presa dal blocco equazione omonimo e trovata con la 3.13, signal= segnale PID ripreso sempre dal blocco " $W_{ae_mandata}$ " per avere un minore intreccio di collegamenti. Il segnale PID viene moltiplicato solo per il termine noto in quanto $W_{ae_mandata}$ già tiene conto della modulazione del controllore PID.

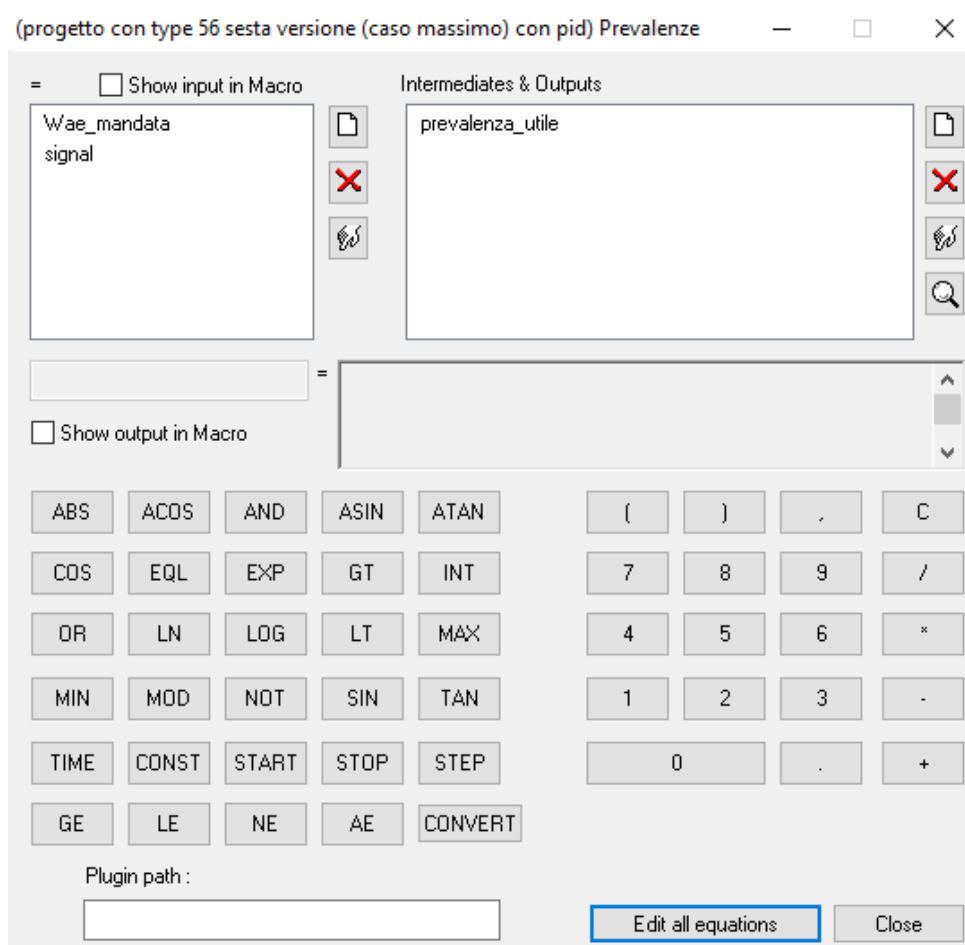


Figura 3.28: Interfaccia per il calcolo della prevalenza utile.

4. Ultimo Type ad essere inserito è stato il blocco equazione nominato "Eq.potenze", usato per valutare potenza termica e potenza di ventilazione. Contiene una costante e due equazioni:

$\eta_{\text{sensibile}}$ = è il rendimento dei ventilatori della VMC, preso dal manuale Aermec e vale 59.7% [37].

Potenza_termica = trovata in seguito alle ipotesi fatte per il progetto e definita come:

$$\text{potenza_termica} = \left(\frac{1.3 \cdot W_{\text{ae_mandata}}}{3600} \right) \cdot 1005 \cdot (T_{\text{intK}} - T_{\text{estK}}) \quad [\text{W}] \quad (3.20)$$

$1.3 = \rho_{\text{aria}}$, $W_{\text{ae_mandata}}$ = portata di rinnovo modulata e presa dal blocco equazione omonimo, $1005 = c_p$ aria in J/(kg · K), T_{intK} = temperatura interna locale presa dal blocco equazione "portata_rinnovo" visibile come collegamento celeste che entra nella calcolatrice nello schema finale del progetto, T_{estK} = temperatura esterna al locale sempre presa dal al blocco equazione "portata_rinnovo" e visibile tramite lo stesso collegamento celeste. Il fratto 3600 è per portare da ore a secondi la portata.

Potenza_ventilazione = trovata per valutare il dispendio dei ventilatori. Si trova come:

$$\text{potenza_ventilazione} = \frac{\left(\frac{\text{Prevalenza_utile} \cdot W_{\text{ae_mandata}}}{3600} \right)}{\eta_{\text{sensibile}}} \quad [\text{W}] \quad (3.21)$$

Prevalenza_utile = prevalenza trovata nel blocco equazione "Prevalenze", $W_{\text{ae_mandata}}$ = portata di rinnovo modulata e presa dal blocco equazione omonimo, $\eta_{\text{sensibile}}$ = rendimento dei ventilatori preso dal manuale ed interno alla calcolatrice. Il fratto 3600 serve per portare da ore a secondi la portata.

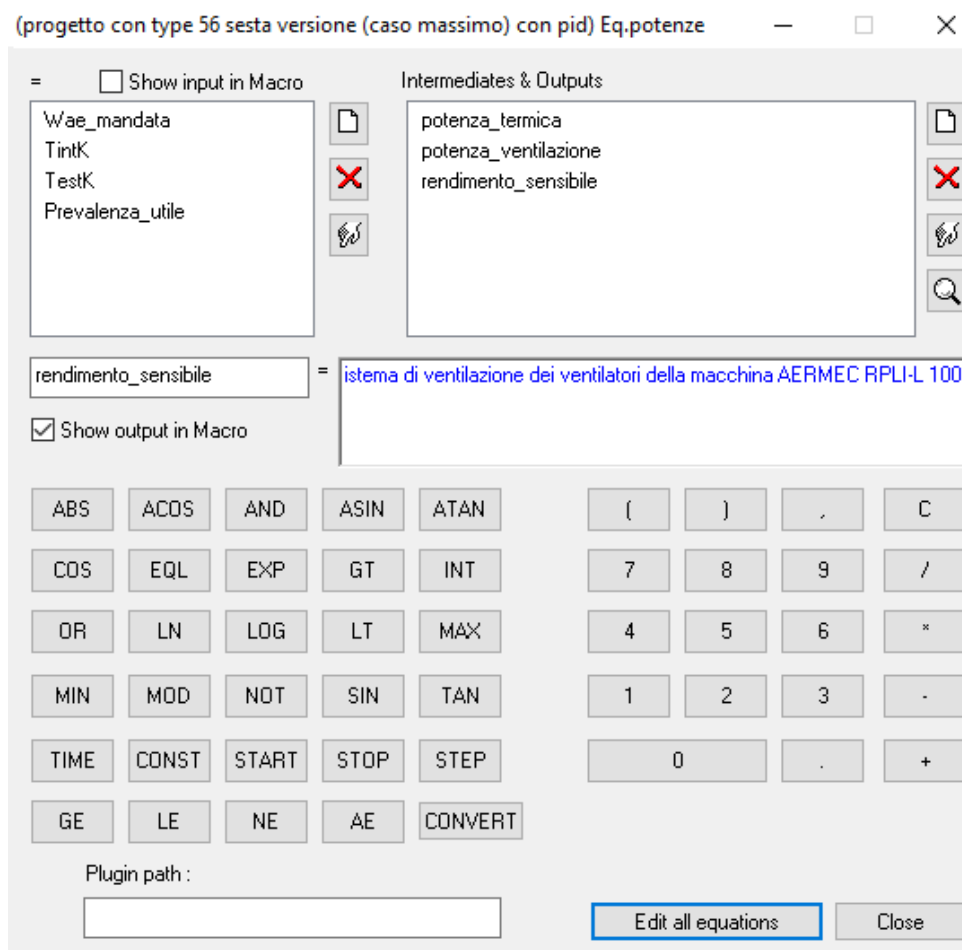


Figura 3.29: Interfaccia di definizione delle equazioni per le potenze e il rendimento sensibile (Aermec RPLI-L 100).

Blocco calcolo portata regolata da controllore, prevalenze e potenze

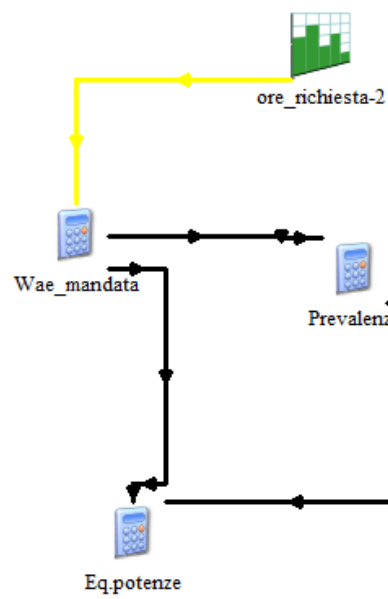


Figura 3.30: Schema del blocco per il calcolo della portata di mandata ($W_{ae_mandata}$), delle prevalenze e delle potenze d'impianto.

3.2.7 Blocco 6: elaborazione risultati simulazione

Questo blocco è servito per ricavare sia i grafici della simulazione per avere un riscontro visivo della simulazione, sia valori numerici di quelli che sono stati ritenuti i dati principali da analizzare. Dal punto di vista dei componenti questo blocco è costituito da: un Type 15, un Type 65d, un blocco equazione e un Type 25c.

Type 25c:printer unformatted without units

Il componente “printer” viene utilizzato per visualizzare (o stampare) le variabili di sistema selezionate a intervalli di tempo specificati [33]. Il suo funzionamento si basa sul corretto setting di vari parametri di cui 3 però essenziali:

- **Printing interval:** è l’intervallo di tempo tra la presa di un dato valore e quello successivo.
- **start time:** imposta in quale momento della simulazione il Type inizia a prendere i dati.
- **stop time:** imposta quando il Type smettere di raccogliere i dati.

E’ fondamentale inoltre settare il numero in inputs che il Type riceve in ingresso e fornire per loro un nome apposito così che nel file dati finale siano ben distinguibili. Per estrarre i dati alla fine della simulazione si fa doppio clic sul Type e si va su External Files, a questo punto premendo edit verranno visualizzati i dati in forma numerica. Il file dati può essere fornito come foglio del blocco note o file Excel in base alla denominazione che si fa sempre nell’external files.

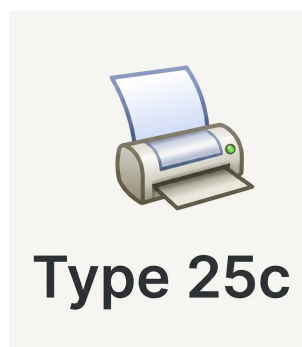


Figura 3.31: Icona del componente Type25c (Printer) in TRNSYS.

Collegamenti e funzionamento

1. Primo Type inserito è il Type 15 da cui viene presa la temperatura e usata come inputs nel Type 25c e nel Type 65d.

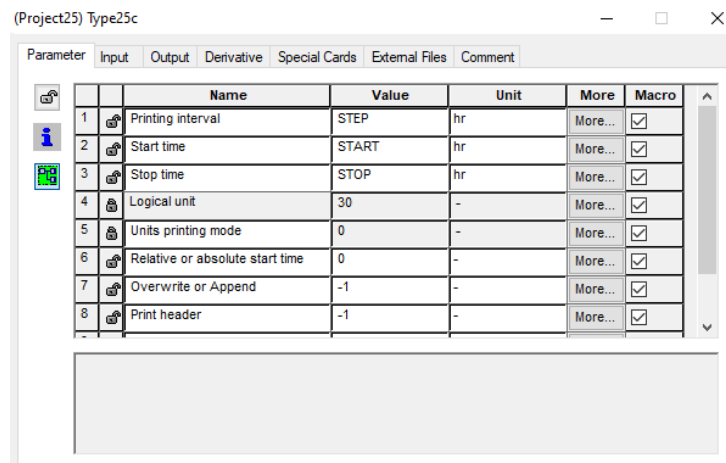


Figura 3.32: Schermata di configurazione dei parametri del componente Type25c in TRNSYS.

2. Secondo Type è il blocco equazione "amplificatore di segnale", che serve solo per prendere il segnale dal PID e ingrandirlo per renderlo più visibile graficamente. E' visibile come collegamento giallo che va dal PID fino al blocco nello schema finale del progetto. L'equazione usata è:

$$\text{segnale} = \text{segnale_} \cdot 100 \quad (3.22)$$

con $\text{segnale_} = \text{segnale del PID}$.

3. Terzo Type è il Type 65d rinominato "DIAGRAMMI" in quanto mostra i grafici del segnale amplificato, la $W_{acmandata}$ presa dal blocco equazione omonimo e non visibile come collegamento in quanto invece di aggiungere una linea che avrebbe intrecciato troppi componenti si è potuto collegare l'input copiando perfettamente il nome della grandezza, la temperatura esterna presa dal Type 15 e $C_{CO_2ist, ppm}$ presa dal blocco equazione "eq._bilancio_massa" e visibile come collegamento viola nel schema finale del progetto. E' stata impostata una doppia scala sull'asse verticale destro e sinistro del grafico, riportando a destra una scala da 0 a 1000 per i ppm e T_{est} e a sinistra una scala da 0 a 1500 per portata e segale.

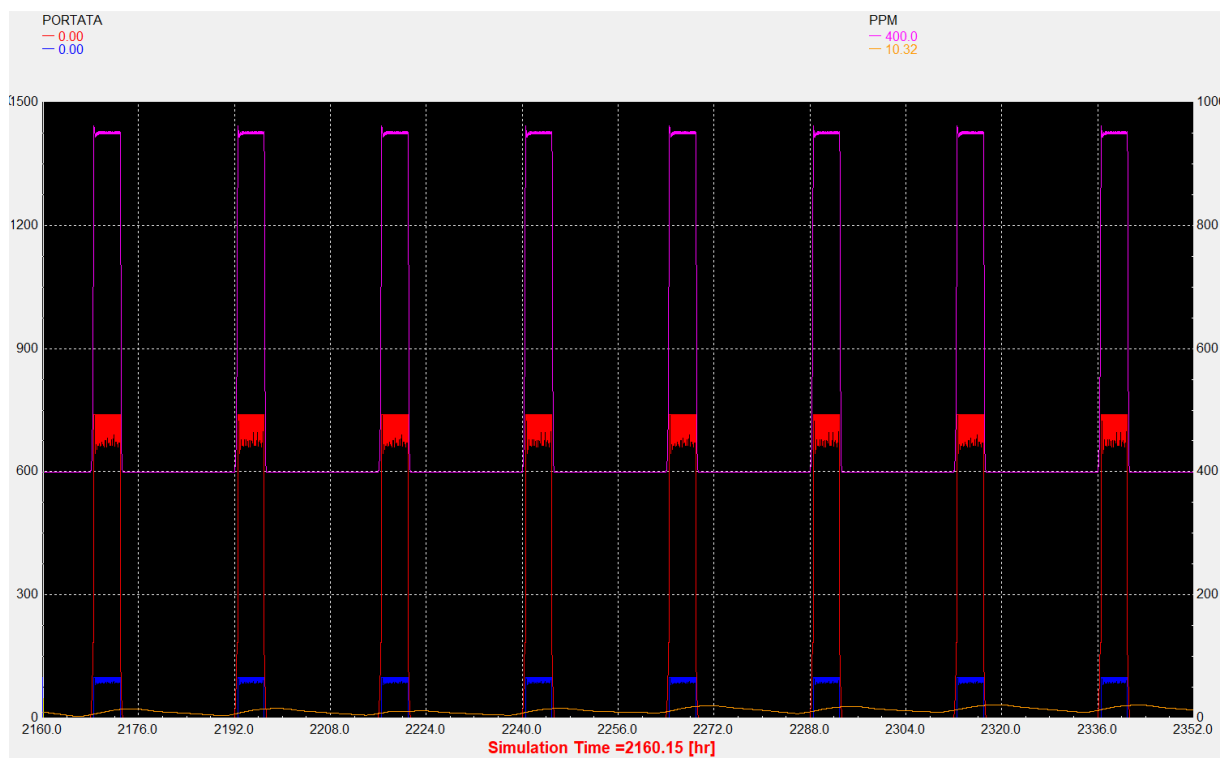


Figura 3.33: Andamento temporale delle portate e della concentrazione di CO₂ (ppm) ottenuto dalla simulazione TRNSYS.

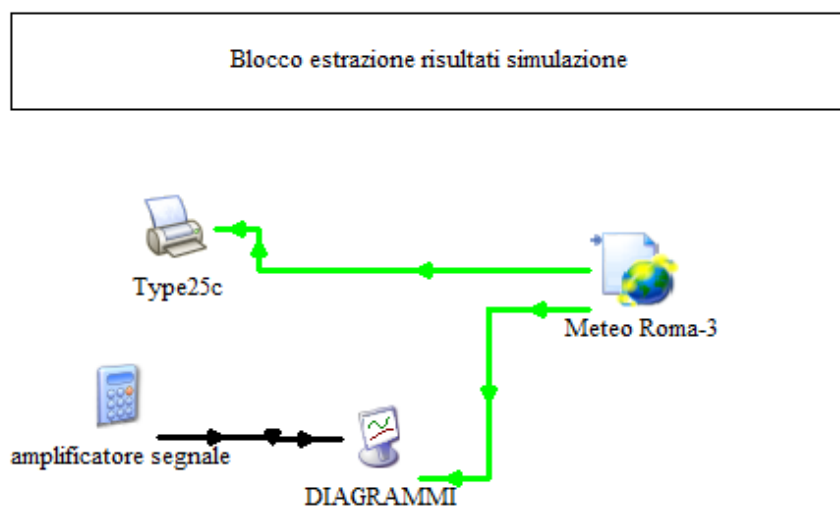


Figura 3.34: Schema del blocco di estrazione dei risultati di simulazione con Type25c, dati meteo e diagrammi di output.

3.2.8 Schema finale progetto

Tutti i singoli blocchi che sono stati spiegati precedentemente sono stati poi uniti tra di loro secondo i collegamenti opportuni in modo da ottenere il modello completo utilizzato per la simulazione, permettendo di poter effettuare simulazioni di un numero più elevato di casi potendo variare sia le caratteristiche della PLW ma anche del tasso di occupazione, del quantitativo di inquinante nel locale e delle dimensioni dell'aula stessa.

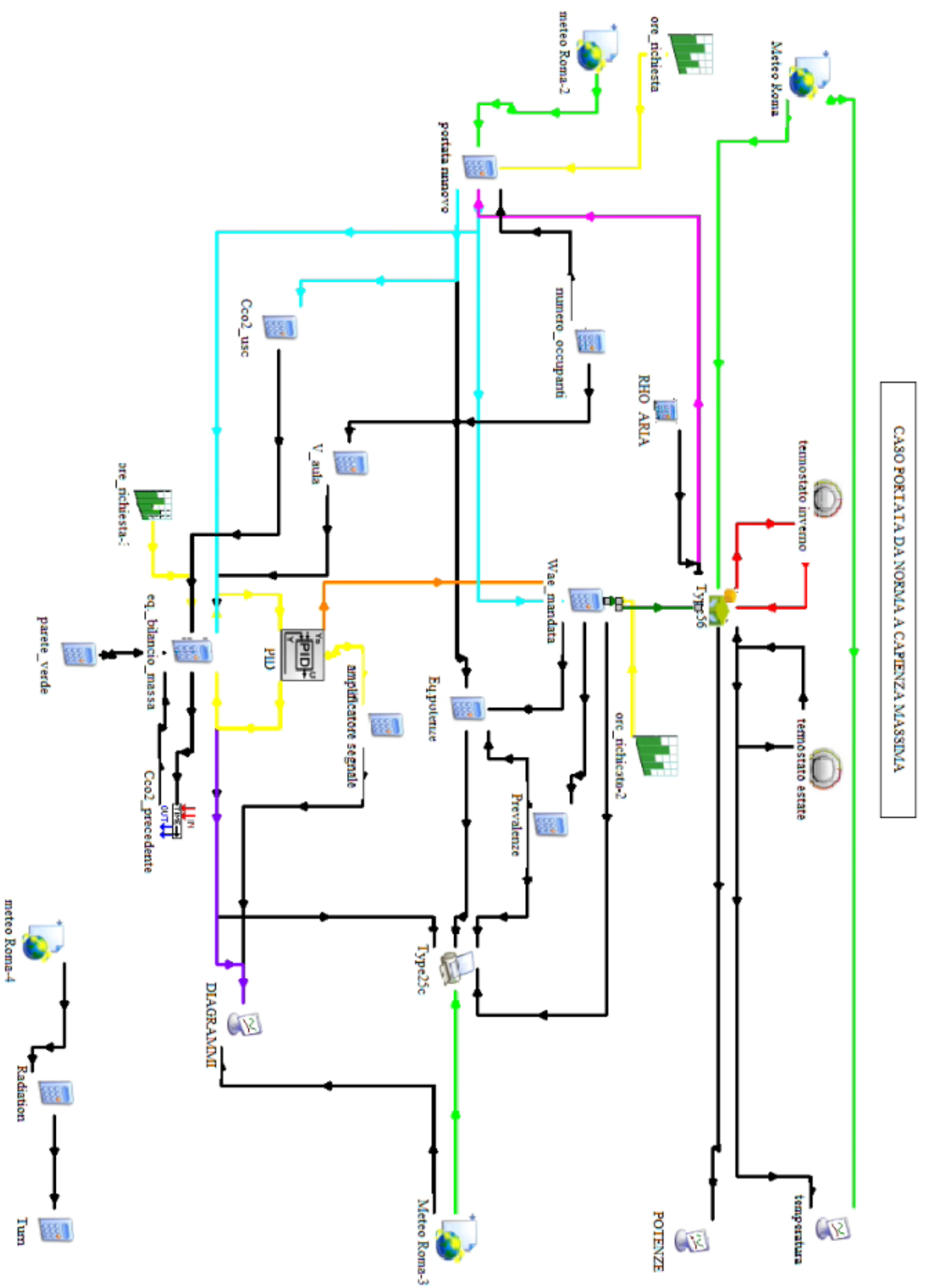


Figura 3.35: Schema logico e d'interconnessione finale del progetto in TRNSYS.

Capitolo 4

Analisi dei risultati

In questo capitolo si riportano i dati relativi alla simulazione completa nei 4 casi citati, ovvero no PLW, PLW piccola, PLW media e PLW grande. Avendo definito il periodo della simulazione dal 15 novembre all'8 di aprile [8] si è scelto come riferimento quello 2025/2026. Verranno in primo luogo riportati i grafici finali relativi ai singoli casi e poi i grafici di confronto tra i vari casi. Ai fini di una migliore comprensione dei grafici si riportano eventuali formule e direttive sulla presa dei dati:

- T_{esterna} = temperatura dell'ambiente fuori aula.
- **Portata** = quella calcolata dalla 3.13.
- **Concentrazione CO_2** = quella trovata dalla 3.12.
- **Potenza termica** = presa sotto ipotesi di portata sufficiente per il riscaldamento e trovata dalla 3.15.
- **Potenza di ventilazione** = calcolata conoscendo il tipo di macchinario usato tramite la 3.16.
- **Prevalenza** = determinata una volta scelto il macchinario tramite la 3.14.
- **Portata media** = calcolata facendo la media delle portate prese ad ogni istante della simulazione.
- **Energia di ventilazione** = trovata partendo dalla potenza di ventilazione tramite:

$$Energia_{\text{ventilazione}} = Potenza_{\text{ventilazione}} \cdot \left(\frac{5}{60} \right) \quad [\text{Wh}] \quad (4.1)$$

ovvero la potenza di ventilazione viene presa costante nell'arco di 5 minuti coincidente con la risoluzione temporale della simulazione, moltiplicando poi per 5/60 (min/h) si ottiene l'energia spesa per la ventilazione in Wh.

- **Costo totale ventilazione elettrica** = trovato facendo riferimento all'energia elettrica consumata dalla macchina. Trovata l'energia per i singoli istanti della simulazione si sono individuati i giorni lavorativi (F1), i sabati (F2) e le domeniche (F3) per poi utilizzare come riferimento di spesa le tabelle del PUN dell'anno 2025/2026 [38].

MESE	MONORARIO (€/kWh)	F1 (€/kWh)	F2 (€/kWh)	F3 (€/kWh)	F23 (€/kWh)
Dicembre 2025	0,115490	0,130090	0,119980	0,104520	0,111632
Novembre 2025	0,117090	0,129590	0,124020	0,105510	0,114025

Figura 4.1: Tabella riepilogativa degli indici PUN per i mesi di novembre e dicembre 2025.

MESE	MONORARIO (€/kWh)	F1 (€/kWh)	F2 (€/kWh)	F3 (€/kWh)	F23 (€/kWh)
Maggio 2026	0,119350	0,107170	0,131440	0,120810	0,125700
Aprile 2026	0,119470	0,111140	0,138260	0,116630	0,126580
Marzo 2026	0,143400	0,143020	0,153910	0,138090	0,145367
Febbraio 2026	0,114410	0,122280	0,119840	0,105300	0,111988
Gennaio 2026	0,132660	0,151261	0,137405	0,118292	0,127084

Figura 4.2: Andamento del Prezzo Unico Nazionale (PUN) nel corso dell'anno 2026.

- **Energia termica** = trovata allo stesso modo dell'energia di ventilazione ma usando la potenza termica, sempre in Wh.
- **Costo totale riscaldamento** = avendo considerato il locale perfettamente isolato, senza carichi termici e che la portata di rinnovo sia sufficiente per il riscaldamento, questi costi seguono lo stesso procedimento di quelli di ventilazione.

4.1 Caso senza PLW

Primo caso preso in considerazione ed utilizzato come partenza per i successivi confronti. In questa simulazione la PLW non è presente e i dati relativi a grandezze come portata, potenze, energie e costi risultano avere i valori più alti tra i quattro casi.

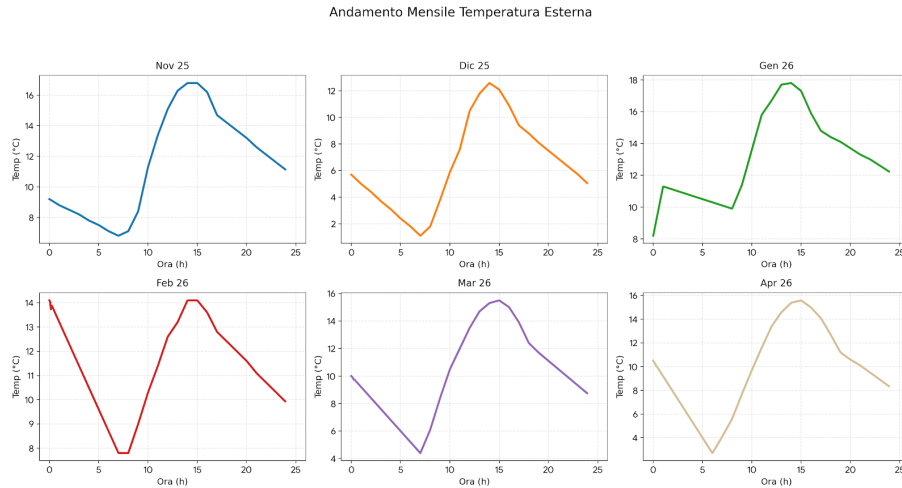


Figura 4.3: Andamento temporale della temperatura esterna del primo giorno di ogni mese (Caso senza PLW).

In figura 4.3 vengono riportate le temperature esterne di ogni primo del mese necessarie per poter poi trovare la potenza necessaria al riscaldamento e la corrispettiva energia di riscaldamento e costo di riscaldamento.

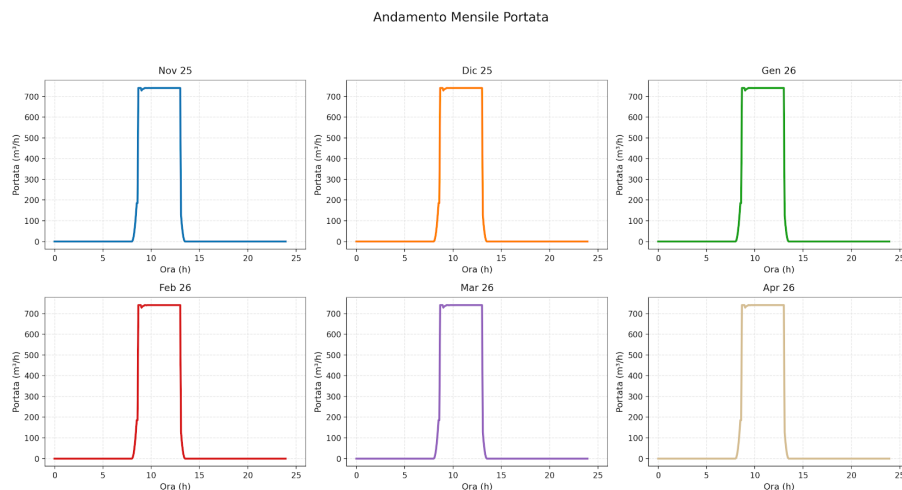


Figura 4.4: Andamento temporale della portata d'aria di ventilazione del primo giorno di ogni mese (Caso senza PLW).

In figura 4.4 viene riportato l'andamento della portata di rinnovo nelle ore di occupazione del locale per ogni primo del mese. Si nota che la portata fornita coincide sempre con il valore

massimo ricavato dalla 3.13 senza presentare nessuna variazione.

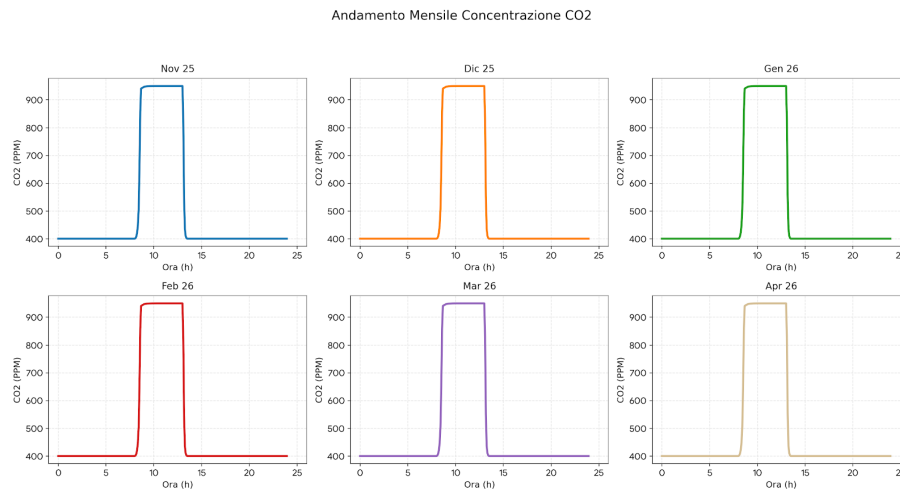


Figura 4.5: Andamento temporale della concentrazione di CO2 (ppm) del primo giorno di ogni mese (Caso senza PLW).

In figura 4.5 viene riportata la concentrazione nel locale per ogni primo del mese. Si nota come questa rimanga costante al valore impostato come limite nel controllore PID, valore dopo il quale si ha l'avvio della ventilazione.

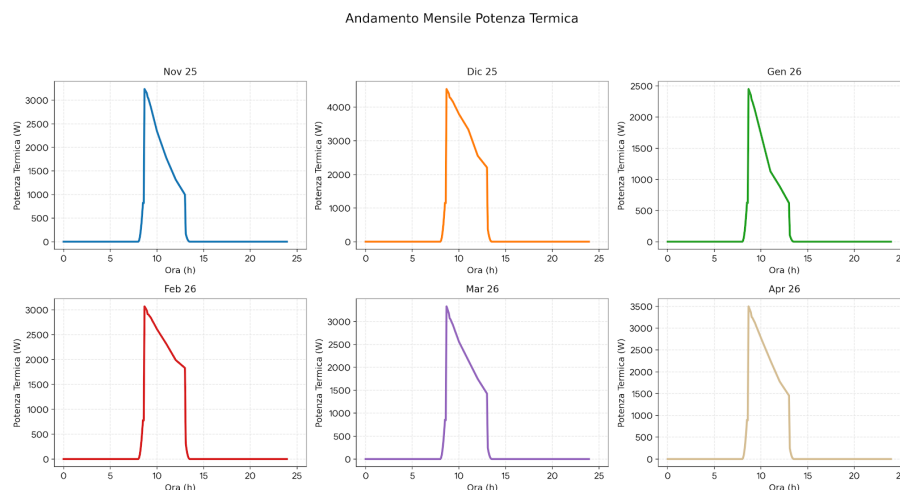


Figura 4.6: Andamento della potenza termica del primo giorno di ogni mese (Caso senza PLW).

In figura 4.6 vengono riportate le potenze termiche necessarie al riscaldamento il primo di ogni mese e il loro andamento. I loro valori sono direttamente proporzionali alla portata che, rimanendo fissa a quella massima, risultano essere i più alti dei quattro casi.

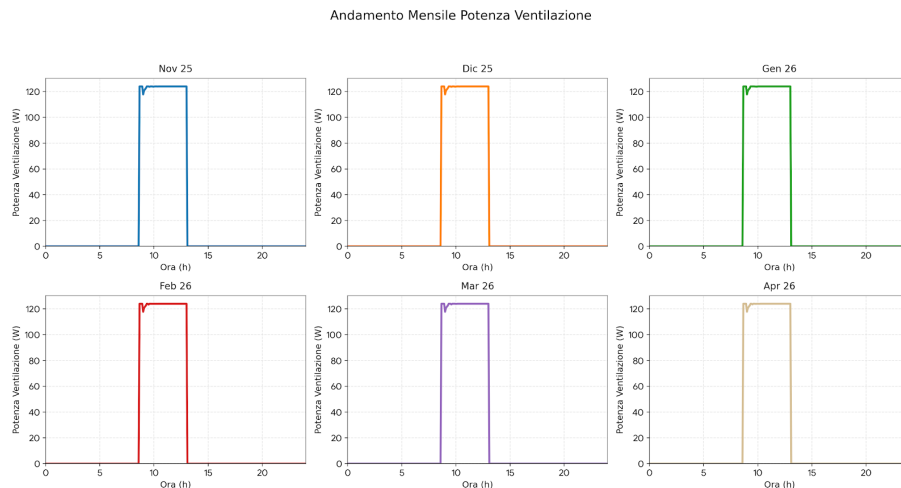


Figura 4.7: Andamento temporale della potenza di ventilazione del primo giorno di ogni mese (Caso senza PLW).

In figura 4.7 vengono riportate le potenze di ventilazione del primo di ogni mese e il loro andamento. Essendo la potenza di ventilazione direttamente proporzionale alla portata di ventilazione si ottiene che nel caso senza PLW si hanno le potenze necessarie alla ventilazione più alte dei quattro casi.

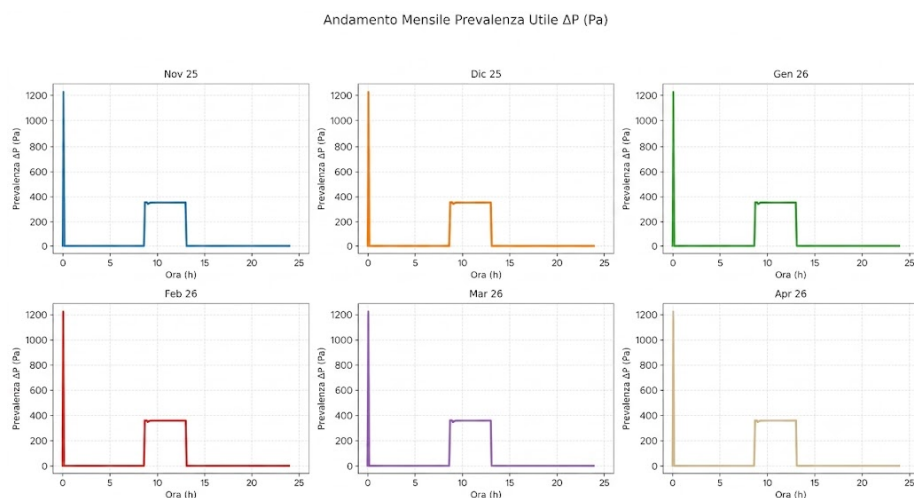


Figura 4.8: Andamento temporale della prevalenza utile ΔP (Pa) del primo giorno di ogni mese (Caso senza PLW).

In figura 4.8 vengono riportati i valori della prevalenza dei ventilatori per il primo di ogni mese. Essendo la prevalenza dipendente dalla portata di rinnovo si ha che nel caso senza PLW si hanno i valori di prevalenza più alti dei quattro casi.

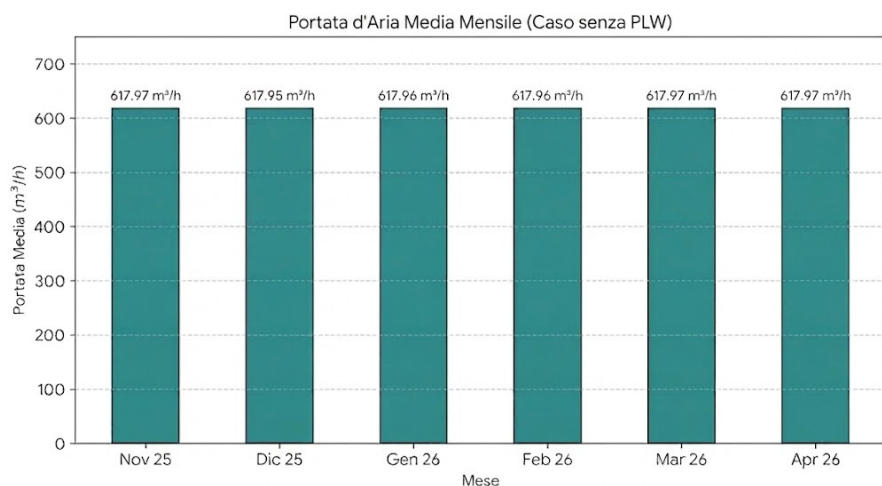


Figura 4.9: Portate di ventilazione medie registrate per ciascun mese di simulazione (Caso senza PLW).

In figura 4.9 si hanno comparate le portate medie dei singoli mesi. Quello che si nota è che la portata si mantiene quasi perfettamente ad un valore costante. Il fatto che il valore medio non coincida con il valore massimo riscontrato nella simulazione del singolo giorno è dovuto al fatto che nella media vengono presi anche i valori di portata che si hanno nel transitorio.

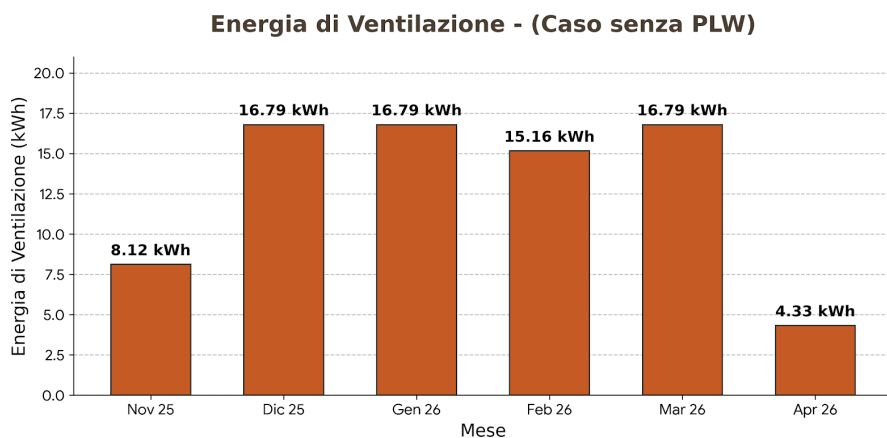


Figura 4.10: Energia di Ventilazione totale spesa ogni mese (Caso senza PLW)

In figura 4.10 viene riportata l'energia di ventilazione complessiva di ogni mese e si nota come il consumo energetico nel caso senza PLW risulti esclusivamente dipendente dai giorni del mese in quanto la portata utilizzata per trovare prima la potenza di ventilazione e poi l'energia risulti costante.

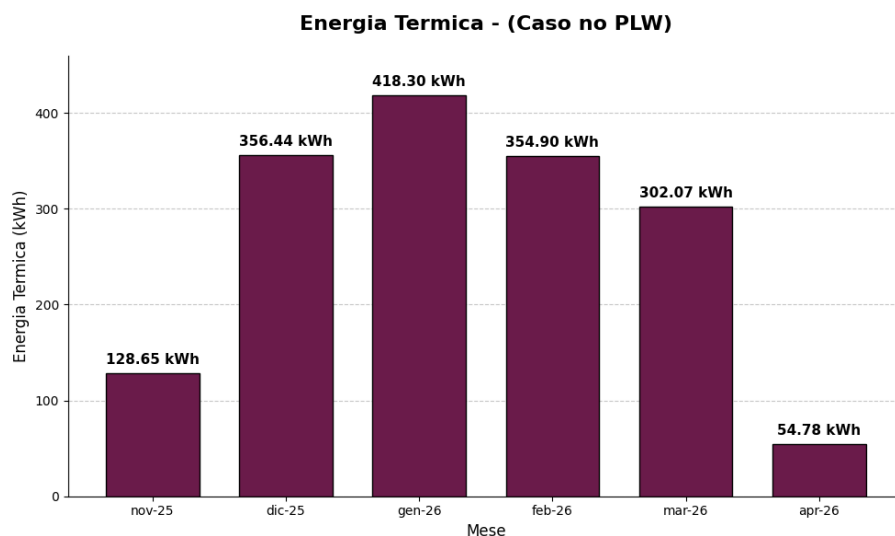


Figura 4.11: Energia Termica totale spesa ogni mese (Caso senza PLW)

In figura 4.11 viene riportata l'energia necessaria al riscaldamento dell'aula e si ha una maggiore variazione tra i vari mesi dovuta quasi esclusivamente alla temperatura esterna al locale, in quanto la portata assunta per il riscaldamento coincide con quella per la ventilazione, costante nel caso senza PLW.

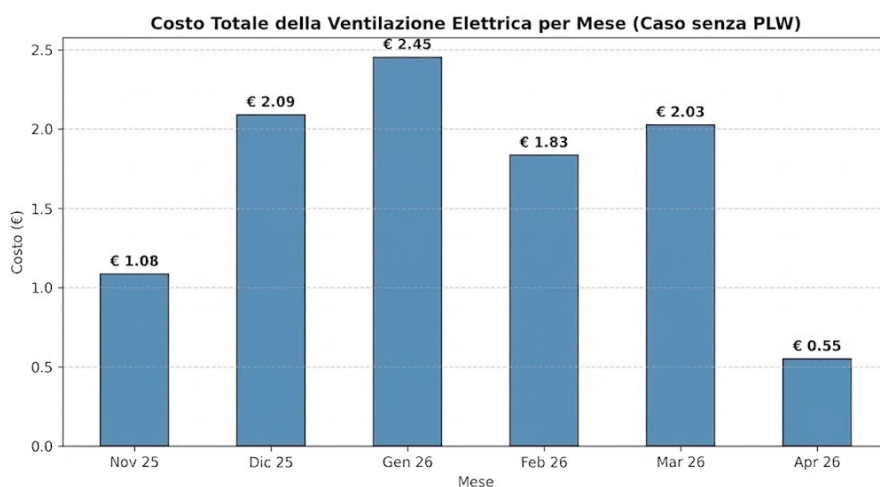


Figura 4.12: Costo totale della ventilazione elettrica per ogni mese di simulazione (Caso senza PLW).

In figura 4.12 sono riportati i costi complessivi per la ventilazione di ogni mese, trovati direttamente sapendo la spesa energetica di ventilazione mensile e il costo della corrente, considerando le diverse fasce orarie che incidono sul costo finale. Essendo direttamente proporzionale all'energia di ventilazione il costo di ventilazione mensile dipenderà dalla portata di ventilazione, facendo risultare il caso senza PLW come caso con costi di ventilazione più elevati tra i quattro.

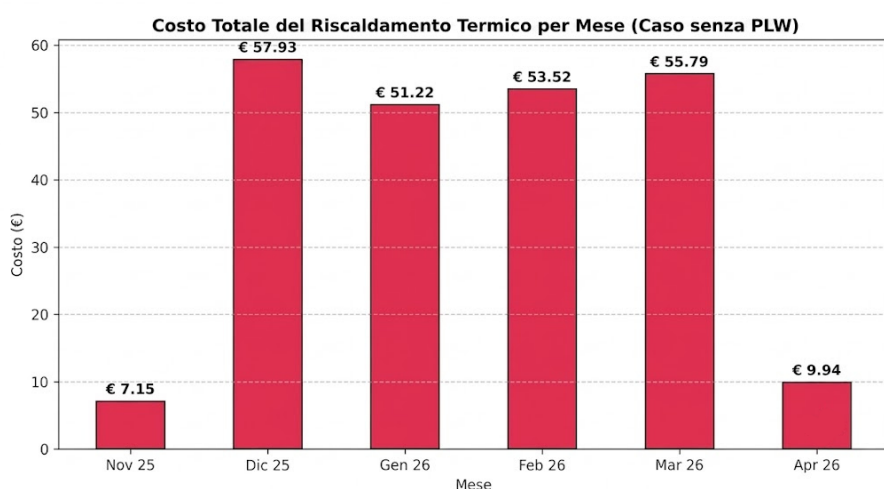


Figura 4.13: Costo totale del riscaldamento termico per ogni mese di simulazione (Caso senza PLW).

In figura 4.13 sono riportati i costi complessivi per il riscaldamento di ogni mese, trovati direttamente sapendo la spesa di energia termica mensile e il costo della corrente, considerando le diverse fasce orarie che incidono sul costo finale. Essendo direttamente proporzionale all'energia termica il costo di riscaldamento mensile dipenderà dalla portata di ventilazione e dalla temperatura esterna (uguale per tutte le simulazioni), facendo risultare il caso senza PLW come caso con costi di riscaldamento più elevati tra i quattro.

Tabella 4.1: Quadro riassuntivo mensile dei costi di ventilazione, riscaldamento e delle portate medie registrate (Caso senza PLW).

Mese	Costo Ventilazione [€]	Costo Riscaldamento [€]	Costo Totale [€]	Portata Media [m ³ /h]
Novembre 2025	€ 1,08	€ 7,15	€ 8,23	618,0
Dicembre 2025	€ 2,09	€ 57,93	€ 60,02	617,9
Gennaio 2026	€ 2,45	€ 51,22	€ 53,67	618,0
Febbraio 2026	€ 1,83	€ 53,52	€ 55,35	618,0
Marzo 2026	€ 2,03	€ 55,79	€ 57,82	618,0
Aprile 2026	€ 0,55	€ 9,94	€ 10,49	618,0
TOTALE	€ 10,03	€ 235,55	€ 245,58	–

4.2 PLW piccola

Per la PLW piccola si assumono dimensioni di $H = 2.70$ m e $L = 2.35$ m. In questo secondo scenario di simulazione si inserisce una PLW di dimensioni contenute per poter avere un primo confronto con il caso senza PLW, portando però risultati estremamente ridotti.

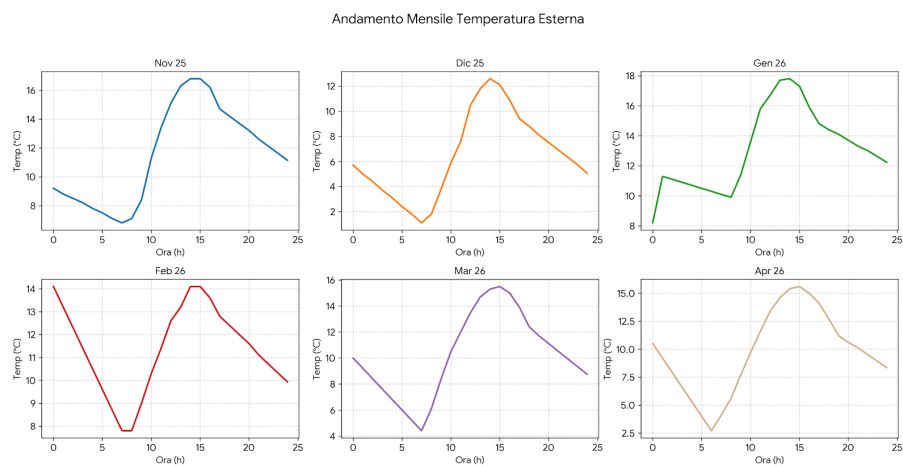


Figura 4.14: Andamento della temperatura esterna del primo giorno di ogni mese (Caso con parete verde - PLW Piccola).

In Figura 4.14 vengono riportate le temperature esterne di ogni primo del mese necessarie per poter poi trovare la potenza necessaria al riscaldamento e la corrispettiva energia di riscaldamento e costo di riscaldamento.

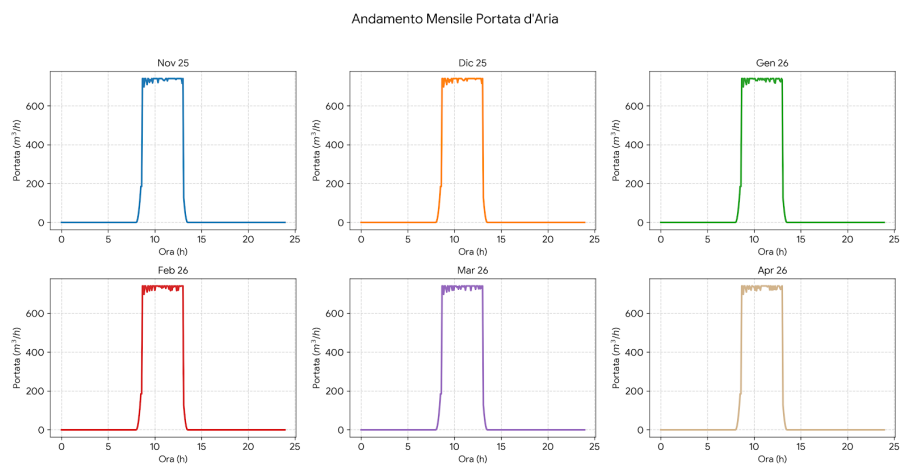


Figura 4.15: Andamento temporale della portata d'aria di ventilazione del primo giorno di ogni mese (Caso con parete verde - PLW Piccola).

In figura 4.15 viene riportato l'andamento della portata di rinnovo nelle ore di occupazione del locale per ogni primo del mese. Si nota che la portata fornita non coincide sempre con il valore massimo ricavato dalla 3.13 ma presenta delle minime variazioni dovute all'effetto della PLW piccola.

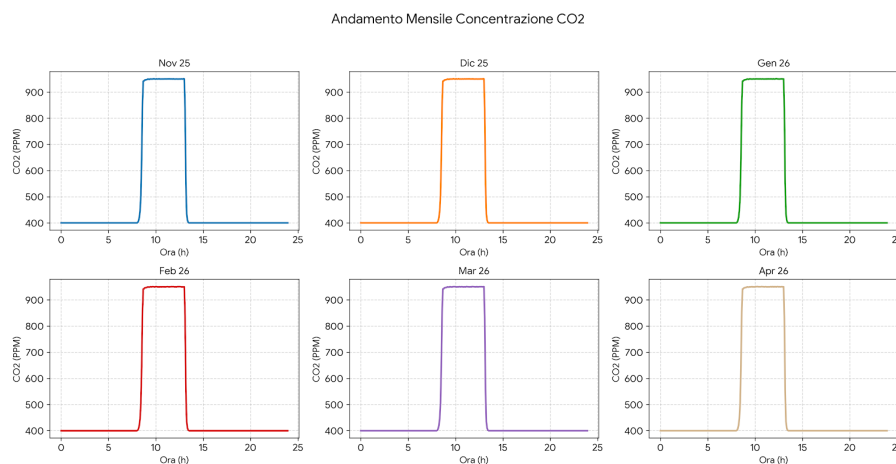


Figura 4.16: Andamento temporale della concentrazione di CO2 (ppm) del primo giorno di ogni mese (Caso con parete verde - PLW Piccola).

In figura 4.16 viene riportata la concentrazione nel locale per ogni primo del mese. Si nota come questa rimanga costante al valore impostato come limite nel controllore PID, valore dopo il quale si ha l'avvio della ventilazione.

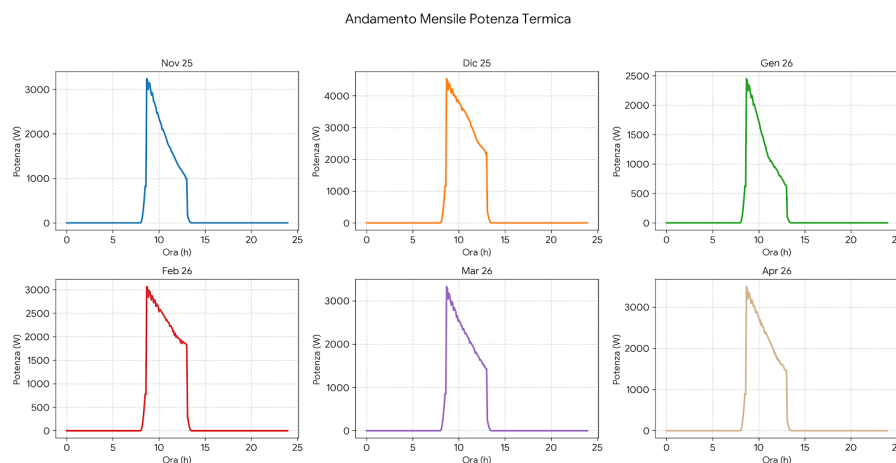


Figura 4.17: Andamento della potenza termica (W) del primo giorno di ogni mese (Caso con parete verde - PLW Piccola).

In figura 4.17 vengono riportate le potenze termiche necessarie al riscaldamento il primo di ogni mese e il loro andamento. I loro valori sono direttamente proporzionali alla portata, che subendo variazioni dovute alla presenza della PLW piccola fanno sì di apportare piccoli cali della potenza termica usata nei singoli intervalli della simulazione.

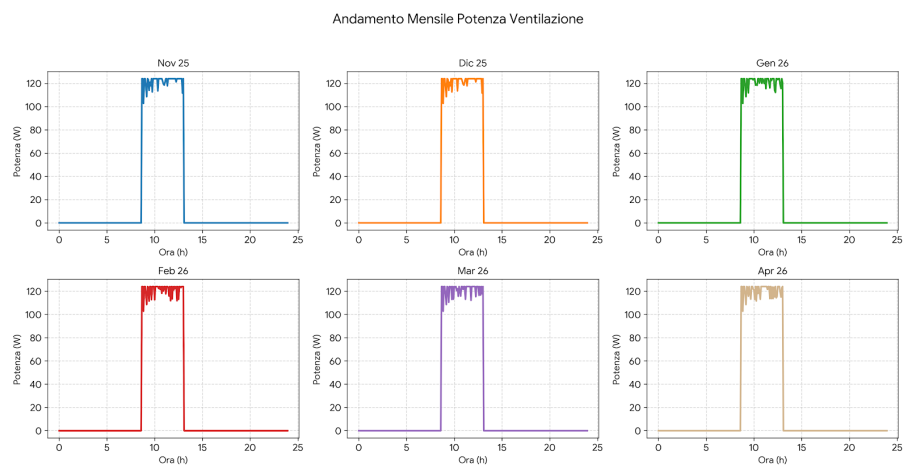


Figura 4.18: Andamento della potenza elettrica di ventilazione (W) del primo giorno di ogni mese (Caso con parete verde - PLW Piccola).

In figura 4.18 vengono riportate le potenze di ventilazione del primo di ogni mese e il loro andamento. Essendo la potenza di ventilazione direttamente proporzionale alla portata di ventilazione si ottiene che nel caso con PLW piccola si hanno lievi variazioni potenza di ventilazione nei singoli intervalli di simulazione che vanno ad abbassare il valore.

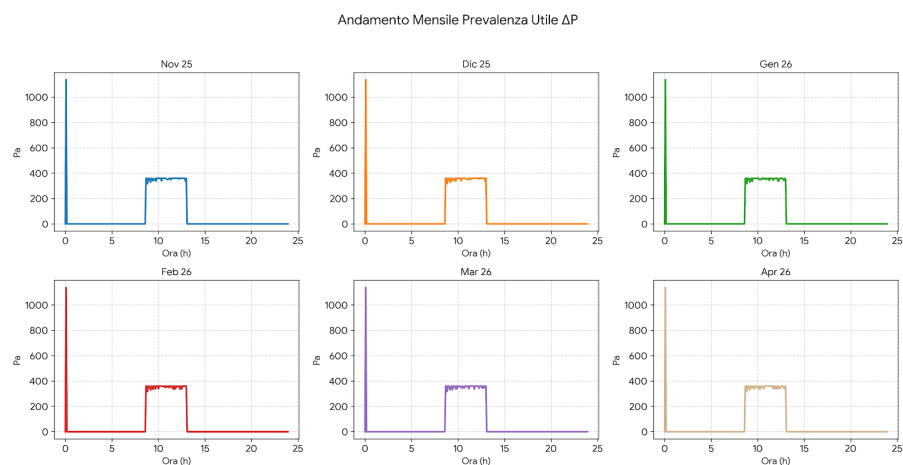


Figura 4.19: Andamento della prevalenza utile ΔP (Pa) del primo giorno di ogni mese (Caso con parete verde - PLW Piccola).

In figura 4.19 vengono riportati i valori della prevalenza dei ventilatori per il primo di ogni mese. Essendo la prevalenza dipendente dalla portata di rinnovo si ha che nel caso con PLW piccola si hanno piccoli cali di prevalenza nei singoli istanti della simulazione, richiedendo così meno potenza di ventilazione.

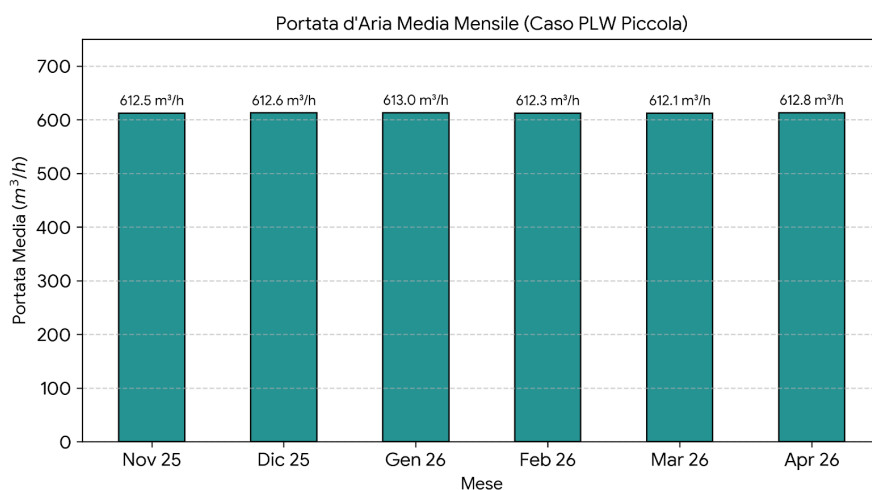


Figura 4.20: Portate di ventilazione medie mensili registrate (Caso con parete verde- PLW Piccola).

In figura 4.20 si hanno comparate le portate medie dei singoli mesi. Quello che si nota è che la portata media inizia a subire un calo dovuto alla presenza della PLW piccola. Il fatto che il valore medio non coincida con il valore massimo riscontrato nella simulazione del singolo giorno è dovuto al fatto che nella media vengono presi anche i valori di portata che si hanno nel transitorio.

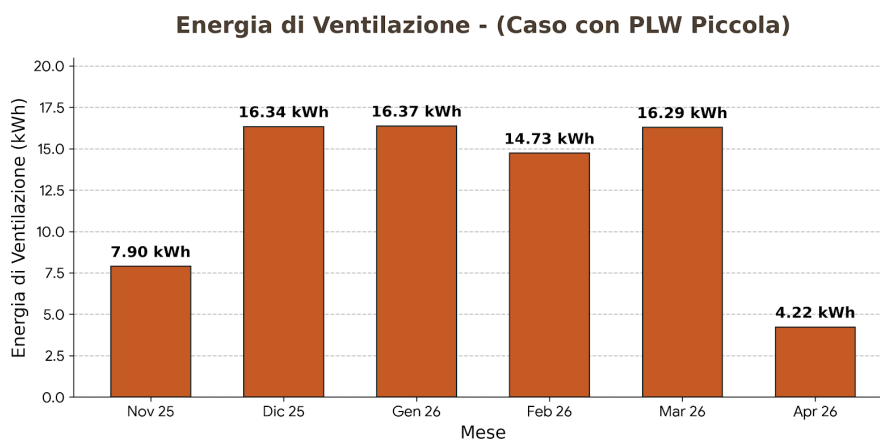


Figura 4.21: Energia di Ventilazione totale spesa ogni mese (Caso con parete verde- PLW Piccola).

In figura 4.21 viene riportata l'energia di ventilazione complessiva di ogni mese e si nota come il consumo energetico nel caso PLW piccola risulti ancora pari a quello nel caso senza PLW.

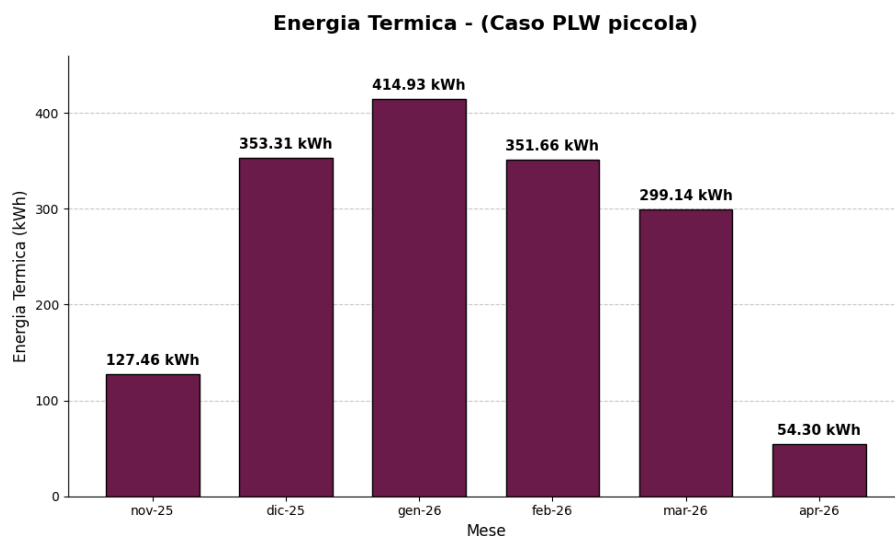


Figura 4.22: Energia Termica totale spesa ogni mese ((Caso con parete verde- PLW Piccola).

In figura 4.22 viene riportata l'energia necessaria al riscaldamento dell'aula e si nota che la presenza della PLW piccola ha prodotto un lieve risparmio in termini di energia termica consumata.

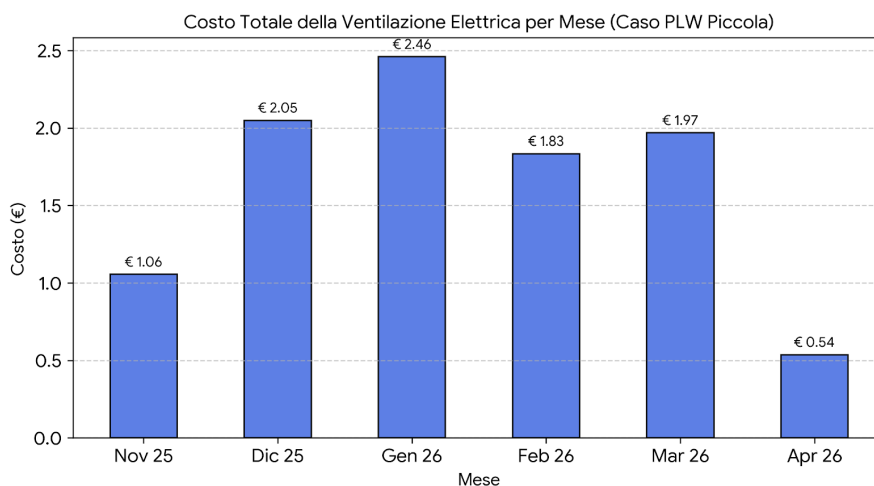


Figura 4.23: Costo totale della ventilazione elettrica mensile (Caso con parete verde- PLW Piccola).

In figura 4.23 sono riportati i costi complessivi per la ventilazione di ogni mese, trovati direttamente sapendo la spesa energetica di ventilazione mensile e il costo della corrente, considerando le diverse fasce orarie che incidono sul costo finale. Essendo direttamente proporzionale all'energia di ventilazione il costo di ventilazione mensile dipenderà dalla portata di ventilazione, indicando come la PLW piccola abbia prodotto un risparmio quasi nullo o comunque molto irrisorio.

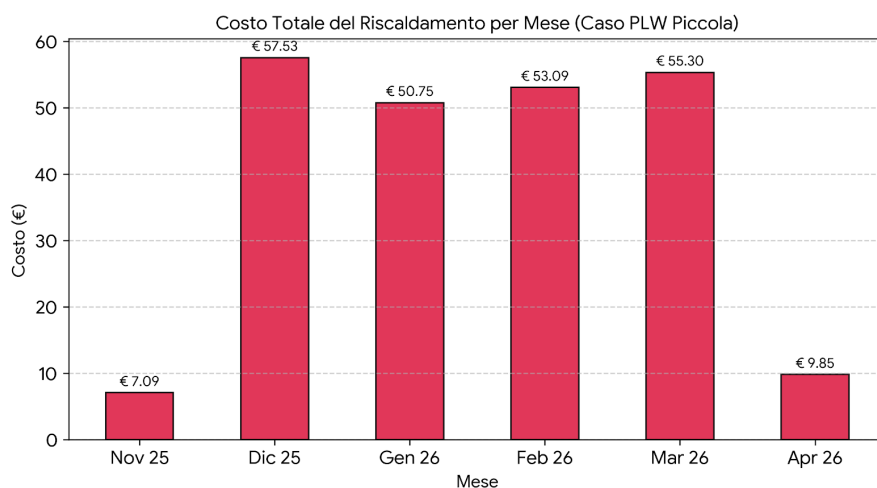


Figura 4.24: Costo totale del riscaldamento termico mensile (Caso con parete verde- PLW Piccola).

In figura 4.24 sono riportati i costi complessivi per il riscaldamento di ogni mese, trovati direttamente sapendo la spesa di energia termica mensile e il costo della corrente, considerando le diverse fasce orarie che incidono sul costo finale. Essendo direttamente proporzionale all'energia termica il costo di ventilazione mensile dipenderà dalla portata di ventilazione e dalla temperatura esterna (che però risulta uguale in ogni simulazione), facendo notare come la presenza della PLW abbia prodotto un risparmio irrisorio.

Tabella 4.2: Quadro riassuntivo mensile dei costi di ventilazione, riscaldamento e delle portate medie registrate (Caso con PLW Piccola).

Mese	Costo Ventilazione [€]	Costo Riscaldamento [€]	Costo Totale Mensile [€]	Portata Media [m ³ /h]
Novembre 2025	1,06	7,09	8,15	612,49
Dicembre 2025	2,05	57,53	59,58	612,65
Gennaio 2026	2,46	50,75	53,21	613,04
Febbraio 2026	1,83	53,09	54,92	612,31
Marzo 2026	1,97	55,30	57,27	612,08
Aprile 2026	0,54	9,85	10,39	611,62
TOTALE	9,91	233,61	243,52	–

4.3 PLW media

Per la PLW media si assumono dimensioni di $H = 2.70$ m e $L = 4.5$ m. In questo caso si continuando a studiare gli effetti della PLW inserita nel locale andando ad aumentarne l'area utile per la fitodepurazione, iniziando ad ottenere dei risultati maggiori.

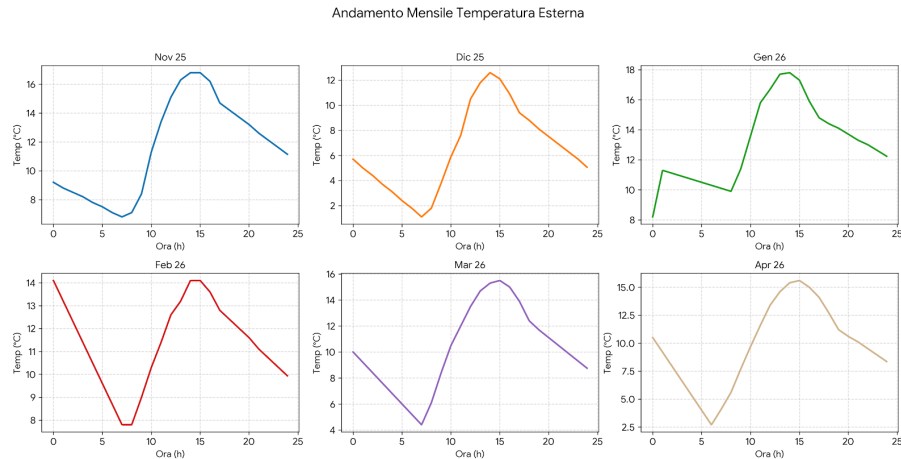


Figura 4.25: Andamento temporale della temperatura esterna del primo giorno di ogni mese (Caso con parete verde- PLW Media).

In Figura 4.25 vengono riportate le temperature esterne di ogni primo del mese necessarie per poter poi trovare la potenza necessaria al riscaldamento e la corrispettiva energia di riscaldamento e costo di riscaldamento.

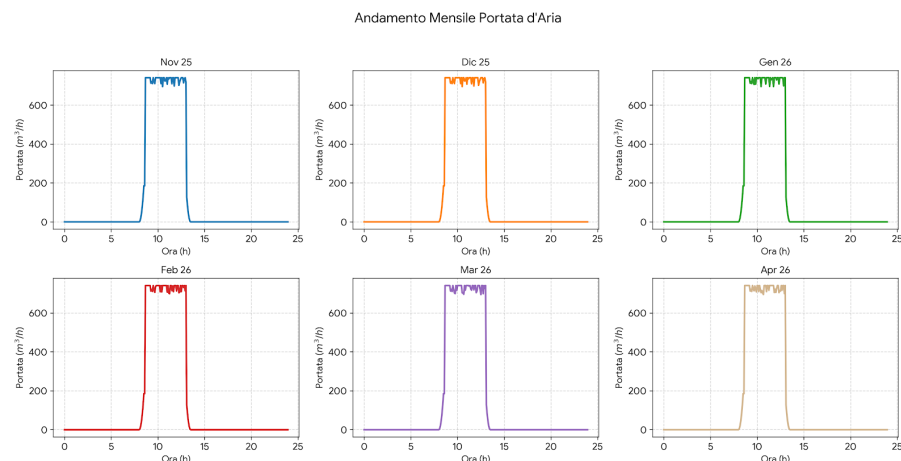


Figura 4.26: Andamento temporale della portata d'aria di rinnovo del primo giorno di ogni mese (Caso con parete verde- PLW Media).

In figura 4.26 viene riportato l'andamento della portata di rinnovo nelle ore di occupazione del locale per ogni primo del mese. Si nota che la portata fornita non coincide sempre con il

valore massimo ricavato dalla 3.13 ma presenta delle variazioni di entità più consistente dovute all'effetto della PLW media.

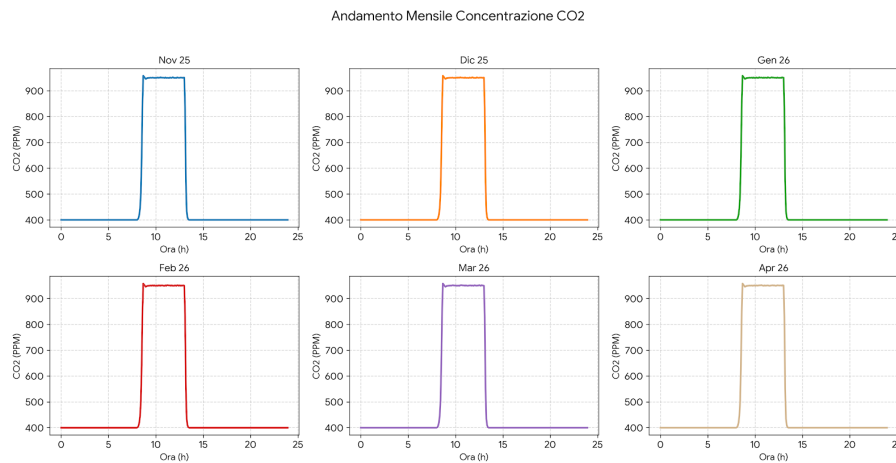


Figura 4.27: Andamento temporale della concentrazione di CO2 (ppm) del primo giorno di ogni mese (Caso con parete verde- PLW Media).

In figura 4.27 viene riportata la concentrazione nel locale per ogni primo del mese. Si nota come questa rimanga costante al valore impostato come limite nel controllore PID, valore dopo il quale si ha l'avvio della ventilazione.

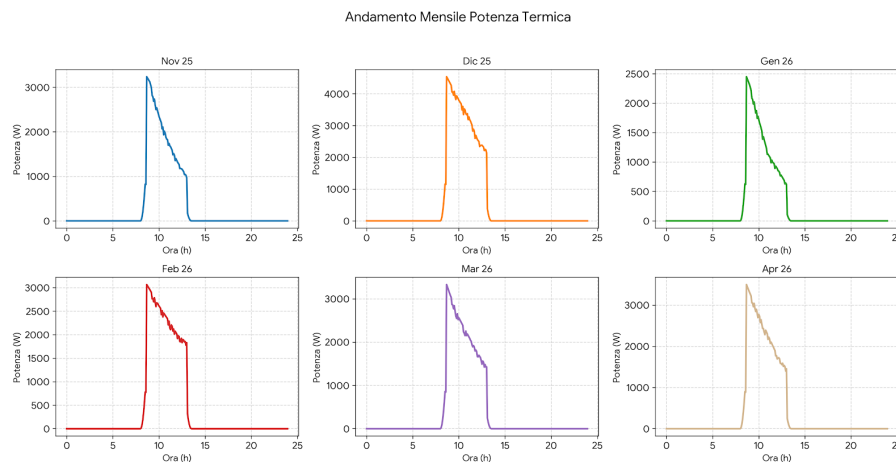


Figura 4.28: Andamento della potenza termica (W) del primo giorno di ogni mese (Caso con parete verde- PLW Media).

In figura 4.28 vengono riportate le potenze termiche necessarie al riscaldamento il primo di ogni mese e il loro andamento. I loro valori sono direttamente proporzionali alla portata che subendo variazioni dovute alla presenza della PLW media fanno sì di apportare cali più consistenti della potenza termica usata nei singoli intervalli della simulazione.

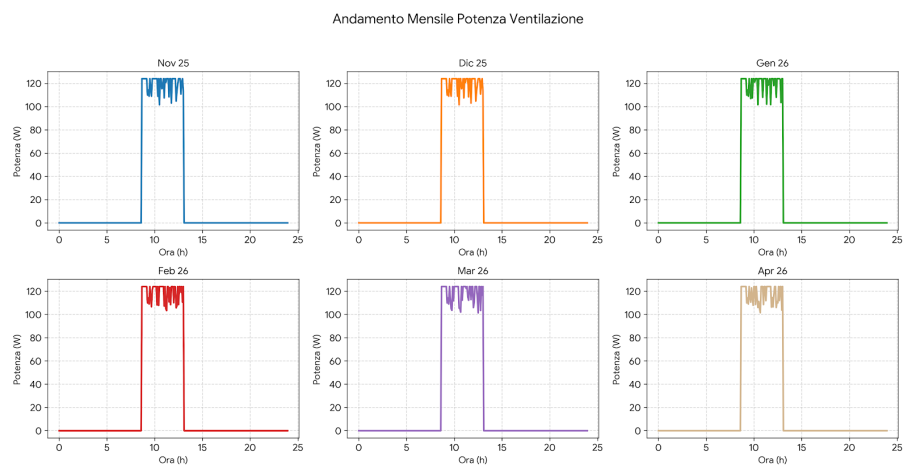


Figura 4.29: Andamento della potenza elettrica di ventilazione (W) del primo giorno di ogni mese (Caso con parete verde- PLW Media).

In figura 4.29 vengono riportate le potenze di ventilazione del primo di ogni mese e il loro andamento. Essendo la potenza di ventilazione direttamente proporzionale alla portata di ventilazione si ottiene che nel caso con PLW media si hanno variazioni più consistenti di potenza di ventilazione nei singoli intervalli di simulazione che vanno ad abbassare il valore.

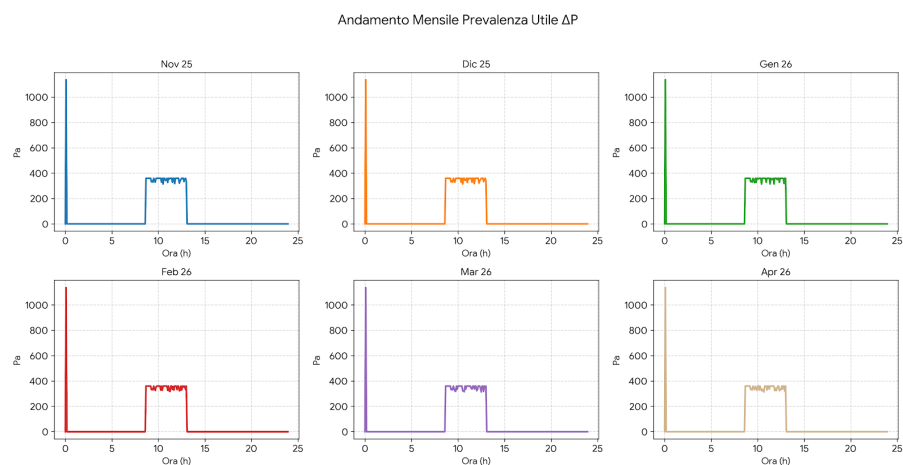


Figura 4.30: Andamento della prevalenza utile ΔP (Pa) del primo giorno di ogni mese (Caso con parete verde- PLW Media).

In figura 4.30 vengono riportati i valori della prevalenza dei ventilatori per il primo di ogni mese. Essendo la prevalenza dipendente dalla portata di rinnovo si ha che nel caso con PLW media si hanno cali più consistenti di prevalenza nei singoli istanti della simulazione, richiedendo così meno potenza di ventilazione.

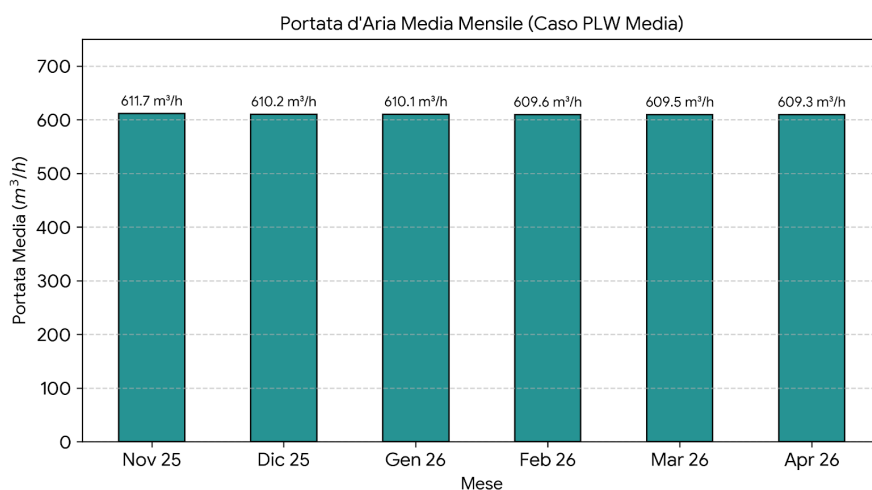


Figura 4.31: Portate di ventilazione medie registrate per ciascun mese (Caso con parete verde- PLW Media).

In figura 4.31 si hanno comparate le portate medie dei singoli mesi. Quello che si nota è che la portata media subisce un calo più consistente dovuto alla presenza della PLW media. Il fatto che il valore medio non coincida con il valore massimo riscontrato nella simulazione del singolo giorno è dovuto al fatto che nella media vengono presi anche i valori di portata che si hanno nel transitorio.

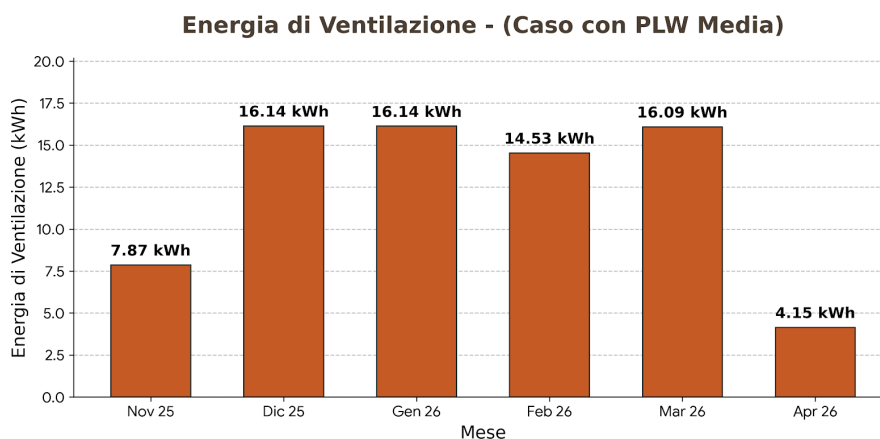


Figura 4.32: Energia di Ventilazione totale spesa ogni mese (Caso con parete verde- PLW Media).

In figura 4.32 viene riportata l'energia di ventilazione complessiva di ogni mese si nota come il consumo energetico nel caso PLW media inizi a diminuire nel caso senza PLW.

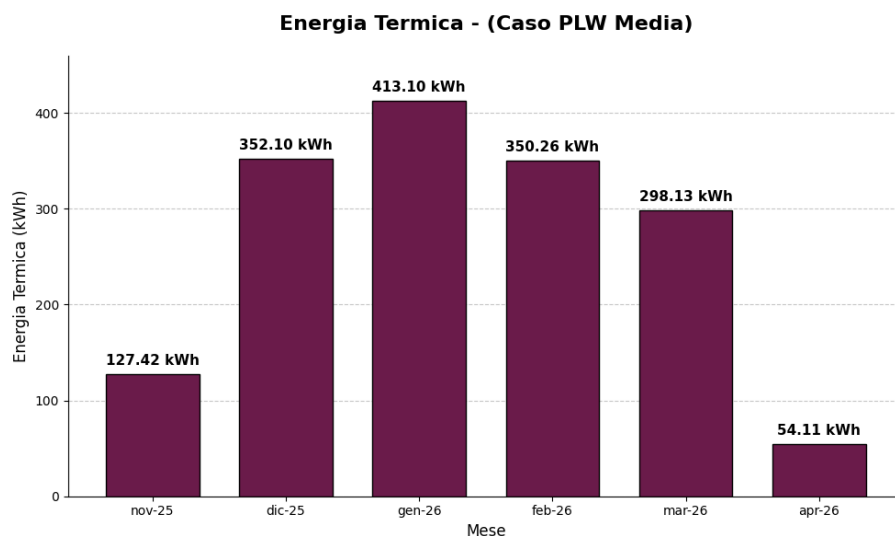


Figura 4.33: Energia Termica totale spesa ogni mese (Caso con parete verde- PLW Media).

In figura 4.33 viene riportata l'energia necessaria al riscaldamento dell'aula e si nota che la presenza della PLW media ha prodotto un risparmio più consistente in termini di energia termica consumata.

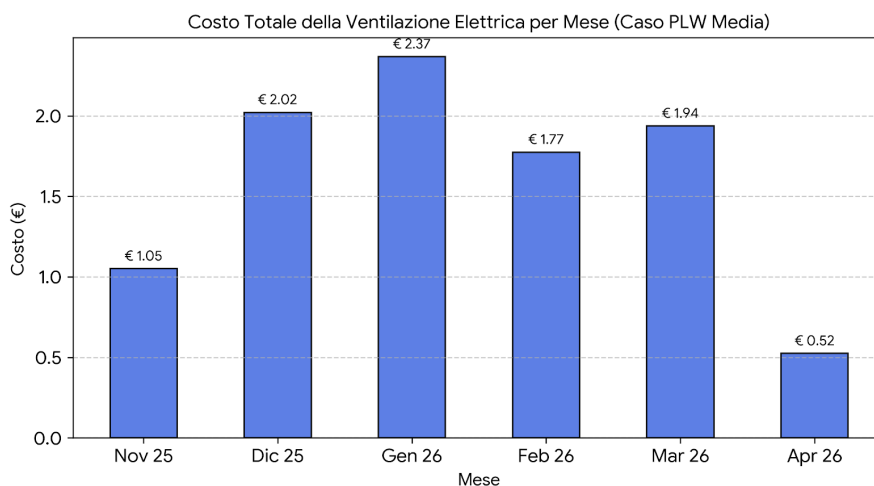


Figura 4.34: Costo totale della ventilazione elettrica mensile (Caso con parete verde- PLW Media).

In figura 4.34 sono riportati i costi complessivi per la ventilazione di ogni mese, trovati direttamente sapendo la spesa energetica di ventilazione mensile e il costo della corrente, considerando le diverse fasce orarie che incidono sul costo finale. Essendo direttamente proporzionale all'energia di ventilazione il costo di ventilazione mensile dipenderà dalla portata di ventilazione, indicando come la PLW media abbia prodotto un risparmio ridotto ma comunque più consistente del caso precedente.

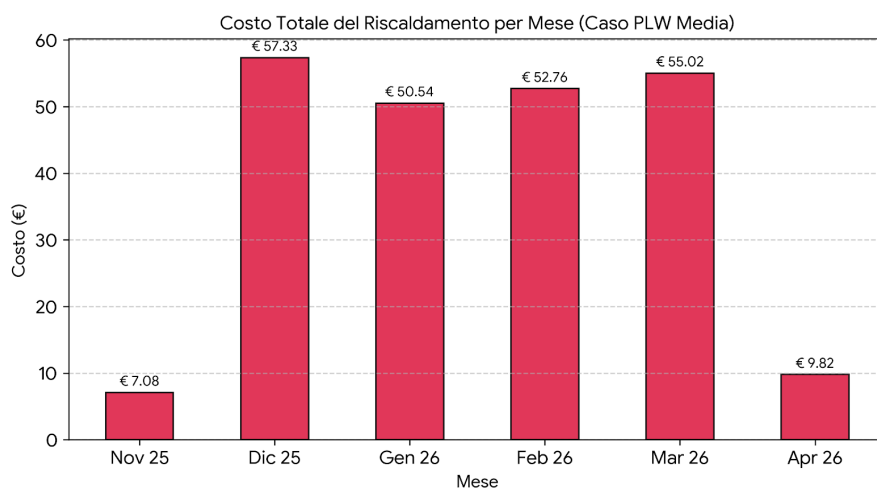


Figura 4.35: Costo totale del riscaldamento termico mensile (Caso con parete verde- PLW Media).

In figura 4.35 sono riportati i costi complessivi per il riscaldamento di ogni mese, trovati direttamente sapendo la spesa di energia termica mensile e il costo della corrente, considerando le diverse fasce orarie che incidono sul costo finale. Essendo direttamente proporzionale all'energia termica il costo di ventilazione mensile dipenderà dalla portata di ventilazione e dalla temperatura esterna (che però risulta uguale in ogni simulazione), facendo notare come la presenza della PLW media abbia prodotto un risparmio sempre molto ridotto ma più consistente del caso precedente.

Tabella 4.3: Quadro riassuntivo mensile dei costi di ventilazione, riscaldamento e delle portate medie registrate (Caso con LW media).

Mese	Costo Ventilazione [€]	Costo Riscaldamento [€]	Costo Totale [€]	Portata Media [m ³ /h]
Novembre 2025	€ 1,05	€ 7,08	€ 8,13	611,71
Dicembre 2025	€ 2,02	€ 57,33	€ 59,35	610,18
Gennaio 2026	€ 2,37	€ 50,54	€ 52,91	610,15
Febbraio 2026	€ 1,77	€ 52,76	€ 54,53	609,57
Marzo 2026	€ 1,94	€ 55,02	€ 56,96	609,54
Aprile 2026	€ 0,52	€ 9,82	€ 10,34	609,35
TOTALE	€ 9,67	€ 232,55	€ 242,22	–

4.4 PLW grande

Per la PLW grande si assumono dimensioni di $H = 2.70$ m e $L = 7.5$ m mettendola sul lato lungo dell'aula. Questo è l'ultimo caso su cui è stata fatta la simulazione ed è quello che ha fornito i dati più significativi in termini di risparmio per la ventilazione mantenendo sempre lo standard qualitativo dell'aria invariato.

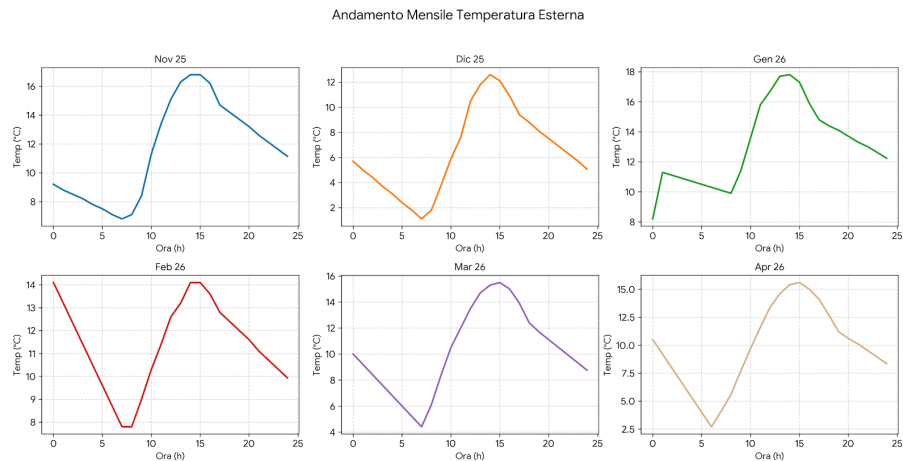


Figura 4.36: Andamento temporale della temperatura esterna del primo giorno di ogni mese (Caso con parete verde - PLW Grande).

In Figura 4.36 vengono riportate le temperature esterne di ogni primo del mese necessarie per poter poi trovare la potenza necessaria al riscaldamento e la corrispettiva energia di riscaldamento e costo di riscaldamento.

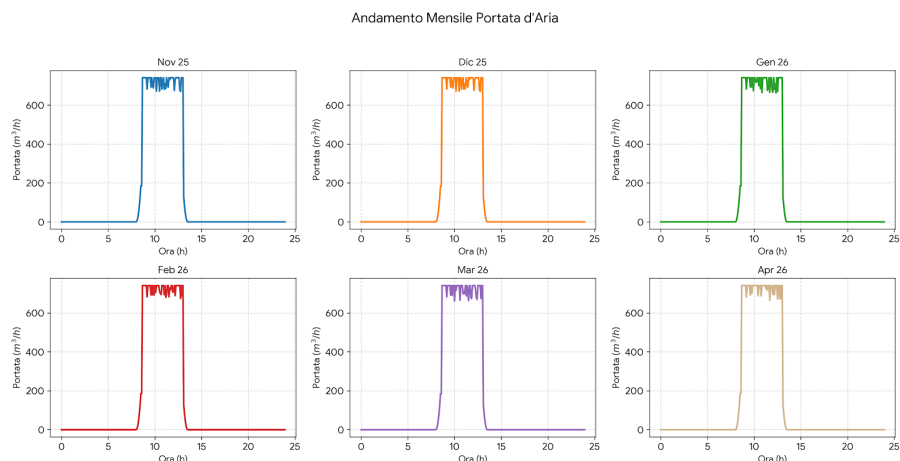


Figura 4.37: Andamento temporale della portata d'aria del primo giorno di ogni mese (Caso con parete verde - PLW Grande).

In figura 4.37 viene riportato l'andamento della portata di rinnovo nelle ore di occupazione del locale per ogni primo del mese. Si nota che la portata fornita non coincide sempre con il

valore massimo ricavato dalla 3.13 ma presenta le variazioni maggiori tra le quattro simulazioni dovute all'effetto della PLW grande.

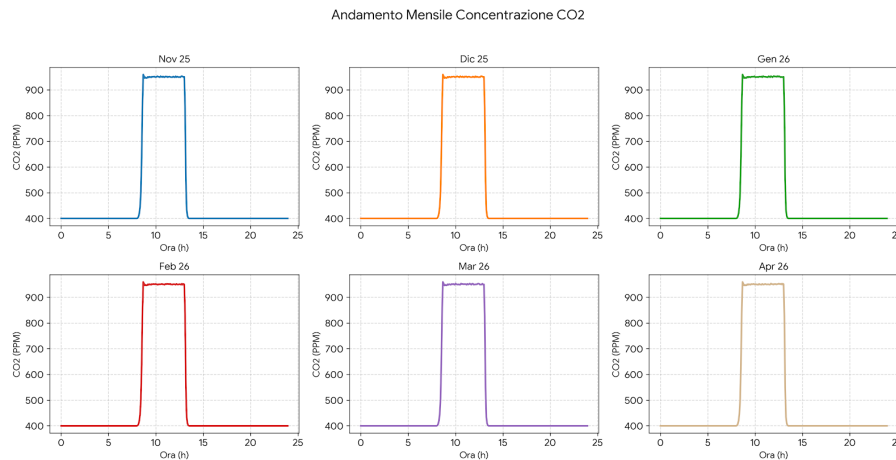


Figura 4.38: Andamento temporale della concentrazione di CO2 (ppm) del primo giorno di ogni mese (Caso con parete verde - PLW Grande).

In figura 4.38 viene riportata la concentrazione nel locale per ogni primo del mese. Si nota come questa rimanga costante al valore impostato come limite nel controllore PID, valore dopo il quale si ha l'avvio della ventilazione.

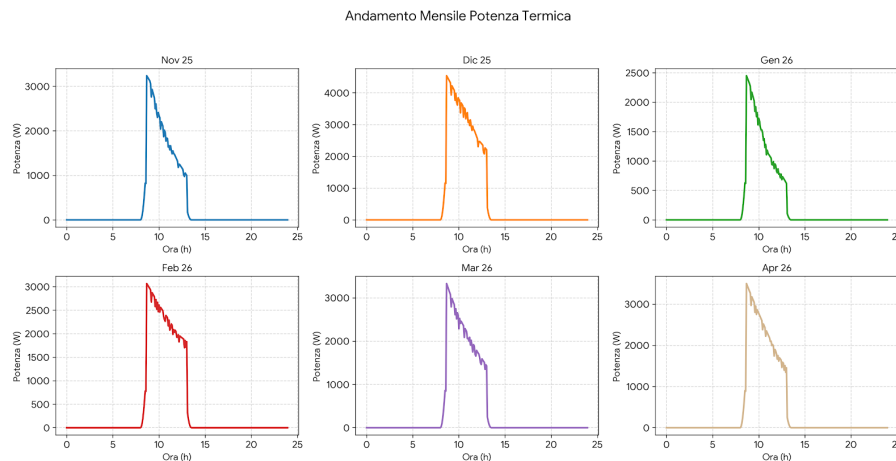


Figura 4.39: Andamento della potenza termica (W) del primo giorno di ogni mese (Caso con parete verde - PLW Grande).

In figura 4.39 vengono riportate le potenze termiche necessarie al riscaldamento il primo di ogni mese e il loro andamento. I loro valori sono direttamente proporzionali alla portata che subendo le variazioni maggiori dovute alla presenza della PLW grande fanno sì di apportare cali maggiori tra i quattro casi, andando a dare i valori di potenza termica più bassa tra i quattro casi nei singoli istanti della simulazione.

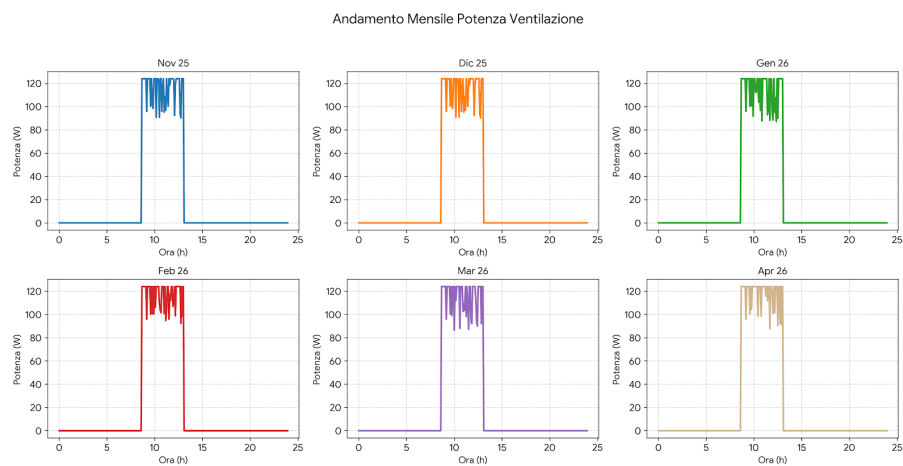


Figura 4.40: Andamento della potenza elettrica di ventilazione (W) del primo giorno di ogni mese (Caso con parete verde - PLW Grande).

In figura 4.40 vengono riportate le potenze di ventilazione del primo di ogni mese e il loro andamento. Essendo la potenza di ventilazione direttamente proporzionale alla portata di ventilazione si ottiene che nel caso con PLW grande si hanno le variazioni maggiori tra i quattro casi, andando a dare il valore di potenza di ventilazione più basso tra i quattro casi nei singoli istanti della simulazione.

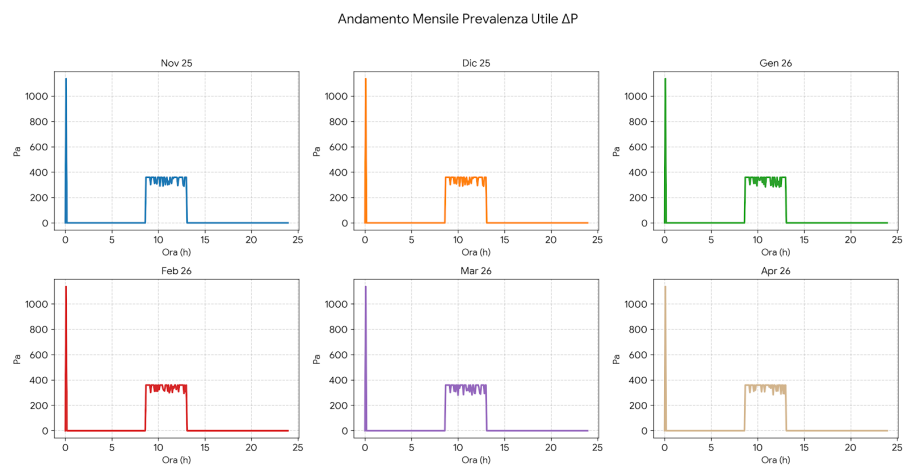


Figura 4.41: Andamento della prevalenza utile ΔP (Pa) del primo giorno di ogni mese (Caso con parete verde - PLW Grande).

In figura 4.41 vengono riportati i valori della prevalenza dei ventilatori per il primo di ogni mese. Essendo la prevalenza dipendente dalla portata di rinnovo si ha che nel caso con PLW grande si hanno i cali più elevati tra le quattro simulazioni in termini di prevalenza nei singoli istanti della simulazione, richiedendo così il valore di potenza più basso dei quattro casi.

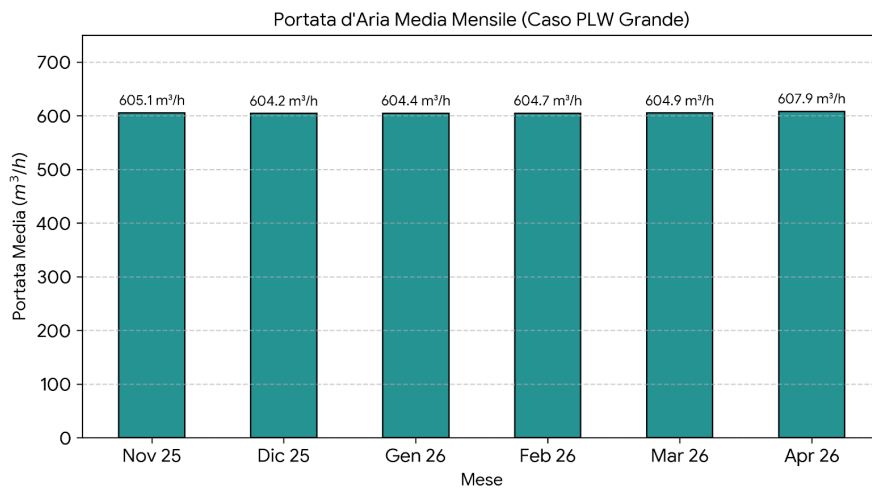


Figura 4.42: Portate di ventilazione medie mensili registrate (Caso parete verde - PLW Grande).

In figura 4.42 si hanno comparate le portate medie dei singoli mesi. Quello che si nota è che la portata media subisce il calo maggiore tra i quattro casi e ciò è dovuto alla presenza della PLW grande. Il fatto che il valore medio non coincida con il valore massimo riscontrato nella simulazione del singolo giorno è dovuto al fatto che nella media vengono presi anche i valori di portata che si hanno nel transitorio.

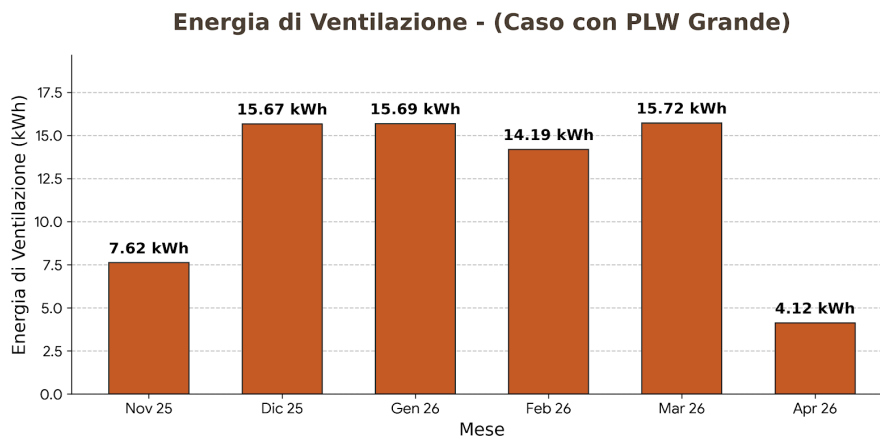


Figura 4.43: Energia di Ventilazione totale spesa ogni mese (Caso parete verde - PLW Grande).

In figura 4.43 viene riportata l'energia di ventilazione complessiva di ogni mese e si nota come il consumo energetico nel caso PLW grande permetta di ottenere il maggiore risparmio di energia di ventilazione nei quattro casi.

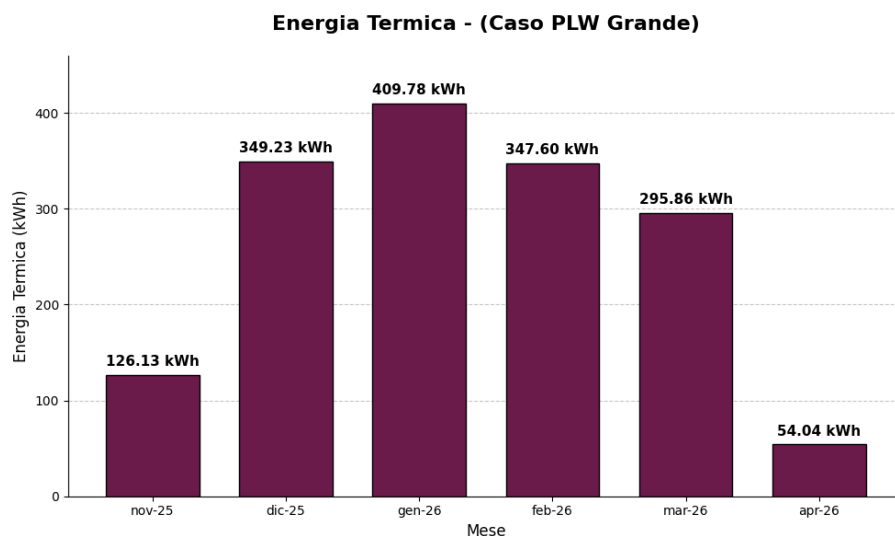


Figura 4.44: Energia Termica totale spesa ogni mese (Caso parete verde - PLW Grande).

In figura 4.44 viene riportata l'energia necessaria al riscaldamento dell'aula e si nota che la presenza della PLW grande ha prodotto il risparmio massimo in termini di energia termica consumata tra i quattro casi.

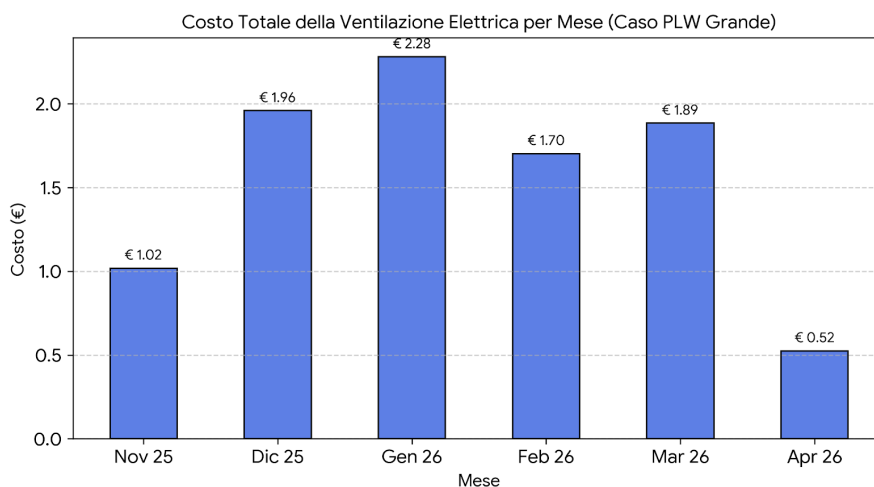


Figura 4.45: Costo totale della ventilazione elettrica mensile (Caso parete verde - PLW Grande).

In figura 4.45 sono riportati i costi complessivi per la ventilazione di ogni mese, trovati direttamente sapendo la spesa energetica di ventilazione mensile e il costo della corrente, considerando le diverse fasce orarie che incidono sul costo finale. Essendo direttamente proporzionale all'energia di ventilazione il costo di ventilazione mensile dipenderà dalla portata di ventilazione, indicando come la PLW grande abbia prodotto il risparmio maggiore tra i quattro casi.

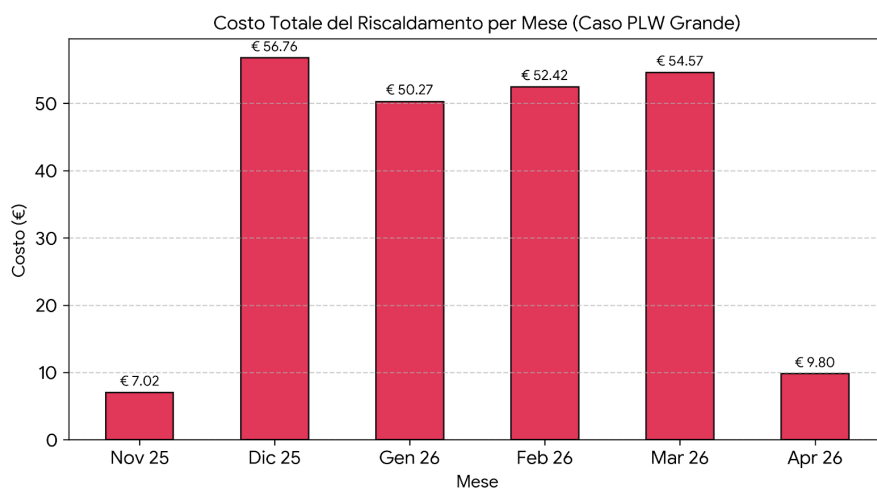


Figura 4.46: Costo totale del riscaldamento termico mensile (Caso parete verde - PLW Grande).

In figura 4.46 sono riportati i costi complessivi per il riscaldamento di ogni mese, trovati direttamente sapendo la spesa di energia termica mensile e il costo della corrente, considerando le diverse fasce orarie che incidono sul costo finale. Essendo direttamente proporzionale all'energia termica il costo di ventilazione mensile dipenderà dalla portata di ventilazione e dalla temperatura esterna (che però risulta uguale in ogni simulazione), facendo notare come la presenza della PLW grande abbia prodotto il risparmio massimo tra i quattro casi.

Tabella 4.4: Quadro riassuntivo mensile dei costi di ventilazione, riscaldamento e delle portate medie registrate (Caso con PLW Grande).

Mese	Costo Ventilazione [€]	Costo Riscaldamento [€]	Costo Totale [€]	Portata Media [m ³ /h]
Novembre 2025	€ 1,02	€ 7,02	€ 8,04	605,14
Dicembre 2025	€ 1,96	€ 56,76	€ 58,72	604,22
Gennaio 2026	€ 2,28	€ 50,27	€ 52,55	604,39
Febbraio 2026	€ 1,71	€ 52,27	€ 53,98	603,63
Marzo 2026	€ 1,88	€ 54,63	€ 56,51	603,51
Aprile 2026	€ 0,52	€ 9,89	€ 10,41	603,32
TOTALE	€ 9,37	€ 230,84	€ 240,21	–

4.5 Grafici comparativi

Dato il grande quantitativo di dati e di grafici ottenuti risulta comodo utilizzare dei grafici che permettono di andare ad osservare le differenze tra i 4 casi studio.

4.5.1 Grafico comparativo portate medie

Con questo grafico si può osservare in maniera alquanto rapida come la presenza della PLW e la sua grandezza riesca a far variare la portata d'aria media nel locale. Questo effetto di riduzione è dovuto all'azione di fitodepurazione che la PLW svolge in maniera indipendente, mantenendo la concentrazione CO_2 più a lungo entro i limiti impostati dal PID e dando un risparmio in termini di accensioni andandole a diminuire ed abbassando anche la portata media necessaria per effettuare la ventilazione.

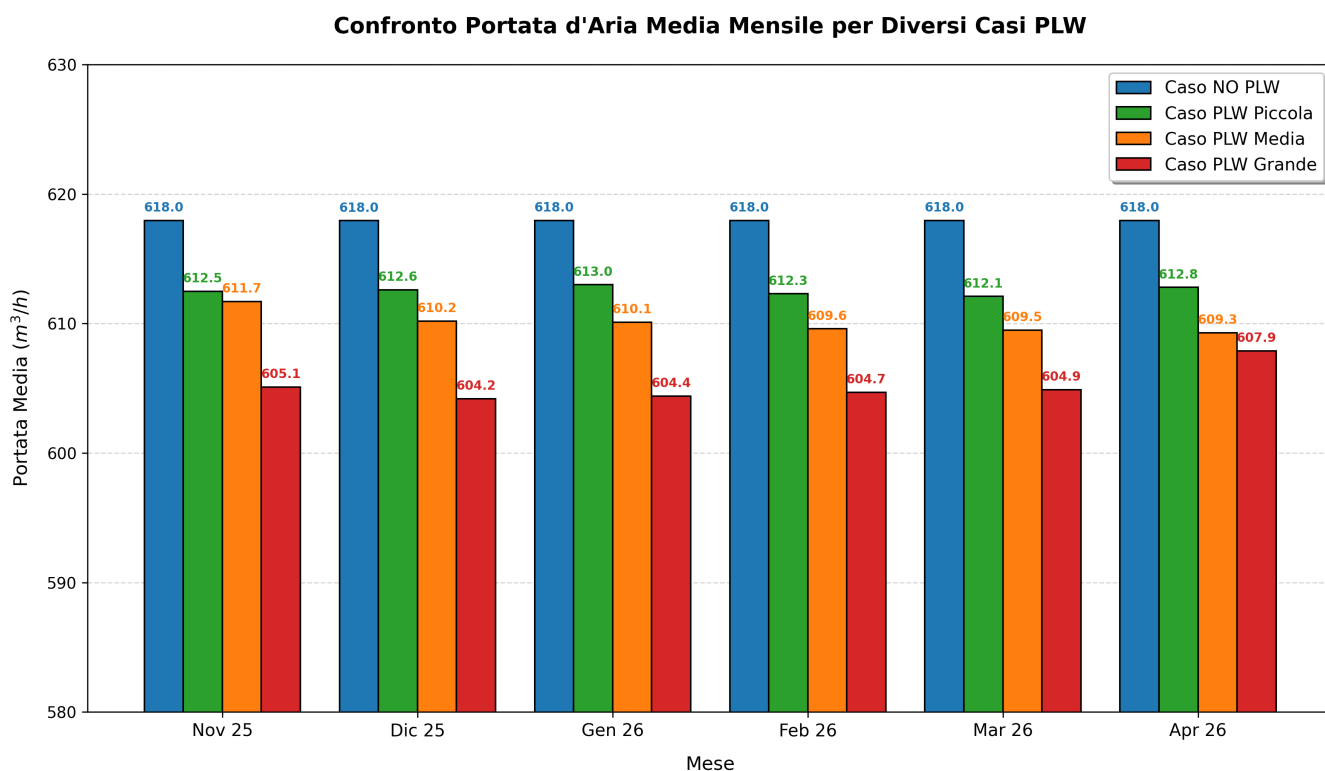


Figura 4.47: Confronto Portata d'Aria Media Mensile (Tutti i casi).

4.5.2 Grafico comparativo concentrazioni CO_2

Per questa comparazione si è preferito sovrapporre i grafici dei singoli casi in quanto, già in sede di valutazione dei dati, era emersa a completa mancanza di variazione della concentrazione. L'invarianza della CO_2 nel corso delle simulazioni di tutti e quattro i casi è di fatto un output atteso, in quanto il corretto settaggio del PID permette proprio al controllore di effettuare tutte le opportune regolazioni della portata con il fine ultimo di mantenere la concentrazione costante indipendentemente da eventuali condizioni interne.

Andamento Mensile Concentrazione CO2 - Confronto Casistiche PLW

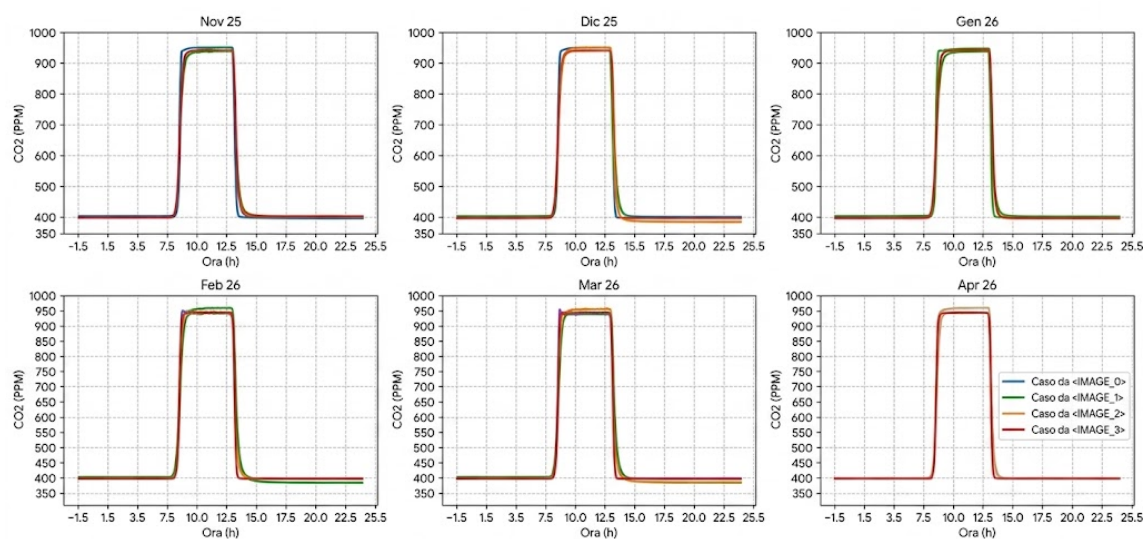


Figura 4.48: Andamento Mensile Concentrazione CO2 (Tutti i casi).

4.5.3 Grafico comparativo energia di ventilazione

Analizzando i dati relativi all'energia spesa per la ventilazione nei singoli casi e mettendo tale dispendio su un unico grafico si nota come la presenza della PLW nell'aula vada ad influenzare il dispendio energetico del ventilatore per svolgere la movimentazione dell'aria necessaria per il rinnovo, andando quindi a poter generare un possibile risparmio economico.

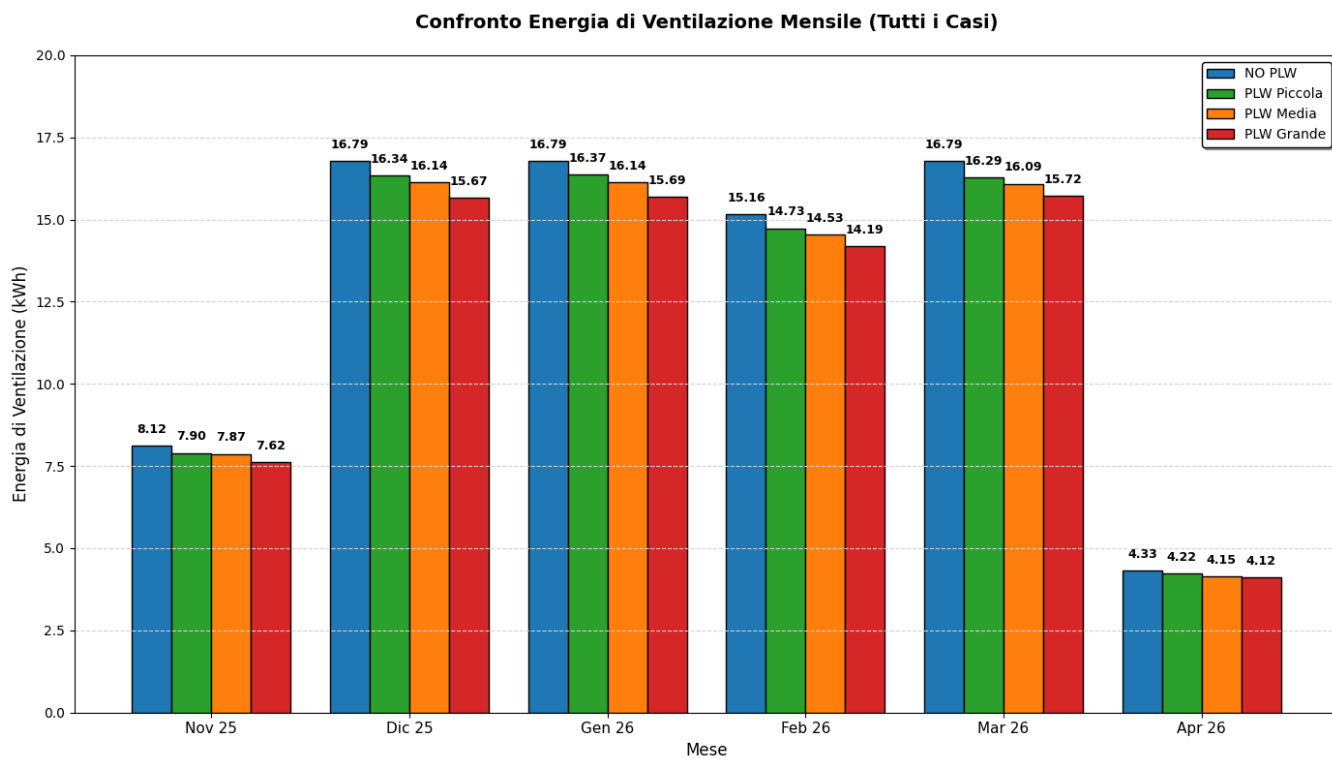


Figura 4.49: Confronto Energia di Ventilazione Mensile (Tutti i Casi).

4.5.4 Grafico comparativo energia termica

Lo studio comparativo tra le varie energie termiche nel progetto, sempre sotto ipotesi di aula perfettamente isolata e che W_{ae} sia sufficiente sia per il rinnovo che per il riscaldamento, fa evincere che l'utilizzo della PLW ha indirettamente un effetto di riduzione dell'energia necessaria per la ventilazione con quindi un successivo risparmio economico.

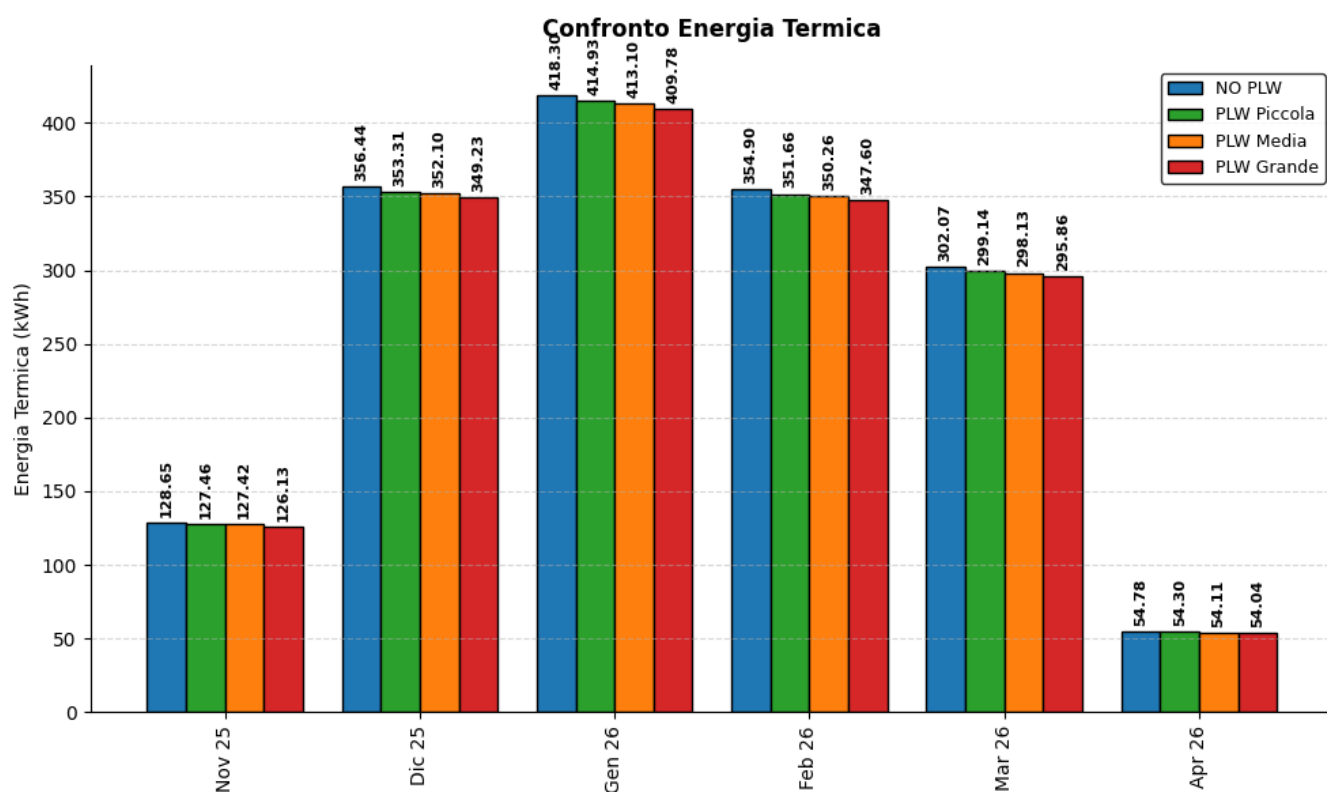


Figura 4.50: Confronto Energia termica Mensile (Tutti i Casi).

4.5.5 Grafico comparativo del costo totale di riscaldamento

Con questa comparazione è possibile osservare in maniera più evidente come vari la spesa per il riscaldamento nei vari casi. Rispetto al caso senza PLW, le varie pareti forniscono un risparmio complessivo di:

- **no PLW:** spesa complessiva di 253.54€
- **PLW piccola:** spesa complessiva di 233.62€, con un risparmio del 7.86% pari a 19.92€.
- **PLW media:** spesa complessiva di 232.55€, con un risparmio del 8.28% pari a 20.99€.
- **PLW grande:** spesa complessiva di 230.84€, con un risparmio del 8.95% pari a 23.2€.

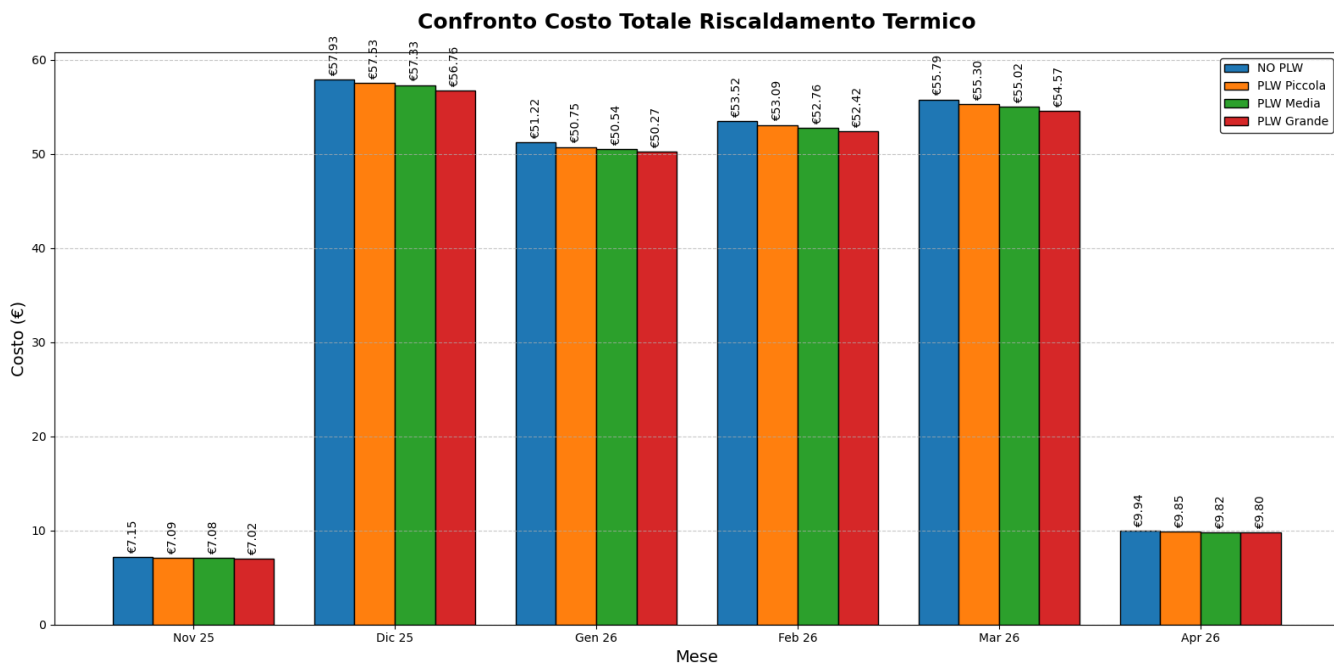


Figura 4.51: Confronto Costi di riscaldamento totali mensili (Tutti i Casi).

4.5.6 Grafico comparativo del costo totale della ventilazione

Comparando i costi totali di ventilazione delle 4 simulazioni è possibile attestare che la PLW ha effettivamente un impatto sull'abbattimento dei costi. Rispetto al caso senza PLW, le varie varie pareti forniscono un risparmio complessivo di:

- **no PLW:** spesa complessiva di 10.04€
- **PLW piccola:** spesa complessiva di 9.91€, con un risparmio del 1.29% pari a 0.13€.
- **PLW media:** spesa complessiva di 9.67€, con un risparmio del 3.69% pari a 0.37€.
- **PLW grande:** spesa complessiva di 9.37€, con un risparmio del 6.67% pari a 0.67€.

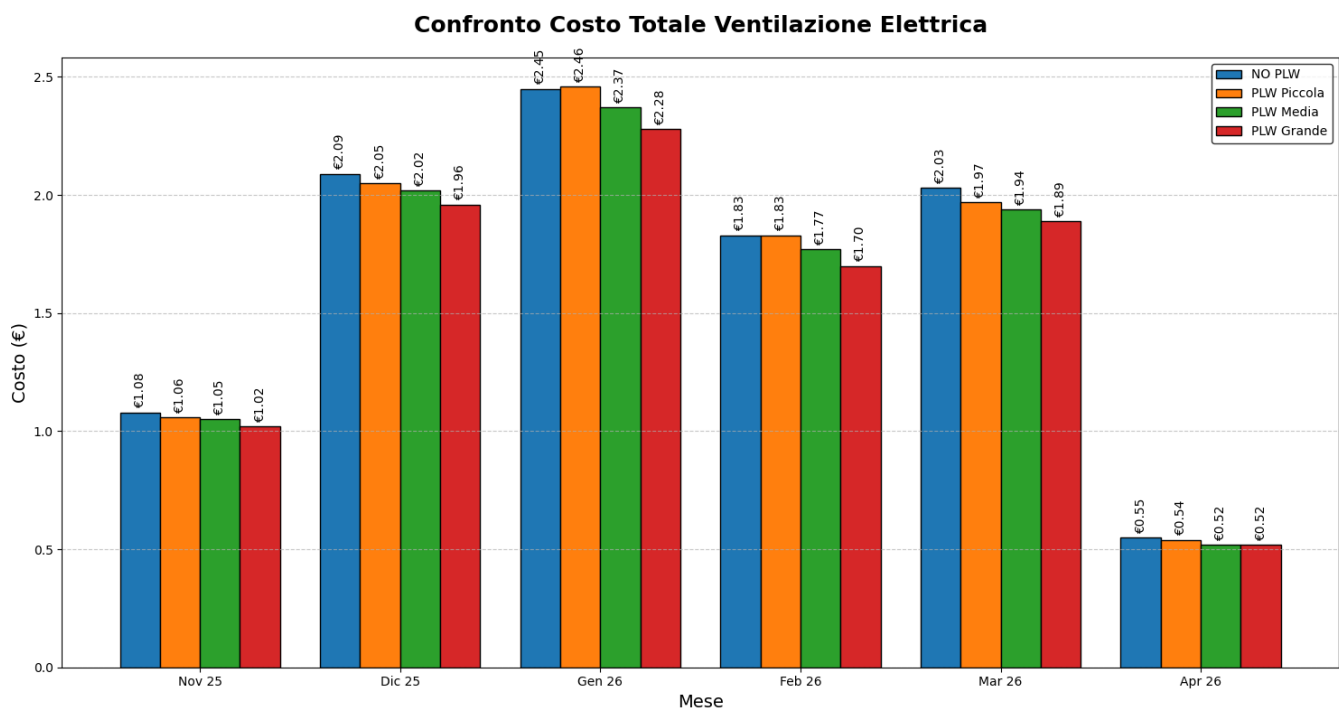


Figura 4.52: Confronto Costi di Ventilazione totali mensili (Tutti i Casi).

Capitolo 5

Conclusioni

Il motivo per cui è stato effettuato lo studio riportato nella seguente tesi è quello verificare l'efficacia e la possibile implementazione di sistemi PLW (Passive Living Wall, in italiano pareti verdi passive) all'interno di locali pubblici in modo da poter sostituire o affiancare i classici sistemi di filtraggio e depurazione dell'aria con metodi meno impattanti dal punto di vista energetico. Dall'analisi dei dati fatta nel capitolo 4 quello che è emerso è che le PLW risultano avere un effetto benefico all'interno del locale dal punto di vista della possibilità di diminuire la portata necessaria per il rinnovo rispetto a quella trovata dalla UNI EN 16798 [15]. Questi effetti benefici dell'utilizzo della PLW all'interno dell'aula sono tutti dovuti all'effetto di fitorimediazione effettuato dalla parete, che ha un ruolo attivo all'interno dell'operazione di fitodepurazione dell'aria del locale e mantenimento dell'inquinante sotto la soglia massima. Questi effetti migliorativi, seppur presenti, sono risultati alquanto ridotti rispetto alle aspettative fornite dalla letteratura moderna riguardo l'utilizzo delle LW in quanto si sono ottenuti risparmi totali comprensivi di riscaldamento e ventilazione di 20.05€ per PLW piccola con $A_{\text{verde}} = 6.345 \text{ m}^2$, 21.36€ per PLW media con $A_{\text{verde}} = 12.15 \text{ m}^2$ e 23.87€ per PLW grande con $A_{\text{verde}} = 20.25 \text{ m}^2$. Nel passaggio da PLW piccola a PLW media si riscontra un aumento del risparmio del 6.13% con un aumento di A_{verde} di circa due volte la iniziale, mentre nel passaggio da PLW piccola a PLW grande si ha un incremento del risparmio del 16% con un aumento di A_{verde} di 3,2 la iniziale. Da queste considerazioni e dall'analisi dei dati si nota come un effetto effettivamente utile della PLW si inizia ad avere a partire dalla PLW media, dovendo però considerare anche gli eventuali costi; non trattati in questa disamina, dell'installazione e del corretto mantenimento della PLW a luce dei motivi visti nel paragrafo 1.4.2.

Queste considerazioni vanno però contestualizzate in quanto lo studio è stato fatto per un singolo locale perfettamente sigillato, senza possibili efflussi di CO_2 che sarebbero potuti andare ad incidere sulla concentrazione istantanea, costo dell'energia preso dal PUN di molto inferiore al reale costo della corrente e con possibilità di scalare i risultati ottenuti per gli n locali presenti. In conclusione con questa tesi si è studiata l'attualità e convenienza dei sistemi PLW come mezzo

di fitodepurazione, facendo evincere che tali metodi possono al più essere utilizzati come mezzo di supporto all'impianto di ventilazione e di benessere psichico-fisico per gli occupanti del locale [29] [21] che come vero sostituto dei metodi di filtraggio odierni. Tali limitazioni delle PLW però sono già state individuate da tempo nel mondo delle LW facendo andare a concentrare gli studi e le risorse sia scientifiche che economiche sui sistemi ALW, in quanto questi hanno già dimostrato la loro efficacia di gran lunga maggiore alle PLW in termini di capacità di purificazione dell'aria e riduzione dei costi dell'impianto di ventilazione.

Bibliografia

- [1] D Barbieri, M Pietrafesa e G Rizzo. “QUALITA’DELL’ARIA INTERNA E REQUISITI DI VENTILAZIONE”. In: (1996).
- [2] Amirreza Talaie et al. “Adsorption, catalytic oxidation, and phytoremediation for air pollution control: a comprehensive review”. In: *Environmental Science: Atmospheres* (2026).
- [3] World Health Organization. *WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM_{2.5} and PM₁₀), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide*. Guidelines. Disponibile su: <https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/551b515e-2a32-4e1a-a58c-cdaecd395b19/content>. Geneva: World Health Organization, 2021. (Visitato il giorno 19/06/2026).
- [4] Gerard Hoek et al. “European Code Against Cancer, 5th edition – outdoor and indoor air pollution and cancer”. In: *Molecular Oncology* 20.1 (2026), pp. 81–95. DOI: <https://doi.org/10.1002/1878-0261.70184>. eprint: <https://febs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/1878-0261.70184>. URL: <https://febs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/1878-0261.70184>.
- [5] Repubblica Italiana. *Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n. 152 - Norme in materia ambientale (Codice dell’Ambiente)*. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana. Testo coordinato e aggiornato disponibile su <https://www.gazzettaufficiale.it/dettaglio/codici/materiaAmbientale>. 2006. (Visitato il giorno 19/06/2026).
- [6] Mehzabeen Mannan e Sami G Al-Ghamdi. “Investigating environmental life cycle impacts of active living wall for improved indoor air quality”. In: *Building and Environment* 208 (2022), p. 108595.
- [7] Mann+Hummel. *Classificazione dei filtri dell’aria secondo la norma UNI EN 16798-3*. Mann+Hummel Air Filtration. 2026. URL: <https://airfiltration.mann-hummel.com/it-it/approfondimenti/classificazione-filtri/uni-en-16798-3.html> (visitato il giorno 16/06/2026).

- [8] Roma Capitale. *Accensione riscaldamenti dal 15 novembre 2025*. Ordinanza del Sindaco n. 147 del 30 ottobre 2025. Ott. 2025. URL: <https://www.comune.roma.it/web/it/notizia/accensione-riscaldamenti-15-novembre-2025.page> (visitato il giorno 24/06/2026).
- [9] Adnan I. Khdair et al. “Advancing natural ventilation in sustainable architecture: mechanisms, innovations, and climate-responsive design for energy-efficient buildings”. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 226 (2026), p. 116314. ISSN: 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116314>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032125009876>.
- [10] ACCA software. *Testo Unico Sicurezza D.Lgs. 81/2008 aggiornato*. Disponibile con navigazione ad accordion del testo normativo. 2008. URL: <https://biblus.acca.it/download/testo-unico-sicurezza-dlgs-81-2008/> (visitato il giorno 16/06/2026).
- [11] ACCA software. *Norma UNI EN 16798: ventilazione e ricambio d'aria*. Guida tecnica sui parametri di comfort interno e qualità dell'aria (IAQ). 2023. URL: <https://biblus.acca.it/uni-en-16798-ventilazione-e-ricambio-d-aria/> (visitato il giorno 16/06/2026).
- [12] Caleffi Hydronic Solutions. *Ventilazione meccanica controllata con recupero di calore: pro e contro*. Analisi tecnica costi-benefici dei sistemi di rinnovo aria residenziali. 2023. URL: <https://www.caleffi.com/it-it/blog/ventilazione-meccanica-controllata-con-recupero-di-calore-pro-e-contro> (visitato il giorno 16/06/2026).
- [13] Aermec S.p.A. *Manuale di Istruzioni/Tecnico*. Codice documento: 6180345_02. Aermec S.p.A. Bevilacqua (VR), Italia. URL: https://support.aermec.com/docs/istr/6180345_02.pdf (visitato il giorno 19/06/2026).
- [14] CFD Land. *What is PMV? What is PPD? – Basics of Thermal Comfort*. Consultato il 20 giugno 2026. URL: <https://cfdland.com/what-is-pmv-what-is-ppd-basics-of-thermal-comfort/>.
- [15] UNI. *UNI EN 16798-1:2019/NA - Criteri per l'ambiente interno - Scelte italiane (Appendice Nazionale)*. Norma Tecnica. Milano, Italia, nov. 2025.
- [16] Ente Italiano di Normazione (UNI). *UNI EN ISO 7730:2026 – 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*. Sostituisce la norma UNI EN ISO 7730:2006. UNI, 2026. URL: <https://store.uni.com/uni-en-iso-7730-2026>.

- [17] Certifico Srl. *Calcolo ventilazione / ricambi d'aria edifici in accordo UNI EN 16798-1 / Esempi*. Sicurezza Lavoro - Documenti Riservati. Disponibile su: <https://www.certifico.com/sicurezza-lavoro/documenti-sicurezza/documenti-riservati-sicurezza/calcolo-ventilazione-ricambi-d-aria-edifici-en-16798-1>. 2023. (Visitato il giorno 19/06/2026).
- [18] Innovasol. *Impianto VMC: Guida Completa alla Ventilazione Meccanica Controllata*. <https://innovasol.it/impianto-vmc/>. Accesso: 22 giugno 2026. 2026.
- [19] Clara Peretti e Luca A. Piterà. “Criteri di ventilazione e qualità dell’aria interna: cosa cambia con la UNI EN 16798-1:2019/NA:2025”. In: *Ingenio-Web* (2025). Pubblicato a seguito dell’entrata in vigore dell’Appendice Nazionale il 13 novembre 2025. URL: <https://www.ingenio-web.it/articoli/criteri-di-ventilazione-e-qualita-dell-aria-interna-cosa-cambia-con-la-uni-en-16798-1-2019-na-2025/>.
- [20] Scribd User Document. *UNI EN 16798-1: Parametri di ingresso dell’ambiente interno per la progettazione e la valutazione della prestazione energetica - Note esplicative*. Documentazione tecnica online. Disponibile su: <https://it.scribd.com/document/828062983/UNI-EN-16798-1-note-1>. 2024. (Visitato il giorno 19/06/2026).
- [21] Junfei Du et al. “Effects of an active living wall on indoor environmental quality and cognitive performance under high-density occupancy in a university classroom”. In: *Available at SSRN 6072508* ().
- [22] Xi Meng et al. “A comprehensive review on the spray cooling system employed to improve the summer thermal environment: application efficiency, impact factors, and performance improvement”. In: *Building and Environment* 217 (2022), p. 109065.
- [23] Dayi Lai et al. “Window-opening behavior in Chinese residential buildings across different climate zones”. In: *Building and environment* 142 (2018), pp. 234–243.
- [24] Danni Zhang, Lei Zhang e Yu Zhang. “Investigation of the indoor CO2 removal efficiency and fresh air energy savings of living walls in office spaces”. In: *Journal of Building Engineering* 90 (2024), p. 109422.
- [25] Fudan Liu et al. “A review on indoor green plants employed to improve indoor environment”. In: *Journal of Building Engineering* 53 (2022), p. 104542.
- [26] Linjing Deng e Qihong Deng. “The basic roles of indoor plants in human health and comfort”. In: *Environmental Science and Pollution Research* 25.36 (dic. 2018), pp. 36087–36101. DOI: [10.1007/s11356-018-3554-1](https://doi.org/10.1007/s11356-018-3554-1). URL: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3554-1>.

- [27] Samaneh Bandehali et al. “Current state of indoor air phytoremediation using potted plants and green walls”. In: *Atmosphere* 12.4 (2021), p. 473.
- [28] Antonio José Fernández-Espinosa et al. “Volatile organic compounds, SO₂ and NO₂ capture by means of an indoor active living wall”. In: *Atmospheric Environment* (2026), p. 121856.
- [29] Fraser Torpy e Michael Zavattaro. “Bench-study of green-wall plants for indoor air pollution reduction”. In: *Journal of living Architecture* (2018).
- [30] A Franco et al. “Wind tunnel analysis of artificial substrates used in active living walls for indoor environment conditioning in Mediterranean buildings”. In: *Building and Environment* 51 (2012), pp. 370–378.
- [31] Solar Energy Laboratory et al. *TRNSYS 17 – Getting Started*. Disponibile online al MIT: <https://web.mit.edu/parmstr/Public/Documentation/01-GettingStarted.pdf>. University of Wisconsin-Madison. 2010. URL: <https://web.mit.edu/parmstr/Public/Documentation/01-GettingStarted.pdf>.
- [32] Solar Energy Laboratory (SEL). *TRNSYS Support Overview*. <http://trnsys.com/support/>. Accesso: 23 giugno 2026. 2026.
- [33] TRNSYS Users Mailing List Archive. *Technical Note on TRNSYS Simulation Models and Component Configurations*. Solar Energy Laboratory (SEL), University of Wisconsin-Madison. URL: https://trnsys.org/MaillistArchive/pdfkSLYr_lzDr.pdf (visitato il giorno 24/06/2026).
- [34] P. Armstrong. *Multizone Building Modeling*. Documentation. Cambridge, MA, USA: Massachusetts Institute of Technology (MIT), 2006. URL: <https://web.mit.edu/parmstr/Public/Documentation/06-MultizoneBuilding.pdf> (visitato il giorno 24/06/2026).
- [35] Ente Italiano di Normazione. *UNI/TS 11300-1:2014 — Prestazioni energetiche degli edifici — Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell’edificio per la climatizzazione estiva ed invernale*. Specifica Tecnica. Milano, Italia: UNI, ott. 2014. URL: <https://store.uni.com/uni-ts-11300-1-2014> (visitato il giorno 24/06/2026).
- [36] Thermal Energy System Specialists (TESS). *TESS Component Libraries: General Descriptions*. Version 18. Thermal Energy System Specialists, LLC. Madison, WI, USA, 2019. URL: http://www.trnsys.com/tess-libraries/GeneralDescriptions_TESSLibs18.pdf (visitato il giorno 24/06/2026).

- [37] Aermec S.p.A. *Manuale di Istruzioni Tecniche — Codice 6180345_02*. Disponibile online tramite il portale di supporto Aermec. Aermec S.p.A. Bevilacqua (VR), Italia, 2024. URL: https://support.aermec.com/docs/istr/6180345_02.pdf (visitato il giorno 26/06/2026).
- [38] GME - Gestore Mercati Energetici. *PUN Index GME: Andamento e dati del Prezzo Unico Nazionale*. <https://www.mercatoelettrico.org/it-it/Home/Pubblicazioni/Dati-GME/PUN-Index-GME>. Ultimo accesso: 26 giugno 2026. 2026.
- [39] Astrid Roetzel et al. “A review of occupant control on natural ventilation”. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14.3 (2010), pp. 1001–1013. ISSN: 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.11.005>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032109002676>.