



Ricerca di Sistema elettrico

La qualità ambientale indoor negli edifici scolastici riqualificati con target nZEB. Un esempio applicativo.

S. Agnoli, G. Centi, D. Iatauro, C. Romeo, P. Signoretti, M. Zinzi

LA QUALITÀ AMBIENTALE INDOOR NEGLI EDIFICI SCOLASTICI RIQUALIFICATI CON TARGET NZEB. UN ESEMPIO APPLICATIVO

S. Agnoli, G. Centi, D. Iatauro, C. Romeo, P. Signoretti, M.Zinzi (ENEA)

Settembre 2016

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2015

Area D: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici

Progetto: D.2.1: Edifici a energia quasi zero (nZEB), Studi sulla riqualificazione energetica del parco esistente di edifici pubblici

Obiettivo d: La qualità ambientale indoor degli edifici nZEB

Responsabile del Progetto: Luciano Terrinoni, ENEA

Responsabile scientifico: Domenico Iatauro, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
SUMMARY	4
1 INTRODUZIONE	6
2 OBIETTIVO E METODO	6
2.1 PARAMETRI DI RIFERIMENTO PER L'ANALISI IEQ IN EDIFICI SCOLASTICI.....	7
2.2 ZONE CLIMATICHE DI RIFERIMENTO	8
2.3 DESCRIZIONE DELL'EDIFICIO DI RIFERIMENTO.....	9
2.4 VARIANTI COSTRUTTIVE DELL'EDIFICIO DI RIFERIMENTO	13
3 CALCOLI.....	13
4 RISULTATI.....	17
4.1 COMFORT TERMICO DURANTE LA STAGIONE DI RISCALDAMENTO	17
4.2 COMFORT TERMICO NELLA STAGIONE INTERMEDIA	20
4.3 CONCENTRAZIONE DI ANIDRIDE CARBONICA NELL'AMBIENTE COSTRUITO	24
5 CONCLUSIONI.....	27
6 BIBLIOGRAFIA.....	29
APPENDICE.....	31

Sommario

La normativa legislativa e tecnica definisce i criteri per la riqualificazione energetica degli edifici, individuando sia i requisiti minimi, da rispettare negli interventi di riqualificazione edilizia, sia i criteri necessari per raggiungere le prestazioni richieste per gli edifici a consumo energetico quasi zero (nZEB), in termini di: efficienza degli impianti energetici, del contributo delle fonti rinnovabili, della qualità energetica dell'involucro edilizio e dei suoi componenti. Questo aspetto è importante poiché agisce in modo significativo sulla qualità indoor dell'ambiente costruito.

Questo rapporto è indirizzato allo studio della qualità ambientale indoor in un edificio scolastico soggetto a riqualificazione energetica con target nZEB. Attraverso analisi numeriche in regime dinamico è studiata l'evoluzione temporale di grandezze e indicatori rilevanti, in particolare: concentrazione di CO₂ durante tutto il periodo di occupazione; voto medio previsto per la stagione invernale con impianto di riscaldamento acceso; evoluzione della temperatura operativa durante le stagioni intermedie ad impianto di riscaldamento spento. Non è stato analizzato il problema della qualità termica e ambientale durante la stagione estiva, essendo le scuole chiuse in tale periodo.

Le analisi sono state condotte per un edificio di riferimento, simulato in condizioni attuali e ipotizzando una riqualificazione di tipo nZEB. Sono state analizzate le seguenti varianti: località geografica (Milano, Roma, Palermo), l'esposizione e la posizione delle aule, i livelli di isolamento termico, tecniche di raffrescamento passivo (schermature solari e ventilazione notturna). Ove possibile il modello di calcolo è stato calibrato su dati reali provenienti da precedenti monitoraggi di edifici scolastici.

I risultati finali evidenziano situazioni sensibilmente differenti in funzione del parametro ambientale e della zona climatica di riferimento. Negli edifici riqualificati, in generale si osserva un miglioramento del comfort invernale legato all'elevato isolamento termico; quest'ultimo, tuttavia, insieme a una ridotta permeabilità all'aria, può provocare surriscaldamento durante le stagioni intermedie. La migliore tenuta all'aria è inoltre causa dell'incremento della concentrazione di CO₂ registrata in molti dei casi studiati. A questi risultati, qualitativamente prevedibili, è seguita una valutazione quantitativa per tutte le configurazioni analizzate, indicando le potenzialità e i rischi che possono intervenire negli edifici scolastici riqualificati secondo i criteri nZEB. I risultati evidenziano infine la necessità di approfondire la ricerca, analizzando, in particolare, l'evoluzione spaziale, oltre che temporale, dei vari parametri e il contributo alla qualità indoor assicurato da diverse soluzioni impiantistiche utilizzabili nel caso di riqualificazioni energetiche con target nZEB.

Summary

Building regulation and technical standards define the criteria for the energy renovation of buildings, setting minimum requirements and values for nearly zero buildings (nZEB) in terms of: energy system efficiencies, contribution of renewable energy, thermal quality of the building envelope and related components. The latter is of high relevance, since it strongly affects the indoor air quality in the built environment.

This study is about the energy retrofit of an existing building with nZEB target. The time evolution of relevant parameters is assessed through dynamic numerical analyses, in particular were analyzed: CO₂ concentration during the whole occupation period; predicted mean vote during winter with the heating system switched on; operative temperature during the intermediate season with the heating system switched off. Performances during summer were out of the scope, being schools closed.

The analyses were carried out on a reference building, simulated in the existing and nZEB retrofitted configuration. The following variants were taken into account: climatic zone (Milan, Rome, Palermo), orientation and position of classrooms, thermal insulation values, technologies to avoid overheating (shading systems and night ventilation). When possible, to model was calibrated versus monitoring data collected in real school buildings.

Final results shows difference figures as a function the specific environment indicator and of the climatic zone. In retrofitted buildings is generally observed an improvement of the thermal comfort in winter due to the thermal insulation; the latter, however, together with the reduced air permeability might cause

overheating during the intermediate season. The improved air tightness might also increase the CO₂ concentration in many cases. These qualitatively predictable results are, in this report, coupled with quantitative figures for all the analyzed configurations, providing advice for the indoor air quality potentials and risks in retrofitted school buildings. Results also show the need of additional investigation in this field, to be addressed mainly to the spatial evolution of the relevant parameters, as well as to the impact on the indoor air quality caused by the different energy systems solutions, which can be adopted for nZEB retrofit of school buildings.

1 Introduzione

La Direttiva 2002/91/CE *Energy Performance of Buildings Directive (EPBD)* e, successivamente, la *recast* 2010/31/CE individuano i principi relativi al miglioramento della prestazione energetica degli edifici nuovi e di quelli sottoposti a ristrutturazione rilevante. Il quadro europeo impone agli Stati Membri, infatti, che i requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici o delle unità immobiliari siano definiti in un'ottica di raggiungimento dei livelli ottimali del rapporto tra costo e beneficio. La direttiva inoltre introduce un target sugli "edifici a energia quasi zero" entro il 2020. L'edificio nZEB (nearly Zero-Energy Buildings) è definito come "quell'edificio che ha prestazioni energetiche molto elevate e che richiede quindi un piccolo fabbisogno di energia, la maggior parte della quale deve essere fornita da fonti rinnovabili". In Italia il recepimento delle Direttive ha prodotto una serie di strumenti normativi che definiscono il quadro di riferimento nazionale in tema di efficienza energetica negli edifici (decreto legge 63/2013, legge 90/2013, decreto legislativo 192/2005 e s.m.i., decreto ministeriale 26 giugno 2015).

Un tema fondamentale in Italia è quello della riqualificazione energetica degli edifici esistenti, a causa dell'obsolescenza del parco edilizio nazionale e dell'andamento del mercato delle nuove costruzioni [1]. Negli ultimi anni si è inoltre evidenziata la necessità di intervenire sul patrimonio scolastico, a causa della scarsa qualità edilizia in termini ambientali, strutturali e di abitabilità. Il quadro normativo indica i requisiti energetici minimi in caso di riqualificazione, appare tuttavia rilevante esplorare le potenzialità della riqualificazione con target nZEB [2].

Tecnologie, strumenti e metodi per gli aspetti energetici di riqualificazione energetica integrale sono oggetto di studio da diversi anni, alcuni esempi sono riportati in bibliografia [3-9]. Sono, inoltre, disponibili studi focalizzati sugli edifici scolastici [10-12]. Sono, invece, ancora da esplorare a fondo le implicazioni che tali ristrutturazioni hanno sulla qualità ambientale all'interno dello spazio costruito (Indoor Environment Quality - IEQ), dimostrandone rischi e potenzialità.

Il tema è di grande interesse per gli edifici scolastici e la qualità ambientale è stata analizzata in diversi studi pubblicati [13-16], esplorando anche i legami tra la qualità dell'ambiente costruito e le performance e la salute degli alunni [17, 18]. Questi studi, essenzialmente basati su monitoraggi di edifici reali, forniscono importanti indicazioni in un determinato contesto costruttivo ed operativo. Si ritiene importante, però, analizzare in modo sistematico l'evoluzione della qualità ambientale indoor di un edificio scolastico nel momento in cui tale contesto subisce una radicale trasformazione a seguito di una riqualificazione energetica, aspetto ancora scarsamente studiato [19, 20].

2 Obiettivo e metodo

L'obiettivo del presente rapporto è quello di analizzare la qualità ambientale indoor nel caso di riqualificazione energetica di edifici scolastici con target nZEB, attraverso l'evoluzione di parametri e indicatori ritenuti adeguati, atti a rappresentare la qualità dell'ambiente costruito.

In questa fase si è focalizzata l'attività sulle modifiche microclimatiche e ambientali introdotte attraverso il miglioramento dell'involucro edilizio, con l'applicazione di tecnologie in grado aumentare l'isolamento termico (tutti i componenti di involucro) e ridurre la permeabilità all'aria (tipicamente i serramenti), riservando ad una fase successiva l'analisi della qualità ambientale in relazione all'upgrade dei sistemi di climatizzazione, soprattutto per il sotto-sistema di emissione, e di illuminazione nel caso di riqualificazioni energetiche.

La qualità ambientale è stata analizzata attraverso analisi numeriche condotte su un edificio scolastico di riferimento, introducendo una serie di varianti climatiche e tecnologiche, che consentissero di valutare le prestazioni indoor nel passaggio dalla configurazione iniziale a quella riqualificata. Lo strumento di calcolo utilizzato e l'edificio di riferimento studiato sono descritti in dettaglio nelle sezioni successive del report.

Il metodo d'indagine è il seguente:

- Individuazione dell'edificio di riferimento, con relativo contesto climatico, e dei parametri ambientali di riferimento
- Analisi numerica degli edifici nello stato iniziale, focalizzata ai principali parametri IEA

- Ipotesi di riqualificazione energetica degli edifici secondo gli standard di riferimento nazionale ed ulteriori soluzioni dedicate al miglioramento della qualità ambientale
- Seconda analisi numerica condotta sugli edifici riqualificati
- Analisi dei risultati ottenuti prima e dopo la riqualificazione energetica

I risultati sono espressi come confronto dell'andamento dei parametri ambientali di riferimento, calcolati per le varie configurazioni di edificio.

2.1 Parametri di riferimento per l'analisi IEQ in edifici scolastici

La scelta dei parametri di riferimento è legata ai principali aspetti d'indagine negli ambienti confinati non severi, ossia: il comfort termo igrometrico e la qualità dell'aria. La scelta è inoltre dipesa dal tipico profilo di occupazione delle scuole, che rimangono chiuse per il periodo che compreso grossomodo tra inizio giugno e metà settembre, salvo le attività dei professori, che avvengono in aree molto limitate dell'edificio scolastico, e saltuarie occupazioni legate allo svolgimento di esami. Si tratta quindi di edifici non utilizzati durante la stagione estiva e dunque generalmente non equipaggiati con impianti di condizionamento.

La normativa tecnica [21 e 22] definisce i principali parametri e indicatori per valutare qualità ambientale indoor, indicando valori consigliati e limite. Alla luce delle considerazioni precedenti i parametri presi in considerazione in questo studio sono i seguenti:

- VMP – Voto Medio Previsto. Tale indicatore è definito come *voto medio di sensazione termica che ci si può aspettare da un campione sufficientemente ampio di persone che si trovano nello stesso ambiente*. L'indicatore è funzione di 4 grandezze microclimatiche (temperatura dell'aria, temperatura media radiante, umidità e velocità dell'aria) e 2 grandezze legate ai soggetti che occupano l'ambiente (attività metabolica e resistenza termica dell'abbigliamento). Al voto medio previsto corrisponde una sensazione psicofisica, come indicato in tabella 1. È importante notare che l'indicatore è valido per ambienti sufficientemente stabili dal punto di vista termico, è quindi applicabile per la stagione invernale con impianto di riscaldamento acceso ma non nelle stagioni intermedie a impianti termici spenti. Nel caso l'impianto termico sia correttamente progettato e in grado di assicurare i 20°C di temperatura dell'aria, si ritiene che il comfort termico sia automaticamente rispettato. Nella realtà può accadere che, pur rispettando il valore di progetto, gli altri parametri microclimatici siano tali da non garantire le condizioni di comfort; in alcuni casi anche la gestione degli impianti termici può causare situazioni di discomfort, soprattutto se l'accensione degli impianti non garantisce un adeguato innalzamento termico delle strutture, che possono comportare valori di temperatura media radiante troppo bassi durante le prime ore di occupazione. Generalmente si considera un ambiente in condizioni di comfort quando il voto medio previsto è compreso tra -0.5 e 0.5.

Tabella 1. VMP e sensazione termica

PMV	SENSAZIONE PSICOFISICA
+ 3	Molto caldo
+ 2	Caldo
+ 1	Leggermente caldo
0	Neutrale
- 1	Leggermente freddo
- 2	Freddo
- 3	Molto freddo

- Temperatura operativa (T_o). La temperatura operativa è definita come media tra temperatura dell'aria e temperatura media radiante all'interno di un ambiente confinato. In funzione della geometria dell'ambiente i due parametri possono essere opportunamente pesati; nel caso di ambienti sufficientemente regolari la temperatura operativa è definita come media aritmetica delle due temperature sopra indicate. Questo parametro è ritenuto sufficientemente accurato per valutare il comfort termico in ambienti non climatizzati, ossia con temperature libere di fluttuare e

con la ventilazione che avviene in modo naturale. Generalmente il comfort termico viene espresso come numero di ore stagionali (o di un determinato periodo) in cui la temperatura operativa supera determinati valori, corrispondenti alle zone di comfort. Questo parametro è utilizzato nel report per valutare il confort termico durante le stagioni intermedie: dalla chiusura della stagione invernale (dipendente dalla zona climatica) alla chiusura delle scuole (convenzionalmente fissata al primo giugno); dall'apertura delle scuole (convenzionalmente fissata al 15 settembre) all'inizio della stagione invernale (dipendente dalla zona climatica). Le condizioni di comfort sono espresse attraverso una valutazione delle ore che superano determinati livelli di soglia.

- Concentrazione di anidride carbonica (CO₂). La qualità dell'aria indoor è legata all'alterazione delle caratteristiche chimico fisiche e biologiche dell'aria, determinata da variazioni di concentrazione dei suoi normali costituenti e dalla presenza di sostanze estranee alla sua composizione. La presenza di individui all'interno di uno spazio confinato altera, peggiorandola, la qualità dell'aria a causa di emissione di bioeffluenti e anidride carbonica. Quest'ultima normale grandezza è quella generalmente presa in considerazione per valutare la qualità ambientale negli edifici. L'evoluzione della concentrazione del gas durante l'intero anno è stata analizzata in questo studio. Le condizioni di comfort sono state espresse attraverso i valori assoluti di concentrazione e attraverso una valutazione delle ore che superano determinati livelli di soglia.

2.2 Zone climatiche di riferimento

Ai fini della riqualificazione energetica degli edifici risulta fondamentale fare riferimento alla zona climatica cui appartiene l'edificio preso in considerazione. La suddivisione del territorio italiano per zone climatiche è normata dal DL del 26 agosto 1993 n. 412, che prevede una suddivisione in sei zone, dalla A alla F, in funzione dei gradi-giorno invernali, indicatore che tiene conto della rigidità del clima ai fini della stima del fabbisogno energetico degli edifici per il servizio di riscaldamento. I dati principali delle tre città selezionate sono riportati in tabella 2.

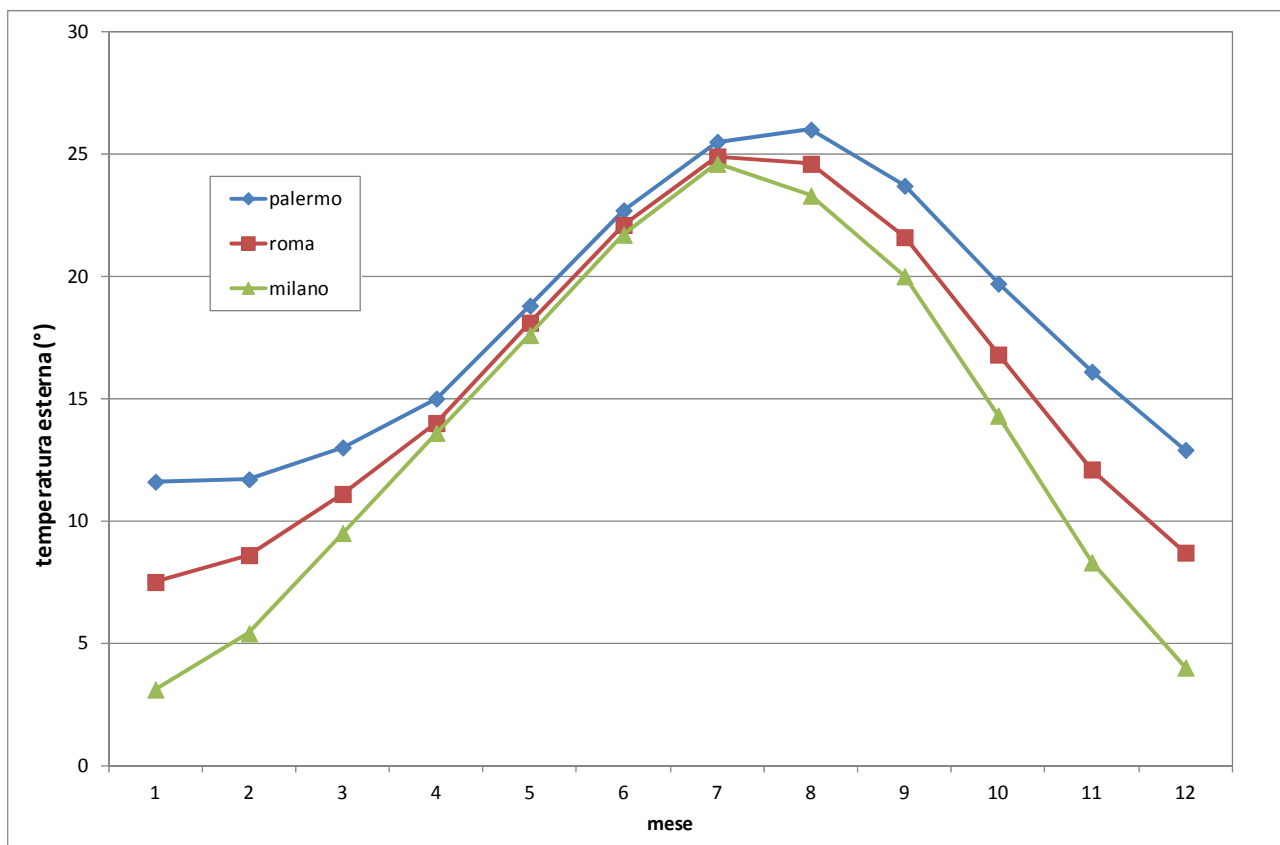


Figura 1 – Temperatura esterna media mensile nelle località di riferimento

Tabella 2. Dati climatici delle tre città selezionate

Località	Zona clim.	Gradi giorno	Stagione di riscaldamento
Palermo	B	751	dal 1 dicembre a 31 marzo
Roma	D	1415	dal 1 novembre al 15 aprile
Milano	E	2404	dal 15 ottobre al 15 aprile

In figura 1 e 2 si riportano i diagrammi della temperatura dell'aria esterna e della radiazione solare su piano orizzontale delle tre località di riferimento. I dati fanno riferimento all'archivio climatico ENEA (<http://clisun.casaccia.enea.it/Pagine/Index.htm>), che riportano i dati osservati su base pluriennale per una serie di stazioni di misura. Questi dati sono differenti da quelli riportati nelle norme di riferimento e sono riportati a titolo esemplificativo.

È interessante osservare come le temperature siano effettivamente differenti per le tre città durante la stagione invernale, viceversa si allineano su valori piuttosto vicini durante la primavera. Questo comportamento induce ad attendersi prestazioni simili nelle stagioni intermedie ad impianto spento nel caso di efficace protezione solare dell'involucro edilizio.

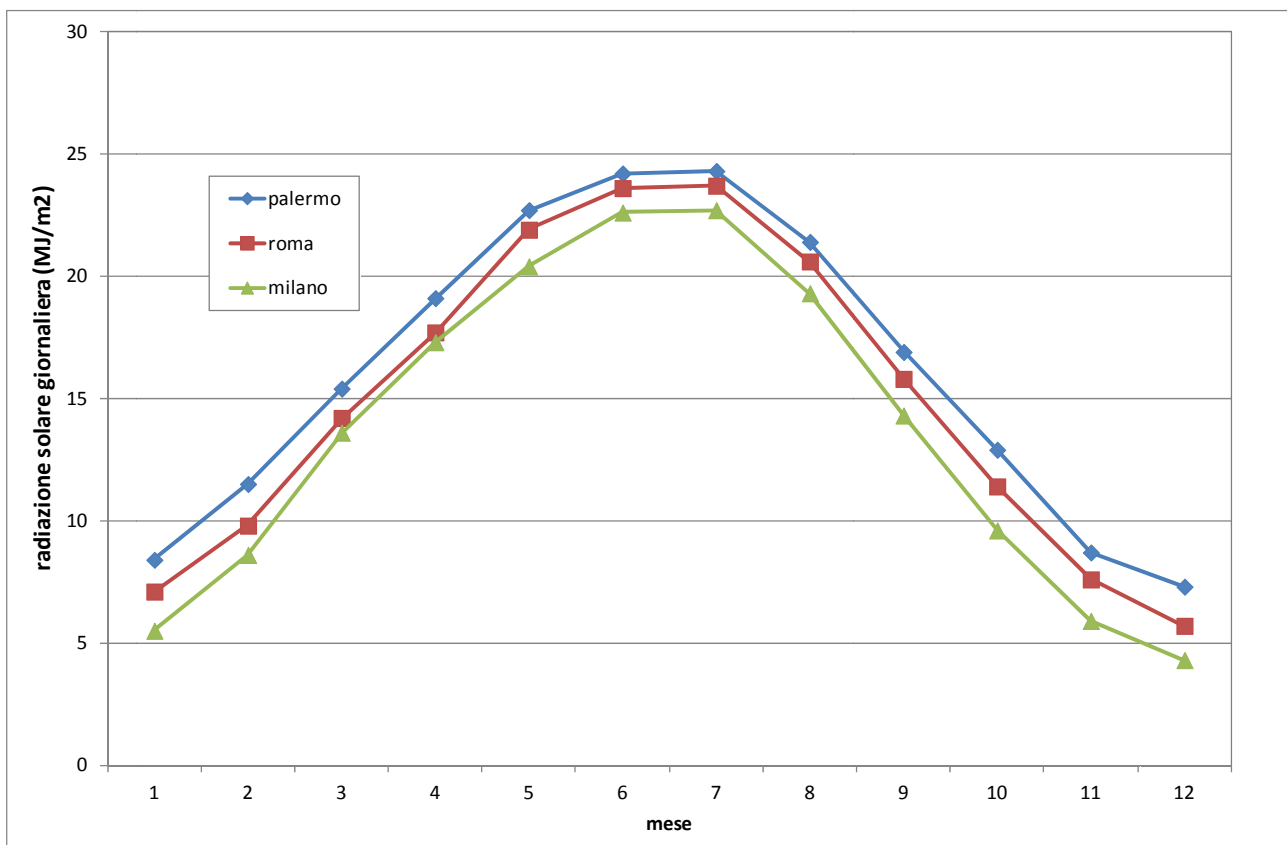


Figura 2 – Radiazione solare giornaliera media mensile nelle località di riferimento

2.3 Descrizione dell'edificio di riferimento

L'edificio di riferimento scelto per lo studio è la scuola Tito Maccio Plauto di Cesena, caso studio nazionale del progetto europeo School of the Future [23]. Si tratta di un edificio degli anni 60 che, nella configurazione iniziale, era privo di isolamento termico e con finestre metalliche a vetro singolo, ventilato in modo naturale. Nel corso del progetto è stato ristrutturato arrivando a prestazioni energetiche molto elevate.

L'edificio si sviluppa su tre piani e ha pianta ad "L" con aule sui fronti est ed ovest, e corridoi orientati a nord e sud, in modo da ottimizzare gli apporti solari nelle aule durante la mattina. La figura 2 riporta la pianta del piano tipo dell'edificio, la figura 3 una vista aerea. Essendo lo studio incentrato sulla qualità indoor, si è

deciso di concentrare l'attenzione su singole aule, rappresentative dell'edificio per esposizione e posizione. In particolare l'aula di riferimento è stata analizzata nelle seguenti configurazioni: esposizione sud ed est, piano intermedio (indicata 1p in grafici e tabelle) e sotto la copertura (indicata 2p in grafici e tabelle). In figura 4 si riporta il lay-out dell'aula tipo con le caratteristiche geometriche principali: la superficie netta è di poco superiore a 50m², la facciata esposta ha due finestre per un totale di 5.46m², l'altezza netta interpiano è 3.17m. Nella configurazione prescelta l'aula ha due pareti con aule adiacenti e con medesimo regime termico, una parete verso il corridoio e una parete esterna; pavimento e soffitto confinano con aule con medesimo regime termico, tranne nel caso dell'aula sotto la copertura.

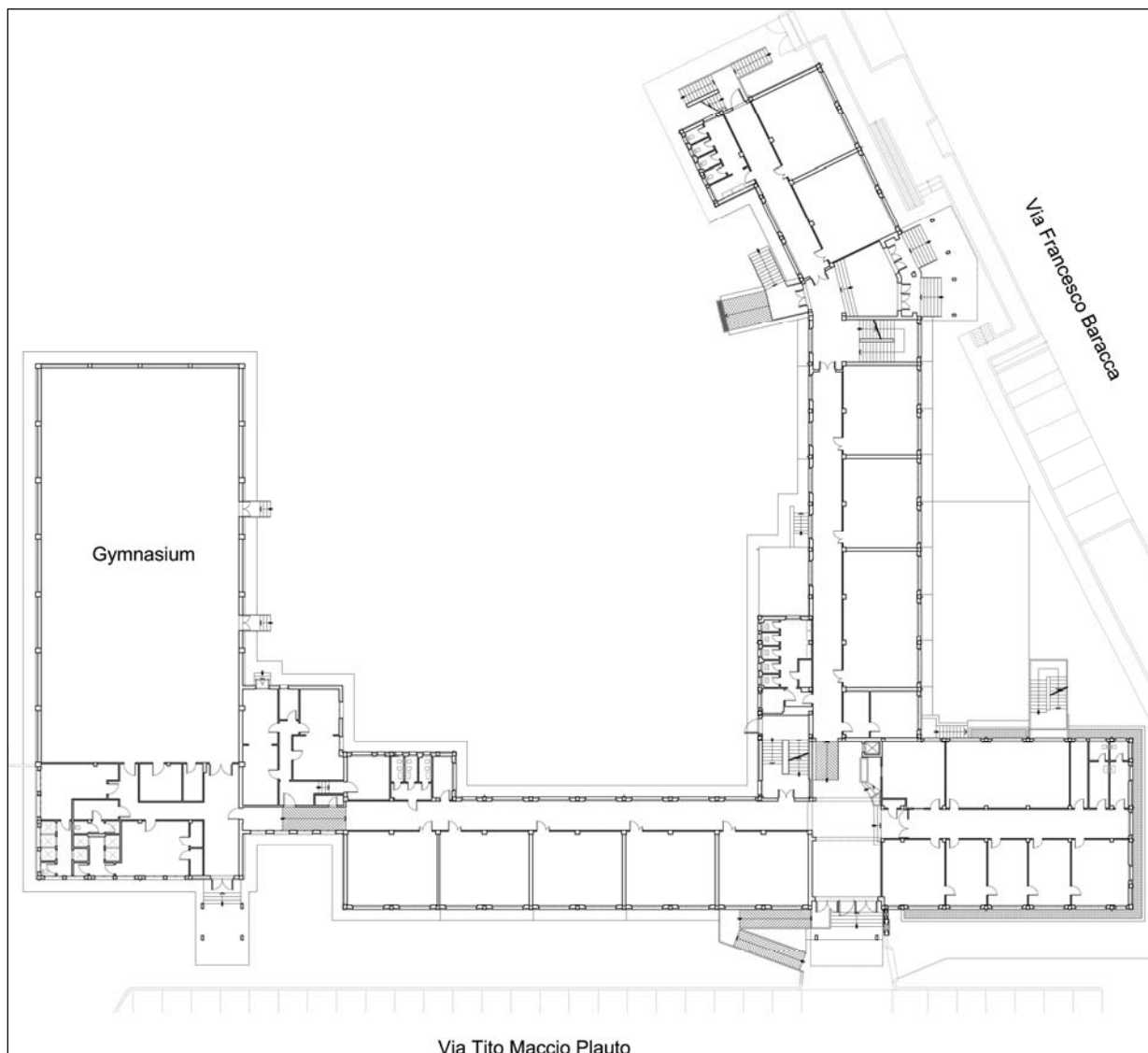


Figura 3 – Pianta del piano tipo della scuola di riferimento

Per quanto riguarda le caratteristiche costruttive, i componenti opachi sono descritti in dettaglio nelle figure da 6 a 9, da cui si evince la scarsa qualità in termini di isolamento termico. Questi valori sono leggermente diversi da quelli riscontrati nella scuola e introdotti per allineare l'edificio in esame con tipologie ricorrenti. Le finestre, tutte con telaio in ferro e lastra singola, hanno una trasmittanza termica di 5.9W/m²K e un fattore solare di 0.87; la classe di permeabilità all'aria del serramento è 1, ossia 50m³/hm², tipica di componenti obsoleti..



Figura 4 – Vista aerea della scuola di riferimento nel contesto urbano

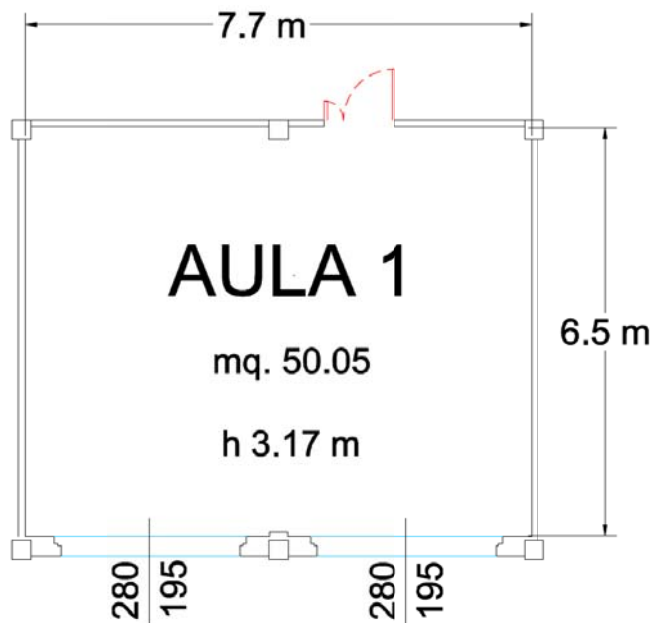


Figura 5 – Geometria dell'aula di riferimento

PARETE ESTERNA				
STRATO	s [m]	λ [W/mK]	c_{sp} [kJ/kgK]	ρ [kg/m ³]
Intonaco di calce e gesso	0,015	0,7	1,01	1.400
Mattori pieni in laterizio	0,28	0,72	0,84	1.800
Intonaco di calce e cemento	0,015	0,9	0,91	1.800
SPESSORE TOTALE [m]	0,31			
TRASMITTANZA [W/m²K]	1,675			

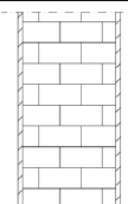


Figura 6 – Descrizione della parete esterna

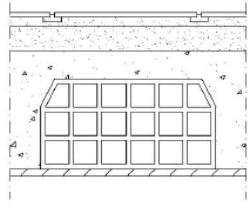
SOLAIO INTERPIANO					
STRATO	s [m]	λ [W/mK]	c_{sp} [kJ/kgK]	ρ [kg/m ³]	
Intonaco di calce e gesso	0,015	0,7	1,01	1.400	
Solaio in laterocemento (20 cm pignatta + 5 cm soletta in c.a.)	0,25	0,723	1	1.280	
Massetto in argilla espansa	0,05	0,38	1	1.000	
Livellamento in malta di sottofondo	0,02	0,43	0,84	1.400	
Piastrelle in porcellana	0,01	1	0,84	2.300	
SPESORE TOTALE [m]	0,345				
TRASMITTANZA [W/m²K]	1,38				

Figura 7 – Descrizione del solaio interpiano

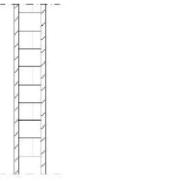
DIVISORI INTERNI					
STRATO	s [m]	λ [W/mK]	c_{sp} [kJ/kgK]	ρ [kg/m ³]	
Intonaco di calce e gesso	0,01	0,7	1,01	1.400	
Forati in laterizio	0,08	1,44	0,84	775	
Intonaco di calce e gesso	0,01	0,7	1,01	1.400	
SPESORE TOTALE [m]	0,1				
TRASMITTANZA [W/m²K]	2,509				

Figura 8 – Descrizione delle pareti divisorie interne

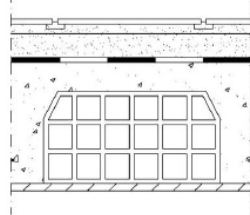
SOLAIO DI COPERTURA					
STRATO	s [m]	λ [W/mK]	c_{sp} [kJ/kgK]	ρ [kg/m ³]	
Intonaco di calce e gesso	0,015	0,7	1,01	1.400	
Solaio in laterocemento (20 cm pignatta + 5 cm soletta in c.a.)	0,25	0,723	1	1.280	
Doppia guaina impermeabilizzante bituminosa (una antiradice)	0,01	0,612	1,47	1.200	
Massetto in argilla espansa	0,05	0,38	1	1.000	
Livellamento in malta di sottofondo	0,02	0,43	0,84	1.400	
Piastrelle cemento&ghiaia	0,01	1,4	0,88	2.000	
SPESORE TOTALE [m]	0,355				
TRASMITTANZA [W/m²K]	1,33				

Figura 9 – Descrizione del solaio in copertura

La scuola ha un impianto di riscaldamento che funziona durante l'occupazione, ipotizzata per la sola mattina dalle 8:00 alle 13:00, il set-point è di 20°C per la temperatura e nessun valore per l'umidità relativa. Non esiste impianto di climatizzazione estiva, essendo la scuola assumendo la scuola chiusa dal primo giugno al 15 settembre. La ventilazione è naturale ed avviene per apertura e chiusura manuale delle finestre, alla portata di ventilazione va aggiunta quella di infiltrazione che avviene anche a serramenti chiusi. L'infiltrazione è stata calcolata assegnando al serramento una classe 1 di permeabilità all'aria, che corrisponde a 50m³/hm² secondo quanto stabilito dallo standard di riferimento [24]. Nota la permeabilità e nota la velocità del vento della località, assunta costante per l'intero anno, attraverso la spinta cinetica dovuta alla pressione del vento sulla facciata, sono state calcolate in modo semplificato le infiltrazioni attraverso i serramenti. Per quanto riguarda la ventilazione naturale, si è ipotizzato che studenti e professori aprano le finestre per 10 minuti all'ora, in particolare si è ipotizzato che ogni finestra consista di tre ante e che solo una di queste sia effettivamente aperta. L'ipotesi deriva dall'osservazione del comportamento dell'utenza in alcuni monitoraggi e non può, conseguentemente, essere considerata di

validità generale. Il modello di calcolo per il contributo alla ventilazione dovuto alle aperture delle finestre è dettagliato nella sezione Calcoli.

Un aspetto importante per la valutazione del comfort termico è stata la modellazione del profilo di accensione dell'impianto termico ideale e il principio di emissione del calore in ambiente. Poiché l'obiettivo era quello di conoscere la risposta dell'involucro edilizio alla forzante ambientale esterna e all'uso dell'edificio, non è stato modellato l'impianto termico ma sono state eseguite una serie di analisi preliminari atte a calibrare l'edificio esistente di Milano con dati di monitoraggio reale, disponibili per l'edificio scolastico di Cesena, utilizzato come riferimento. A valle delle analisi preliminari si è arrivati a una serie di configurazioni, da ritenersi sufficientemente accurate solo per il caso in esame. Orario di accensione dell'impianto: 03.00 di mattina a Milano; 05.00 a Roma e Palermo. Si è inoltre ipotizzato che il calore immesso in ambiente sia convettivo e radiativo in parti uguali (50% per entrambi). Questo accorgimento ha consentito di realizzare una temperatura media radiante compatibile con misure ambientali misurate in un edificio e con condizioni ambientali simili.

Altri input utilizzati per le simulazioni sono: densità di occupazione delle aule pari a $2.17\text{m}^2/\text{persona}$, conformemente agli standard nazionali; gli apporti interni per apparecchiature sono $5\text{W}/\text{m}^2$, le schermature solari in tutti i casi introducono un fattore correttivo di 0.2 al fattore solare dei serramenti dell'edificio.

2.4 Varianti costruttive dell'edificio di riferimento

La configurazione per l'edificio riqualificato prevede il miglioramento delle trasmittanze termiche dei componenti di involucro, i cui valori sono riportati in tabella 3. A differenza dello stato attuale in cui le caratteristiche di involucro sono indipendenti dalla zona climatica, nell'edificio riqualificato le trasmittanze termiche variano in funzione della zona, i dati riportati fanno riferimento alle zone B, D, E. Tali valori corrispondono ai criteri da adottare nelle riqualificazioni con target nZEB secondo la normativa vigente. La tecnologia utilizzata è il cappotto esterno per le pareti e l'isolamento superiore della copertura. I nuovi serramenti sono in PVC e vetrocamera basso-emissivo con fattore solare 0.6 e la classe di permeabilità all'aria del serramento è 3, ossia $9\text{m}^3/\text{hm}^2$. Infiltrazione e ventilazione sono calcolati analogamente a quanto fatto per l'edificio esistente.

Uno step successivo consiste nel valutare le prestazioni termiche applicando ai serramenti una schermatura solare esterna con un fattore di ombreggiamento pari a 0.2, le schermature sono considerate sempre attivate durante il periodo di occupazione dell'edificio. L'ulteriore passo è di valutare l'impatto della ventilazione notturna, questo è fatto applicando una portata di ventilazione esterna pari a 3 ricambi ora dalle 21.00 alle 7.00. Non sono eseguite analisi di tipo impiantistico o indicati lay-out di edificio con il quale si realizza il ricambio d'aria desiderato; in questo report si verifica solo l'impatto della ventilazione sui carichi termici, in termini di portata d'aria immessa.

Tabella 3. Trasmittanza termica ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$) dei componenti soggetti a riqualificazione

Componente	U_Z-B ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	U_Z-D ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)	U_Z-E ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
Parete esterna	0.40	0.32	0.28
Copertura	0.32	0.26	0.24
Solaio di base	0.42	0.32	0.29
Serramenti	3	1.8	1.4

3 Calcoli

Il software TRNSYS v.16.1 [25], sviluppato dal Solar Energy Laboratory della University of Wisconsin-Madison, è stato usato come strumento di calcolo per mettere in luce le relazioni che intercorrono tra gli edifici scolastici e il comfort degli occupanti, prima e dopo un'operazione di efficientamento energetico, secondo i requisiti nZEB. Si tratta di uno strumento largamente testato e validato che consente di eseguire analisi termiche in regime dinamico, risolvendo il trasferimento di calore applicando il metodo della z-trasformata. TRNSYS utilizza un approccio modulare dove il progetto viene scomposto in diversi blocchi

(Type), connessi tra loro attraverso diversi tipi di relazioni e calcolati in modo iterativo/sequenziale. Ogni Type è infatti descritta da un modello matematico e presenta una serie di parametri, di ingressi e di uscite. La definizione delle Type, delle connessioni e dei simulation settings, avviene attraverso il Simulation Studio. TRNbuild è invece lo strumento attraverso il quale è possibile descrivere in modo dettagliato le caratteristiche termo-fisiche dell'edificio. Questo software è stato sviluppato al fine di semplificare e migliorare il controllo durante la delicata fase di input dei dati, che avviene ogni qual volta debba essere descritto e caratterizzato un edificio. Ad ogni salvataggio del file creato, vengono generati specifici file testo con una sintassi molto rigorosa, che vengono successivamente caricati nella Type 56, all'interno del Simulation Studio, per eseguire le simulazioni. La descrizione dell'edificio consta nella definizione delle diverse zone termiche di cui esso è composto e, in particolare, della caratterizzazione per ognuna di esse: delle pareti opache verticali e orizzontali, attraverso la definizione dei materiali e delle stratigrafie di cui sono composte compresi i relativi spessori, delle superfici trasparenti, attraverso l'individuazione dei materiali, delle resistenze termiche del telaio e delle caratteristiche termofisiche della vetrata isolante, considerando in quest'ultimo caso anche la dipendenza delle prestazioni del vetro dall'angolo di incidenza dell'irraggiamento solare, infine vengono stabiliti i rispettivi coefficienti di adduzione liminare, interni ed esterni, esistendo anche la possibilità di farli calcolare dal codice ad ogni time-step. In figura 10 è riportata una schermata del modulo utilizzato per l'inserimento dei dati relativi all'edificio.

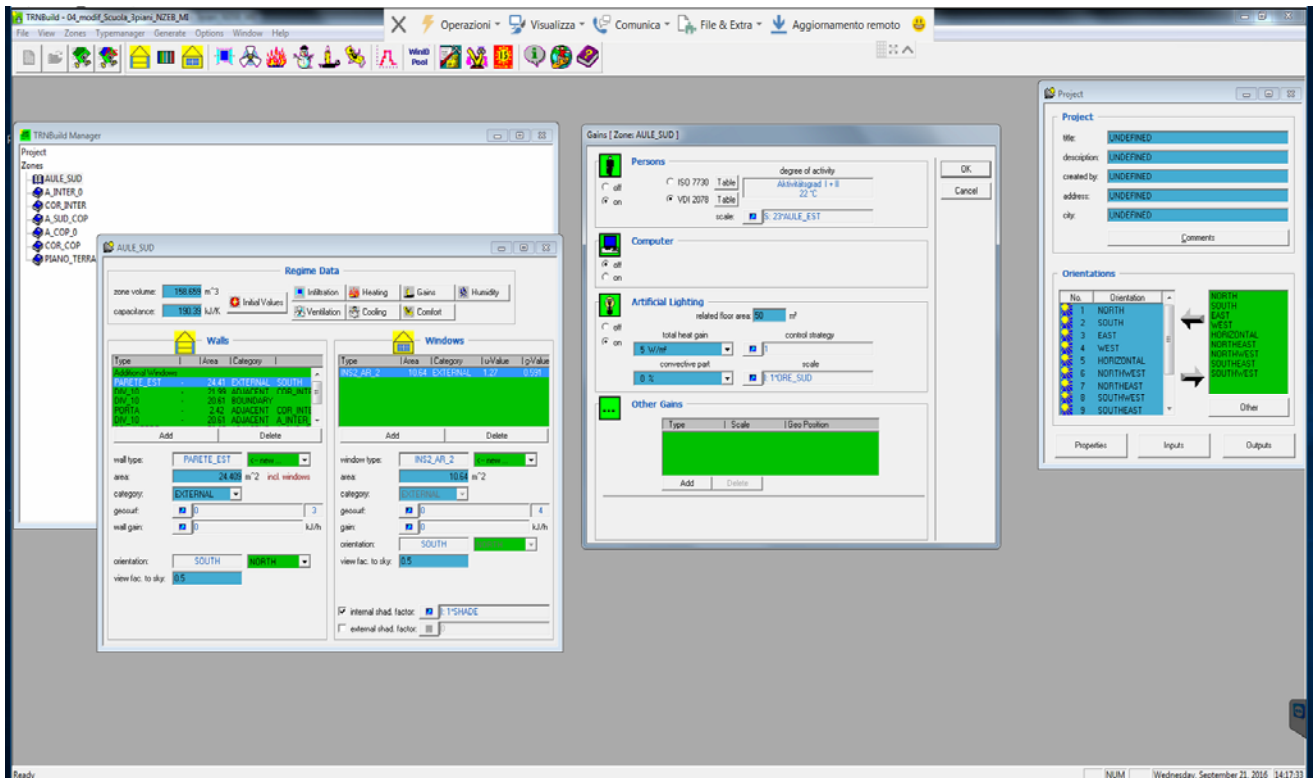


Figura 10 – Schermata della Type 56 TRNBLD

Per ogni superficie, opaca e/o trasparente, viene poi specificata l'area, l'esposizione azimutale e zenitale e il fattore di vista della volta celeste. Quest'ultimo valore consentirà, nel Simulation Studio, di calcolare correttamente anche la cessione radiativa delle pareti e delle coperture, fenomeno particolarmente importante durante le ore notturne. La descrizione dell'edificio prevede inoltre di predisporre, per ogni zona termica, un impianto ideale, definendone: la potenza, il set-point della temperatura e la percentuale di umidità relativa desiderata. Infine, è possibile stabilire un numero di ricambi d'aria orari specifici, rappresentativi delle infiltrazioni e della ventilazione, nonché prevedere la presenza di persone negli ambienti indicandone anche il relativo livello di attività, o altri flussi di calore di diversa natura che possono essere presenti in un ambiente confinato.

In figura 11 e 12 si riportano rispettivamente: la schermata del Simulation Studio con le Type utilizzate per le simulazioni e, a titolo esemplificativo, le connessioni dei parametri termo fisici tra la la Type dei dati climatici e quella relativa alla modellazione dell'edificio.

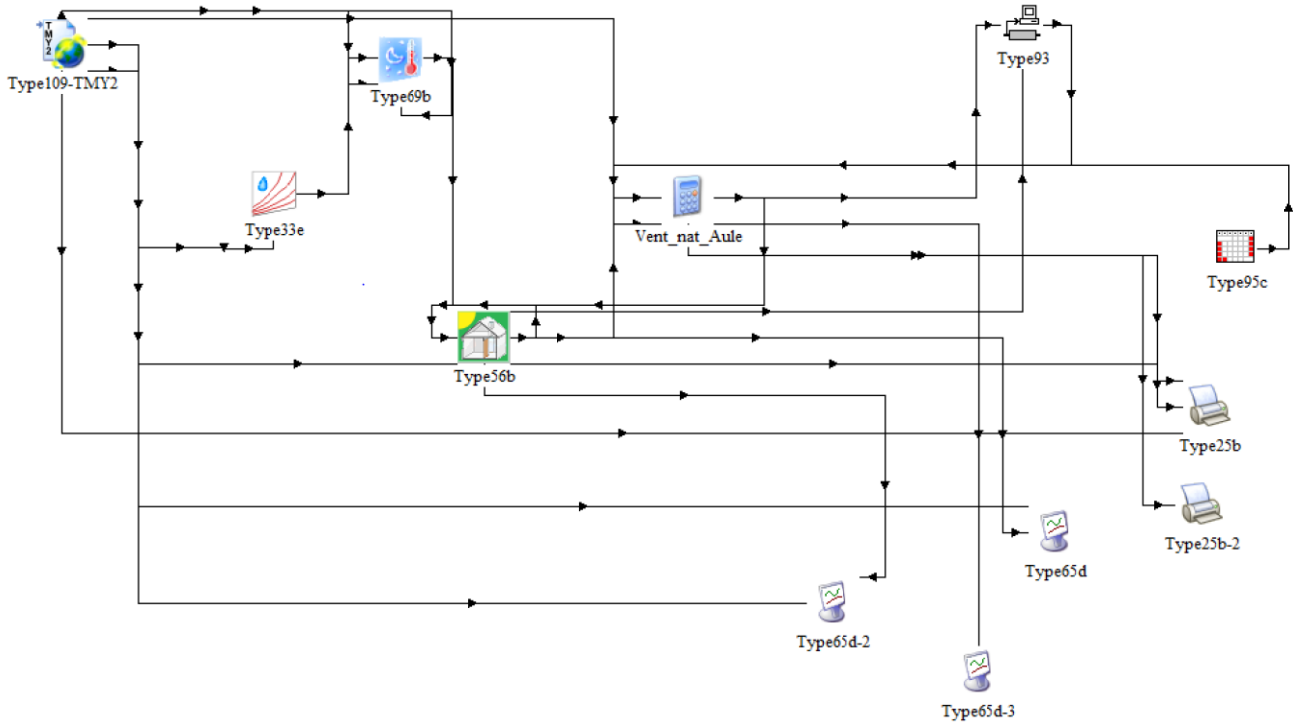


Figura 11 – Schermata di Simulation Studio

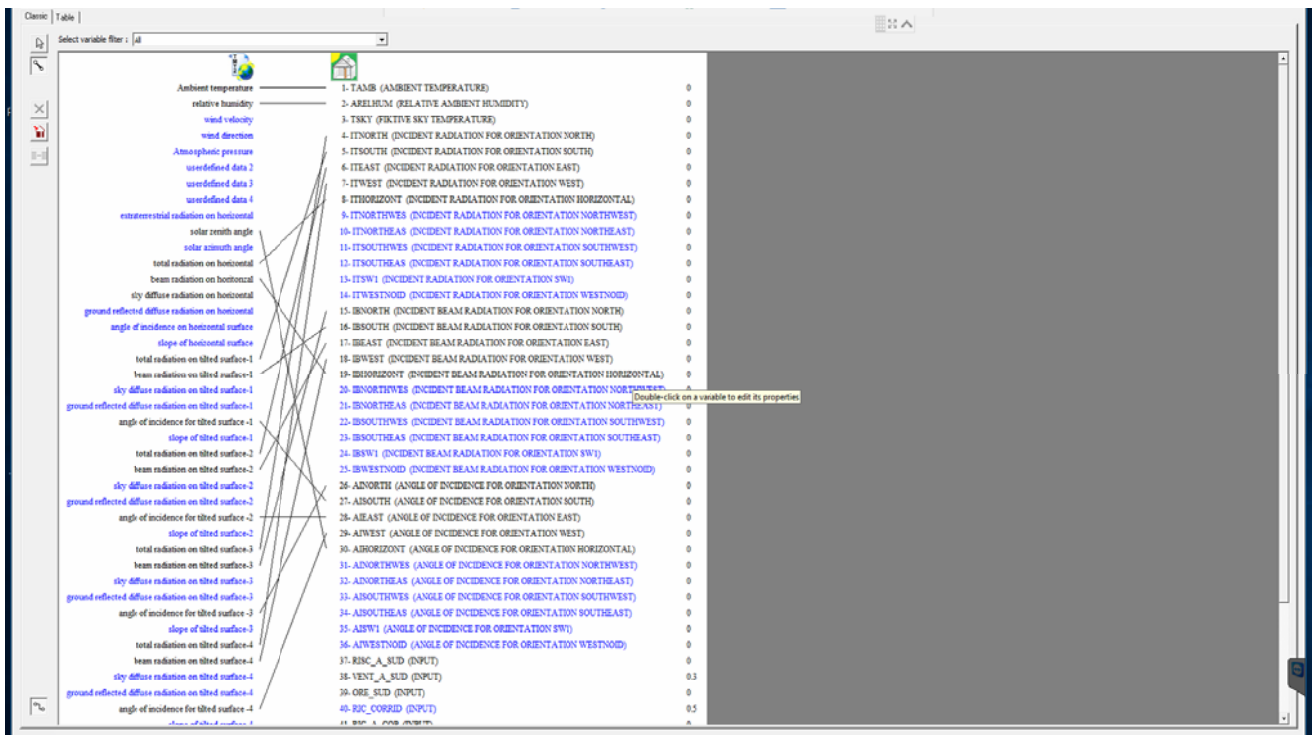


Figura 12 – Schermata con studio dei collegamenti di Simulation Studio

Le Type utilizzate nel presente progetto, con i relativi collegamenti, oltre quelle già citate, sono descritte di seguito.

La Type 109 è stata utilizzata allo scopo di leggere, ad intervalli di tempo regolari, un file dati relativo alle condizioni climatiche della zona oggetto di studio, consentendo anche di poterne convertire le unità di misura secondo le diverse esigenze di calcolo. Attraverso questa Type viene inoltre calcolata la potenza dell'irraggiamento solare che investe una o più superfici comunque orientate, secondo il time-step scelto, distinguendo i singoli contributi della radiazione incidente, sia diretta che diffusa. Infine viene calcolato l'angolo di incidenza solare per ognuna delle superfici descritte, aspetto particolarmente importante nei casi in cui il flusso di calore incide su superfici trasparenti, le cui prestazioni variano proprio in funzione di questa variabile.

La Type 33 viene utilizzata per studiare le caratteristiche termodinamiche dell'aria umida, in particolare nel caso oggetto di studio sono state inputate come variabili la temperatura e umidità relativa dell'aria esterna, ottenendo come output la temperatura di rugiada, grandezza utilizzata dalla Type 69.

Attraverso la Type 69 è stata calcolata la temperatura fittizia del cielo, necessaria per determinare lo scambio di calore tra le superfici esterne e la volta celeste nell'intervallo di lunghezze d'onda relativo all'infrarosso lontano. La temperatura fittizia del cielo infatti è sempre inferiore rispetto a quella ambiente, ed è quindi di fondamentale importanza poterne conoscere i valori. In questo modo è possibile descrivere con precisione lo scambio termico per irraggiamento che avviene tra le superfici, sia opache che trasparenti, e la volta celeste. Tale fenomeno assume una connotazione molto importante durante il periodo notturno, determinando il raffreddamento delle masse e l'abbassamento delle temperature superficiali degli elementi esterni.

La type 95 descrive il calendario durante tutto il periodo dell'anno scelto, l'output infatti include: l'anno, i mesi, il giorno della settimana e dell'anno, la data ed infine indica se nel passo temporale che viene studiato cadono giorni festivi o di vacanza. Nel caso studio la type è stata utilizzata per individuare i giorni festivi in cui la scuola rimaneva chiusa.

La Type 65 restituisce in tempo reale, attraverso un grafico dinamico, l'andamento delle grandezze ad essa collegate, consentendo di verificare, in tempo reale, la risposta del modello descritto.

La Type 25 restituisce un file ASCII contenente i dati orari delle grandezze ad essa collegate, che sono stati calcolati dal codice.

Infine, la Type "Vent_nat_Aule", rappresentata da una calcolatrice nello schema di Simulation Studio, ha una funzione molto importante in quanto, attraverso di essa, è stato possibile inserire le equazioni necessarie a descrivere i ricambi d'aria orari negli ambienti, dovuti sia alle infiltrazioni che alla ventilazione. Tali fenomeni hanno influenzato in modo determinante i risultati ottenuti dalle simulazioni. In particolare sono state inserite le equazioni derivate da uno studio su ambienti con ventilazione naturale attraverso una singola facciata per descrivere: la ventilazione per stack effect (effetto camino - ossia la ventilazione indotta da gradienti termici verticali lungo l'apertura), la ventilazione dovuta alla portata d'aria in ingresso per effetto della spinta del vento e le infiltrazioni [26].

Di seguito vengono riportate le equazioni empiriche relative allo studio sopra citato:

$$Q_{\text{stack effect}} = A \cdot \text{function} (Gr, M) \cdot (\Delta\theta \cdot g \cdot h / \theta)^{0.5}$$

essendo: A è l'area dell'anta aperta, g è l'accelerazione di gravità, θ è la media delle temperature dell'aria interna ed esterna, $\Delta\theta$ è la differenza tra le temperature dell'aria interna ed esterna, M il rapporto delle dimensioni della finestra (altezza/larghezza), Gr è il numero di Grashof espresso nel caso: $(\Delta\theta \cdot g \cdot h^3 / \theta \cdot \nu^2)$.

$$Q_{\text{wind effect}} = (0.025) \cdot A \cdot U_R$$

essendo: A è l'area dell'anta aperta e U_R è la velocità del vento all'altezza standard.

Le formule precedenti sono state opportunamente implementate nel modello, introducendo gli opportuni adattamenti secondo alcune ipotesi del calcolo riguardanti: la geometria del sistema, i profili di utilizzo, i dati climatici indoor e outdoor. Le equazioni corrette sono riportate di seguito.

$$\text{stack effect} = 1/3 * 2.56 * 0.61 * (((\text{abs}(T_{A_Sud_K} - \text{Test_K})) * 1.6 * 9.8) / ((T_{A_Sud_K} + \text{Test_K}) / 2)) ** 0.5)$$

essendo: 2.56 è l'area della finestra espressa in metri quadrati, 1/3 è la riduzione introdotta ipotizzando che venga aperta una sola anta delle 3 di cui è composto il serramento, 0.61 è un coefficiente suggerito da Warren e Perkins in funzione delle caratteristiche geometriche della finestra e del numero di Grashof.

$$\text{wind effect} = 0.025 * 2.56 * 1.7$$

essendo: 0.025 è un valore derivato da studi sperimentali utilizzato nei casi di edifici relativamente bassi, 2.56 è l'area della finestra, 1.7 è la velocità del vento nella zona di riferimento.

A partire da questi valori sono stati quindi calcolati i ricambi orari in ambiente nelle varie ore della giornata e, conseguentemente, la concentrazione di anidride carbonica in ambiente.

$$\text{Ricambi_d'aria} = (\max(\text{Wind_effect}, \text{stack_effect}) * 3600 / 158.7 / \min) + Q * 2/3 * \text{prof_vent_8_13} + Q * \text{chiusura} + (\max(\text{wind_effect}, \text{stack_effect}) / 158.7) * 2 * \text{bidelle} * 3600 / 4$$

essendo: Q sono le infiltrazioni d'aria attraverso le ante chiuse espresse in metri cubi orari su metro quadrato di serramento, prof_vent_8_13 è il profilo di occupazione della scuola, chiusura rappresenta le ore in cui la scuola rimane chiusa, bidelle rappresenta l'ora durante la quale vengono fatte le pulizie (dalle 13.00 alle 14.00),

$$\text{conc_CO}_2 = (((158.7 * 0.0004 + ((\text{Input}12 - 0.0004) * 158.7) + 0.0264 * 23 * \text{prof_vent_8_13})) + (\text{volume} * 0.0004)) * \text{prof_vent_8_13} / (158.7 + \text{volume}) + 0.0004 * \text{chiusura} + (((158.7 * 0.0004 + ((\text{Input}12 - 0.0004) * 158.7)) + (\text{volume} * 0.0004)) * (\text{gt}(\text{bidelle}, 0.5)) / (158.7 + \text{volume}))$$

essendo: Input12 è il valore della concentrazione di CO₂ al time-step precedente, 0.0004 è la concentrazione di CO₂ dell'aria esterna, volume sono i ricambi d'aria orari calcolati, 158.7 è il volume netto della zona espresso in metri cubi.

4 Risultati

Questa sezione presenta i risultati delle analisi numeriche, raggruppate in funzione del parametro prestazionale selezionato. I dati sono presentati in forma aggregata per rendere più compatta la rappresentazione dei risultati più significativi. Si rimanda all'Appendice per la presentazione dei risultati in modo esteso.

È importante rimarcare che la validità dei risultati è da riferirsi alle ipotesi precedentemente definite e da non intendersi, quindi, di validità generale.

4.1 Comfort termico durante la stagione di riscaldamento

Le analisi di voto medio previsto non hanno evidenziato condizioni di discomfort per l'edificio scolastico esistente a Palermo. Le peggiori performance si sono registrate, infatti, per l'aula sotto copertura esposta ad est, dove in solo 8 ore si è registrato un valore di VMP inferiore a -0.5. Di fatto condizioni di comfort termico sono sempre verificate nell'edificio, infatti la media stagionale del VMP, mediato a sua volta per le 4 configurazioni, è 0.07: il valore più elevato si registra nell'aula intermedia a sud (0.16) il più basso nell'aula sopra menzionata (-0.02). Risultati di questo tipo assicurano la verifica delle condizioni di comfort nell'edificio esistente e l'effetto della riqualificazione nZEB è, in questo senso, di limitata rilevanza. Per tale ragioni non sono presentati risultati ulteriormente dettagliati.

Diversa è la situazione per Roma e, soprattutto Milano, dove il limite di comfort è stato superato in numerose situazioni. Va tuttavia segnalato che mai sono registrati valori inferiori a -1, quelli in cui la sensazione di discomfort comincia a diventare significativa per un numero elevato di occupanti. In figura 13

sono presentate le ore con VMP inferiore a -0.5 delle aule di riferimento nel caso dell'edificio esistente a Roma e Milano. Le aule registrano un valore inferiore al dato di soglia per circa il 30% del periodo, con punte del 40% circa per l'aula sotto copertura esposta ad est. I dati evidenziano, dunque, la criticità delle coperture non isolate, specialmente nel caso di edifici privi di sottotetto, con l'impatto sulle temperature superficiali e, di conseguenza, sulle condizioni di comfort.

Roma presenta risultati diversi, originati dalle più miti condizioni climatiche. In questo caso i valori di voto medio previsto inferiori a -0.5 sono di circa 12%, con un minimo di 8% dell'aula sud al piano intermedio ad un massimo di 18% per l'aula sotto copertura esposta ad est.

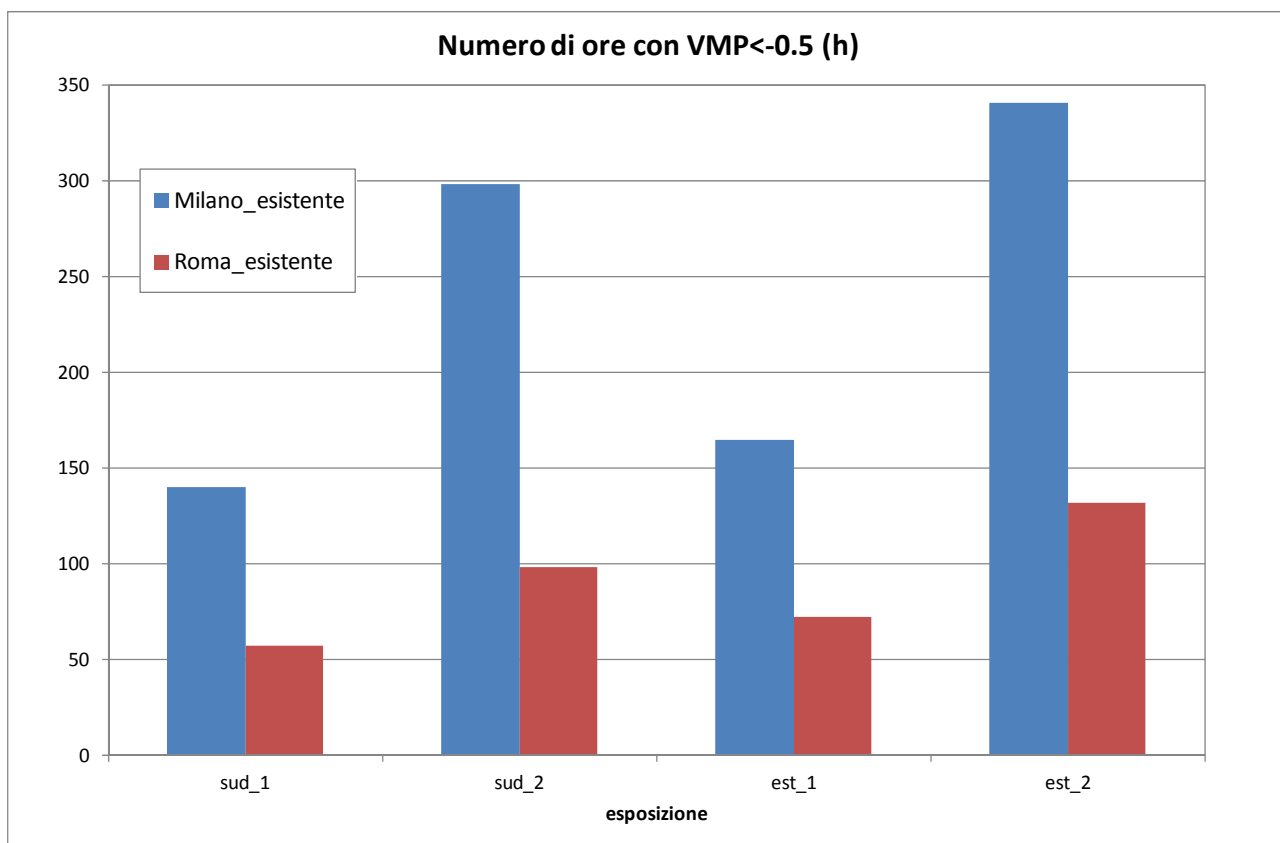


Figura 13 – Numero di ore con voto medio previsto inferiore a -0.5 nelle aule esistenti a Milano e Roma

Nel caso dell'edificio riqualificato con target nZEB non si registrano valori inferiori a -0.5 in nessuna delle aule nelle 3 località analizzate, salvo 2 ore a Milano per la solita aula sotto copertura. In termini aggregati, il voto medio previsto a Milano nell'edificio esistente è -0.38, mediando sulle 4 configurazioni di riferimento; l'effetto dell'isolamento termico dell'involucro comporta un incremento del VMP pari a 0.36 durante l'intera stagione di riscaldamento. Nel caso di Roma la media del VMP sulle 4 configurazioni è -0.21, il valore sale a +0.22 nell'edificio riqualificato con un incremento medio pari a 0.43 e mediato sulle 4 configurazioni di prova. Il massimo di incremento nelle singole configurazioni è per l'aula sotto copertura esposta a sud: 0.42 a Milano e 0.51 a Roma. I risultati disaggregati per esposizione sono riportati nella tabella 4.

Tabella 4. Voto medio previsto nelle aule di riferimento nella stagione invernale

	VMP_medio (-)			
	Aula sud_1p	Aula sud_2p	Aula est_1p	Aula est_2p
Milano Esistente	-0.32	-0.42	-0.35	-0.44
Milano nZEB	0.03	0.00	-0.04	-0.06
Roma Esistente	-0.13	-0.22	-0.21	-0.29
Roma nZEB	0.32	0.29	0.14	0.12

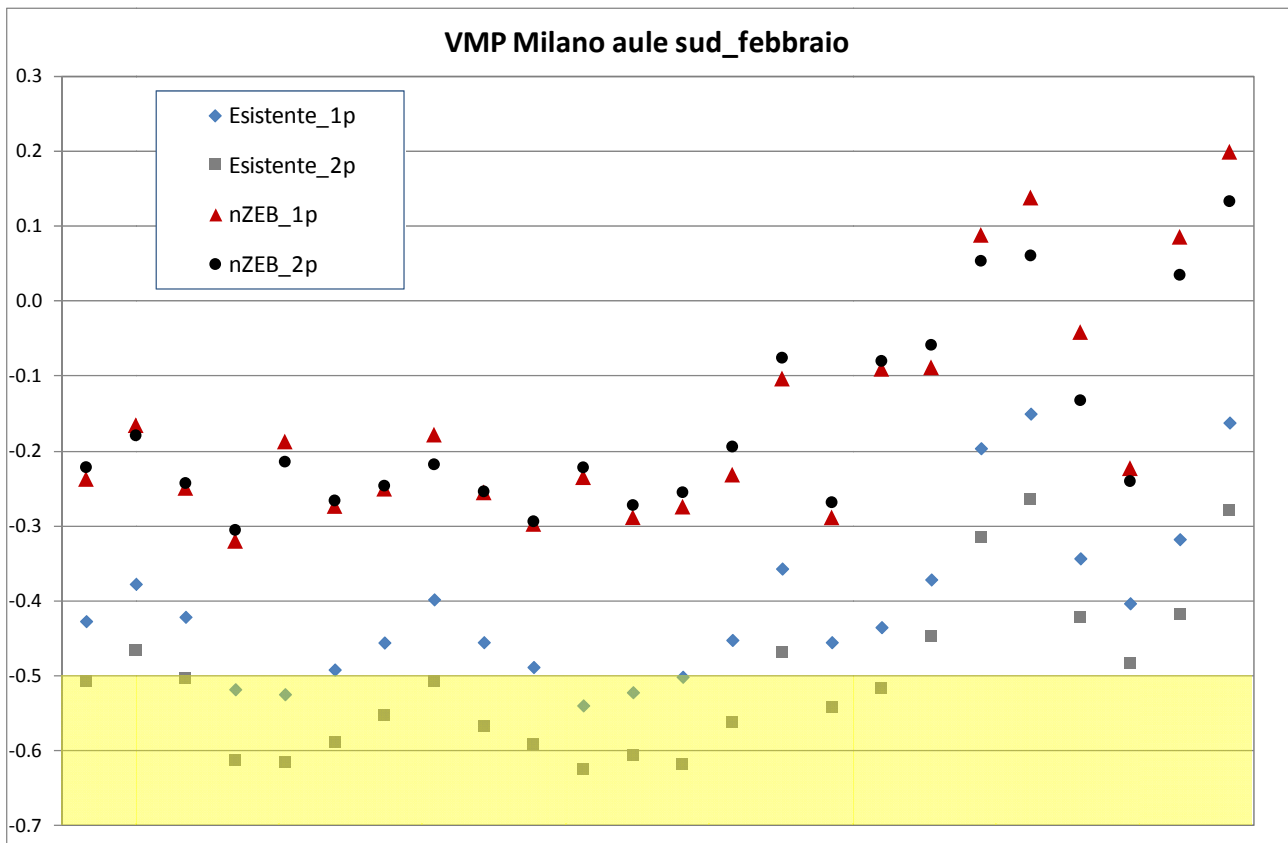


Figura 14 – Voto medio previsto giornaliero nelle aule esposte a sud a Milano

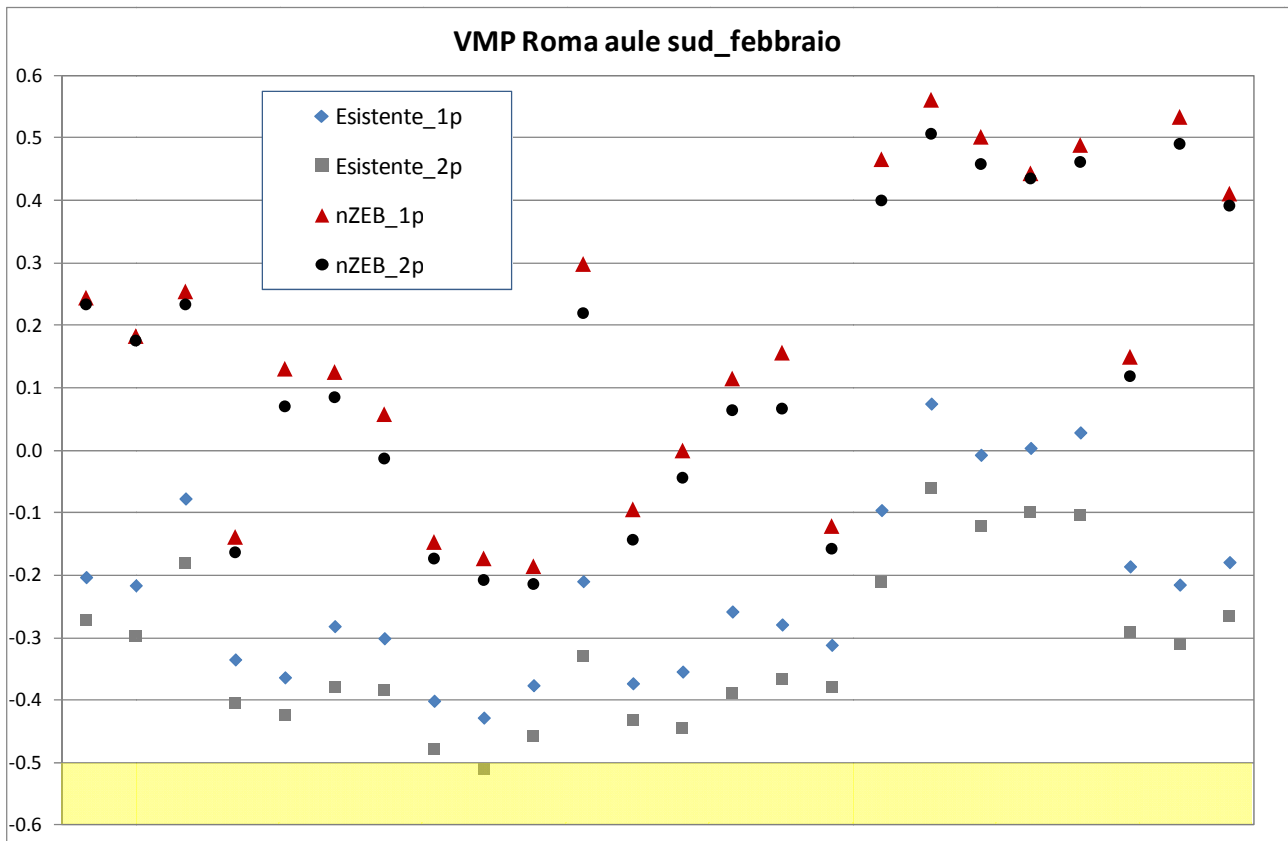


Figura 15 – Voto medio previsto giornaliero nelle aule esposte a sud a Milano

Le figure 14 e 15 riportano il valore di VMP giornaliero delle aule di riferimento esposte a sud, rispettivamente per Milano e Roma, nel caso di edificio esistente e sottoposto a riqualificazione. A titolo esemplificativo i risultati sono riferiti al mese di febbraio. Dalla figura 14 si evince come la il voto medio previsto giornaliero a Milano sia in diversi casi inferiore a -0.5, in particolare per l’aula al secondo piano, nel caso di edificio nZEB si realizza un clima confortevole e stabile per tutto il periodo di osservazione. Roma registra uno solo caso con VMP giornaliero inferiore a -0.5 in alcuni casi si osservano valori di VMP superiore a 0 anche per la configurazione esistente.

Al fine di evidenziare le differenze di voto medio previsto in funzione dell’orientamento e della posizione dell’aula di riferimento, in Appendice sono riportati in modo dettagliato i valori di VMP calcolati per la sola città di Milano.

4.2 Comfort termico nella stagione intermedia

Il comfort termico è stato valutato in funzione dell’evoluzione della temperatura operativa all’interno della aula di riferimento, durante le ore di occupazione, nella stagione intermedia. La tabella 5 riporta i valori medi della temperatura operativa nel periodo di osservazione, mediati a loro volta per le 4 configurazioni analizzate. I dati evidenziano in modo generale le variazioni del microclima interno a seguito della riqualificazione dell’edificio, si rimanda all’Appendice per un set più dettagliato di risultati..

Tabella 5. Temperatura operativa media nelle località di riferimento

	Milano	Roma	Palermo
Periodo di riferimento	16/4-31/5; 15/9-15/10	16/4-31/5; 15/9-31/10	31/3-31/5; 15/9-30/11
	$T_{o,m}$ (°C)		
Esistente	21.0	23.5	25.3
nZEB	26.0	28.0	29.8
nZEB+shading esterno	23.6	25.2	26.9
nZEB+shading esterno+vent	21.5	23.5	24.8

La tabella 6 illustra le variazioni del valor medio della temperatura operativa rispetto alla configurazione iniziale. Si noti che la semplice riqualificazione nZEB indurrebbe un microclima chiaramente non confortevole, con intensità crescente con il decrescere della latitudine. L’utilizzazione di schermature solari esterne mitiga tale effetto, anche l’incremento medio della temperatura rimane significativo (compreso tra 1.6 e 2.6°C). La ventilazione notturna accoppiata alle schermature ristabilisce condizioni microclimatiche simili a quelle calcolate per l’edificio originale.

Tabella 6. Variazione della temperatura operativa media in edifici nZEB rispetto all’edificio esistente

	Milano	Roma	Palermo
Periodo di riferimento	16/4-31/5; 15/9-15/10	16/4-31/5; 15/9-31/10	31/3-31/5; 15/9-30/11
	$\Delta T_{o,m}$ (°C)		
nZEB	4.9	4.5	4.6
nZEB+shading esterno	2.6	1.7	1.6
nZEB+shading esterno+vent	0.5	0.0	-0.4

A scopo esemplificativo si riportano inoltre i plot orari delle temperature operative nelle varie configurazioni analizzate per le tre città di riferimento. I grafici sono presentati nelle figure 16, 17 e 18 fanno riferimento alla prima settimana di maggio.

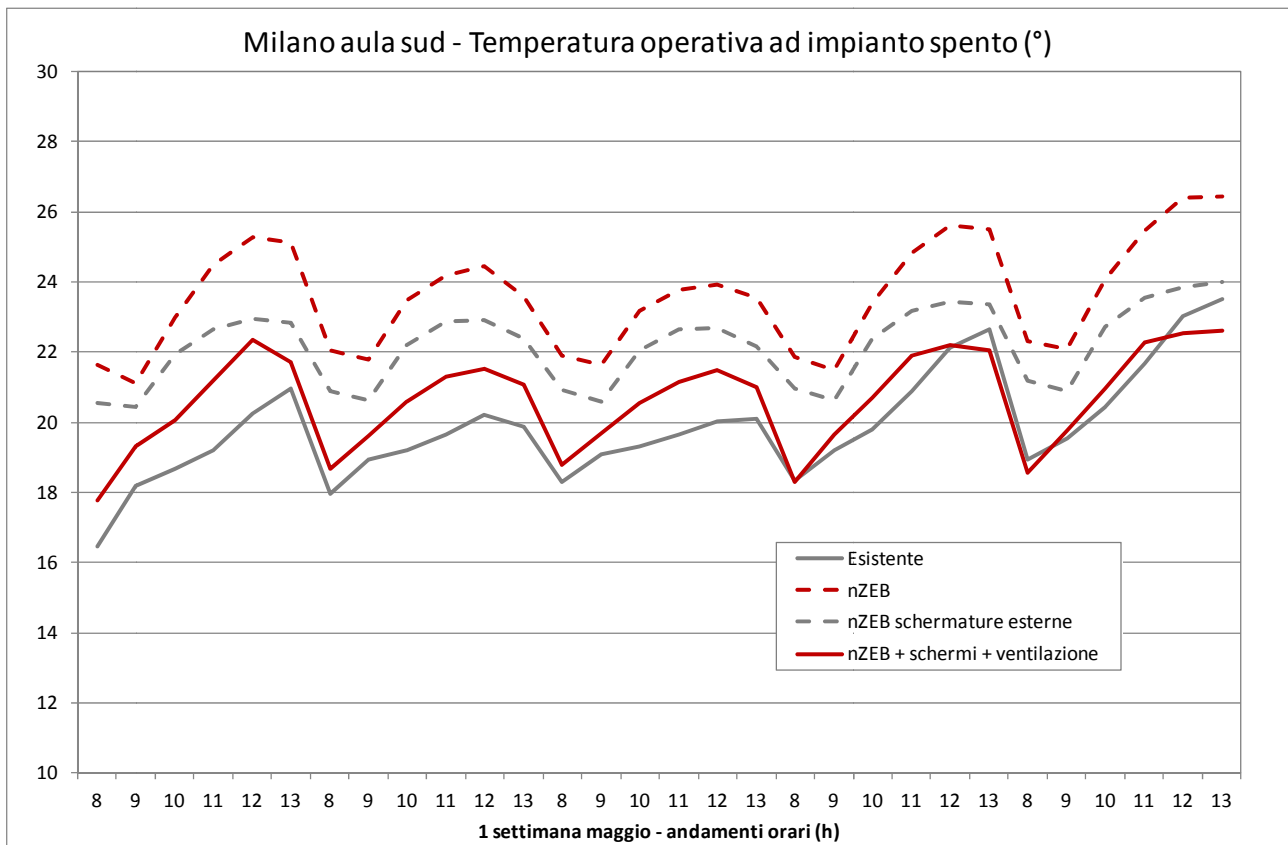


Figura 16 – Andamento della temperatura operativa in un aula a Milano

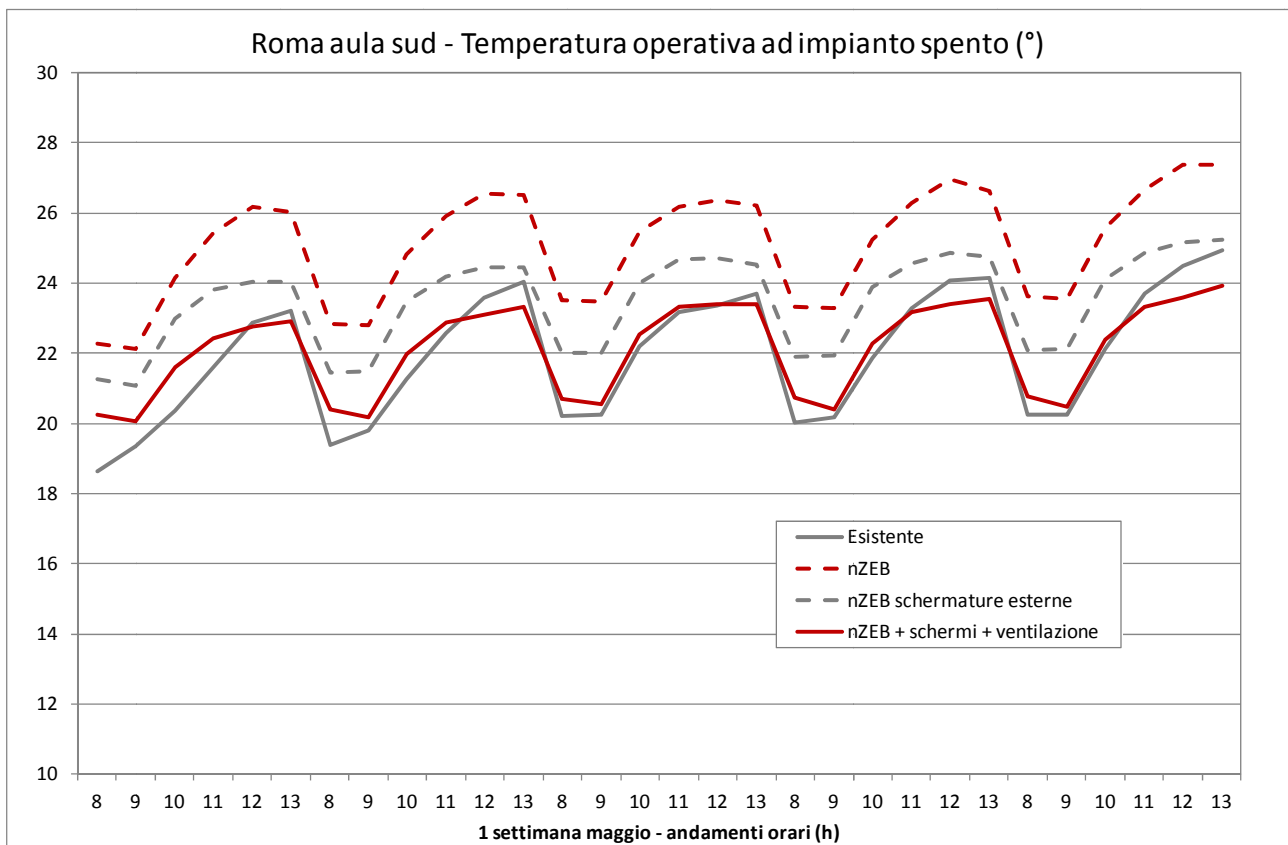


Figura 17 – Andamento della temperatura operativa in un aula a Roma

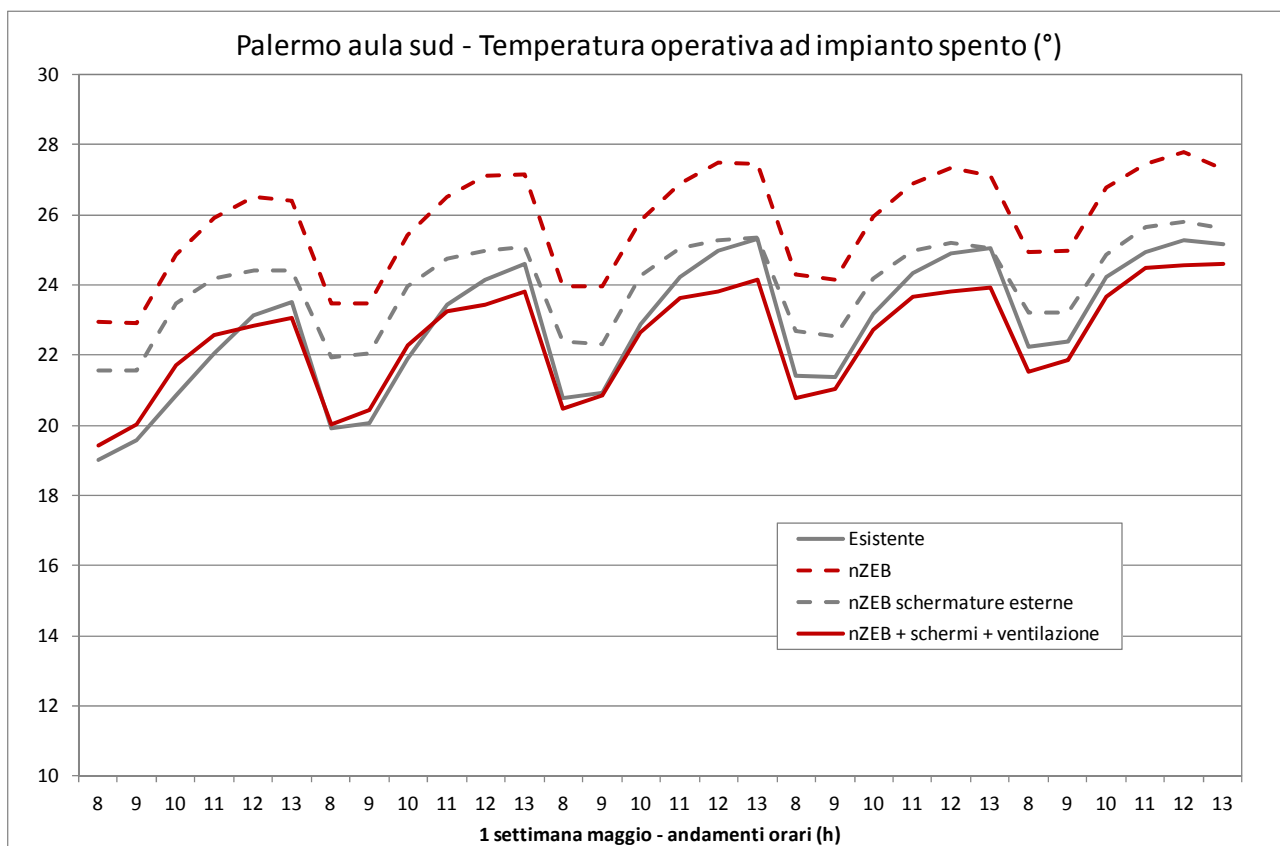


Figura 18 – Andamento della temperatura operativa in un aula a Palermo

Le figure 19, 20 e 21 presentano la distribuzione delle ore di occupazione delle aule con temperatura operativa superiore a determinati valori di soglia. Gli istogrammi rappresentano la media delle 4 aule di riferimento, in Appendice si riportano i dati per esteso.

A Milano si evidenzia l'assenza di seri problemi di surriscaldamento nell'edificio esistente con una temperatura compresa superiore a 26°C per un numero di ore pari a circa 1% del periodo di osservazione. La configurazione nZEB riduce la qualità termica dell'ambiente costruito, poiché in oltre il 23% del periodo si registrano valori di temperatura operativa superiori a 28°C. L'effetto della schermatura solare è quello di migliorare notevolmente le condizioni ambientali poiché le temperature superiori a 26°C si riducono al 10% e solo nel 3% dei casi il valore è superiore a 27°C. L'accoppiamento della protezione solare interna e della ventilazione notturna allinea le prestazioni dell'edificio riqualificato a quelle dell'edificio esistente

Diversi risultati si ottengono per Roma. Con le assunzioni di calcolo adottate, nella configurazione iniziale si registra un numero di ore con temperature superiori a 27°C nel 10% del periodo (anche se solo il 4% segna un valore superiore a 28°C). Decisamente peggiorativa è la riqualificazione nZEB che implica temperature superiori a 28 e 29°C, rispettivamente nel 50% e il 40% delle ore della stagione intermedia. In queste condizioni non appare sufficiente il contributo delle sole schermature esterne, dal momento che temperature superiori a 27 e 28°C sono calcolate, rispettivamente, per il 20 e il 10% del periodo. Come nel caso precedente, l'inserimento della ventilazione notturna allinea il comfort termico nell'edificio pre e post riqualificazione energetica.

Palermo registra le condizioni più severe in termini di rischi di surriscaldamento durante le stagioni intermedie. Temperature superiori a 27°C sono calcolate per l'edificio esistente, per il quale si registrano 29°C nel 10% delle ore di occupazione. La riqualificazione nZEB causa livelli termici per i quali si prevedono temperature superiori a 28°C in oltre la metà del periodo osservato e nel 25% delle ore nel caso si applichino schermature solari esterne. Rimangono significative le ore con oltre 30°C sia in assenza che in presenza di protezioni solari aggiuntive. Risulta fondamentale il contributo della ventilazione notturna che riduce a circa 8% il numero delle ore con temperatura operativa superiore a 28°C, raggiungendo così prestazioni addirittura migliorative rispetto a quelle ottenute per l'edificio esistente.

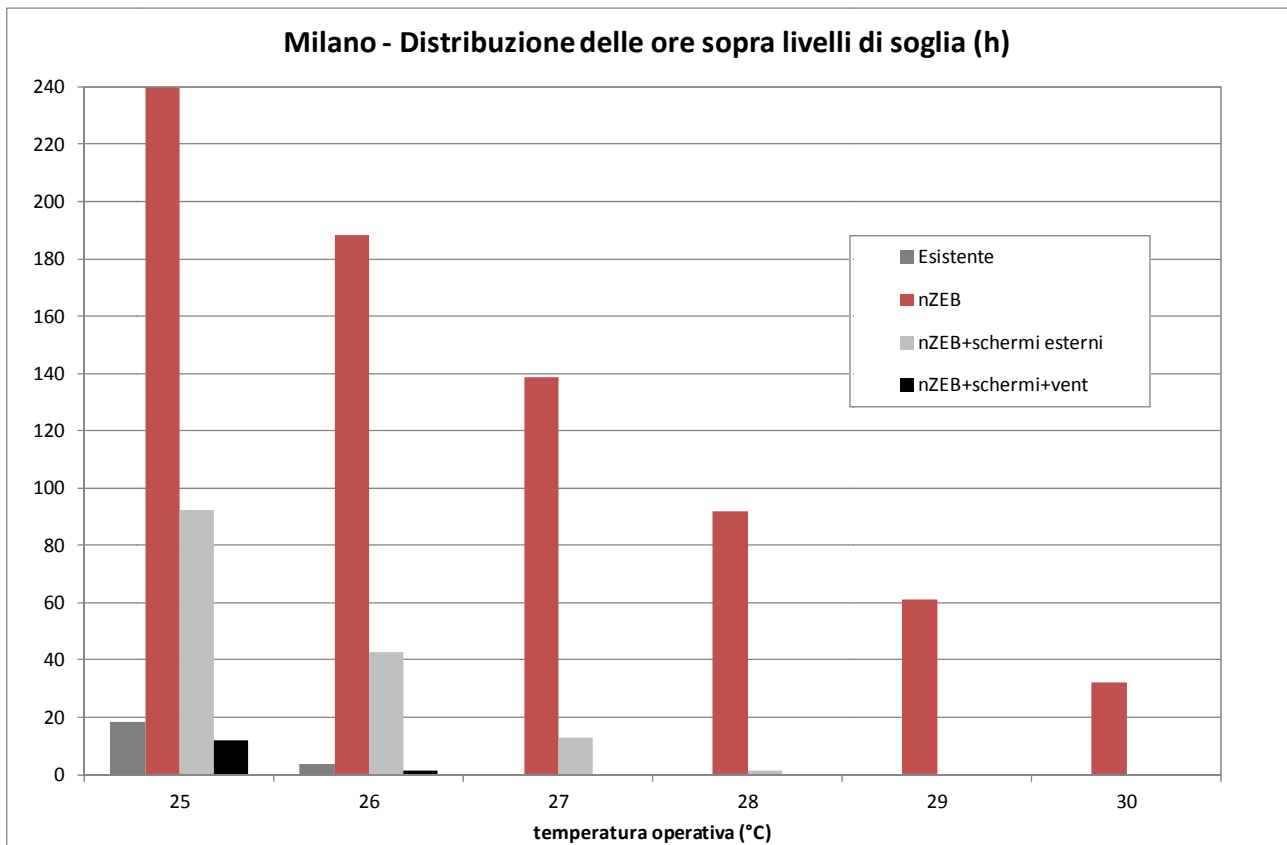


Figura 19 – Distribuzione delle ore oltre determinati livelli di soglia in un aula a Milano

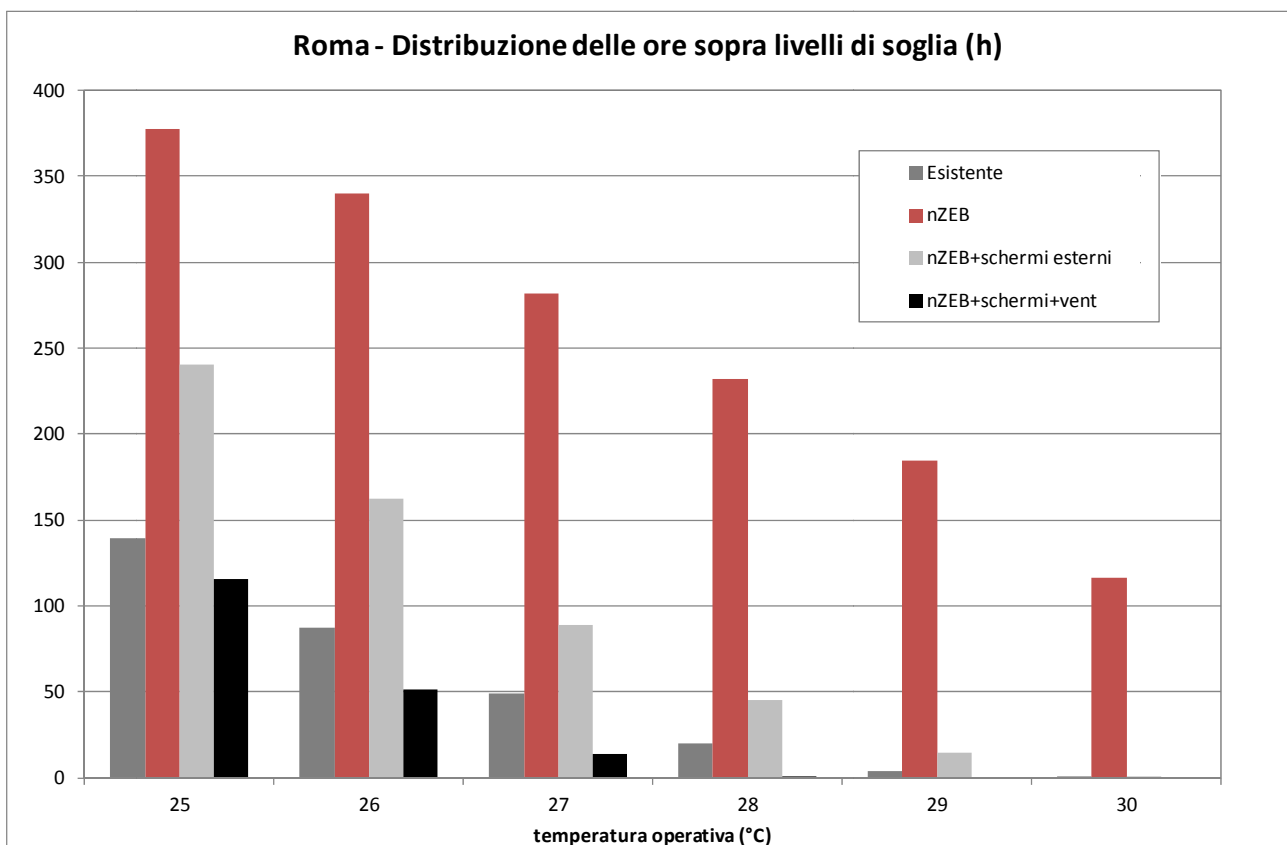


Figura 20 – Distribuzione delle ore oltre determinati livelli di soglia in un aula a Roma

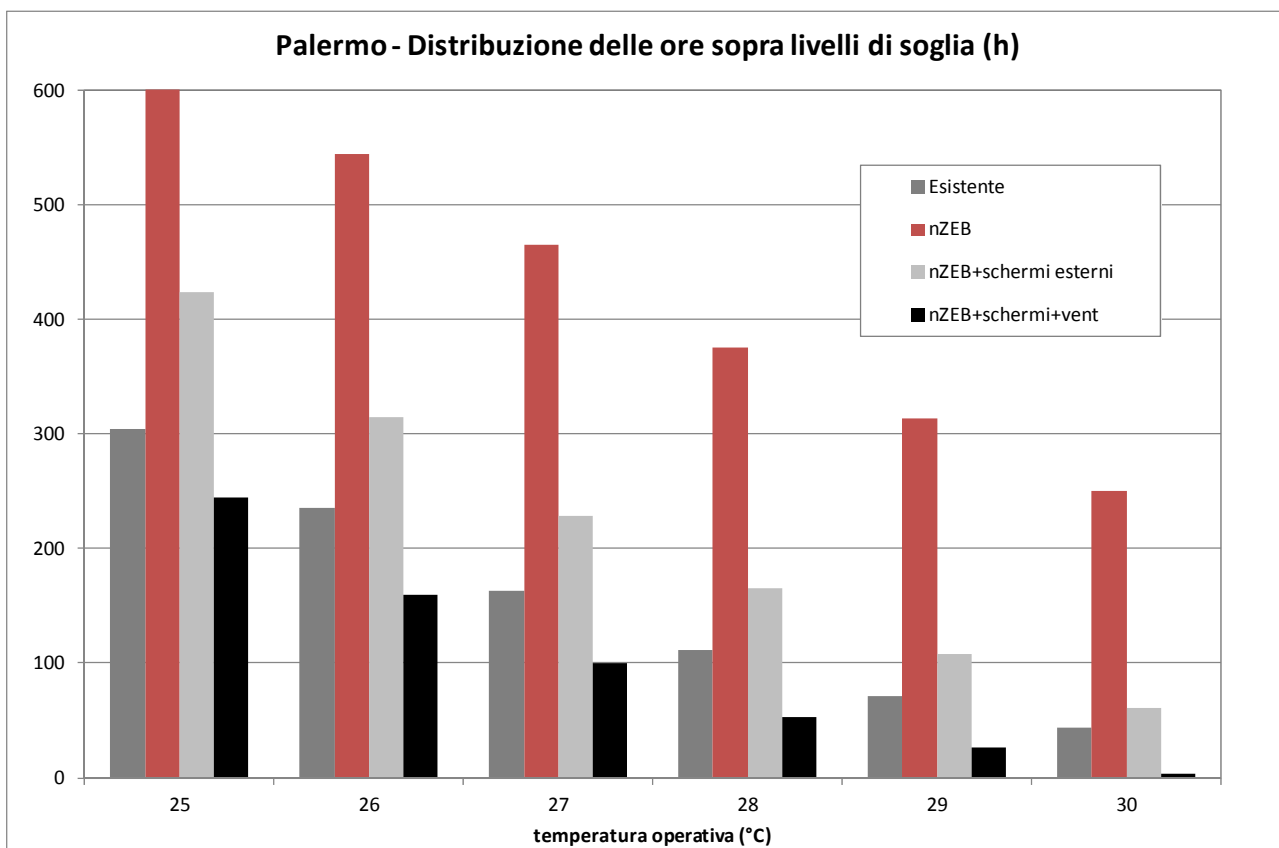


Figura 21 – Distribuzione delle ore oltre determinati livelli di soglia in un'aula a Palermo

4.3 Concentrazione di anidride carbonica nell'ambiente costruito

I risultati relativi alla concentrazione di CO₂ in ambienti confinati, hanno l'obiettivo di verificare come l'involucro edilizio riqualificato impatti sulla qualità dell'aria indoor. È bene ricordare che, in base alle ipotesi adottate, la qualità dell'aria è legata ai ricambi d'aria che avvengono in modo naturale e che i risultati dipendono da due fenomeni contrastanti:

- La minore permeabilità all'aria dei nuovi serramenti riduce le infiltrazioni e quindi i ricambi orari, questo comportamento dell'edificio riqualificato tende a far aumentare la concentrazione di CO₂ in ambiente.
- I modelli di ventilazione naturale dimostrano che l'innalzamento termico dell'ambiente favorisce il ricambio d'aria per effetto camino, questo comportamento dell'edificio riqualificato tende a ridurre la concentrazione di CO₂ in ambiente.

I risultati aggregati sono presentati in tabella 7, nella quale si riportano i valori medi di concentrazione di anidride carbonica nelle aule al primo piano esposte a sud. I risultati sono divisi per le configurazioni esistenti ed nZEB, nonché per la stagione invernale e per la stagione intermedia. I risultati ottenuti per le altre esposizioni non differiscono in modo significativo e, di conseguenza, non sono inclusi nel rapporto.

La tabella 7 evidenzia l'impatto peggiorativo della riqualificazione nZEB sulla concentrazione di CO₂ in ambiente, sebbene con variazioni molto limitate: 3% a Milano e 1.3% a Roma; a Palermo si ha una riduzione di circa il 2%. Durante la stagione intermedia si ha un miglioramento della qualità ambientale, con un picco di riduzione della CO₂ di circa: 5% a Milano, 9% a Roma, 12% a Palermo. Il comportamento è in buona parte dovuto all'innalzamento, anche notevole, delle temperature interne nell'edificio ben isolato, che crea condizioni favorevoli al ricambio d'aria. Va tuttavia notato che le simulazioni in configurazione nZEB sono state condotte senza schermature solari esterne.

A titolo di esempio, nel caso di Roma nella stagione intermedia si ha una riduzione di CO₂ di 225ppm, tuttavia con l'applicazione delle schermature il valore medio è di 2872ppm con una differenza di soli 13ppm rispetto alla configurazione dell'edificio esistente.

Tabella 7. Valori medi stagionali della concentrazione di anidride carbonica

	Concentrazione media CO ₂ (ppm)			
	Stagione invernale		Stagione intermedia	
	esistente	nZEB	esistente	nZEB
Milano	2099	2165	2627	2501
Roma	2346	2375	2885	2620
Palermo	2681	2620	3069	2711

Le figure 22, 23 e 24 presentano l'andamento orario della CO₂ nell'aula di riferimento, sia nella configurazione esistente che nZEB, in una tipica settimana invernale. L'evoluzione temporale ricalca fedelmente i risultati medi: a Milano le curve relative alla configurazione esistente sono sempre più basse rispetto a quella riqualificata; a Roma tali differenze sono decisamente ridotte e a Palermo si assiste ad una inversione durante la giornata, per cui la configurazione nZEB diventa migliorativa rispetto a quella iniziale. La figura 25, a titolo esemplificativo, evidenzia l'impatto delle schermature esterne che, riducendo la temperatura indoor, limitano i ricambi orari e quindi provocano un innalzamento della CO₂.

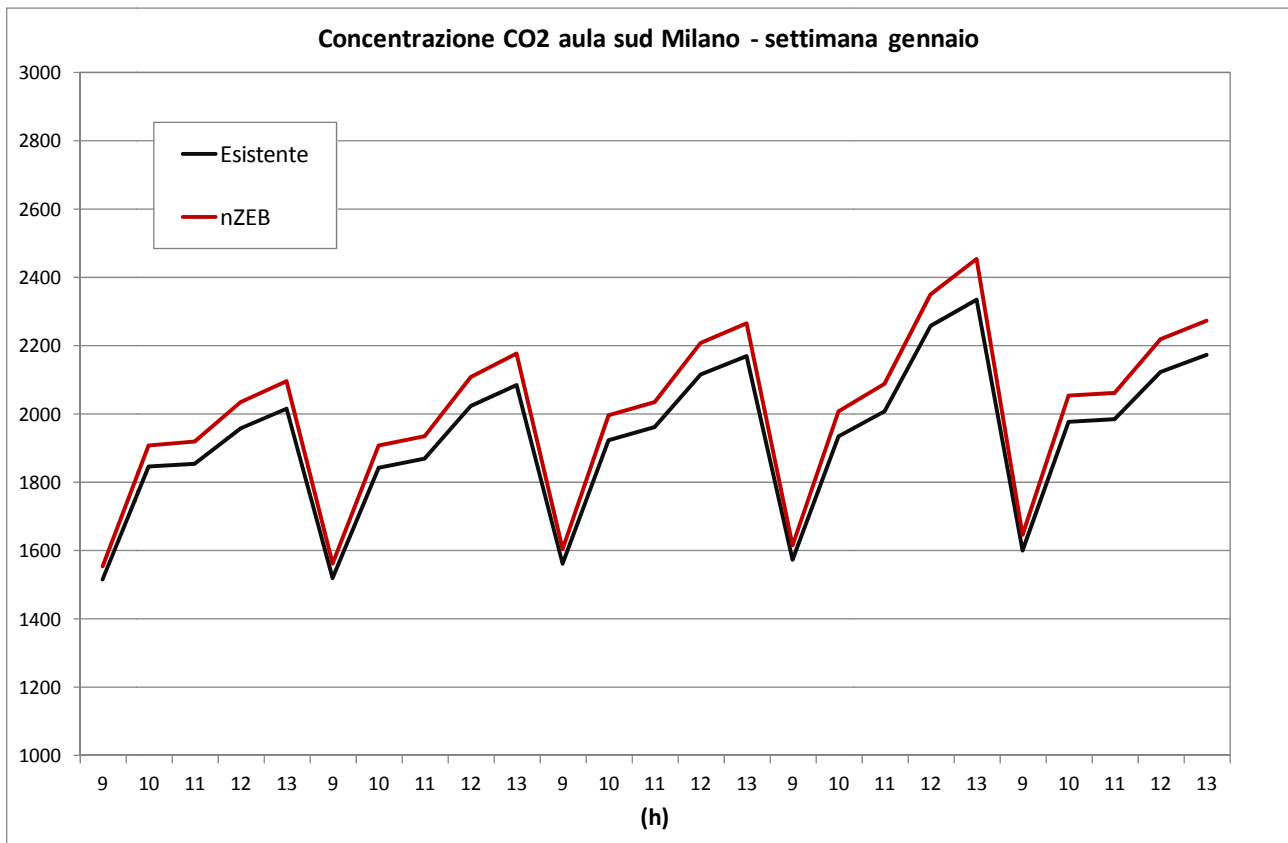


Figura 22 – Andamento orario della concentrazione di anidride carbonica nell'aula sud a Milano - Inverno

È importante notare che in questa sezione è stata discussa la variazione della concentrazione di anidride carbonica tra le due configurazioni, senza entrare nel dettaglio dei livelli assoluti calcolati. In merito a questi ultimi, estesamente riportati in Appendice, è bene notare come la qualità dell'aria sia assolutamente inadeguata rispetto agli standard tecnici internazionali, per i quali non dovrebbero essere tollerati valori superiori a 1200-1500ppm.

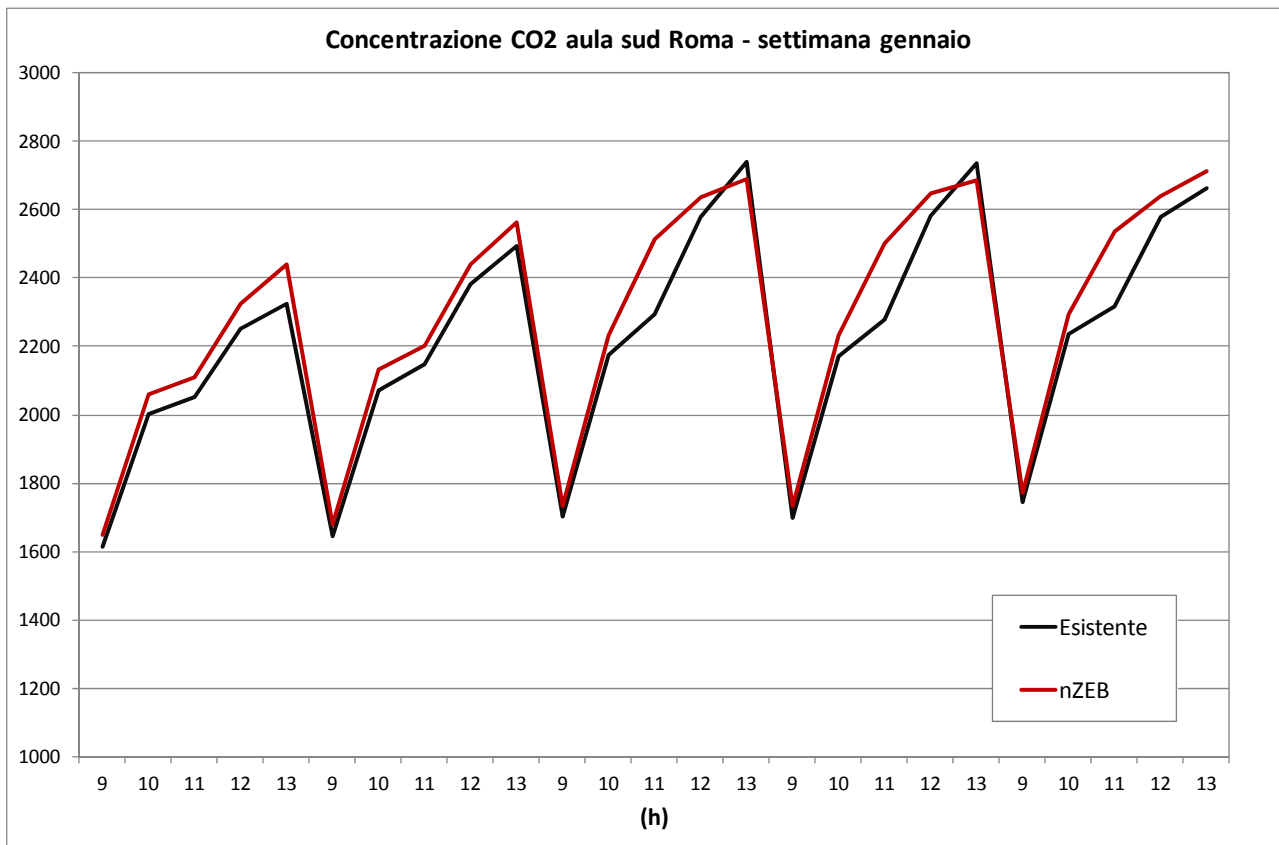


Figura 23 -- Andamento orario della concentrazione di anidride carbonica nell'aula sud a Roma - Inverno

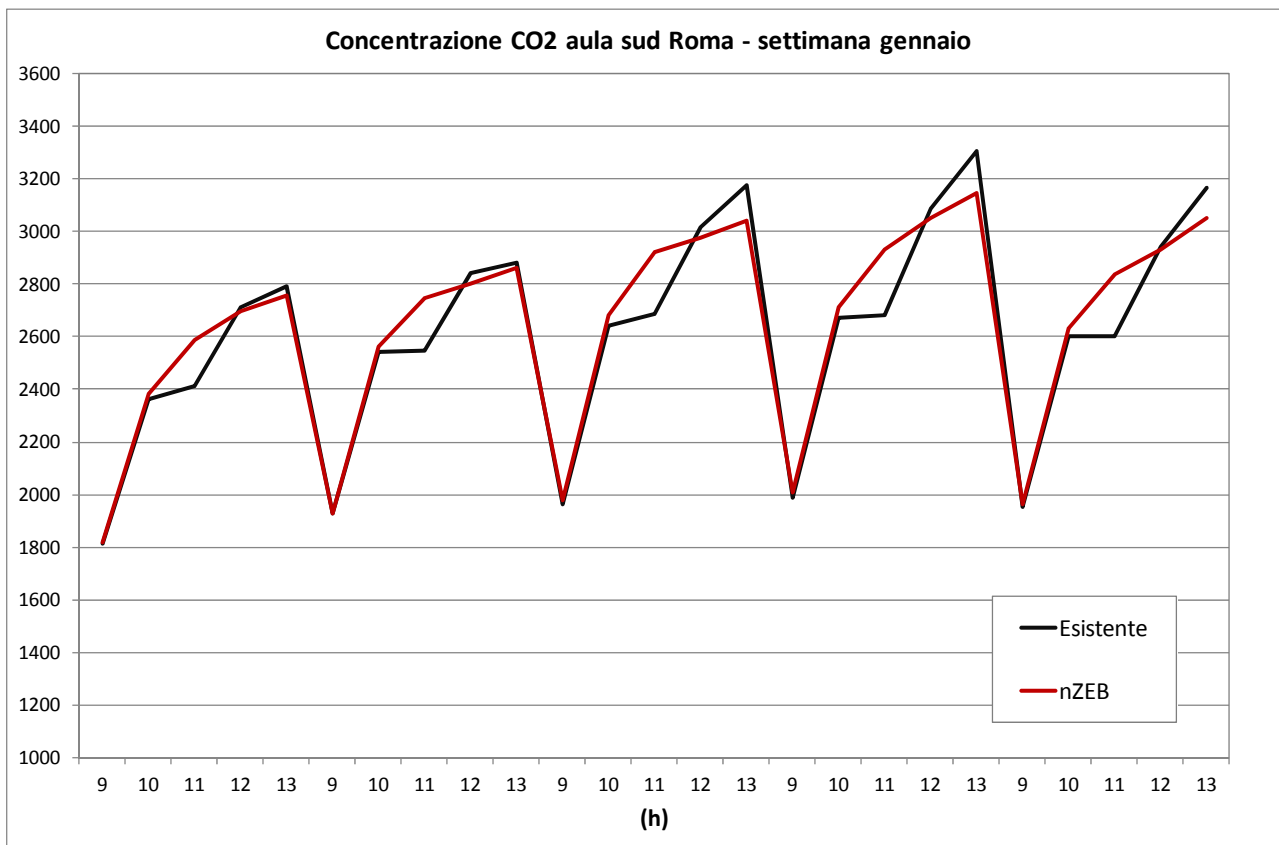


Figura 24 - Andamento orario della concentrazione di anidride carbonica nell'aula sud a Palermo - Inverno

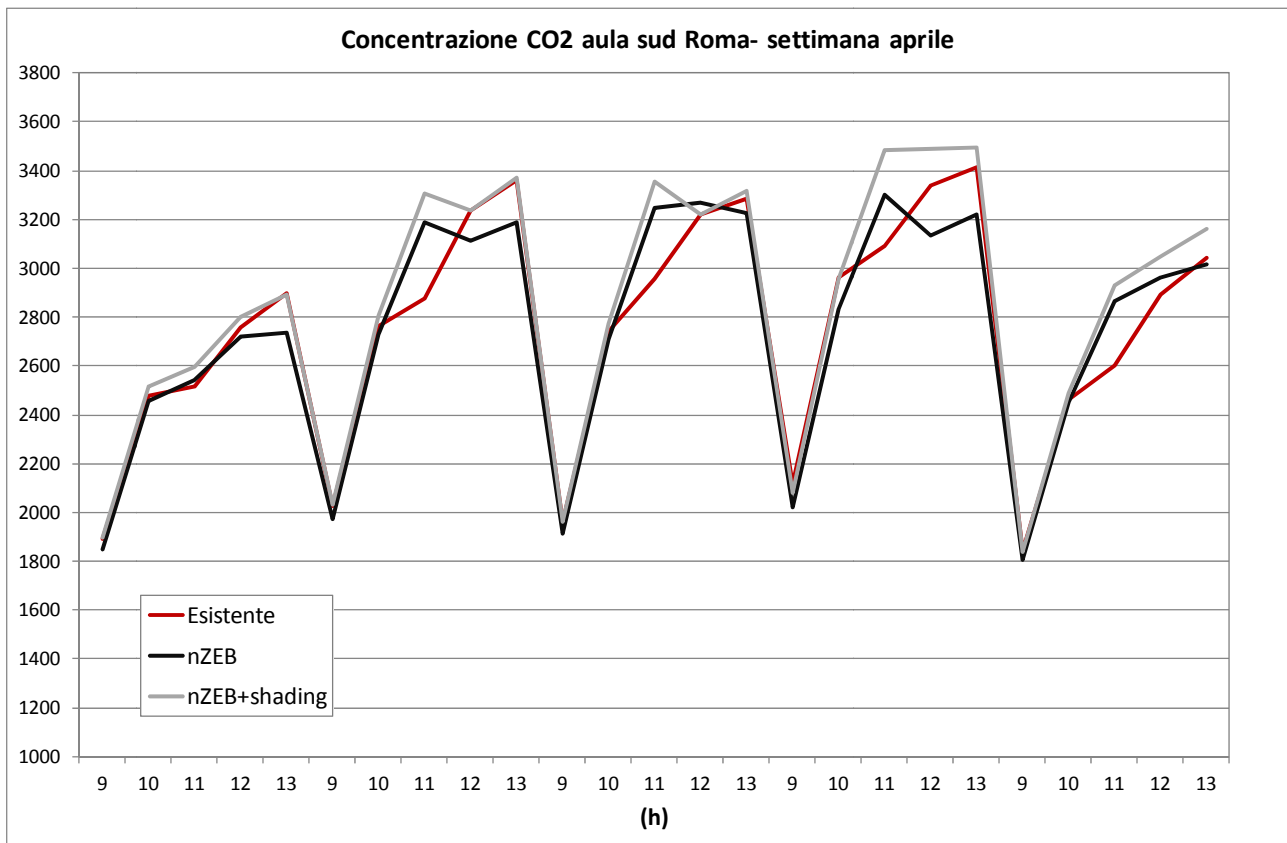


Figura 25 – Andamento orario della concentrazione di anidride carbonica nell’aula sud a Roma – Stagione intermedia

5 Conclusioni

Questo rapporto presenta i risultati di una attività atta a valutare l’impatto delle riqualificazioni energetiche con target nZEB sulle prestazioni ambientali dell’ambiente costruito. Si tratta di un lavoro preliminare, la cui validità risiede nelle ipotesi formulate all’interno di ogni sezione del rapporto e, di conseguenza, non generalizzabili a tutto il parco edilizio.

Per quanto riguarda il comfort termico durante la stagione invernale, i risultati hanno evidenziato un miglioramento della qualità ambientale a Roma e, soprattutto, Milano. Seppure sempre entro limiti accettabili, il voto medio previsto non dava risultati ottimali nelle due città, che viceversa sono stati raggiunti grazie al miglioramento della qualità termica dell’involucro edilizio. Nessun problematica è stata evidenziata per Palermo, dove anche per l’edificio esistente si erano calcolati adeguati valori degli indicatori di comfort. Il voto medio previsto è migliorato mediamente di circa 0.4-0.5 a seguito dell’intervento di riqualificazione energetica.

Tale intervento è risultato avere implicazioni negative sulla qualità termica dell’edificio durante le stagioni intermedie, con magnitudo fortemente dipendente dalle condizioni climatiche. In tutti i casi l’assenza di schermature esterne provoca una temperatura operativa superiote a 28°C in molte ore dell’anno. A Milano e Roma, le protezioni solari garantiscono livelli termici accettabili, simili a quelli riscontrati dell’edificio esistente. A Palermo questo non appare sufficiente e l’integrazione di soluzioni di raffrescamento attivo o, preferibilmente, passivo sono necessarie e utili, come evidenziato dai risultati relativi alla ventilazione notturna.

Per quanto riguarda infine la qualità dell’aria, si è evidenziata, come prevedibile, una scadente qualità ambientale indoor pre e post riqualificazione energetica, con livelli di CO₂ non accettabili, mediamente di 2000-3000ppm con punte fino a 5000ppm. Non sono riscontrati trend generali, salvo un marginale peggioramento delle condizioni ambientali (aumento della concentrazione di CO₂) alle temperature più basse e, in modo speculare, un miglioramento a seguito dell’innalzamento dei livelli termici.

Questo rapporto presenta delle importanti informazioni preliminari sul tema, troppo spesso trascurato rispetto agli aspetti puramente termici ed energetici, a scapito di coloro che nella realtà dovranno occupare edifici riqualificati con tali criteri. Lo studio, tuttavia, non esaurisce certamente il problema della qualità ambientale negli edifici, scolastici e non, soggetti a riqualificazione energetica. Lo studio, al contrario, fornisce alcune interessanti indicazioni per futuri approfondimenti, in particolare:

- Necessità di valutare il comfort termico invernale in una modellazione che consideri nel suo complesso il sistema edificio-impianto e non solo l'involucro edilizio.
- Necessità di valutare l'evoluzione del comfort termico non solo temporale ma anche spaziale, con analisi puntuali di comfort in diverse zone dello spazio costruito.
- Necessità di approfondire i meccanismi di ventilazione naturale e meccanica, al fine di stimare con maggiore accuratezza i fenomeni di comfort termico e ambientale indoor, con eventuale utilizzo di modelli termo fluidodinamici al posto di modelli empirici semplificati.

6 Bibliografia

1. Ministero dello Sviluppo Economico – Strategia per la Riquilificazione Energetica del Parco Immobiliare Nazionale, 2015.
2. Ministero dello Sviluppo Economico – Piano d’Azione Nazionale per incrementare gli edifici ad energia quasi zero, 2015.
3. Kalle Kuusk, Targo Kalamees, Mikk Maivel, Cost effectiveness of energy performance improvements in Estonian brick apartment buildings, *EnergyBuild*. 77 (2014) 313–322.
4. Energy Functional Retrofitting of Historic Residential Buildings: The Case Study of the Historic Center of Perugia *Energy Procedia*, 82, 2015 1009–1016.
5. Zihua Zhou, Shuzhen Zhang, Chendong Wang, Jian Zuo, Qing He, Raufdeen Rameezdeen, Achieving energy efficient buildings via retrofitting of existing buildings: a case study, *J. Clean. Prod.* 112 (2016) 3605–3615, Part 5, 20.
6. Denver Jermyn, Russell Richman, A Process for Developing Deep Energy Retrofit Strategies for Single-Family Housing Typologies: Three Toronto Case Studies *Energy and Buildings* (2016), 10.1016/j.enbuild.2016.01.022.
7. R.M. Ward, R. Choudhary, A bottom-up energy analysis across a diverse urbanbuilding portfolio: retrofits for the buildings at the Royal Botanic Gardens, Kew, UK, *Build. Environ.* 74 (2014) 132–148.
8. Jørgen Rose, Kirsten Engelund Thomsen, Energy saving potential in retrofitting of non-residential buildings in Denmark, *Energy Procedia* 78 (2015)1009–1014.
9. Moncef Krarti, Evaluation of large scale building energy efficiency retrofit program in Kuwait, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 50 (2015) 1069–1080.
10. A. Dimoudi, P. Kostarela, Energy monitoring and conservation potential inschool buildings in the C’ climatic zone of Greece, *Renew. Energ.* 34 (1) (2009)289–296.
11. Vincenc Butala, Peter Novak, Energy consumption and potential energy savings in old school buildings, *Energy Build.* 29 (3) (1999) 241–246.
12. A. Blyth, R. Almeida, D. Forrester, A. Gorey, G. Hostens, *Modernising Secondary School Buildings in Portugal* Paris, OECD Publishing, 2012.
13. Corgnati SP, Filippi M, Viazzo S. Perception of the thermal environment in high school and university classrooms: subjective preferences and thermal comfort. *Building and Environment* 2007;42:951–9.
14. Wong NH, Khoo SS. (2003) Thermal comfort in classrooms in the tropics. *Energy and Buildings*, (n.35):337–51.
15. Pepler RD, Warner RE. (1968) Temperature and learning: an experimental study. *ASHRAE Transactions*;74(1):211–24.
16. Tiberiu Catalina, Vlad Iordache , IEQ assessment on schools in the design stage, *Building and Environment*, Volume 49, March 2012, Pages 129-140.
17. Ulla Haverinen-Shaughnessy, Richard J. Shaughnessy, Eugene C. Cole, Oluyemi Toyinbo, Demetrios J. Moschandreas, An assessment of indoor environmental quality in schools and its association with health and performance, *Building and Environment*, Volume 93, Part 1, November 2015, Pages 35-40.
18. Oluyemi Toyinbo, Richard Shaughnessy, Mari Turunen, Tuula Putus, Jari Metsämuuronen, Jarek Kurnitski, Ulla Haverinen-Shaughnessy, Building characteristics, indoor environmental quality, and mathematics achievement in Finnish elementary schools, *Building and Environment*, Volume 104, 1 August 2016, Pages 114-121.
19. Michele Zinzi, Stefano Agnoli, Giovanni Battistini, Gualtiero Bernabini, Deep energy retrofit of the T. M. Plauto School in Italy—A five years experience, *Energy and Buildings*, Volume 126, 15 August 2016, Pages 239-251.
20. Federico Noris, Gary Adamkiewicz, William W. Delp, Toshifumi Hotchi, Marion Russell, Brett C. Singer, Michael Spears, Kimberly Vermeer, William J. Fisk, Indoor environmental quality benefits of apartment energy retrofits, *Building and Environment*, Volume 68, October 2013, Pages 170-178.

21. UNI EN ISO 7726:2002 Ergonomics of the thermal environment Instruments for measuring physical quantities.
22. UNI EN 15251:2008 Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics.
23. School of the Future – Towards Zero Emission with High Performance Indoor Environment 2010-2015. FP7 EU Collaborative Project EeB.ENERGY:2010.8.1-2 "Demonstration of EnergyEfficiency through Retrofitting of Buildings".
24. UNI 12207: 200, Finestre e porte - Permeabilità all'aria – Classificazione.
25. TRNSYS 16; www.trnsys.com
26. Warren P.R., 1977. Ventilation through openings on one wall only, International Conference Heat and Mass transfer in Buildings, Dubrovnik, Yugoslavia.

Appendice

1. Andamento del voto medio previsto giornaliero durante la stagione di riscaldamento a Milano in funzione dell'esposizione e della configurazione

Abbreviazioni:

Es.: esistente

int_est: piano intermedio esposizione est

int_sud: piano intermedio esposizione sud

nZEB: edificio a energia quasi zero

cop_est: piano sottocopertura esposizione est

cop_sud: piano sottocopertura esposizione sud

VMP giornaliero (-)									
Giorno	Es. int est	Es. cop_est	Es. int_sud	Es. cop_sud	nZEB int est	nZEB cop_est	nZEB int_sud	nZEB cop_sud	
2	-0.3	-0.4	-0.4	-0.5	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	
3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.5	-0.1	-0.1	-0.2	-0.2	
4	-0.4	-0.5	-0.4	-0.5	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3	
5	-0.4	-0.5	-0.5	-0.6	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3	
6	-0.5	-0.6	-0.5	-0.6	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	
7	-0.5	-0.6	-0.5	-0.6	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	
9	-0.6	-0.7	-0.6	-0.7	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	
10	-0.5	-0.6	-0.5	-0.6	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	
11	-0.4	-0.5	-0.5	-0.6	-0.1	-0.2	-0.2	-0.3	
12	-0.4	-0.5	-0.5	-0.6	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	
13	-0.5	-0.6	-0.5	-0.7	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	
14	-0.5	-0.7	-0.6	-0.7	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4	
16	-0.6	-0.7	-0.7	-0.8	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	
17	-0.5	-0.6	-0.6	-0.7	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	
18	-0.5	-0.6	-0.5	-0.6	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	
19	-0.4	-0.5	-0.4	-0.5	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2	
20	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.2	-0.3	-0.2	-0.3	
21	-0.4	-0.5	-0.5	-0.5	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	
23	-0.5	-0.6	-0.5	-0.6	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	
24	-0.5	-0.6	-0.5	-0.6	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3	
25	-0.5	-0.6	-0.5	-0.6	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	
26	-0.4	-0.5	-0.4	-0.5	-0.1	-0.1	-0.2	-0.2	
27	-0.4	-0.5	-0.4	-0.5	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3	
28	-0.5	-0.6	-0.5	-0.6	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	
30	-0.5	-0.6	-0.5	-0.6	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	
31	-0.5	-0.5	-0.5	-0.6	-0.2	-0.3	-0.2	-0.3	
32	-0.4	-0.5	-0.4	-0.5	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3	
33	-0.4	-0.5	-0.4	-0.5	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2	
34	-0.4	-0.5	-0.4	-0.5	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3	
35	-0.5	-0.6	-0.5	-0.6	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	
37	-0.5	-0.6	-0.6	-0.6	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	
38	-0.5	-0.6	-0.5	-0.6	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	
39	-0.5	-0.6	-0.5	-0.6	-0.2	-0.3	-0.2	-0.3	
40	-0.4	-0.5	-0.5	-0.6	-0.1	-0.2	-0.2	-0.3	
41	-0.5	-0.6	-0.5	-0.6	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	
42	-0.5	-0.6	-0.5	-0.6	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	
44	-0.5	-0.6	-0.5	-0.6	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	
45	-0.5	-0.6	-0.5	-0.6	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	
46	-0.5	-0.6	-0.5	-0.6	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	
47	-0.5	-0.6	-0.5	-0.6	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	
48	-0.4	-0.5	-0.4	-0.5	0.0	-0.1	-0.1	-0.1	
49	-0.5	-0.5	-0.5	-0.6	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	
51	-0.4	-0.5	-0.4	-0.5	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	
52	-0.4	-0.4	-0.4	-0.5	0.0	-0.1	-0.1	-0.1	

53	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	0.1	0.1	0.1	0.0
54	-0.1	-0.3	-0.2	-0.3	0.2	0.1	0.1	0.0
55	-0.3	-0.4	-0.4	-0.5	0.0	0.0	-0.1	-0.2
56	-0.4	-0.5	-0.4	-0.5	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3
58	-0.3	-0.4	-0.4	-0.5	0.1	0.1	0.0	0.0
59	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	0.3	0.2	0.1	0.1
60	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	0.3	0.2	0.1	0.0
61	-0.1	-0.2	-0.2	-0.3	0.4	0.3	0.2	0.1
62	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	0.3	0.2	0.0	-0.1
63	-0.4	-0.5	-0.5	-0.5	-0.1	-0.2	-0.2	-0.3
65	-0.4	-0.5	-0.4	-0.5	0.0	0.0	0.0	-0.1
66	-0.4	-0.5	-0.4	-0.5	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2
67	-0.4	-0.5	-0.4	-0.5	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2
68	-0.3	-0.4	-0.3	-0.4	0.0	0.0	0.0	-0.1
69	-0.3	-0.4	-0.4	-0.5	0.0	-0.1	-0.1	-0.2
70	-0.4	-0.5	-0.4	-0.5	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3
72	-0.3	-0.4	-0.3	-0.4	0.2	0.2	0.2	0.1
73	-0.3	-0.4	-0.3	-0.4	0.1	0.0	0.0	0.0
74	-0.2	-0.3	-0.2	-0.3	0.1	0.1	0.1	0.1
75	-0.1	-0.3	-0.2	-0.3	0.3	0.2	0.2	0.2
76	0.0	-0.1	0.0	-0.2	0.4	0.4	0.3	0.3
77	-0.3	-0.4	-0.3	-0.4	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2
79	-0.2	-0.2	-0.1	-0.2	0.4	0.4	0.3	0.3
80	-0.2	-0.3	-0.2	-0.3	0.3	0.3	0.2	0.2
81	0.0	-0.2	0.0	-0.2	0.5	0.4	0.4	0.4
82	-0.2	-0.3	-0.2	-0.3	0.3	0.3	0.2	0.2
83	-0.1	-0.3	0.0	-0.2	0.3	0.3	0.4	0.4
84	-0.3	-0.3	-0.2	-0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
86	-0.1	-0.2	-0.1	-0.2	0.5	0.5	0.5	0.5
87	0.0	-0.1	0.1	0.0	0.5	0.5	0.6	0.6
88	-0.1	-0.2	0.0	-0.1	0.4	0.4	0.5	0.4
89	0.0	-0.1	0.1	0.0	0.6	0.6	0.6	0.6
90	-0.1	-0.2	-0.1	-0.2	0.5	0.5	0.4	0.4
91	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4	0.0	0.0	-0.1	-0.1
93	-0.4	-0.4	-0.4	-0.5	0.0	0.0	0.0	-0.1
94	-0.3	-0.4	-0.3	-0.4	0.1	0.0	0.1	0.1
95	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	0.3	0.3	0.3	0.2
96	0.0	-0.1	0.1	0.0	0.3	0.3	0.4	0.3
97	0.1	0.0	0.2	0.1	0.5	0.4	0.5	0.5
98	-0.1	-0.2	0.1	0.0	0.3	0.2	0.4	0.4
100	0.1	0.0	0.1	0.0	0.7	0.7	0.7	0.7
101	0.2	0.1	0.2	0.2	0.7	0.7	0.8	0.8
102	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.5	0.5	0.5	0.5
103	0.0	-0.1	0.0	-0.1	0.4	0.5	0.5	0.5
287	0.0	-0.1	0.0	-0.1	0.7	0.7	0.5	0.6
289	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.8	0.6	0.6
290	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.8	0.8	0.5	0.6
291	0.1	0.0	0.0	0.0	0.8	0.8	0.6	0.6
292	0.1	0.0	0.1	0.0	0.9	0.9	0.6	0.6
293	0.1	0.0	0.1	0.0	0.9	0.9	0.6	0.6
294	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3	0.4	0.4	0.2	0.2
296	-0.2	-0.3	-0.2	-0.3	0.5	0.5	0.3	0.3
297	0.0	-0.1	-0.1	-0.2	0.6	0.6	0.4	0.4
298	-0.1	-0.2	-0.2	-0.3	0.4	0.4	0.2	0.2
299	-0.3	-0.4	-0.3	-0.4	0.3	0.3	0.1	0.1
300	-0.3	-0.4	-0.3	-0.4	0.2	0.2	0.1	0.1
301	-0.4	-0.4	-0.4	-0.5	-0.1	-0.1	-0.2	-0.2
303	0.0	-0.1	-0.1	-0.2	0.7	0.7	0.4	0.4
304	0.1	0.0	-0.1	-0.2	0.7	0.7	0.4	0.3

305	-0.4	-0.4	-0.4	-0.5	0.1	0.1	-0.1	-0.2
306	-0.4	-0.4	-0.4	-0.5	0.1	0.0	-0.1	-0.2
307	-0.4	-0.5	-0.4	-0.5	-0.1	-0.1	-0.2	-0.2
308	-0.4	-0.5	-0.4	-0.5	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3
310	-0.4	-0.4	-0.4	-0.5	0.1	0.1	0.0	0.0
311	-0.3	-0.4	-0.3	-0.4	0.1	0.1	0.0	0.0
312	-0.3	-0.4	-0.3	-0.4	0.0	0.0	0.0	-0.1
313	0.0	-0.1	-0.1	-0.3	0.3	0.3	0.2	0.2
314	-0.2	-0.3	-0.2	-0.3	0.2	0.2	0.1	0.1
315	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	0.0	0.0	-0.1	-0.1
317	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	0.3	0.2	0.1	0.1
318	-0.1	-0.2	-0.3	-0.4	0.3	0.3	0.1	0.1
319	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	0.0	0.0	-0.1	-0.2
320	-0.4	-0.4	-0.4	-0.5	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2
321	-0.4	-0.4	-0.4	-0.4	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2
322	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3
324	-0.4	-0.4	-0.4	-0.5	0.0	-0.1	-0.1	-0.1
325	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1
326	-0.4	-0.4	-0.4	-0.5	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2
327	-0.4	-0.4	-0.4	-0.5	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2
328	-0.3	-0.4	-0.4	-0.5	0.0	-0.1	-0.1	-0.2
329	-0.4	-0.5	-0.5	-0.6	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3
331	-0.3	-0.4	-0.5	-0.6	0.2	0.1	-0.1	-0.2
332	-0.4	-0.5	-0.5	-0.6	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3
333	-0.5	-0.6	-0.5	-0.6	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3
334	-0.5	-0.6	-0.5	-0.6	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3
335	-0.5	-0.6	-0.5	-0.6	-0.2	-0.3	-0.2	-0.3
336	-0.5	-0.6	-0.5	-0.6	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3
338	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2
339	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3
340	-0.4	-0.5	-0.5	-0.6	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3
341	-0.4	-0.5	-0.5	-0.6	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3
342	-0.4	-0.5	-0.5	-0.6	-0.2	-0.3	-0.2	-0.3
343	-0.5	-0.6	-0.5	-0.6	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3
345	-0.6	-0.6	-0.6	-0.7	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3
346	-0.4	-0.5	-0.5	-0.6	-0.1	-0.1	-0.2	-0.2
347	-0.5	-0.6	-0.5	-0.6	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3
348	-0.4	-0.5	-0.5	-0.6	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3
349	-0.4	-0.5	-0.4	-0.5	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3
350	-0.3	-0.4	-0.4	-0.5	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3
352	-0.4	-0.5	-0.5	-0.5	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2
353	-0.4	-0.5	-0.4	-0.5	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2
354	-0.4	-0.5	-0.4	-0.5	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3
355	-0.5	-0.5	-0.5	-0.6	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3
356	-0.5	-0.6	-0.5	-0.6	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3
357	-0.5	-0.6	-0.5	-0.6	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3
359	-0.5	-0.6	-0.6	-0.7	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3
360	-0.5	-0.7	-0.6	-0.7	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3
361	-0.5	-0.6	-0.5	-0.7	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3
362	-0.5	-0.6	-0.5	-0.7	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3
363	-0.5	-0.6	-0.5	-0.6	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3
364	-0.5	-0.6	-0.5	-0.7	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3

2. Temperatura operativa: ore con temperature superiori a valori si soglia e temperature medie nel periodo

Abbreviazioni:

int_est: piano intermedio esposizione est

cop_est: piano sottocopertura esposizione est

int_sud: piano intermedio esposizione sud

cop_sud: piano sottocopertura esposizione sud

MILANO	int est	cop_est	int_sud	cop_sud	int est	cop_est	int_sud	cop_sud
h				%				
To	1 - esistente							
25	23	20	16	14	6	5	4	4
26	7	8	0	0	2	2	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0
2 - nZEB								
25	263	271	203	222	67	69	52	57
26	211	218	154	171	54	56	39	44
27	162	168	103	122	42	43	26	31
28	109	125	57	77	28	32	15	20
29	69	91	37	48	18	23	9	12
30	37	49	18	25	9	13	5	6
3 - nZEB + schermature solari								
25	108	128	60	73	28	33	15	19
26	46	72	21	31	12	18	5	8
27	13	31	0	8	3	8	0	2
28	0	5	0	0	0	1	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0
4 - nZEB + schermature solari + ventilazione notturna								
25	16	26	2	16	4	7	1	4
26	0	5	0	0	0	1	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0
media 1	media 2	media 3	media 4	media 1	media 2	media 3	media 4	
25	18	240	92	12	5	61	24	3
26	4	189	43	1	1	48	11	0
27	0	139	13	0	0	36	3	0
28	0	92	1	0	0	24	0	0
29	0	61	0	0	0	16	0	0
30	0	32	0	0	0	8	0	0

Temperatura operativa media (°C)				
Configurazione	int_est	cop_est	int_sud	cop_sud
1 - esistente	21.4	21.3	20.8	20.7
2 - nZEB	26.3	26.6	25.4	25.7
3 - nZEB + schermature solari	23.9	24.2	23.0	23.2
4 - nZEB + schermature solari + vent. notturna	21.9	21.9	21.2	21.1

ROMA	int_est	cop_est	int_sud	cop_sud	int_est	cop_est	int_sud	cop_sud
	h				%			
To	1 - esistente							
25	159	164	111	123	34	35	24	26
26	98	100	74	76	21	21	16	16
27	57	61	38	41	12	13	8	9
28	12	24	21	23	3	5	4	5
29	0	2	6	6	0	0	1	1
30	0	0	0	1	0	0	0	0
	2 - nZEB							
25	401	406	346	357	86	87	74	76
26	362	375	301	322	77	80	64	69
27	299	319	240	270	64	68	51	58
28	255	268	195	209	54	57	42	45
29	199	226	138	176	43	48	29	38
30	115	156	87	106	25	33	19	23
	3 - nZEB + schermature solari							
25	266	297	182	216	57	63	39	46
26	169	217	112	150	36	46	24	32
27	88	139	47	81	19	30	10	17
28	44	78	20	40	9	17	4	9
29	10	36	0	11	2	8	0	2
30	0	4	0	0	0	1	0	0
	4 - nZEB + schermature solari + ventilazione notturna							
25	133	158	74	96	28	34	16	21
26	59	77	31	39	13	16	7	8
27	12	30	3	10	3	6	1	2
28	0	1	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0
	media 1	media 2	media 3	media 4	media 1	media 2	media 3	media 4
25	139	378	240	115	30	81	51	25
26	87	340	162	52	19	73	35	11
27	49	282	89	14	11	60	19	3
28	20	232	46	0	4	50	10	0
29	4	185	14	0	1	39	3	0
30	0	116	1	0	0	25	0	0

Configurazione	Temperatura operativa media (°C)			
	int_est	cop_est	int_sud	cop_sud
1 - esistente	23.9	23.9	23.2	23.3
2 - nZEB	28.2	28.6	27.4	27.8
3 - nZEB + schermature solari	25.4	25.9	24.5	25.0
4 - nZEB + schermature solari + vent. notturna	23.9	24.1	23.0	23.1

PALERMO	int_est	cop_est	int_sud	cop_sud	int_est	cop_est	int_sud	cop_sud
	h				%			
To	1 - esistente							
25	326	322	279	289	46	46	40	41
26	239	263	211	228	34	37	30	32
27	154	177	152	168	22	25	22	24
28	112	127	95	111	16	18	14	16
29	68	83	65	71	10	12	9	10
30	33	49	41	53	5	7	6	8
	2 - nZEB							
25	610	627	565	602	87	89	80	86
26	560	582	499	538	80	83	71	77
27	474	512	416	456	68	73	59	65
28	391	420	324	367	56	60	46	52
29	318	349	277	309	45	50	39	44
30	238	282	221	260	34	40	31	37
	3 - nZEB + schermature solari							
25	440	481	362	413	63	69	52	59
26	322	380	256	299	46	54	36	43
27	209	288	183	235	30	41	26	33
28	170	202	111	177	24	29	16	25
29	91	167	66	108	13	24	9	15
30	50	92	36	64	7	13	5	9
	4 - nZEB + schermature solari + ventilazione notturna							
25	253	290	207	227	36	41	29	32
26	161	194	116	166	23	28	17	24
27	94	144	70	91	13	21	10	13
28	46	71	40	56	7	10	6	8
29	23	43	6	33	3	6	1	5
30	0	12	0	1	0	2	0	0
	media 1	media 2	media 3	media 4	media 1	media 2	media 3	media 4
25	304	601	424	244	43	86	60	35
26	235	545	314	159	34	78	45	23
27	163	465	229	100	23	66	33	14
28	111	376	165	53	16	53	24	8
29	72	313	108	26	10	45	15	4
30	44	250	61	3	6	36	9	0

Configurazione	Temperatura operativa media (°C)			
	int_est	cop_est	int_sud	cop_sud
1 - esistente	24.9	25.0	25.5	25.6
2 - nZEB	29.0	29.6	30.1	30.6
3 - nZEB + schermature solari	26.7	27.3	26.4	27.1
4 - nZEB + schermature solari + vent. notturna	24.7	25.1	24.6	25.0

3. Concentrazione media giornaliera di anidride carbonica durante le ore di occupazione. L'aula di riferimento è interpiano con orientamento sud.

Concentrazione media giornaliera di CO ₂ (ppm)													
G	MI_esis	MI_nZEB	RM_esis	RM_nZEB	PA_esis	PA_NZEB	G	MI_esis	MI_nZEB	RM_esis	RM_nZEB	PA_esis	PA_NZEB
2	2002	2079	2190	2228	2596	2685	131	2556	2544	2761	2656	3019	2713
3	2018	2094	2239	2301	2924	2818	132	2327	2294	2509	2448	2822	2632
4	1946	2020	2204	2261	2500	2497	133	2552	2589	2869	2774	3035	2811
5	1949	2026	2177	2269	2509	2499	135	2665	2604	3043	2871	3364	2889
6	1936	2011	2125	2189	2538	2491	136	2539	2510	3091	2799	3125	2809
7	1925	1999	2164	2236	2556	2636	137	2657	2580	2791	2684	3130	2774
9	1863	1931	2074	2131	2438	2394	138	2582	2516	2965	2712	3134	2778
10	1911	1984	2129	2184	2491	2450	139	2959	2731	2941	2758	3077	2775
11	1877	1941	2123	2175	2519	2507	140	4102	3134	4267	3338	4692	4871
12	1792	1854	1947	2001	2292	2286	142	3033	2777	3135	2812	3207	2940
13	1793	1855	1977	2036	2411	2443	143	2964	2689	3236	2861	3322	2993
14	1827	1892	2019	2079	2460	2500	144	2773	2596	2907	2666	3055	2790
16	1838	1904	2049	2116	2418	2448	145	2858	2633	2996	2698	3138	2777
17	1869	1937	2148	2203	2548	2579	146	2891	2617	3144	2852	3252	2818
18	1946	2022	2298	2362	2698	2721	147	4222	3165	3626	2974	3529	3091
19	2022	2103	2294	2360	2747	2770	149	3046	2711	2991	2701	3101	2781
20	1973	2051	2308	2391	2654	2683	150	2976	2637	3132	2739	3062	2689
21	1988	2068	2360	2459	2783	2834	257	3270	2516	3291	2641	3961	2857
23	1947	2023	2288	2331	2624	2605	258	2857	2444	2960	2485	3302	2747
24	1832	1897	2151	2187	2422	2410	259	3178	2562	3055	2535	3355	2749
25	1872	1940	2215	2254	2453	2438	261	2836	2468	3350	2628	3237	2712
26	1945	2010	2360	2372	2703	2708	262	2647	2378	3074	2538	3210	2658
27	1996	2110	2503	2510	2632	2621	263	2558	2334	3026	2537	3103	2610
28	1912	1985	2311	2374	2637	2690	264	2618	2367	2976	2579	3236	2681
30	1988	2065	2513	2514	2756	2689	265	2737	2406	2965	2533	2997	2586
31	2035	2120	2596	2613	2855	2832	266	3227	2571	3508	2819	3283	2701
32	2025	2108	2470	2534	2765	2706	268	2599	2383	3263	2727	3234	2703
33	2017	2095	2421	2485	2653	2622	269	2565	2358	2904	2551	2983	2572
34	1965	2043	2263	2328	2522	2491	270	2685	2422	2859	2566	2993	2585
35	1878	1947	2052	2105	2494	2494	271	2523	2360	2744	2458	2816	2494
37	1874	1942	2198	2275	2468	2407	272	2511	2403	3065	2610	2964	2532
38	1934	2009	2207	2290	2515	2448	273	2502	2402	3389	2720	3826	2866
39	1863	1932	2178	2269	2485	2416	275	2317	2266	2689	2356	2854	2402
40	1856	1921	2067	2136	2467	2415	276	2373	2351	2596	2359	3031	2551
41	1891	1961	2116	2190	2555	2512	277	2428	2425	3000	2511	3324	2607
42	1937	2012	2140	2209	2585	2663	278	2499	2518	2830	2519	3101	2597
44	2015	2098	2298	2342	2559	2510	279	2531	2561	2863	2496	3210	2641
45	1816	1880	1998	2080	2284	2238	280	2594	2710	3212	2655	3537	2804
46	1867	1935	2102	2150	2384	2357	282	2616	2665	2978	2535	3154	2635
47	2037	2116	2186	2227	2561	2556	283	2741	2745	3027	2598	3374	2856
48	2000	2074	2358	2428	2691	2674	284	2926	2824	3268	2821	3349	2952

49	1935	2010	2157	2221	2538	2611	285	2582	2581	2908	2550	3038	2656
51	2033	2114	2312	2320	2801	2726	286	2648	2575	2854	2512	2945	2585
52	2100	2162	2425	2426	3035	2842	287	2968	2791	2876	2537	3064	2636
53	2143	2240	2567	2588	3102	3056	289	2307	2312	2645	2378	2719	2421
54	2007	2098	2302	2323	2709	2724	290	2344	2333	2773	2445	2920	2471
55	2065	2148	2291	2301	2710	2713	291	2328	2320	2850	2463	2899	2454
56	2045	2126	2294	2387	2844	2790	292	2309	2302	2628	2412	2905	2450
58	2048	2150	2398	2362	2646	2612	293	2662	2566	3205	2688	3135	2610
59	2100	2162	2422	2409	2735	2654	294	2539	2574	3365	2774	3293	2640
60	2067	2124	2363	2391	2533	2475	296	2237	2280	2590	2450	2801	2383
61	2097	2143	2336	2358	2507	2429	297	2265	2308	2636	2477	2902	2430
62	2006	2072	2202	2231	2486	2428	298	2240	2285	2529	2410	2903	2467
63	1948	2007	2171	2210	2554	2474	299	2159	2171	2366	2300	2993	2493
65	2115	2231	2370	2385	2531	2439	300	2163	2202	2502	2398	3114	2529
66	2063	2140	2292	2337	2533	2454	301	2025	2087	2427	2407	3304	2651
67	1898	1969	2174	2225	2346	2286	303	2334	2335	2642	2527	3594	2769
68	1952	2020	2186	2240	2450	2393	304	2265	2290	2526	2441	3275	2688
69	2010	2119	2216	2274	2509	2451	305	1941	2025	2170	2092	2700	2420
70	2086	2173	2385	2449	2701	2745	306	2025	2121	2245	2218	2756	2536
72	2172	2232	2370	2402	2519	2471	307	2086	2192	2244	2228	2739	2567
73	2172	2287	2332	2369	2525	2489	308	2028	2113	2299	2377	2901	2729
74	2176	2280	2461	2527	2694	2611	310	2210	2266	2335	2309	2870	2682
75	2212	2285	2380	2439	2677	2607	311	2257	2316	2428	2405	2849	2686
76	2602	2662	2653	2713	4625	3628	312	2279	2339	2668	2638	3320	2888
77	2222	2309	2538	2646	3093	2923	313	2314	2349	2649	2687	3078	2863
79	2165	2217	2357	2359	2517	2468	314	2384	2456	2696	2687	3331	2975
80	2181	2238	2337	2329	2560	2494	315	2537	2672	3355	3154	4076	3451
81	2383	2413	2533	2524	2664	2561	317	2221	2301	2516	2493	2795	2538
82	2265	2317	2415	2420	2794	2632	318	2170	2242	2430	2416	2810	2504
83	2309	2359	2405	2410	2728	2614	319	2066	2157	2358	2374	2732	2430
84	2313	2402	2560	2627	2856	2774	320	2148	2281	2357	2381	2742	2434
86	2432	2442	2557	2532	2875	2759	321	2173	2250	2460	2470	2848	2493
87	2409	2435	2519	2504	2769	2650	322	2072	2161	2467	2493	3112	2620
88	2244	2278	2459	2445	2669	2572	324	2205	2287	2717	2637	3044	2661
89	2380	2398	2601	2581	2816	2713	325	2126	2196	2563	2542	2716	2439
90	2424	2427	2587	2577	3362	3145	326	2142	2219	2429	2452	3173	2668
91	2185	2257	2346	2417	2980	2780	327	2150	2240	2674	2698	3324	2742
93	2093	2170	2184	2192	2541	2495	328	1975	2048	2316	2380	2691	2481
94	2210	2287	2320	2371	2802	2718	329	1998	2080	2440	2508	3280	2873
95	2562	2688	2383	2436	3166	2891	331	1953	2039	2261	2268	2851	2670
96	2362	2407	2457	2504	3016	2792	332	1941	2050	2129	2160	2639	2551
97	2509	2605	2651	2680	3243	2887	333	1910	1982	2050	2113	2502	2463
98	2521	2627	2648	2675	3371	2950	334	1926	2000	2125	2204	2585	2553
100	2746	2720	3023	2856	3424	2943	335	2029	2114	2192	2234	2785	2632
101	2808	2764	2966	2853	3471	3091	336	1933	2008	2043	2105	2669	2774
102	2424	2472	2479	2464	2783	2611	338	2111	2203	2322	2353	2734	2739

103	2424	2489	2495	2428	2821	2584	339	1965	2043	2174	2214	2574	2567
104	2387	2461	2485	2477	2815	2566	340	1931	2006	2099	2147	2578	2486
105	2287	2415	2454	2526	2909	2608	341	1963	2041	2177	2216	2649	2642
107	2298	2349	2540	2568	2856	2626	342	1993	2074	2218	2330	2695	2693
108	2176	2228	2382	2427	2742	2566	343	1917	1990	2195	2265	2651	2709
109	2168	2223	2303	2348	2656	2496	345	1887	1958	2123	2158	2423	2400
110	2155	2160	2443	2489	2684	2565	346	2012	2095	2291	2351	2736	2671
111	2090	2117	2371	2430	2731	2601	347	1891	1962	2225	2270	2714	2658
112	2212	2336	2451	2578	2802	2747	348	2061	2146	2425	2437	2769	2743
114	2218	2269	2509	2462	2659	2609	349	1989	2069	2472	2496	2756	2733
115	2393	2443	2852	2838	2682	2630	350	2230	2330	2787	2860	4448	3356
116	2347	2419	2833	2874	2831	2690	352	2144	2221	2602	2639	3615	3217
117	2339	2364	2985	2901	2758	2672	353	2083	2170	2489	2518	3006	2946
118	2192	2217	2569	2619	2734	2619	354	2033	2118	2439	2454	2861	2821
119	2067	2129	2453	2540	2616	2594	355	1852	1919	2234	2236	2485	2470
121	2461	2506	2747	2746	3039	2831	356	1973	2052	2490	2468	2661	2627
122	2614	2645	2887	2828	3455	3001	357	1875	1944	2384	2491	2856	2724
123	2546	2605	3172	2910	3283	2926	359	1788	1849	1990	2084	2390	2314
124	2486	2559	2863	2777	3082	2817	360	1790	1852	2048	2096	2434	2376
125	2550	2590	3059	2816	3548	3077	361	1829	1894	2106	2208	2427	2378
126	2741	2734	3333	2961	3581	3091	362	1860	1928	2321	2362	2696	2627
128	2356	2359	2602	2528	2896	2668	363	1935	2010	2422	2449	2936	2840
129	2361	2363	2616	2546	2878	2642	364	1950	2027	2428	2511	3202	3121
130	2333	2338	2552	2502	2784	2611							