



Ricerca di Sistema elettrico

Caratterizzazione degli edifici non residenziali ad uso scolastico della PA siciliana

*M. Cellura, F. Guarino, V. La Rocca, V. Lo Brano,
G. Maniscalco, M. Morale*



CARATTERIZZAZIONE DEGLI EDIFICI NON RESIDENZIALI AD USO SCOLASTICO DELLA PA SICILIANA

M. Cellura, F. Guarino, V. La Rocca, V. Lo Brano, G. Maniscalco, M. Morale (Università di Palermo, Dipartimento di Energia, Ingegneria dell'Informazione e Modelli Matematici - DEIM)

Settembre 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2013

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto: Sviluppo di modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica sul patrimonio immobiliare pubblico

Obiettivo: Edifici pubblici tipo, Indici di benchmark di consumo per tipologie di edificio ad uso ufficio e scuole, Applicabilità di tecnologie innovative e modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica

Responsabile del Progetto: Gaetano Fasano, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "*Caratterizzazione degli edifici scolastici nella Regione Sicilia*"

Responsabile scientifico ENEA: Gaetano Fasano

Responsabile scientifico Maurizio Cellura

Indice

SOMMARIO.....	5
1 OBIETTIVI	7
PARTE A	8
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE.....	8
2.1 SELEZIONE DEI CASI-STUDIO.....	8
2.2 EDIFICI ANALIZZATI	8
3 EDIFICIO 1	10
3.1 GEOMETRIA	10
3.2 SUDDIVISIONE IN ZONE TERMICHE.....	12
3.3 ELEMENTI COSTRUTTIVI	15
3.4 ASSUNZIONI NELLA MODELLIZZAZIONE	16
3.4.1 <i>Livelli di occupazione interna e apporti termici conseguenti</i>	16
3.4.2 <i>Illuminazione artificiale</i>	20
3.4.3 <i>Apparecchiature elettriche</i>	20
3.4.4 <i>Protezioni solari</i>	20
3.4.5 <i>Ventilazione naturale</i>	21
3.4.6 <i>Infiltrazioni d'aria</i>	22
3.4.7 <i>Impianto di riscaldamento</i>	22
4 EDIFICIO 2	24
4.1 GEOMETRIA	24
4.2 SUDDIVISIONE IN ZONE TERMICHE.....	25
4.3 ELEMENTI COSTRUTTIVI	28
4.4 ASSUNZIONI NELLA MODELLIZZAZIONE	29
4.4.1 <i>Livelli di occupazione e apporti termici interni conseguenti</i>	30
4.4.2 <i>Illuminazione artificiale</i>	32
4.4.3 <i>Apparecchiature elettriche</i>	32
4.4.4 <i>Protezioni solari</i>	32
4.4.5 <i>Ventilazione naturale</i>	32
4.4.6 <i>Infiltrazione d'aria</i>	33
4.4.7 <i>Impianto di riscaldamento</i>	33
5 EDIFICIO 3	34
5.1 GEOMETRIA	34
5.2 SUDDIVISIONE IN ZONE TERMICHE.....	36
5.3 ELEMENTI COSTRUTTIVI	39
5.4 ASSUNZIONI NELLA MODELLIZZAZIONE	41
5.4.1 <i>Livelli di occupazione</i>	41
5.4.2 <i>Illuminazione artificiale</i>	43
5.4.3 <i>Apparecchiature elettriche</i>	43
5.4.4 <i>Protezioni solari</i>	43
5.4.5 <i>Ventilazione naturale</i>	43
5.4.6 <i>Infiltrazione d'aria</i>	43
5.4.7 <i>Impianto di riscaldamento</i>	43
6 PRESTAZIONI ENERGETICHE DEGLI EDIFICI	44

PARTE B.....	52
7 VENTILATIVE COOLING.....	52
7.1 STATO DELL'ARTE: CLASSIFICAZIONE DELLE PRINCIPALI TECNICHE DI "VENTILATIVE COOLING".....	52
7.1.1 <i>Raffrescamento Geotermico</i>	52
7.1.2 <i>Raffrescamento evaporativo</i>	53
7.1.3 <i>Ventilazione diurna e notturna</i>	54
7.2 COMPONENTI E SOLUZIONI TECNICHE.....	56
7.3 CASI STUDIO SIGNIFICATIVI DEL SETTORE NON-RESIDENZIALE.....	57
7.3.1 <i>Studio sulla ventilazione notturna in tre edifici non residenziali ad Atene, Grecia</i>	57
8 CONCLUSIONI.....	61
9 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	62

Sommario

La presente relazione finale descrive le ricerche svolte, in seno all'accordo di collaborazione tra l'ENEA e il Dipartimento dell'Energia, ingegneria dell'Informazione e modelli Matematici (DEIM) dell'Università di Palermo. L'accordo di collaborazione è intitolato *“Caratterizzazione degli edifici scolastici nella Regione Sicilia”*. La relazione è suddivisa in due sezioni: la prima, Parte A, illustra lo studio condotto per la caratterizzazione degli edifici non residenziali ad uso scolastico della PA siciliana; la seconda, Parte B, descrive lo stato dell'arte del *“Ventilative Cooling”* con riferimento particolare ad alcuni casi-studio reali, nel contesto della partecipazione del DEIM alle attività dell'IEA EBC ANNEX 62”.

Nel corso dell'annualità precedente è stata effettuata un'analisi della consistenza, dello stato, e delle tipologie di involucro più significative del patrimonio edilizio scolastico siciliano, utilizzando dati statistici disponibili in letteratura e indagini di campo. Nel corso di questa annualità si è identificato un ristretto campione di edifici scolastici rappresentativo del patrimonio edilizio siciliano. Si tratta di tre edifici adibiti a strutture scolastiche relative a differenti gradi di istruzione: una scuola elementare, una media ed una superiore. In particolare, l'edificio che ospita la scuola elementare ha subito negli ultimi anni estesi interventi di ristrutturazione e riqualificazione energetica; il confronto tra le prestazioni energetiche dell'edificio riqualificato con quelle relative agli altri due edifici campione ha permesso di valutare i risparmi energetici indotti dall'introduzione di nuove normative di settore sugli edifici scolastici.

Gli edifici analizzati sono sufficientemente rappresentativi della eterogeneità del patrimonio edilizio scolastico siciliano poiché si tratta di:

- edifici differenti posti nelle zone climatiche B e C, che caratterizzano più del 65% dei Comuni siciliani,
- edifici dalle caratteristiche termofisiche differenti: trasmittanze (U) tipiche delle costruzioni degli anni '70 ($U_{\text{superfici_verticali}} > 1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) ed edifici recentemente ristrutturati (U conforme al DPR n. 59/2009),
- edifici che ospitano scuole di differente ordine e grado.

Lo studio è stato sviluppato a partire da un approccio preliminare di raccolta ed analisi dei dati per ciascun edificio. L'analisi sistematica dei casi-studio ha consentito di desumere le caratteristiche fondamentali per la modellizzazione: stratigrafia, spessori e qualità termofisica dell'involucro edilizio, apporti termici interni causati da apparecchiature elettroniche ed illuminanti, livelli di occupazione in ogni zona dell'edificio e relativi apporti termici interni, caratteristiche degli impianti termici e modalità di funzionamento. L'analisi non ha tralasciato di esaminare *“abitudini”* e *“pratiche comuni”* utilizzate nella gestione degli immobili, come ad esempio la tendenza degli occupanti ad aprire le finestre o a utilizzare schermature solari in alcune fasce orarie nel corso dell'anno. Il passaggio seguente ha riguardato la suddivisione di ognuno dei tre edifici in opportune zone termiche, secondo logiche di uguale destinazione d'uso, di assimilabilità geometrica e di gestione comune di diversi locali da parte dello stesso impianto termico con le stesse regolazioni. Il software di calcolo prescelto per l'implementazione dei modelli è stato TRNSYS 17.01.

La struttura geometrica di ogni edificio è stata dettagliatamente modellizzata in 3D tramite il software Google Sketchup; tali modelli sono successivamente stati importati in ambiente TRNSYS. Ogni modello è stato costruito implementando accuratamente le informazioni raccolte nella fase preliminare, integrandolo con le informazioni relative agli occupanti e alla descrizione dei carichi interni dell'edificio. Le logiche di funzionamento, di regolazione e d'uso degli impianti termici sono state implementate in ognuno dei modelli.

L'analisi delle prestazioni energetiche dei tre edifici è stata effettuata tramite un set di indicatori sintetici, al fine di ottenere dei valori di riferimento e di benchmark per il patrimonio edilizio scolastico della Regione Sicilia; tra di essi il fabbisogno energetico per riscaldamento annuo, il fabbisogno energetico per riscaldamento annuo riferito alla superficie in pianta o al numero di studenti. Si riportano di seguito alcuni risultati espressi grazie ai predetti indicatori specifici.

Casi studio	Zona climatica	kWh/a	kWh/(m ² *a)	kWh/(studente*a)	Ordine di istruzione
Edificio 1	C	13.358,46	20,60	64,53	Scuola media superiore
Edificio 2	C	38.048	21,87	93,25	Scuola media inferiore
Edificio 3	B	2.533,33	2,94	6,21	Scuola elementare

Dai risultati emersi dalle analisi, si evince che i primi due edifici (edificio 1 e edificio 2) sono caratterizzati da un fabbisogno energetico per il riscaldamento nettamente superiore al terzo. In particolare, il consumo specifico (kWh/(m²*anno)) del terzo edificio risulta essere pari a circa il 14% del consumo specifico dell'edificio 1 e il 13% dell'Edificio 2.

Questi dati sono giustificati dal fatto che l'edificio 3 ha subito estesi interventi di ristrutturazione e riqualificazione energetica negli ultimi anni. Infatti, analizzando le caratteristiche termofisiche degli edifici, si è rilevato altresì che i primi due edifici presentano elementi finestrati conformi al D.lgs 192/2005, mentre gli elementi opachi esterni hanno caratteristiche tipiche di edifici risalenti al periodo precedente al 1930; il terzo edificio, invece, è caratterizzato da elementi opachi e finestrati conformi alle più recenti normative (DPR n.59/2009), nonché da un impianto termico più moderno ed efficiente e da un sistema di regolazione più efficace.

La seconda parte del lavoro illustra lo stato dell'arte del "Ventilative Cooling" (raffrescamento per ventilazione) e tratta le tecniche di controllo passive e attive della movimentazione dei flussi d'aria all'interno degli ambienti confinati. L'importanza dello studio di tali tecniche è generata da un crescente interesse nell'uso della ventilazione quale strategia per garantire anche il comfort ambientale nel periodo estivo e nelle stagioni intermedie, limitando il ricorso ai sistemi di refrigerazione in un'ottica di risparmio energetico.

Il lavoro è stato sviluppato nel novero delle attività dell' "International Energy Agency – Energy in buildings and communities Annex 62, Ventilative Cooling".

Il DEIM partecipa ai lavori della Subtask A dell'Annex 62 suddetto, che focalizza il suo interesse sulla simulazione termofisica e sull'analisi del contesto legislativo a scala internazionale.

Il gruppo di lavoro del DEIM ha partecipato al primo meeting dell'Annex 62, svoltosi all'Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL) in Svizzera in qualità di "observer"; i lavori sono stati focalizzati principalmente sul completamento del report interno sullo stato dell'arte nelle pratiche di "Ventilative Cooling".

Il contributo del DEIM ai lavori dell'Annex 62 è relativo:

- all'analisi dello stato dell'arte del "Ventilative Cooling" e alle potenziali applicazioni e implementazioni di tali contributi nella legislazione locale italiana;
- alla modellizzazione del "Ventilative Cooling".

1 Obiettivi

L'edilizia scolastica rappresenta il 31% dell'intero patrimonio edilizio pubblico siciliano e costituisce un settore che richiede interventi strategici orientati all'efficienza energetica, in accordo agli obiettivi fissati dalle più recenti politiche europee sul risparmio energetico [1]. La Direttiva 2012/27/UE fissa per ogni Stato Membro una quota di riqualificazione energetica minima del patrimonio edilizio pubblico da eseguire annualmente a partire dal 1 gennaio 2014, quota corrispondente al 3 % della superficie coperta utile totale degli edifici pubblici riscaldati e/o raffrescati [2].

Gli obiettivi generali dell'attività qui presentata sono:

- analisi di benchmark di edifici campione ai fini di una caratterizzazione del patrimonio edilizio non residenziale ad uso scolastico della Pubblica Amministrazione siciliana;
- analisi dello stato dell'arte delle tecniche di "Ventilative Cooling" e applicazione delle stesse ad alcuni casi studio, al fine di stimare i conseguenti risparmi energetici ottenibili nel condizionamento estivo del settore dell'edilizia scolastica, mantenendo tuttavia elevati standard di comfort degli ambienti confinati.

Partendo dai risultati dello studio svolto nel corso dell'annualità precedente [3], che ha riguardato l'analisi della consistenza, dello stato e delle tipologie di involucro di un campione significativo di edifici scolastici siciliani, sono stati selezionati alcuni casi studio rappresentativi del patrimonio edilizio scolastico in termini di fascia climatica, densità di popolazione e tipologia di involucro. Le fasi successive hanno riguardato la raccolta dei dati e la creazione di modelli termofisici dettagliati in ambiente TRNSYS.

Per ognuno dei casi studio in esame è stata inoltre effettuata un'analisi dei consumi energetici, descritti tramite degli indici di consumo specifico al fine di ottenere valori di riferimento e di benchmark per il patrimonio edilizio scolastico siciliano. I risultati mostrano che le prestazioni energetiche dei casi studio selezionati variano da circa 3 kWh/(m²*anno) a circa 20 kWh/(m²*anno), in funzione delle caratteristiche termofisiche dell'involucro e delle caratteristiche climatiche del sito.

I risultati evidenziano altresì che l'introduzione di tecniche di "Ventilative Cooling" nei contesti scolastici analizzati, privi nella maggioranza dei casi di impianto di raffrescamento, potrebbe garantire un significativo miglioramento delle condizioni di comfort termoigrometrico all'interno degli spazi confinati.

PARTE A

2 Descrizione delle attività svolte

Di seguito sono descritte le caratteristiche e peculiarità che hanno portato alla selezione del campione di edifici e la costruzione dei modelli, e che hanno inoltre consentito di effettuare delle simulazioni volte a determinare le prestazioni energetiche degli stessi, che sono state riassunte tramite un set di indicatori sintetici.

2.1 Selezione dei casi-studio

La selezione degli edifici oggetto di studio è stata effettuata in seguito ad un'analisi volta all'ottenimento di un campione quanto più eterogeneo e rappresentativo del patrimonio edilizio scolastico siciliano.

Al fine di massimizzare la rappresentatività del campione selezionato, i tre edifici sono stati individuati in zone climatiche differenti, in zone geografiche dalla densità abitativa diversa ed appartenenti a ordini di istruzione differenti.

Gli edifici selezionati sono appartenenti alle zone climatiche B (comprendente circa il 24% degli edifici scolastici siciliani [4]) e C (comprendente circa il 42% degli edifici scolastici siciliani [4]).

Si trovano inoltre all'interno di contesti territoriali che presentano delle densità di popolazione pari a: 143,9 [abitanti/km²] (edificio 1), 162,3 [abitanti/km²] (edificio 2) e 212,7 [abitanti/km²] (edificio 3). Gli ordini di istruzione di appartenenza delle tre scuole sono: Secondaria Superiore, Secondaria Inferiore e Primaria.

Nella tabella 2.1 sono riepilogate le caratteristiche climatiche, territoriali e del periodo di costruzione dei tre edifici scolastici oggetto di studio.

Tabella 2.1: Schema dei contesti edilizi del campione analizzato.

Casi studio	Zona climatica	Densità di popolazione [abitanti/km ²]	Ordine di istruzione	Periodo di costruzione [3]
Edificio 1	C	143,9	Scuola media superiore	1961-75
Edificio 2	C	162,3	Scuola media inferiore	anni '70
Edificio 3	B	212,7	Scuola elementare	Recentemente riquilificato energeticamente

2.2 Edifici analizzati

I tre edifici presentano differenze per caratteristiche geometriche, profili di occupazione, caratteristiche impiantistiche e termofisiche e sono stati suddivisi opportunamente in zone termiche, secondo criteri di uguale destinazione d'uso, di assimilabilità geometrica e di gestione comune di diversi locali da parte dello stesso impianto termico con le stesse regolazioni.

I modelli sono stati implementati in ambiente di calcolo TRNSYS 17.01, software commerciale basato sul metodo "Heat Balance" che permette di simulare in regime dinamico con risoluzione temporale variabile in accordo alle preferenze dell'analista. Nel caso in specie i sistemi edificio-impianto analizzati sono stati esaminati su base oraria.

In dettaglio, le caratteristiche dell'ambiente confinato sono state implementate nel modello attraverso la selezione dei seguenti dati:

- caratteristiche geometriche, termofisiche e costruttive dell'involucro edilizio

- apporti termici interni da occupanti, apparecchiature elettriche e dispositivi di illuminazione
- sistemi di controllo della temperatura interna delle zone termiche
- sistemi di interazione tra impianto di riscaldamento con la zona termica.

In generale, nel caso di irreperibilità di un dato richiesto dalla modellizzazione, si fa riferimento a dati di letteratura di settore.

Le sezioni 3, 4 e 5, successivamente riportate, descrivono rispettivamente le caratteristiche dei modelli dei tre casi studio analizzati.

Nella sezione 6 sono presentati i risultati ottenuti per le prestazioni energetiche e gli andamenti delle temperature dell'aria interna in alcune zone termiche in periodi rilevanti dell'anno. Inoltre si è eseguita un'analisi dei consumi attraverso degli indicatori sintetici.

3 Edificio 1

Il primo edificio campione è una scuola secondaria superiore che presenta caratteristiche termofisiche dell'involucro tipiche del periodo 1961-1975 [3]; è localizzato nella fascia climatica C e si trova in un territorio avente una densità di popolazione di 143,9 abitanti/km².

3.1 Geometria

L'edificio si sviluppa su due livelli, ha una superficie in pianta complessiva di 675,46 m² (337,73 m² per piano) con un volume totale di 2634,3 m³ ed una superficie vetrata complessiva di 92,24 m².

Le zone termiche adibite ad aule presentano una percentuale di superficie vetrata media pari a circa il 34%. Le figure 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 rappresentano rispettivamente la vista sud, nord, ovest ed est dell'edificio 1.

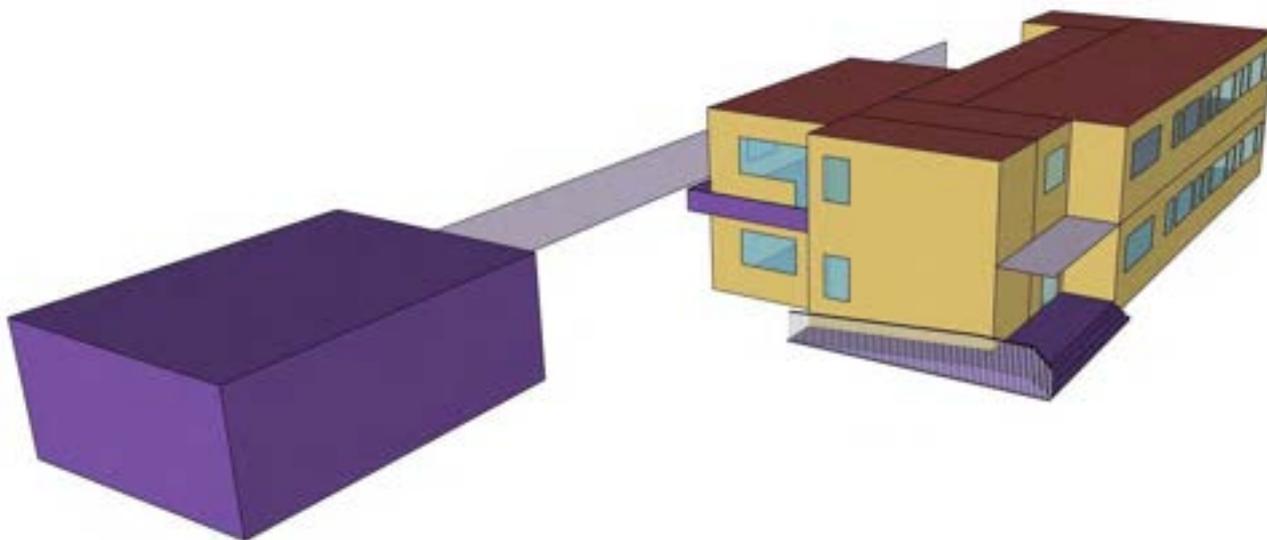


Figura 3.1 : Vista Sud

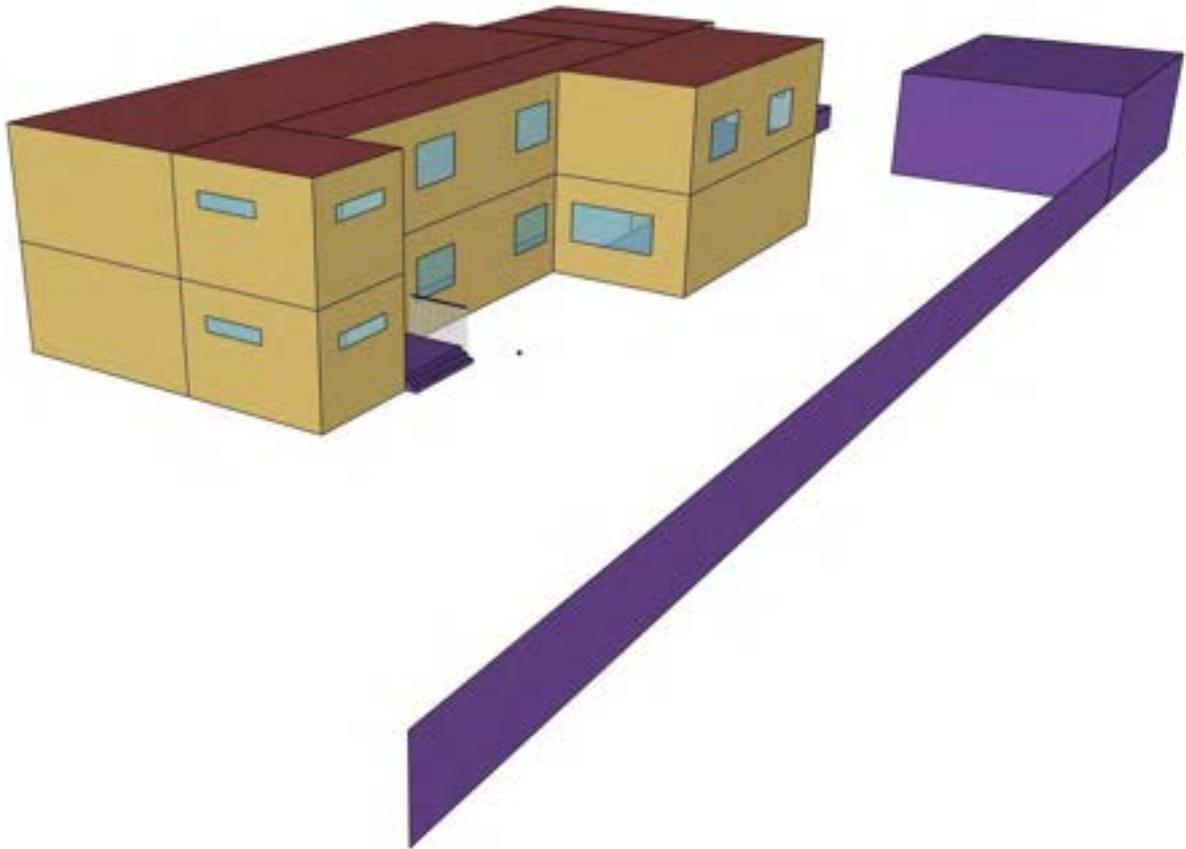


Figura 3.2 : Vista Nord

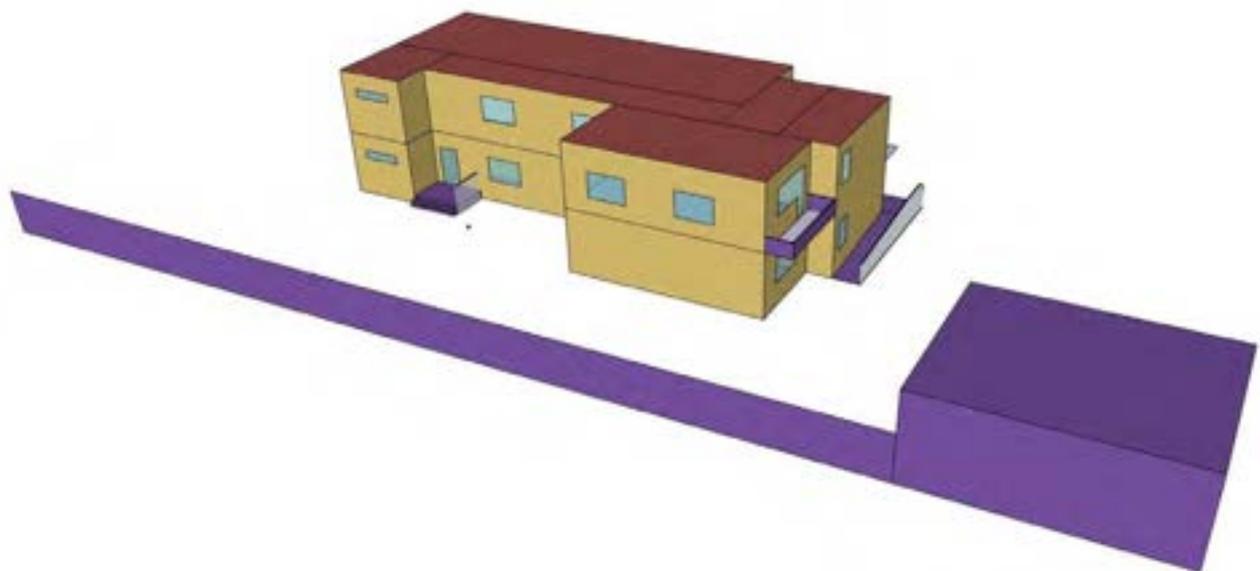


Figura 3.3 Vista Ovest

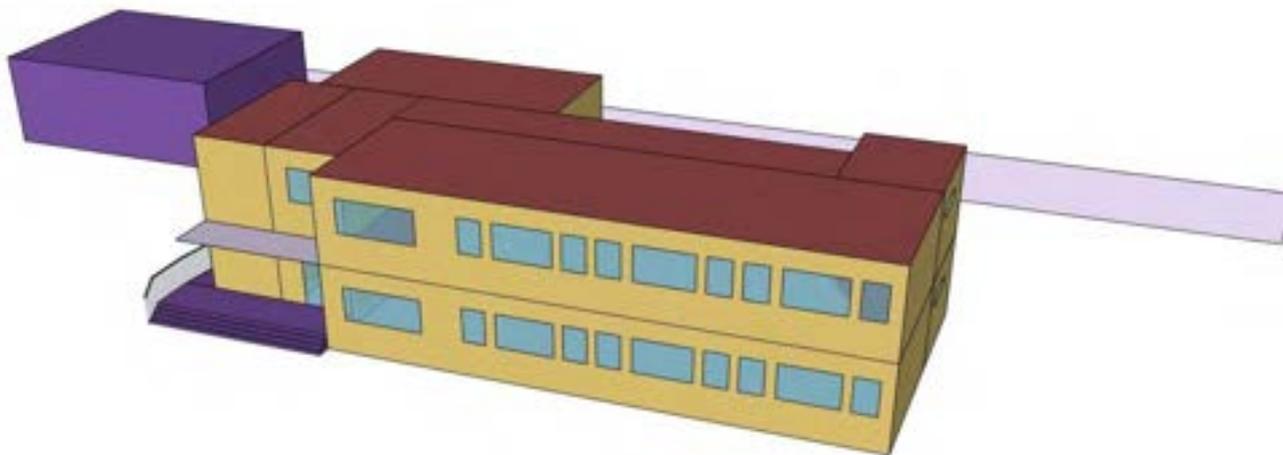


Figura 3.4 : Vista Est

3.2 *Suddivisione in zone termiche*

La tabella 3.1 riassume le zone termiche individuate per il caso studio e la relativa superficie calpestabile.

Tabella 3.1: suddivisione del modello in zone termiche

zona termica	Tipo di zona	Superficie [m²]
A	Ingresso	26,85
B	corridoio piano terra	57,12
C	aule piano terra	166,09
D	ufficio amministrazione	65,29
E	scale	26,38
F	corridoio primo piano	83,97
G	aula primo piano	166,09
H	aule primo piano	65,29
I	bagni piano terra	22,38
L	bagni primo piano	22,38

La figura 3.5 rappresenta la zona termica L, la figura 3.6 l'ufficio dell'amministrazione D e la figura 3.7 la zona C.

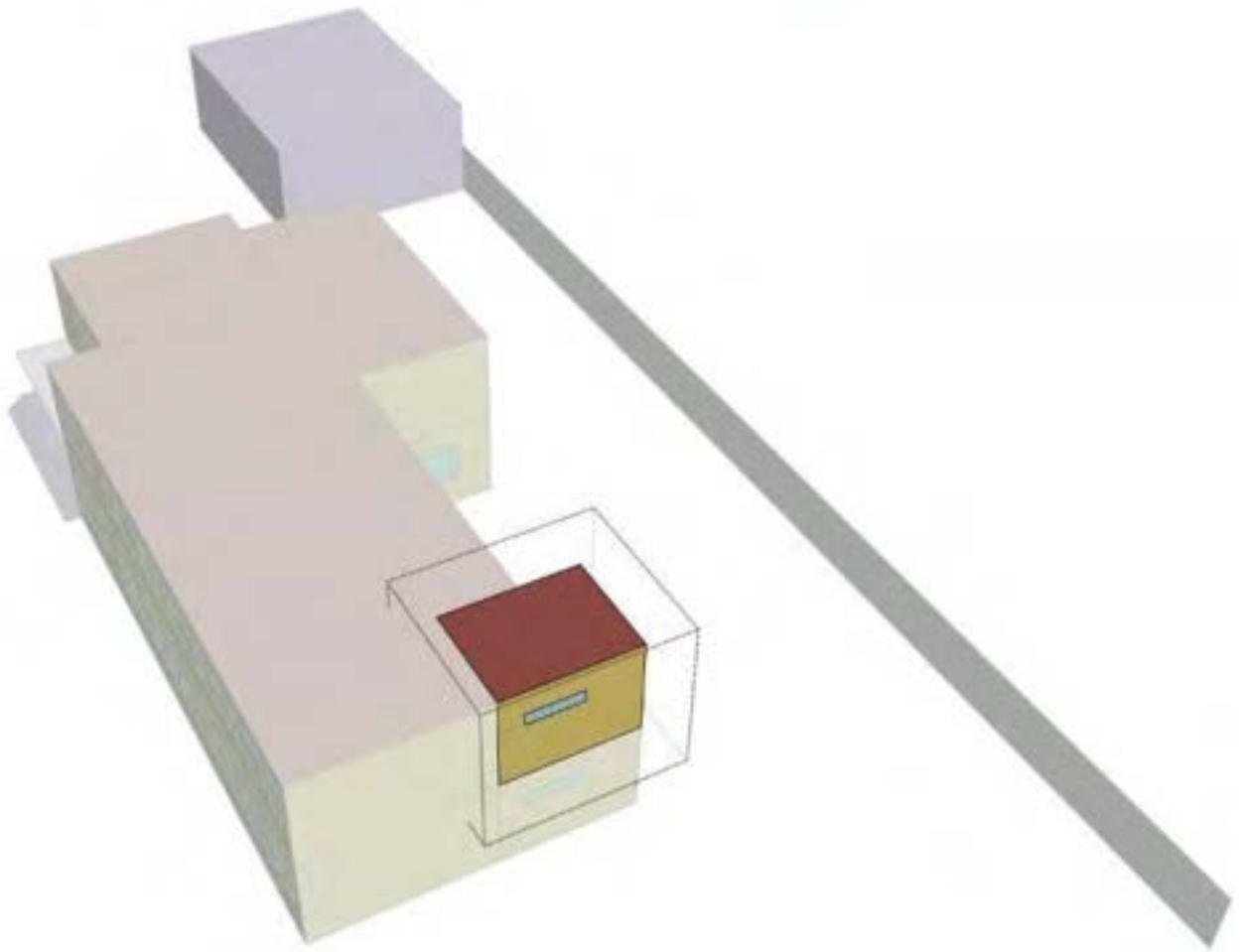


Figura 3.5: Zona termica L "corridoio primo piano".

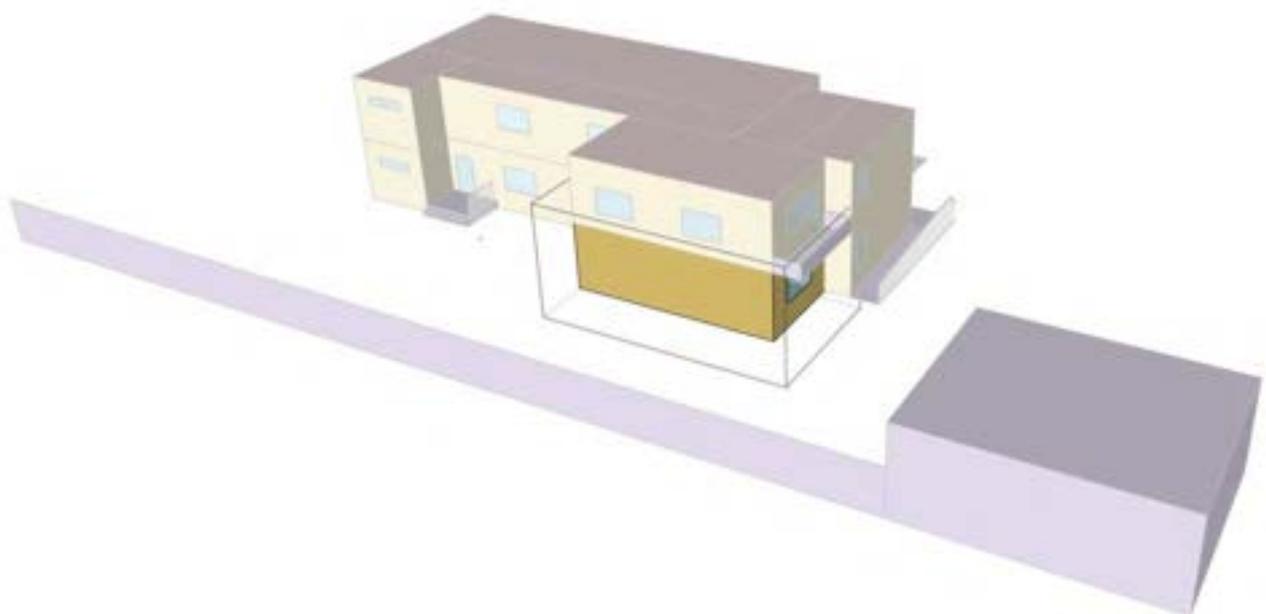


Figura 3.6: Zona termica D "ufficio amministrazione".

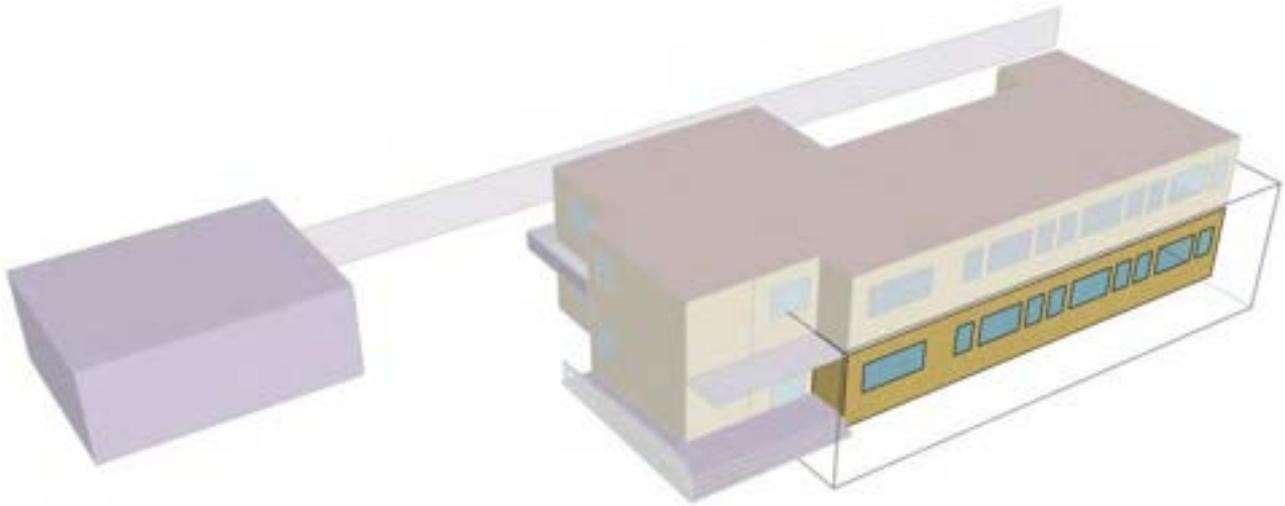


Figura 3.7: Zona termica C “aule piano terra”.

In figura 3.8 si riporta lo schema del sistema edificio-impianto implementato in ambiente TRNSYS.

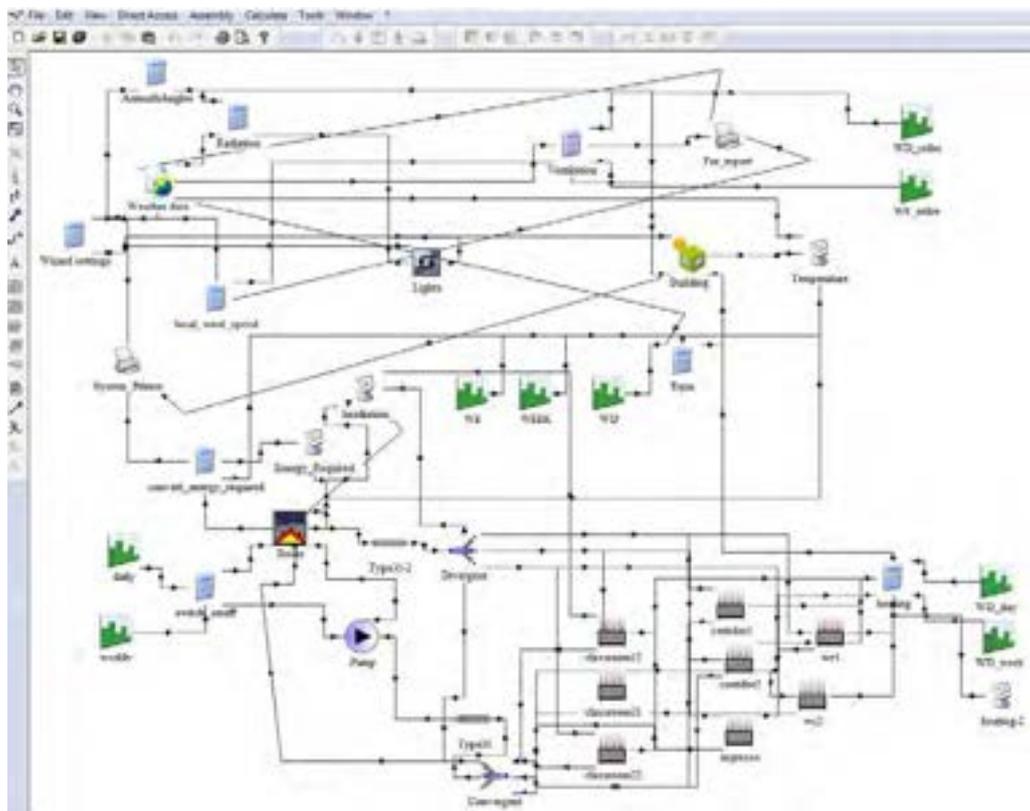


Figura 3.8: schema del sistema edificio-impianto dell'edificio 1.

3.3 Elementi costruttivi

Di seguito le caratteristiche termofisiche degli elementi opachi e trasparenti dell'edificio 1. I valori di U di tali strutture sono tipici delle soluzioni architettoniche più comunemente utilizzate nel periodo compreso tra il 1961 e il 1975 [3].

Le tabelle 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6 riportano le caratteristiche termofisiche dell'edificio in esame.

Tabelle 3.2: Trasmittanza termica e stratigrafia delle pareti esterne

Componente	U [W/(m ² K)]
PARETE ESTERNA	1,22
Stratigrafia	Spessore [m]
ESTERNO	
Intonaco	0,02
Concio di tufo	0,45
Intonaco	0,02
INTERNO	
TOTALE	0,49

Tabelle 3.3: Trasmittanza termica e stratigrafia del solaio

Componente	U [W/(m ² K)]
SOLAIO	0,30
Stratigrafia	Spessore [m]
ESTERNO	
Guaina bituminosa	0,01
Massetto Cementizio	0,08
Solaio latero-cemento	0,12
Intonaco	0,02
INTERNO	
TOTALE	0,23

Tabelle 3.4: Trasmittanza termica e stratigrafia degli infissi esterni

Componente	U [W/(m ² K)]
INFISSI ESTERNI	2,89
Descrizione	
Vetro singolo 4 mm + Telaio metallico senza taglio termico	

Tabelle 3.5: Trasmittanza termica e stratigrafia delle pareti interne

Componente	U [W/(m ² K)]
PARETE INTERNA	1,81
Stratigrafia	Spessore [m]
ESTERNO	
Intonaco	0,02
Concio di tufo	0,15
Intonaco	0,02
INTERNO	
TOTALE	0,19

Tabelle 3.6: Trasmittanza termica e stratigrafia del solaio interno

Componente	U [W/(m ² K)]
SOLAIO INTERNO	1,58
Stratigrafia	Spessore [m]
Intonaco	0,02
Solaio latero-cemento	0,30
Massetto cementizio	0,06
Pavimento	0,02
TOTALE	0,40

3.4 Assunzioni nella modellizzazione

A seguito dell'indagine di campo e dell'analisi documentale è stato possibile definire i parametri utilizzati nella modellizzazione dell'edificio.

I paragrafi seguenti analizzano nel dettaglio le principali assunzioni del processo di modellizzazione, ovvero:

- Livelli di occupazione interna e apporti termici interni conseguenti (vedi paragrafo 3.4.1);
- Apporti termici interni dovuti a illuminazione artificiale e apparecchiature elettriche (vedi paragrafi 3.4.2 - 3.4.3);
- Presenza e l'uso di protezioni solari (vedi paragrafo 3.4.4);
- Flussi d'aria per ventilazione ed infiltrazione (vedi paragrafi 3.4.5 – 3.4.6);
- Funzionamento dell'impianto di riscaldamento (vedi paragrafo 3.4.7).

3.4.1 Livelli di occupazione interna e apporti termici conseguenti

Per determinare i livelli di occupazione della scuola in esame nella fase di modellizzazione sono stati considerati i seguenti fattori:

- orari di apertura effettivi, tenendo conto anche dello svolgimento di corsi serali didattici e di attività extrascolastiche;
- indici di affollamento;
- destinazione d'uso della zona, distinguendo tra uffici amministrativi e aule didattiche.

Con riferimento agli indici di affollamento tutte le zone termiche rispettano i limiti di legge previsti in base al grado di istruzione [5].

E' stato altresì utilizzato un approccio dinamico che permette di considerare variazioni stocastiche nel numero di studenti presenti all'interno delle aule al fine di ottenere dei carichi termici di picco variabili e più realistici.

La modellizzazione dei livelli di occupazione è stata effettuata dinamicamente con una risoluzione temporale oraria, tramite il software TRNSYS e la programmazione di un type TRNSYS predisposto ad hoc.

L'idea di base dello studio prevede la creazione di un set di probabilità integrate in un sistema basato su catene di Markov.

La Figura 3.9 rappresenta un classico sistema matematico Markoviano di transizione tra stati diversi, denominati rispettivamente "A", "B" e "#". Ad ogni iterazione infatti, il sistema ha una probabilità di effettuare una transizione verso gli altri stati o di permanere nello stato di partenza. Ad esempio, qualora al tempo $t=1$, il sistema si trova nello stato A, lo stesso potrebbe effettuare una transizione verso lo stato B, verso lo stato # o permanere nella condizione A anche per $t=2$. Tali transizioni sono vincolate alle probabilità P_{AA} , P_{AB} e $P_{A\#}$, nell'esempio proposto.

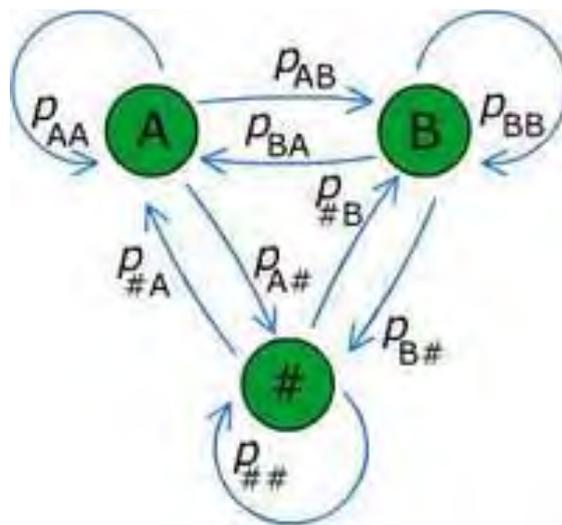


Figura 3.9: Esempio di un sistema matematico basato su una catena di Markov

Lo studio prevede un sistema basato su catene di Markov volto alla modellizzazione dinamica dei livelli di occupazione delle zone termiche. Sono stati considerati due diversi stati, ovvero “Occupante presente nella zona termica” e “Occupante assente”.

Lo stato “assente” è rappresentato dal numero “0”, lo stato “presente nella zona termica” dal numero “1”. La Transizione 0 – 1, ad esempio, indica la probabilità per ogni ora del giorno che un occupante entri nella specifica zona termica, la transizione 0 – 0, invece, indica la probabilità che lo stato di “Occupante assente” perduri anche nell’iterazione successiva (Fig. 3.10 e 3.11).

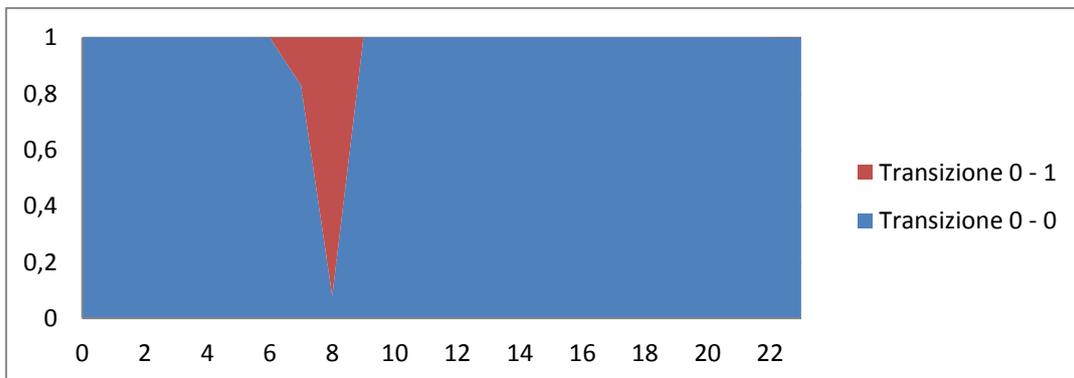


Figura 3.10: Esempio di Probabilità di transizione di stato (1)

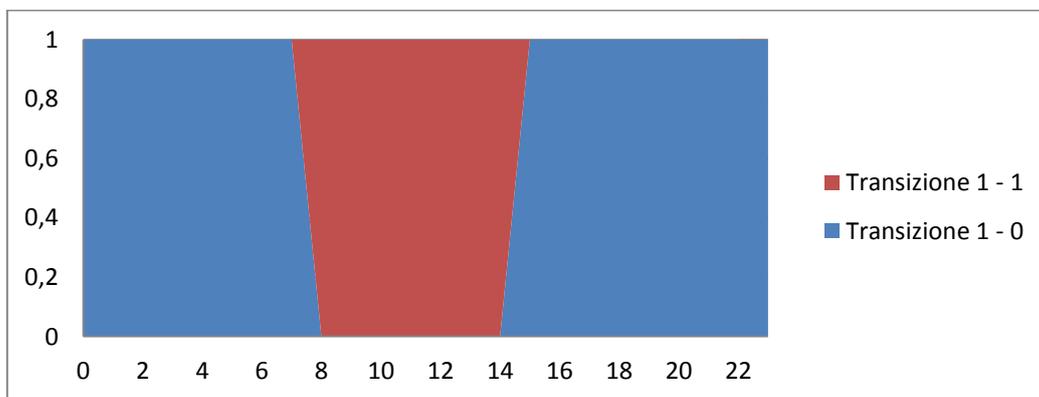


Figura 3.11: Esempio di Probabilità di transizione di stato (2)

Un tipico esempio di profilo di occupazione dinamico è riportato nella figura 3.12 seguente:

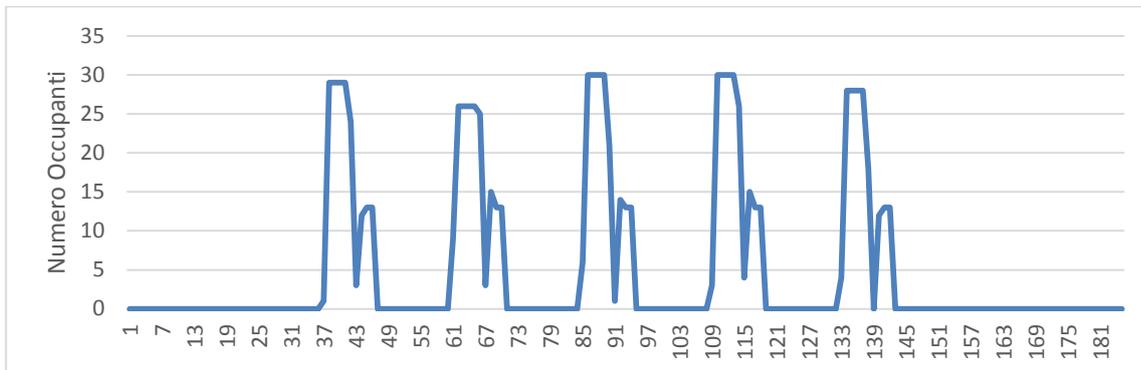


Fig. 3.12 Esempio di profilo di occupazione generato dal modello Markoviano

Il comportamento stocastico delle variabili è apprezzabile nella variabilità dei picchi dei valori riportati. E' altresì possibile verificare la variazione nei valori riportati nel corso del weekend, in cui il numero di occupanti la zona termica scende a zero. L'algoritmo utilizza la generazione di numeri casuali ad ogni iterazione per garantire il verificarsi delle transizioni tra i due stati descritti in precedenza: ovvero, ad ogni timestep il type genera dei numeri casuali che saranno confrontati con le probabilità estratte dai profili predeterminati.

Si riportano in tabella 3.7 i profili medi di occupazione risultanti per l'edificio in esame. Le celle colorate indicano un valore unitario di occupazione, i colori sono differenti nelle varie colonne esclusivamente per una migliore comprensione.

Tabella 3.7: Profili medi orari di occupazione dei locali

da	a	Lunedì			Martedì			Mercoledì			Giovedì			Venerdì			Sabato		
		aule	aule-serale	Amministr.	aule	aule-serale	Amministr.	aule	aule-serale	Amministr.	aule	aule-serale	Amministr.	aule	aule-serale	Amministr.	aule	aule-serale	Amministr.
7:30	8:30																		
8:30	9:30																		
9:30	10:30																		
10:30	11:30																		
11:30	12:30																		
12:30	13:30																		
13:30	14:30																		
INTERRUZIONE DELLE ATTIVITA' dalle 14:30 - 15:30																			
15:30	16:30																		
16:30	17:30																		
17:30	18:30																		
18:30	19:30																		
19:30	20:30																		
20:30	21:30																		
21:30	22:30																		

La tabella 3.7 descrive la distinzione delle zone termiche in “Aule”, “Aule serali” e “Amministrazione” (Amministrazione), a seconda della differente destinazione d’uso dei locali.

In particolare:

- La definizione “Aule” comprende tutti i locali adibiti ai fini didattici, ovvero le zone termiche C, G, H;
- La definizione “Aule Serali” comprende tutti i locali adibiti a fini didattici in cui le lezioni sono svolte anche di sera, ovvero solo nella zona termica C;
- La definizione “Amministrazione” prevede tutti i locali occupati da personale amministrativo, ovvero le zone termiche D, B ed F.

Si è considerato altresì che nel corso dell’anno vi sono dei periodi in cui l’edificio non risulta occupato a causa delle festività e della mancanza di lezioni, ovvero:

- Periodo natalizio – dal 23 Dicembre al 7 Gennaio;
- Periodo pasquale – dal 14 al 22 Aprile (ovviamente tale data è variabile, ma nel caso in specie si è fissata in tale periodo);
- 25 Aprile;
- 1 Maggio;
- 2 Giugno;
- Periodo estivo di chiusura dal 22 Luglio al 31 Agosto.

Per tutte le zone termiche, si sono considerati gli apporti termici interni dovuti alla presenza di persone in accordo alla Norma ISO7730 [6].

3.4.2 Illuminazione artificiale

Un altro termine considerato nel bilancio energetico dell’edificio è quello relativo agli apporti termici forniti dai sistemi di illuminazione. In particolare, si è assunto un valore medio relativo alle diverse zone termiche individuate in accordo alle indicazioni contenute nel “Load Calculation Application Manual” di J. Spitler [7]. Gli apporti termici dovuti all’illuminazione sono stati considerati in funzione delle ore di occupazione degli ambienti interni e delle apparecchiature, i profili orari di funzionamento dell’impianto di illuminazione seguono quelli di occupazione degli ambienti corrispondenti e sono inoltre funzione dei livelli di illuminazione naturale dell’ambiente.

3.4.3 Apparecchiature elettriche

Gli apporti termici dovuti alle apparecchiature elettriche sono stati valutati sulla base della verifica degli apparecchi realmente presenti nell’edificio, effettuata durante la fase di sopralluogo in sito.

I valori sono stati stimati in accordo ai contenuti del d.d.g. n. 5796 dell’11 Giugno 2009 - Valori globali degli apporti interni [8].

3.4.4 Protezioni solari

Nel modello è stato implementato un sistema di controllo della radiazione solare.

Tale sistema replica le comuni abitudini degli occupanti nella gestione della radiazione solare tramite l’utilizzo di serramenti esterni. La logica di modellizzazione dell’intervento degli utenti prevede differenti livelli di intervento sovrapposti:

- Il sistema prevede la verifica della presenza di occupanti all’interno dello spazio confinato. Se nessun occupante si trova nella zona termica considerata, le schermature solari saranno chiuse;

- Se i livelli di occupazione sono maggiori di zero, il fattore di schermatura solare è legato all'aumento di temperatura nella zona termica e ai livelli di radiazione solare diretta sulle diverse superfici finestrate.

3.4.5 Ventilazione naturale

La ventilazione naturale è stata modellizzata all'interno di ogni singola zona termica attraverso un algoritmo meglio descritto in [9]. Tale sistema di ventilazione naturale simula il comportamento degli occupanti che, in funzione delle variabili climatiche, tendono a reagire a situazioni di discomfort.

L'algoritmo implementato valuta il tasso di ventilazione in funzione dell'orientamento dell'edificio, del contesto climatico, della direzione del vento e della sua velocità attraverso il grado di apertura ipotizzato.

Il flusso d'aria Q_w che attraversa ogni finestra è stato calcolato secondo l'equazione 1.1:

$$Q_w = C_w \times A_{opening} \times F_{schedule} \times V \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (1.1)$$

Dove:

- C_w è un parametro che tiene conto dell'angolo di incidenza del vento sulle superfici esaminate,
- $A_{opening}$ è l'apertura espressa in $[m^2]$,
- $F_{schedule}$ è la frazione di area finestrata aperta (m^2/m^2),
- V è la velocità locale del vento $[m/s]$

In particolare, C_w si calcola con la seguente formula:

$$C_w = 0,55 - \left[\frac{\text{angolo_effettivo_dell'esposizione_direzione_del_vento}}{180} \right] \times 0,25 \quad (1.2)$$

C_w è funzione della differenza tra l'angolo di esposizione delle superfici finestrate e dell'angolo di direzione del vento, espressi in gradi.

In figura 3.13 si riporta l'andamento dei profili orari della velocità del vento e del numero di ricambi d'aria di una zona termica presa a titolo esemplificativo.

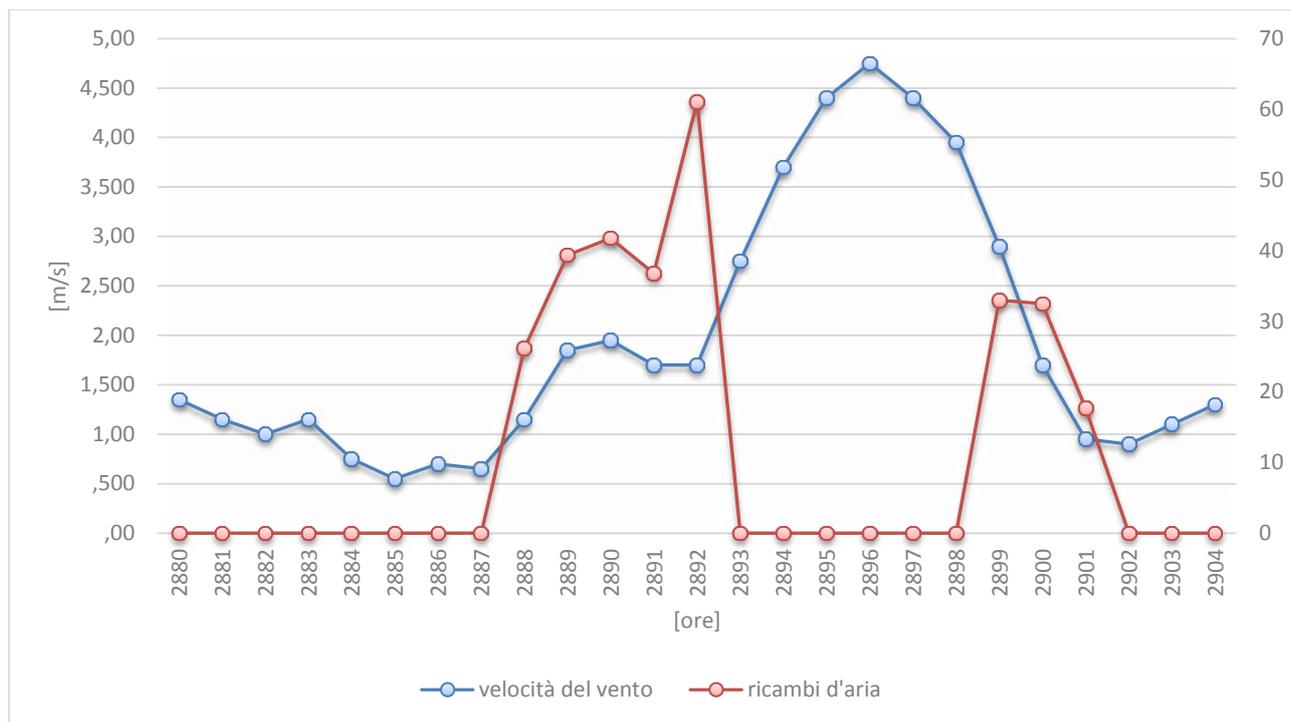


Figura 3.13: Profilo orario del vento e della portata d’aria Q_w entrante nella generica zona termica.

Il modello di calcolo del flusso d’aria è stato esteso ad ogni apertura presente nell’edificio. La portata d’aria entrante nell’edificio è calcolata dinamicamente su base oraria per ogni zona termica.

3.4.6 Infiltrazioni d’aria

Per quanto riguarda le infiltrazioni di aria dalle finestre è stato constatato, durante la fase di sopralluogo, che i serramenti sono di scarsa qualità rispetto agli standard attuali.

Le dispersioni termiche per infiltrazione dell’aria sono state calcolate tenendo conto della tipologia e dello stato degli infissi presenti nell’edificio (infissi in alluminio deteriorati). In questo caso è stato fissato un tasso di infiltrazione d’aria medio pari a 0,5 ricambi d’aria per ora [10].

3.4.7 Impianto di riscaldamento

Al fine di valutare il fabbisogno di energia per il riscaldamento nell’intero anno di indagine è stato simulato l’impianto di riscaldamento presente nell’edificio.

L’impianto non è dotato di un sistema di controllo. Trattandosi di fascia climatica C, il periodo di funzionamento va dal 15 novembre al 31 marzo per un numero di ore giornaliere pari a dieci [11].

L’impianto di riscaldamento ha dei terminali in radiatori in alluminio (tabella 3.8) collegati a tre caldaie alimentate da metano, caratterizzate ognuna da una potenza nominale di 24,6 kW (tabella 3.9).

Tabella 3.8: Specifiche tecniche dei corpi scaldanti

Zone termiche	Dimensioni in [mm]				N. alette	Potenza termica per aletta
	Altezza tot	Lunghezza	Profondità	Interasse		
						Watt
(C), (G), (H), (D)	2046	80	95	2000	6	321
(A), (B), (F)	2046	80	95	2000	16	321
(I), (L)	2046	80	95	2000	4	321

Tabella 3.9: Specifiche tecniche caldaie

Combustibile	Potenza nominale [kW]	Temperatura massima di mandata [°C]	N. caldaie
Gas Metano	24,6	90	3

4 Edificio 2

Il secondo edificio analizzato è una scuola secondaria inferiore, che mostra caratteristiche termofisiche tipiche del periodo costruttivo relativo agli anni '70 [3]. Localizzato nella fascia climatica C, è altresì situato in un contesto caratterizzato da una densità di popolazione di 162,3 [abitanti/km²].

4.1 Geometria

L'edificio si sviluppa su un unico livello e presenta una superficie in pianta complessiva di 2.541,77 m² ed un volume totale di 8.896,20 m³.

Sia le aule, sia la zona adibita ad amministrazione, sono caratterizzate da un'incidenza di superfici finestrate media di circa il 31% se confrontato con la superficie verticale totale.

Le figure 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 rappresentano le viste rispettivamente nord, sud, est e ovest dell'edificio.

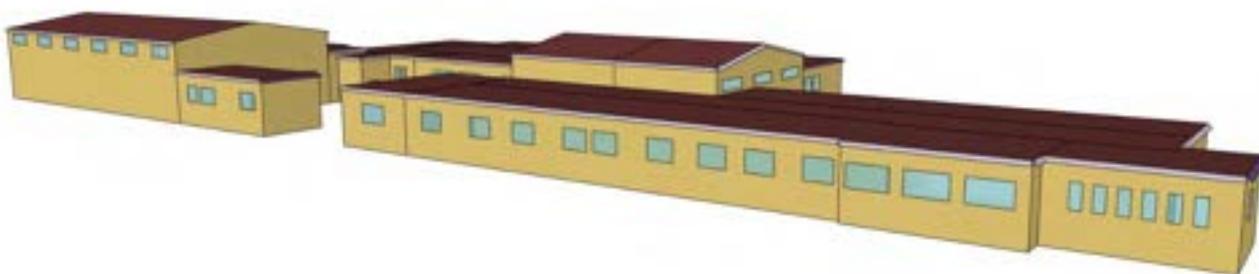


Figura 4.1: Vista Nord



Figura 4.2: Vista Sud

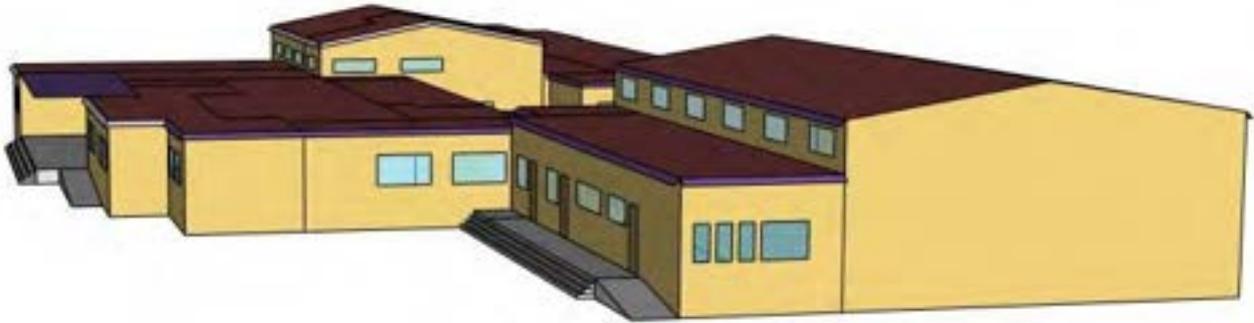


Figura 4.3: Vista est



Figura 4.4: Vista Ovest

4.2 *Suddivisione in zone termiche*

L'edificio è stato suddiviso in opportune zone termiche, secondo criteri di uguale destinazione d'uso, di assimilabilità geometrica e di gestione comune di diversi locali da parte dello stesso impianto termico con analoghe regolazioni.

In tabella 4.1 sono riportate le zone termiche individuate.

Tabella 4.1: suddivisione del modello in zone termiche

Zona termica	Tipo di zona	Superficie [m ²]
A	Ingresso	83,58
B	uffici amministrazione	127,20
C	corridoio 2	117,71
D	aule 1	177,26
E	deposito 1	81,33
F	corridoio 1	234,86
G	aule 2	303,34
H	bagni 1	47,54
I	aula riunioni	75,90
L	bagni 2	10,50
M	stanza professori	22,68
N	corridoio 3	205,53
O	aule 3	149,58
P	aule 4	89,25
Q	bagni 3	37,25
R	laboratorio informatica	49,73
S	deposito 2	21,38
T	laboratorio musicale	66,08
U	centrale termica	12,60
V	palestra	472,23
Z	bagni 4	156,24

Le figure 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, rappresentano alcune zone termiche individuate nell’edificio.

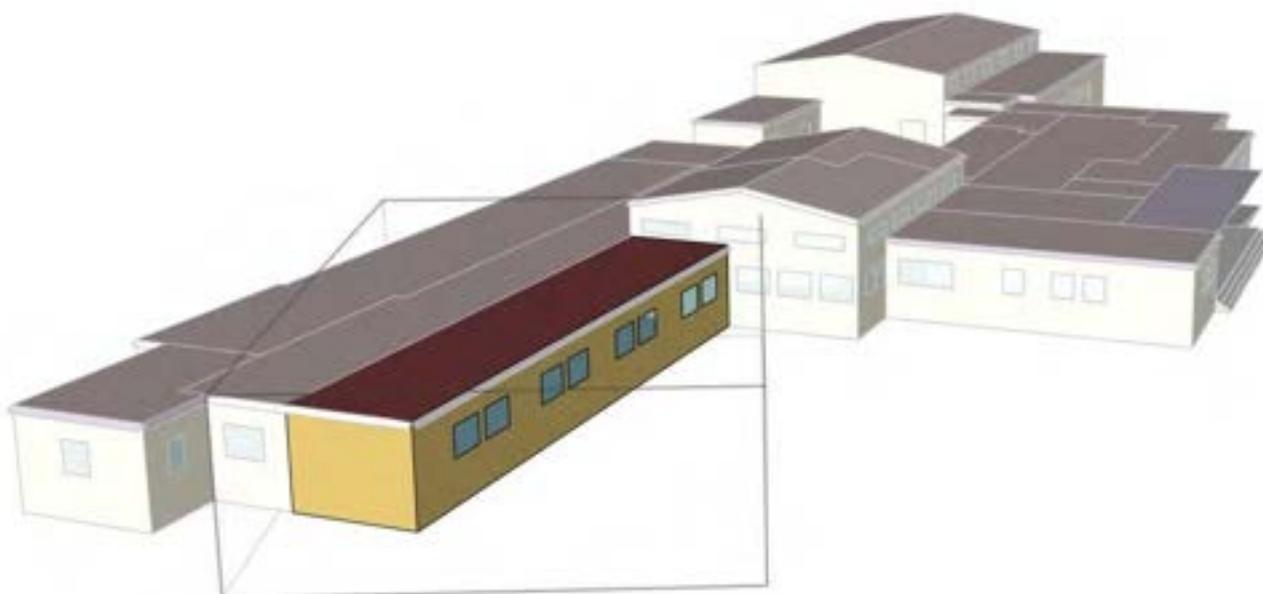


Figura 4.5: Zona termica D “aula 1”.

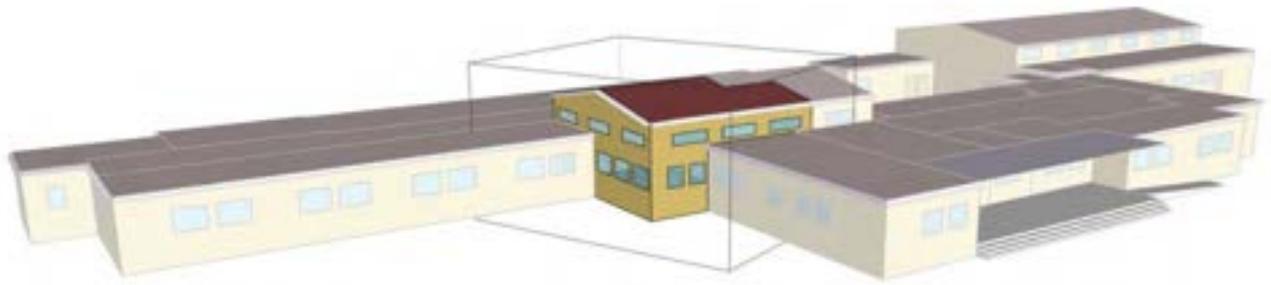


Figura 4.6: Zona termica E “deposito 1”.

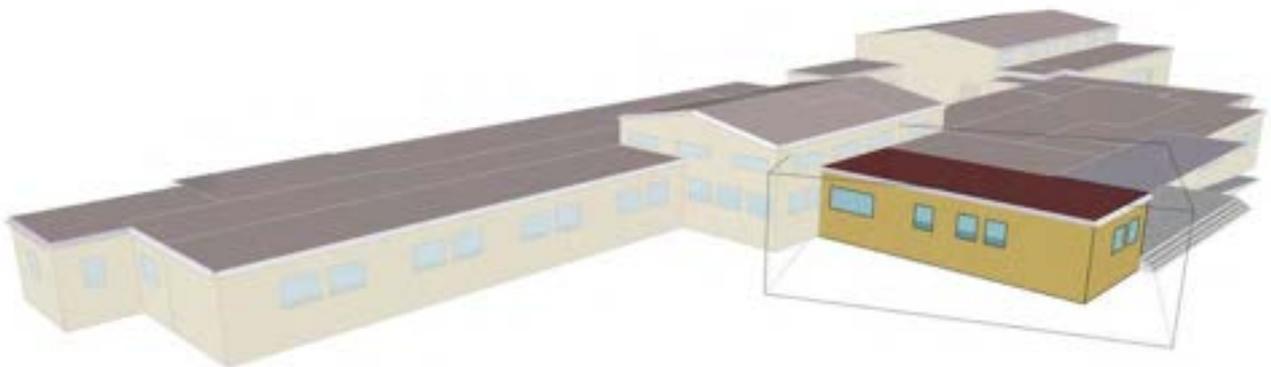


Figura 4.7: Zona termica B “uffici amministrazione”.

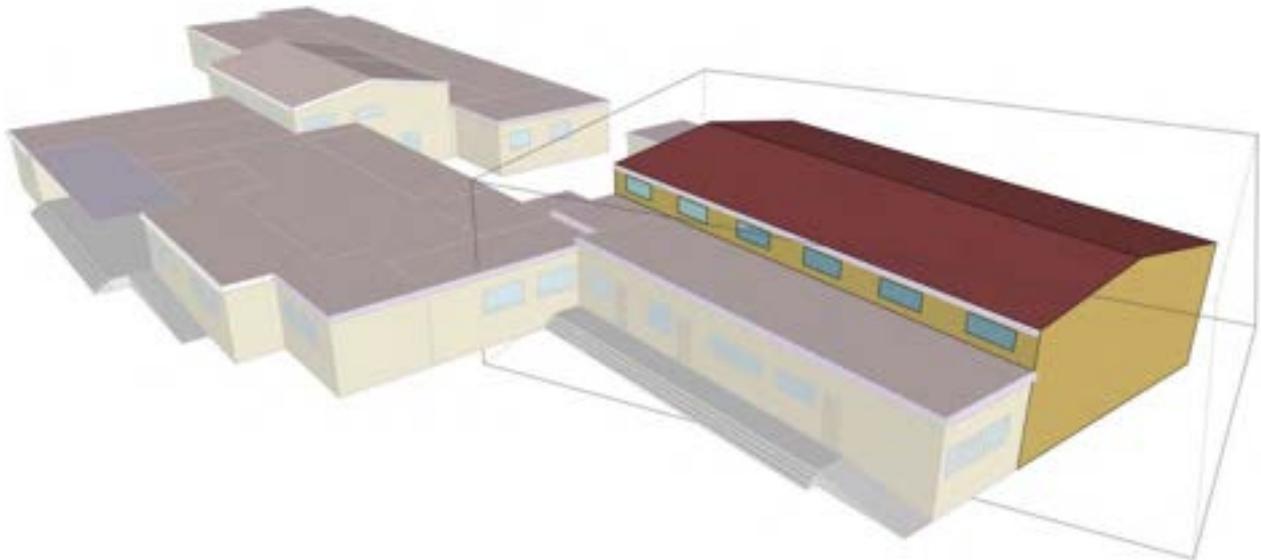


Figura 4.8: Zona termica V “palestra”.

In figura 4.9 si riporta il modello edificio-impianto implementato in ambiente TRNSYS.

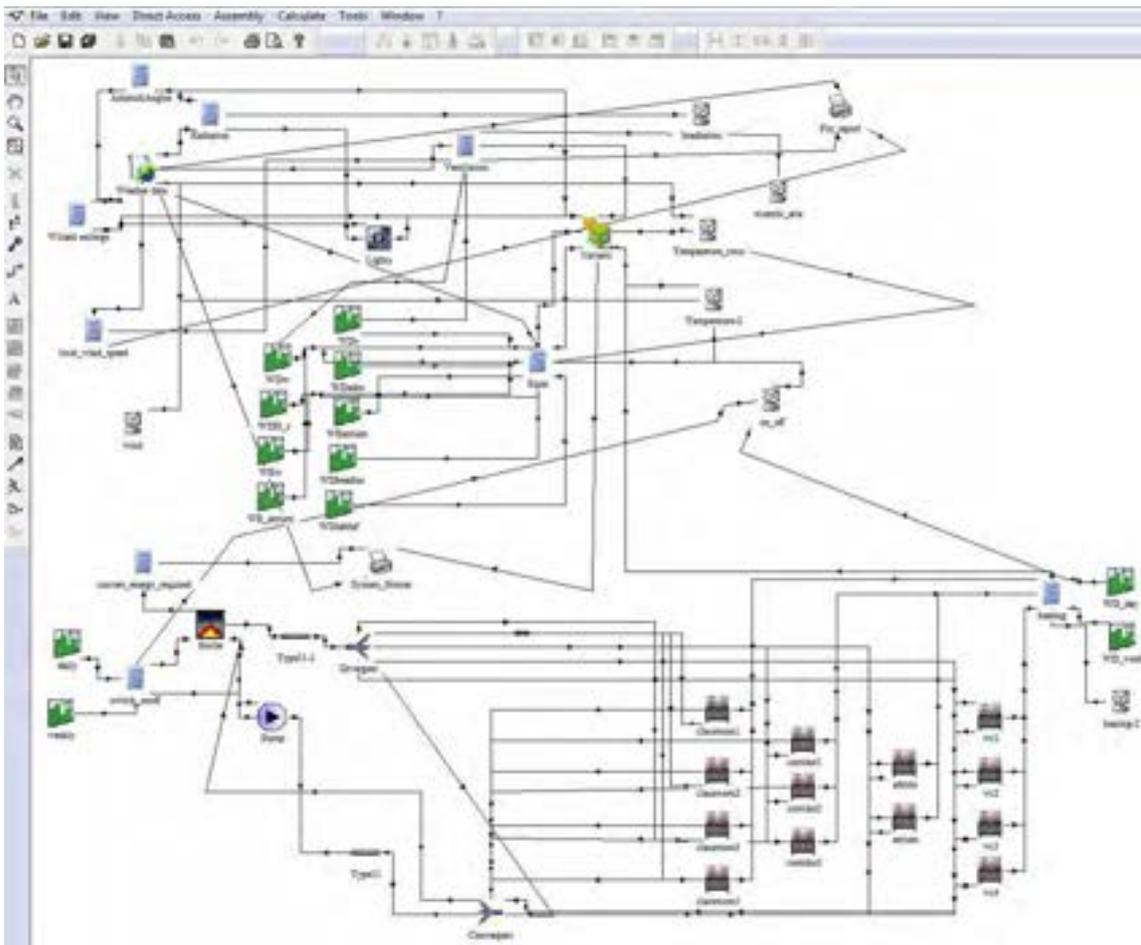


Figura 4.9: schema del sistema edificio-impianto dell'edificio 2.

4.3 Elementi costruttivi

Questo paragrafo riporta le caratteristiche termofisiche degli elementi opachi e trasparenti dell'edificio 2. I valori di trasmittanza termica (U) di tali strutture sono tipici delle soluzioni architettoniche più comunemente utilizzate nella fase finale degli anni '70 [3].

Nelle tabelle 4.2-4.5, sono riportate le caratteristiche termofisiche dell'edificio oggetto di analisi.

Tabelle 4.2: Trasmittanza termica e stratigrafia delle pareti esterne

Componente	U [W/(m ² K)]
PARETE ESTERNA	1,37
Stratigrafia	Spessore [m]
ESTERNO	
Intonaco	0,02
Concio di tufo	0,35
Intonaco	0,02
INTERNO	
TOT.	0,39

Tabelle 4.3: Trasmittanza termica e stratigrafia del solaio

Componente	U [W/(m ² K)]
SOLAIO	0,32
Stratigrafia	Spessore [m]
ESTERNO	
Guaina bituminosa	0,01
Massetto Cementizio	0,08
Solaio latero-cemento	0,15
Intonaco	0,02
INTERNO	
TOT.	0,26

Tabelle 4.4: Trasmittanza termica e stratigrafia degli infissi esterni

Componente	U [W/(m ² K)]
INFISSI ESTERNI	2,89
Descrizione	
Vetro singolo 4 mm + Telaio metallico senza taglio termico	

Tabelle 4.5: Trasmittanza termica e stratigrafia delle pareti interne

Componente	U [W/(m ² K)]
PARETE INTERNA	1,97
Stratigrafia	Spessore [m]
ESTERNO	
Intonaco	0,02
Concio di tufo	0,10
Intonaco	0,02
INTERNO	
TOT.	0,14

E' stato effettuato un confronto delle caratteristiche termofisiche di questo edificio con le caratteristiche termofisiche individuate nello studio condotto nell'annualità precedente [3].

4.4 Assunzioni nella modellizzazione

A seguito dell'indagine di campo e dell'analisi documentale è stato possibile definire i parametri utilizzati nella modellizzazione dell'edificio.

I paragrafi seguenti analizzano nel dettaglio le principali assunzioni del processo di modellizzazione, ovvero:

- Livelli di occupazione interna e apporti termici interni conseguenti (vedi paragrafo 4.4.1);
- Apporti termici interni dovuti a illuminazione artificiale e apparecchiature elettriche (vedi paragrafi 4.4.2 – 4.4.3);
- Presenza e l'uso di protezioni solari (vedi paragrafo 4.4.4);
- Flussi d'aria per ventilazione ed infiltrazione (vedi paragrafi 4.4.5 – 4.4.6);
- Funzionamento dell'impianto di riscaldamento (vedi paragrafo 4.4.7).

4.4.1 Livelli di occupazione e apporti termici interni conseguenti

I livelli di occupazione utilizzati per la modellizzazione sono i reali livelli di affollamento su base oraria della scuola tramite un approccio basato sulle catene di Markov, descritto nel paragrafo 3.4.1.

E' stata effettuata la distinzione tra zone relative agli uffici amministrativi e quelle a finalità didattica, tenendo conto inoltre che la scuola prevede corsi serali e attività extra-scolastiche. In particolare l'edificio è caratterizzata indici di occupazione che rispettano i limiti di legge [5].

In tabella 4.6 si riporta il profilo di occupazione oraria medio nelle diverse zone.

Tabella 4.6: Profili medi orari di occupazione dei locali

		Lunedì				Martedì				Mercoledì				Giovedì				Venerdì				Sabato			
da	a	aule	Laboratori	Atrio	ammin.	aule	Laboratori	Atrio	ammin.	aule	Laboratori	Atrio	ammin.	aule	Laboratori	Atrio	ammin.	aule	Laboratori	Atrio	ammin.	aule	Laboratori	Atrio	ammin.
8:00	9:00	Occupato			Occupato	Occupato			Occupato	Occupato			Occupato	Occupato			Occupato	Occupato			Occupato	Occupato			Occupato
9:00	10:00	Occupato			Occupato	Occupato			Occupato	Occupato			Occupato	Occupato			Occupato	Occupato			Occupato	Occupato			Occupato
10:00	11:00	Occupato	Occupato		Occupato	Occupato	Occupato		Occupato	Occupato	Occupato		Occupato	Occupato	Occupato		Occupato	Occupato	Occupato		Occupato	Occupato	Occupato		Occupato
11:00	12:00	Occupato	Occupato		Occupato	Occupato	Occupato		Occupato	Occupato	Occupato		Occupato	Occupato	Occupato		Occupato	Occupato	Occupato		Occupato	Occupato	Occupato		Occupato
12:00	13:00	Occupato			Occupato	Occupato			Occupato	Occupato			Occupato	Occupato			Occupato	Occupato			Occupato	Occupato			Occupato
13:00	14:00	Occupato			Occupato	Occupato			Occupato	Occupato			Occupato	Occupato			Occupato	Occupato			Occupato	Occupato			Occupato
INTERRUZIONE DELLE ATTIVITA' 14:00 - 14:30																									
14:30	15:30	Occupato				Occupato				Occupato				Occupato		Occupato				Occupato					Occupato
15:30	16:30	Occupato				Occupato				Occupato				Occupato		Occupato				Occupato					Occupato
16:30	17:30	Occupato				Occupato				Occupato				Occupato		Occupato				Occupato					Occupato
17:30	18:30															Occupato									

Relativamente alla tabella 4.6, per ciascun giorno, sono riportati i profili orari medi di occupazione delle aule, dei laboratori, dell'atrio e degli uffici dell'amministrazione.

Si è considerato altresì che nel corso dell'anno vi sono dei periodi in cui l'edificio non risulta occupato a causa delle festività o della mancanza di lezioni.

I periodi in cui i livelli di occupazione sono nulli per l'intero edificio sono:

- Periodo natalizio – dal 23 Dicembre al 7 Gennaio;
- Periodo pasquale – dal 14 al 22 Aprile (ovviamente tale data è variabile, ma nel caso in specie si è fissata in tale periodo);
- 25 Aprile;
- 1 Maggio;
- 2 Giugno;
- Periodo estivo di chiusura dal 22 Luglio al 31 Agosto.

Anche in questo caso si è fatto riferimento alla norma ISO7730 [6] che definisce gli apporti termici gratuiti degli occupanti in dipendenza dell'attività svolta all'interno dell'ambiente confinato.

4.4.2 Illuminazione artificiale

Per tenere conto del contributo degli apporti termici interni dei dispositivi di illuminazione, è stato definito un valore medio relativo alle diverse zone termiche in accordo a [7].

Gli apporti termici dovuti all'illuminazione seguono i profili orari di occupazione degli ambienti interni e sono funzione delle condizioni di illuminamento naturale.

4.4.3 Apparecchiature elettriche

Gli apporti termici dovuti alle apparecchiature elettriche sono stati valutati a partire dalla verifica puntuale della presenza di tali sistemi in ogni zona termica.

Per ogni zona termica, di seguito il dettaglio delle apparecchiature elettroniche presenti di cui sono stati definiti gli apporti termici interni secondo [8]:

- Zona termica (D) e (M): 1 PC.
- Zona termica (G): 3 PC.
- Zona termica (B): 6 PC, 3 stampanti e una fotocopiatrice.
- Zona termica (R): 25 PC, 2 stampanti, un server e un modem wi-fi.
- Zona termica (I): un videoproiettore e un PC con il solo monitor.

Per tutti i componenti elettrici sono stati considerati profili orari di funzionamento coerenti con quelli di occupazione delle rispettive zone termiche.

4.4.4 Protezioni solari

Anche per questo caso studio è stato implementato un modello di controllo passivo della radiazione solare, attraverso l'utilizzo di serramenti esterni. Il modello implementato in questo edificio segue la stessa logica di funzionamento dell'edificio 1, pertanto si rimanda all'analogo paragrafo 3.4.4.

4.4.5 Ventilazione naturale

Il sistema di ventilazione naturale modellizzato secondo l'algoritmo descritto nella precedente analisi, replica le normali pratiche di apertura e chiusura delle superfici finestrate.

L'algoritmo implementato è uguale a quello descritto precedentemente nel paragrafo 3.4.5.

4.4.6 Infiltrazione d'aria

Per quanto riguarda le infiltrazioni d'aria dell'edificio che provengono dalle finestre è stato osservato, durante la fase di sopralluogo, che i serramenti sono sprovvisti di guarnizione.

Il contributo relativo all'infiltrazione dell'aria è stato definito tenendo conto quindi della tipologia e dello stato degli infissi presenti nell'edificio (infissi in ghisa danneggiati). E' stato pertanto fissato un tasso di infiltrazione d'aria medio pari a 0,5 ricambi d'aria per ora [10].

4.4.7 Impianto di riscaldamento

Per calcolare la richiesta di energia necessaria per il riscaldamento nell'intero anno di indagine, si è modellizzato il comportamento termico dell'impianto di riscaldamento presente nell'edificio.

Durante la simulazione, l'impianto entra in funzione nel periodo previsto dalla legge DPR 412/93 definito in base alla fascia climatica di appartenenza dell'edificio. Dato che la fascia climatica in cui si trova la scuola è la C, tale periodo di funzionamento va dal 15 novembre al 31 marzo per un numero di ore giornaliere pari a dieci [11].

L'impianto di riscaldamento è a radiatori in alluminio (tabella 4.7) collegati ad una caldaia a gas metano caratterizzata da una potenza nominale di 348 kW (tabella 4.8).

Tabella 4.7: Specifiche tecniche dei corpi scaldanti

Zone termiche	Dimensioni in [mm]				N. alette	Potenza termica per aletta
	Altezza tot	Lunghezza	Profond.	Interass.		Watt
(D), (G), (I), (O), (P), (M), (R), (T)	686	60	128	623	22	111
(B)	686	60	128	623	15	111
(H), (L), (Q), (Z)	686	60	128	623	5	111
(A), (C), (F), (N)	686	60	128	623	20	111

Tabella 4.8: Specifiche tecniche caldaia

Combustibile	Potenza nominale [kW]	Temperatura massima di mandata [°C]	Pressione massima [bar]
Gas Metano	348	90	5

5 Edificio 3

L'edificio analizzato in questa sezione è una scuola elementare. L'edificio ha subito recentemente diffusi interventi di riqualificazione energetica e strutturale. Appartenente alla fascia climatica B, è localizzato in un contesto territoriale che ha una densità di popolazione di 212,7 [abitanti/km²]. L'edificio è situato nel centro urbano ed è stato necessario modellizzare nel dettaglio gli edifici circostanti, causa di rilevanti condizioni di ombreggiamento.

5.1 Geometria

L'edificio si sviluppa su tre livelli. Ha una superficie calpestabile complessiva di 1.433,72 m² ed un volume totale di 4.587,91 m³.

Le figure 5.1, 5.2 e 5.3 rappresentano rispettivamente le viste dell'edificio del lato nord-ovest, sud-ovest, sud-est.

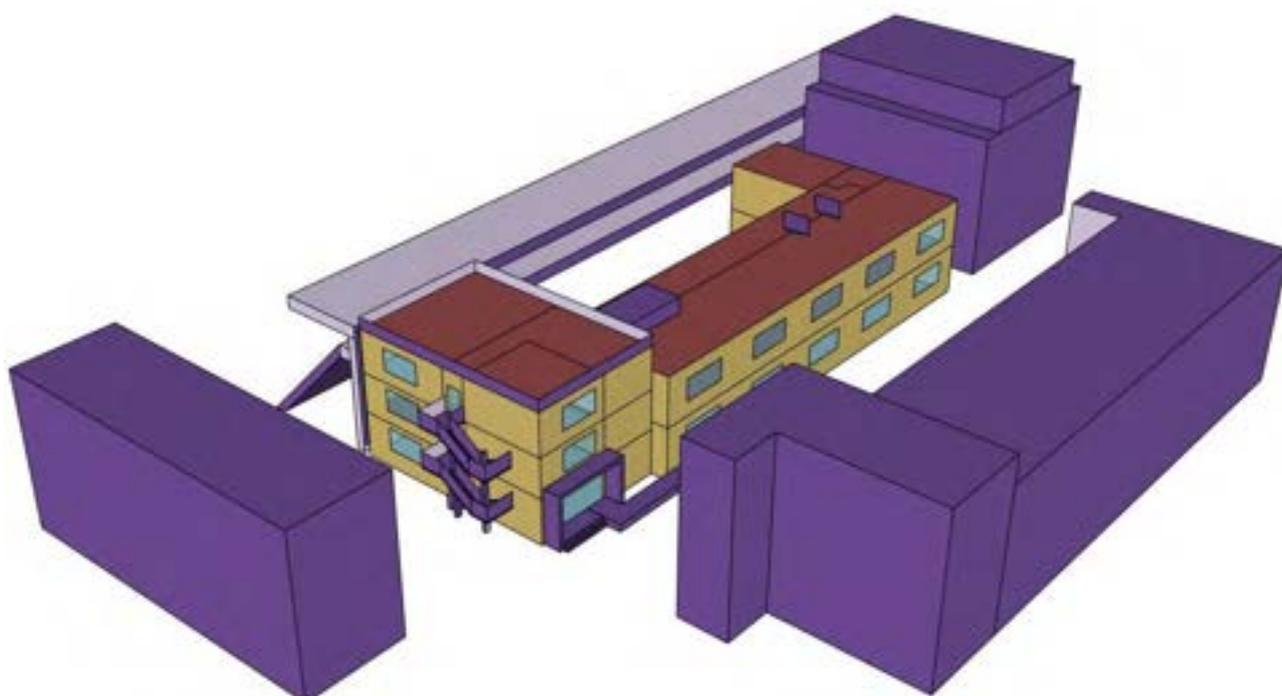


Figura 5.1: Vista Nord-Ovest

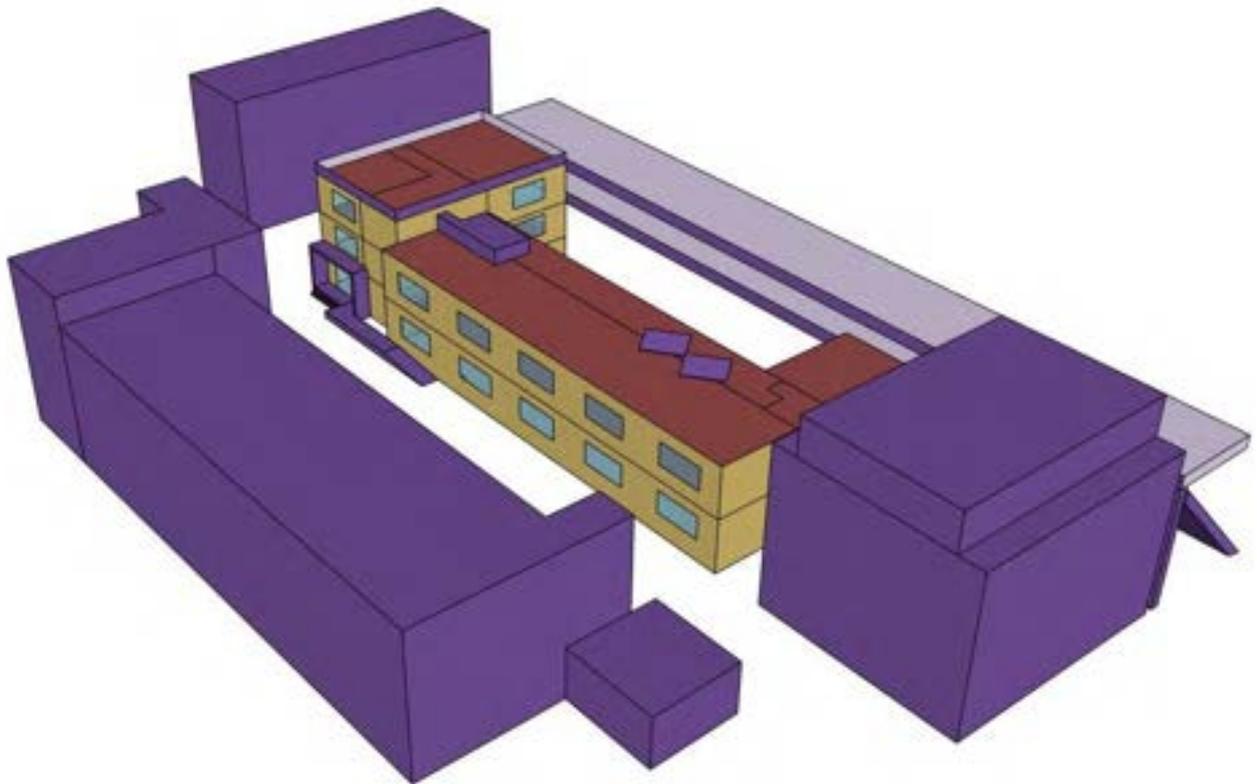


Figura 5.2: Vista Sud-Ovest

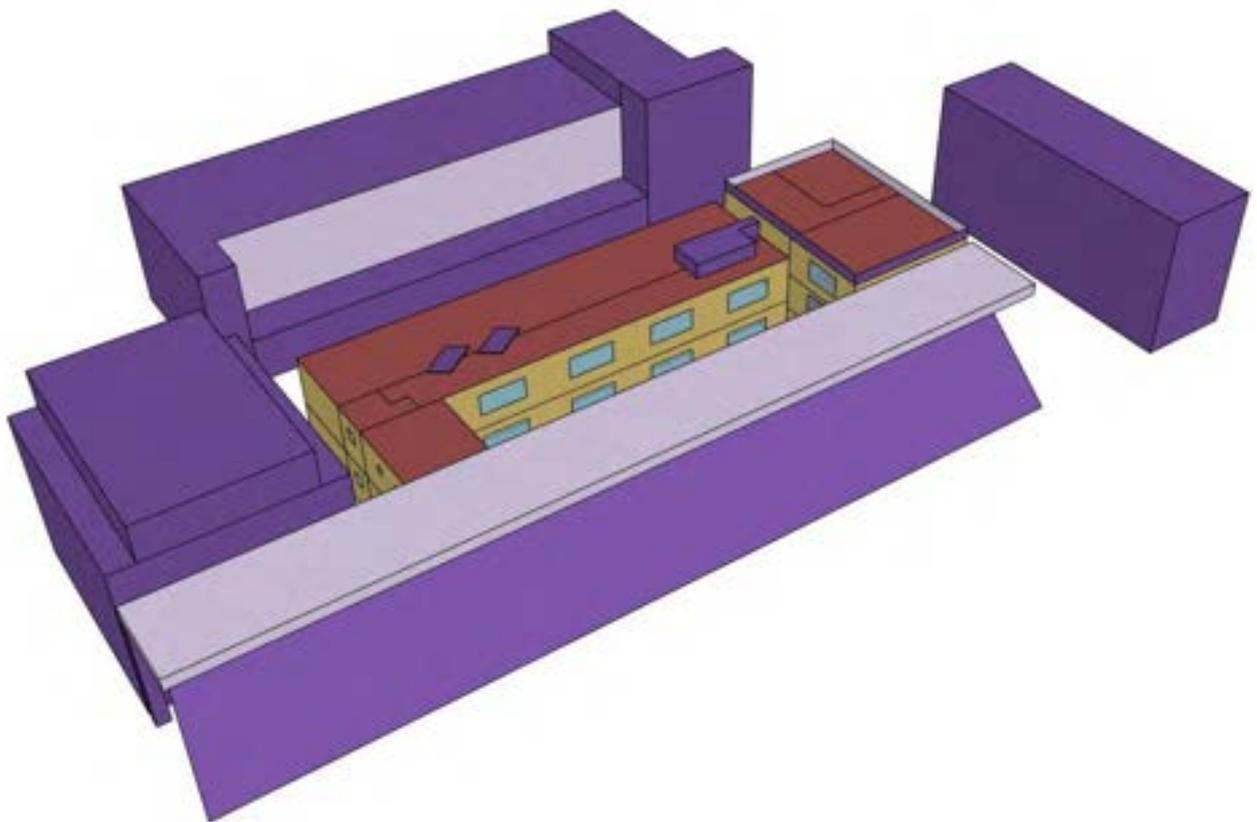


Figura 5.3: Vista Sud-Est

5.2 Suddivisione in zone termiche

L'edificio in questione è stato anch'esso suddiviso in più zone termiche seguendo gli stessi criteri di modellizzazione utilizzati per gli edifici precedenti. In tabella 5.1 le zone termiche individuate.

Tabella 5.1: suddivisione del modello in zone termiche

Zona termica	Tipo di zona	Superficie [m ²]
A	ingresso	98,59
B	aula 1 piano	42,83
C	scala 1 piano terra-primo piano	55,76
D	aule 1 secondo piano	42,83
E	scala 2 p. primo-secondo piano	55,76
F	aula 2 piano terra	90,35
G	laboratorio di informatica p. primo	90,35
H	aula 2 secondo piano	90,35
I	aule 3 terra piano	252,31
L	corridoio piano terra	116,45
M	bagno 1 piano terra	13,27
N	bagno 2 piano terra	51,42
O	bagno 1 primo piano	13,27
P	bagno 2 primo piano	51,42
Q	corridoio primo piano	116,45
R	aule 3 primo piano	252,31

Nelle figure 5.4 e 5.5, alcuni esempi di zone termiche definite nel corso della modellizzazione dell'edificio.

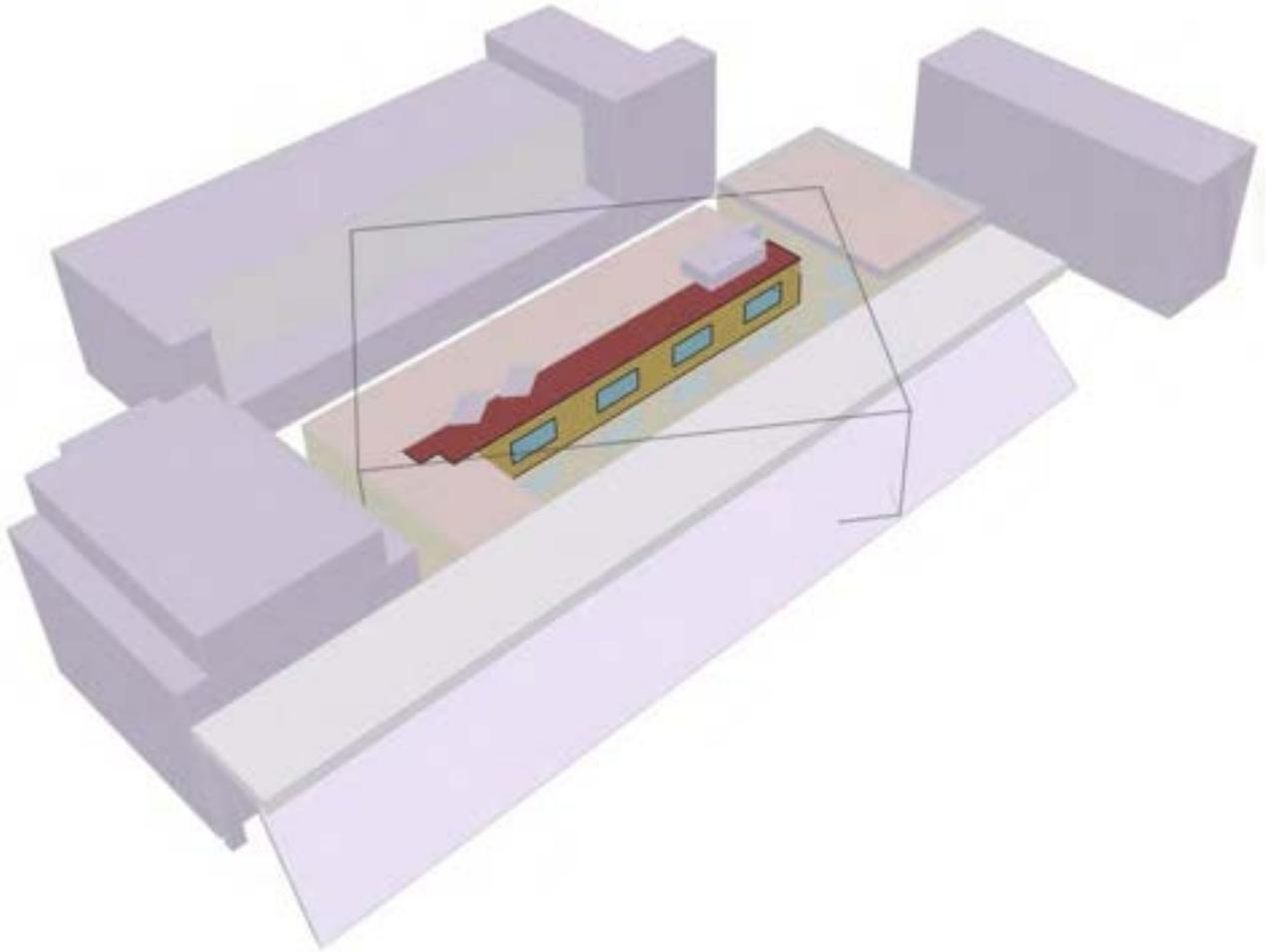


Figura 5.4: Zona termica Q "corridoio piano primo".

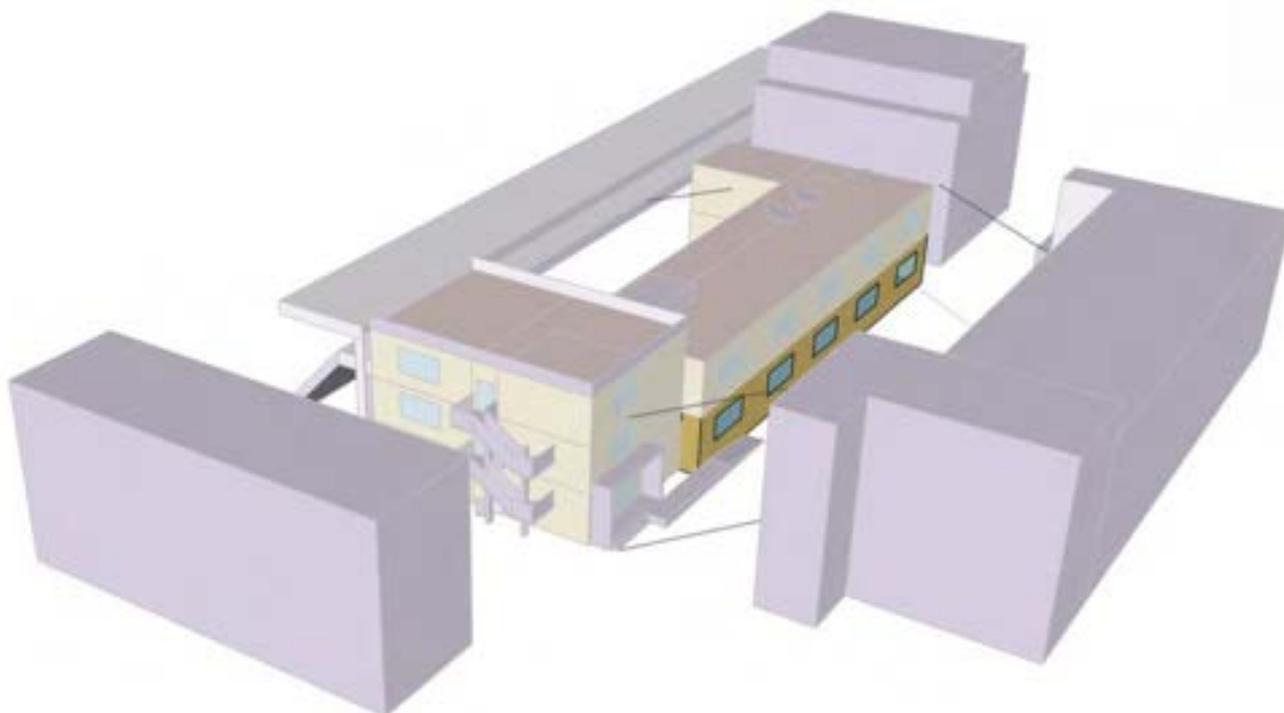


Figura 5.5: Zona termica I “aule 3 piano terra”.

In figura 5.6 si riporta il modello edificio-impianto implementato in ambiente TRNSYS.

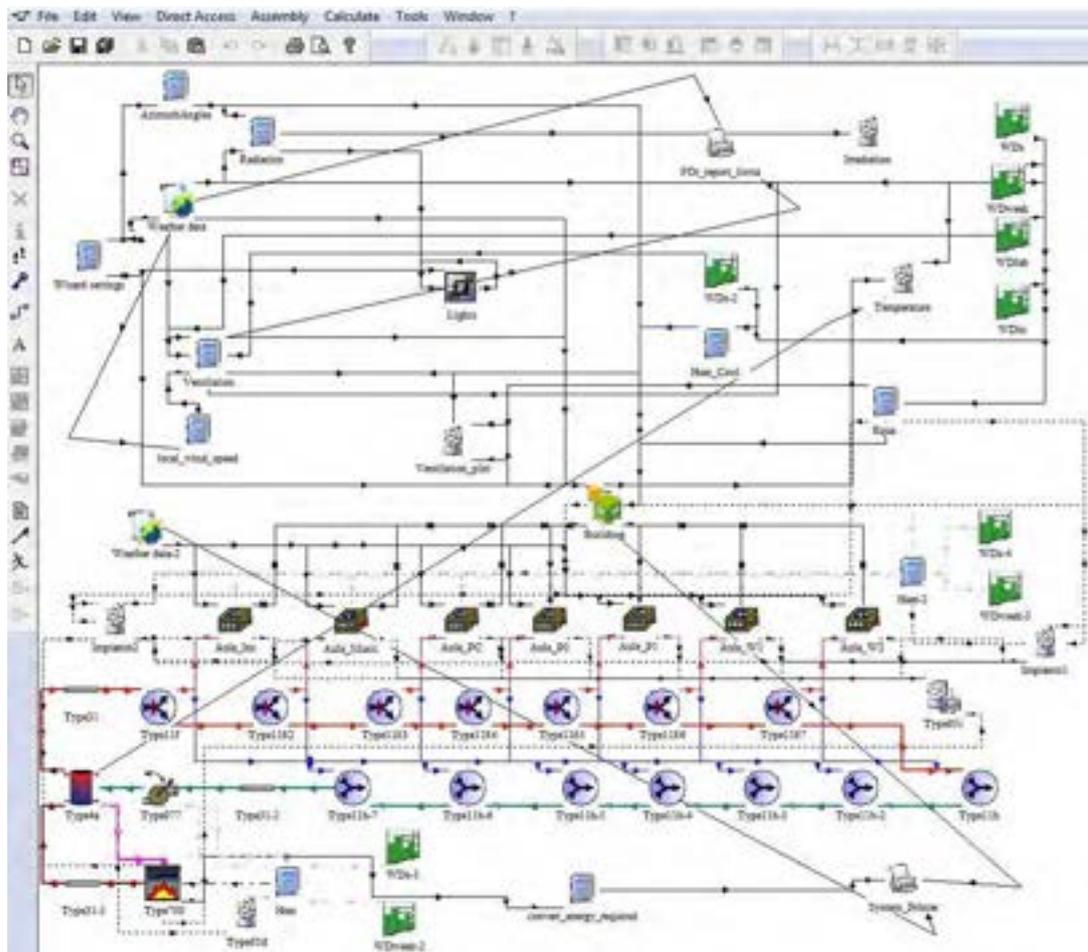


Figura 5.6: schema del sistema edificio-impianto dell'edificio 2.

5.3 Elementi costruttivi

A differenza dei due edifici precedenti, l'edificio in esame ha subito negli ultimi anni degli interventi diffusi di efficientamento energetico.

I lavori di riqualificazione energetica effettuati sull'edificio sono stati:

1. Interventi di adeguamento della normativa scolastica ed alla riforma Moratti [12];
2. Interventi di ristrutturazione dell'immobile finalizzati a:
 - a. Rifacimento impianti idrico, termico, elettrico, etc.;
 - b. Rifacimento opere per l'abbattimento delle barriere architettoniche;
 - c. Ripristino di infissi, intonaci, pavimenti e rivestimenti (per alcune categorie solo per le parti ammalorate);
 - d. Altri interventi di finitura e di miglioramento tecnologico e funzionale dell'opera.

Nelle tabelle 5.2-5.5, sono riportate le caratteristiche termofisiche dell'edificio 3.

Tabelle 5.2: Trasmittanza termica e stratigrafia delle pareti esterne

Componente	U [W/(m ² K)]
PARETE ESTERNA	0,40
Stratigrafia	Spessore [m]
ESTERNO	
Intonaco	0,02
Blocco in laterizio	0,18
Strato isolante	0,03
Blocco in laterizio	0,25
Intonaco	0,02
INTERNO	
TOT.	0,5

Tabelle 5.3: Trasmittanza termica e stratigrafia del solaio

Componente	U [W/(m ² K)]
SOLAIO	0,24
Stratigrafia	Spessore [m]
ESTERNO	
Guaina bituminosa	0,004
Strato isolante	0,06
Massetto Cementizio	0,04
Solaio latero-cemento	0,20
Strato isolante	0,01
Intonaco	0,01
INTERNO	
TOT.	0,32

Tabelle 5.4: Trasmittanza termica e stratigrafia degli infissi esterni

Componente	U [W/(m ² K)]
INFISSI ESTERNI	2,6
Descrizione	
Vetro doppio con Telaio metallico senza taglio termico	

Tabelle 5.5: Trasmittanza termica e stratigrafia delle pareti interne

Componente	U [W/m ² K]
PARETE INTERNA	0,51
Stratigrafia	Spessore [m]
ESTERNO	
Intonaco	0,012
Concio di tufo	0,066
Intonaco	0,012
INTERNO	
TOT.	0,09

Tutti gli elementi costruttivi descritti sono conformi alle più recenti normative (DPR n.59/2009).

5.4 Assunzioni nella modellizzazione

A seguito dell'indagine di campo e dell'analisi documentale è stato possibile definire i parametri utilizzati nella modellizzazione dell'edificio.

I paragrafi seguenti analizzano nel dettaglio le principali assunzioni del processo di modellizzazione, ovvero:

- Livelli di occupazione interna e apporti termici interni conseguenti (vedi paragrafo 5.4.1);
- Apporti termici interni dovuti a illuminazione artificiale e apparecchiature elettriche (vedi paragrafi 5.4.2 – 5.4.3);
- Flussi d'aria per ventilazione ed infiltrazione (vedi paragrafi 5.4.4 – 5.4.5);
- Funzionamento dell'impianto di riscaldamento (vedi paragrafo 5.4.6).

5.4.1 Livelli di occupazione

Per determinare le assunzioni da effettuare in riferimento ai livelli di occupazione, si è fatto riferimento ai reali orari di apertura e indici di affollamento della scuola analizzata. Anche in questo caso è stato utilizzato un approccio basato sulle catene di Markov, descritto nel paragrafo 3.4.1.

E' stata effettuata la distinzione tra zone relative agli uffici amministrativi e quelle a finalità didattica, tenendo conto inoltre che la scuola prevede corsi serali e attività extrascolastiche.

In dettaglio, i livelli di occupazione risultanti della scuola sono in accordo ai limiti di legge previsti in [5].

In tabella 5.6, l'occupazione oraria media delle diverse zone termiche.

Tabella 5.6: Profili medi orari di occupazione dei locali

		LUNEDÌ			MARTEDÌ			MERCOLEDÌ			GIOVEDÌ			VENERDÌ		
Da	a	aule	Laboratori	Amministrazione	aule	Laboratori	Amministrazione	aule	Laboratori	Amministrazione	aule	Laboratori	Amministrazione	aule	Laboratori	Amministrazione
		7:15	8:15													
8:15	9:15															
9:15	10:15															
10:15	11:15															
11:15	12:15															
12:15	13:15															
13:45	14:45															
14:45	15:45															
15:45	16:45															
13:45	14:45															

La tabella 5.6, riportata i profili orari delle aule, dei laboratori e degli uffici dell’amministrazione. Si è considerato altresì che nel corso dell’anno vi sono dei periodi in cui l’edificio non risulta occupato a causa delle festività e della mancanza di lezioni in alcuni periodi.

Tali periodi in cui i livelli di occupazione sono nulli per l’intero edificio sono:

- Periodo natalizio – dal 23 Dicembre al 7 Gennaio;

- Periodo pasquale – dal 14 al 22 Aprile (ovviamente tale data è variabile, ma nel caso in specie si è fissata in tale periodo);
- 25 Aprile;
- 1 Maggio;
- 2 Giugno;
- Periodo estivo di chiusura dal 22 Luglio al 31 Agosto.

Le assunzioni relative al carico termico per occupante sono identiche a quelle effettuate nei paragrafi 3.4.1 e 4.4.1.

5.4.2 Illuminazione artificiale

Per i dispositivi di illuminazione, è stato considerato un apporto termico interno alle zone termiche in accordo con [7] e in modo del tutto analogo al paragrafo 3.4.2.

5.4.3 Apparecchiature elettriche

Sono di seguito indicati le apparecchiature elettriche presenti nell'edificio i cui apporti termici sono coerenti con la [8]:

- Zona termica (G): 15 PC 2 stampanti, un server e un modem wi-fi.

Per tutti i componenti elettrici sono stati considerati dei profili orari di funzionamento coerenti con quelli di occupazione dei locali.

5.4.4 Protezioni solari

Anche per questo edificio è stato implementato un modello di controllo passivo della radiazione solare, attraverso l'utilizzo di serramenti esterni. Il modello implementato in questo edificio segue la stessa logica di funzionamento dell'edificio 1, pertanto si rimanda all'analogo paragrafo 3.4.4.

5.4.5 Ventilazione naturale

La ventilazione dell'edificio avviene naturalmente attraverso le normali pratiche di apertura e chiusura delle finestre.

Anche per l'analisi di questo edificio è stato implementato un algoritmo analogo a quello descritto nel paragrafo 3.4.4.

5.4.6 Infiltrazione d'aria

A causa della superiore qualità degli infissi presenti nell'edificio 3, rispetto ai primi due edifici, il contributo relativo all'infiltrazione d'aria è stato fissato ad un livello di 0,2 ricambi d'aria per ora [10].

5.4.7 Impianto di riscaldamento

L'impianto termico dell'edificio prevede dei terminali a ventilconvettori presenti nelle zone termiche. I ventilconvettori sono collegati ad una caldaia di 170 kW.

L'impianto entra in funzione nel periodo previsto del DPR n.74 del 2013 definito in base alla fascia climatica di appartenenza. Dato che la fascia climatica in cui si trova la scuola è la B, tale periodo di funzionamento va dal 1° dicembre al 31 marzo per un numero di ore giornaliere pari a otto [11].

6 Prestazioni energetiche degli edifici

Questa sezione illustra i risultati dell’analisi di simulazione termofisica degli edifici scolastici descritti nelle sezioni precedenti. In dettaglio sono riportati i consumi energetici per il riscaldamento degli edifici campione di riferimento. Al fine di ottenere dei valori di riferimento e di benchmark per il patrimonio scolastico siciliano, è stato sviluppato un set di indicatori di consumo specifico di energia.

I risultati sono stati normalizzati in funzione dei seguenti parametri (tabella 6.1):

- Superficie riscaldata
- Numero di aule
- Superficie delle aule
- Numero di studenti.

Tabella 6.1 Indicatori specifici di valutazione dei consumi energetici di riscaldamento

Edifici	kWh/anno	kWh/(m ² *a)	kWh/(aula *a)	kWh/(m ² aula *a)	kWh/(studente *a)
Edificio 1	13.358,46	20,60	1484,27	28,87	64,53
Edificio 2	38.048	21,87	2113,78	52,89	93,25
Edificio 3	2.533,33	2,94	180,95	3,29	6,21

Dalla tabella si evincono differenze sostanziali tra i primi due edifici (Edifici 1 e 2) e il terzo (Edificio 3). Quest’ultimo mostra un consumo specifico [kWh/(m²*anno)] pari al 14% del consumo specifico dell’Edificio 1 e al 13% dell’Edificio 2. Ciò è dovuto agli interventi di riqualificazione energetica che l’Edificio 3 ha subito negli ultimi anni orientati al miglioramento delle prestazioni termofisiche degli elementi finestrati e dell’efficienza dell’impianto termico.

E’ stato calcolato altresì il consumo di energia su base mensile. Si riportano i risultati per i tre edifici nelle figure 6.1, 6.2 e 6.3.

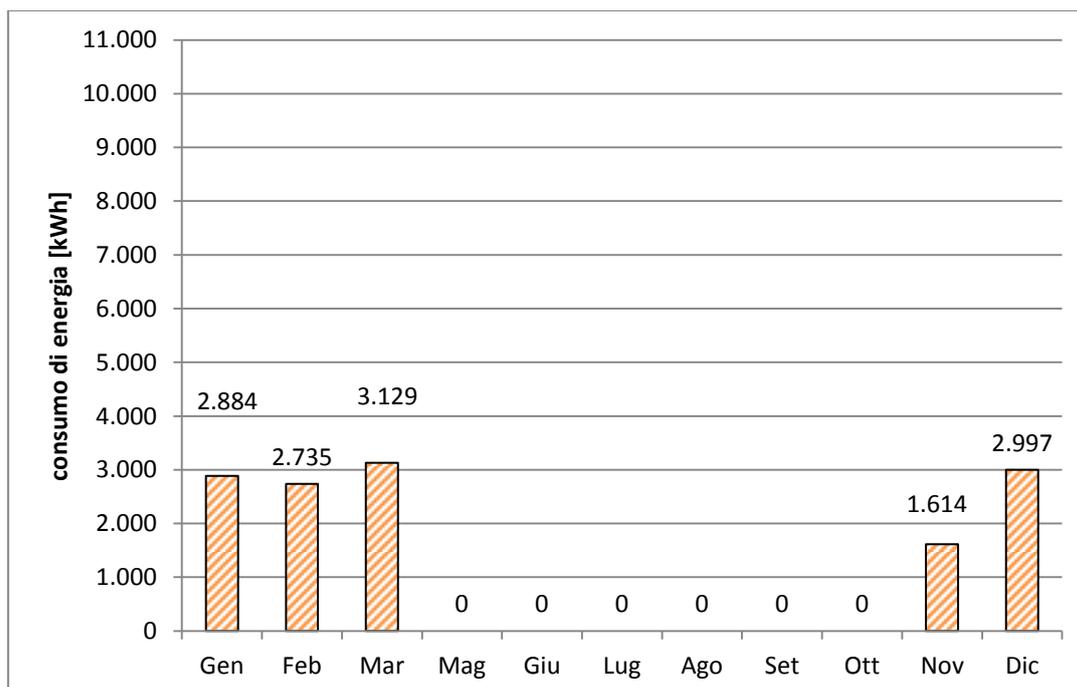


Figura 6.1: consumo di energia su base mensile "edificio 1".

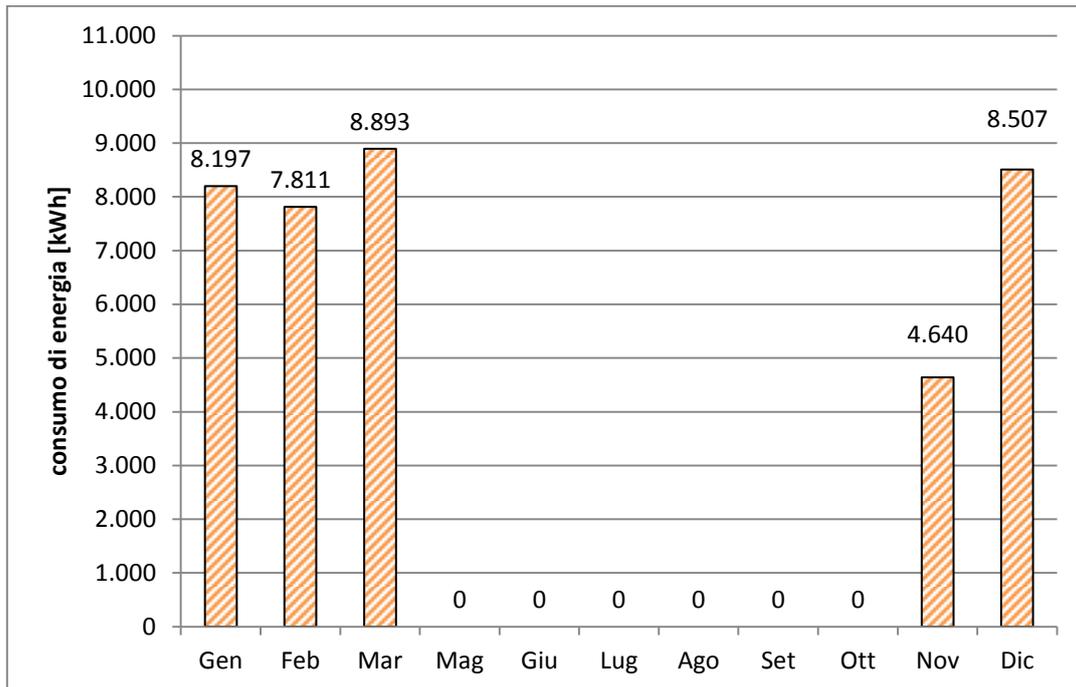


Figura 6.2: consumo di energia su base mensile "edificio 2".

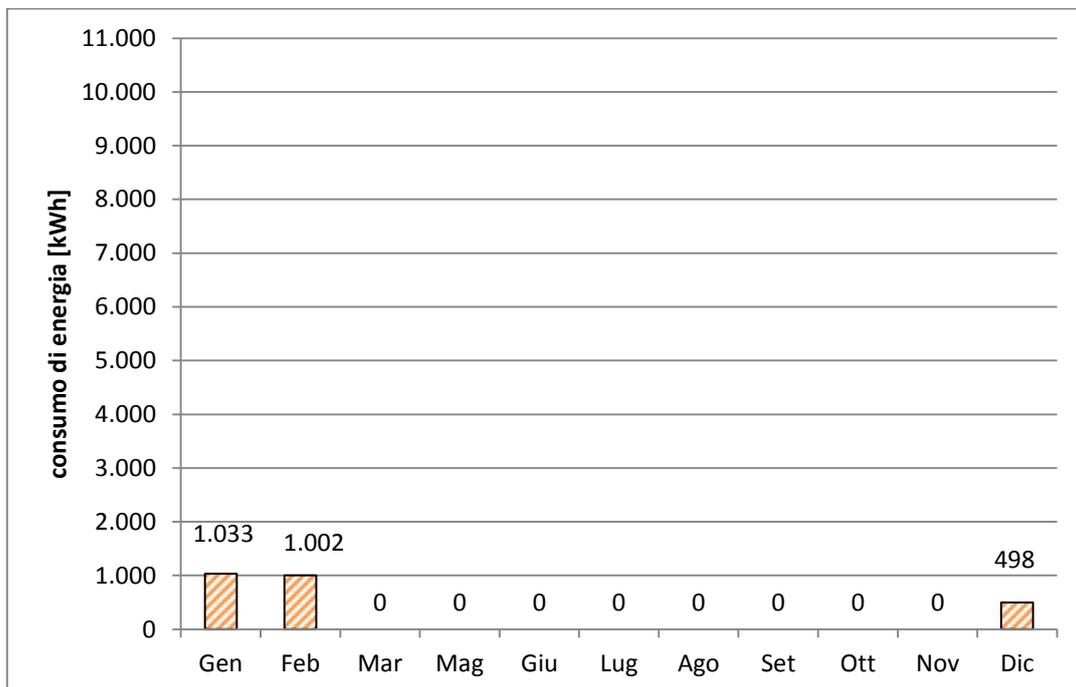


Figura 6.3: consumo di energia su base mensile "edificio 3".

Come evidenziato in figura 6.3 l'impianto di riscaldamento dell'Edificio 3 entra in funzione soltanto nei mesi di dicembre, gennaio e febbraio, sebbene il DPR 412/93 preveda per la zona climatica B un periodo di riscaldamento compreso tra il 1° dicembre e il 31 marzo. L'impianto non entra in funzione nel mese di marzo perché all'interno delle zone termiche la temperatura non scende mai al di sotto di 20°C (temperatura di setpoint dell'impianto) nelle ore di occupazione dell'edificio (figura 6.4). In figura 6.4 si riporta l'andamento delle temperature delle zone termiche durante una settimana del mese di marzo.

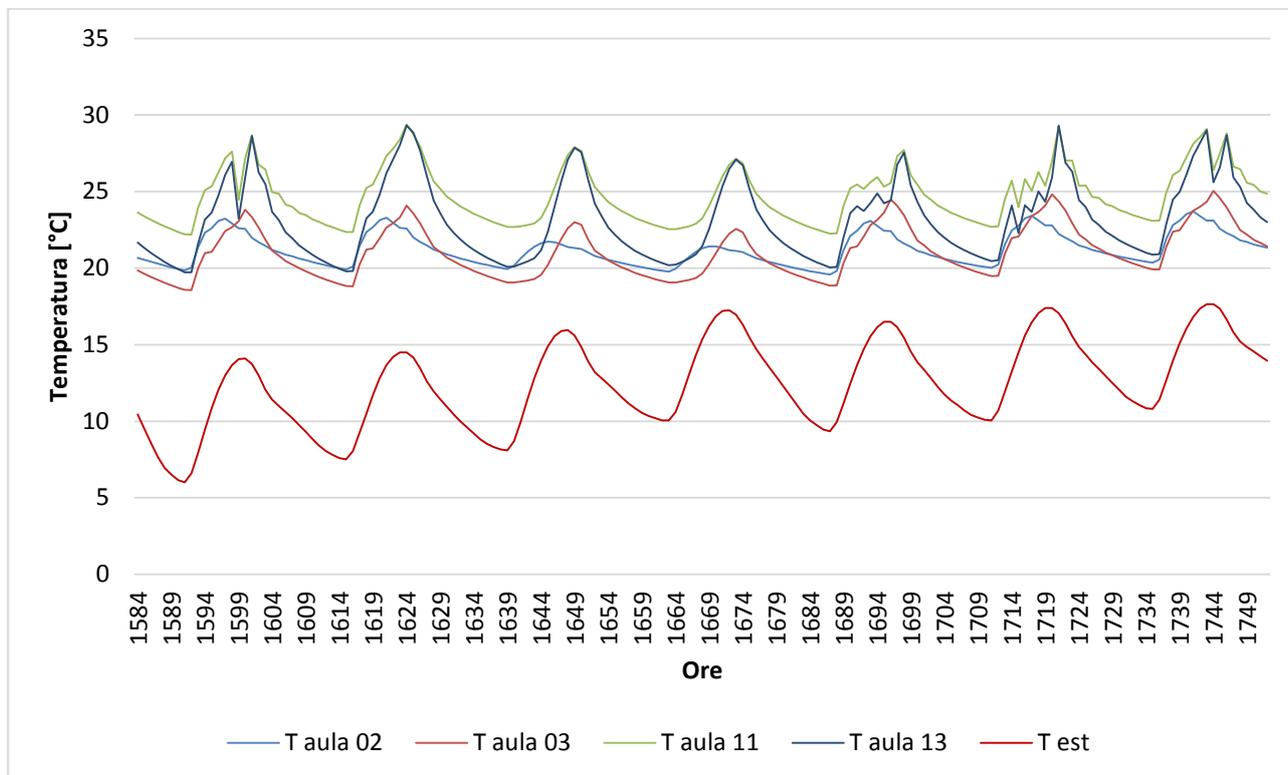


Figura 6.4: andamento delle temperature delle zone termiche durante una settimana del mese di marzo.

Si precisa che i valori di temperatura (figura 6.4) che scendono al di sotto dei 20°C sono in corrispondenza delle ore serali e notturne.

Sono stati analizzati inoltre i consumi specifici per la settimana più fredda dell’anno in cui l’impianto di riscaldamento è funzionante (tabella 6.2).

Dai risultati riportati in tabella 6.2 si rileva che l’edificio 3 ha dei consumi specifici [kWh/(m²*a)] ridotti rispetto ai primi due nella settimana comprendente il giorno più freddo dell’anno, ovvero dall’11/01 al 17/01 per la zona C e dal 9/01 al 15/01 per la zona B dell’edificio 1 e dal 20/01 al 26/01.

Tabella 6.2: Consumi energetici specifici degli impianti di riscaldamento nella settimana più fredda

Edifici	kWh	kWh/(m ²)	kWh/(aula)	kWh/(m ² *aula)	kWh/(studente)
Edificio 1	658,43	1,02	73,16	1,42	3,18
Edificio 2	1856	1,07	103,11	2,58	4,55
Edificio 3	300	0,35	21,43	0,39	0,74

Per la stessa settimana, è stata condotta un’analisi sulle condizioni di temperatura interna delle zone termiche adibite ad aule nei tre edifici per verificare l’efficacia di funzionamento degli impianti e le condizioni di comfort interne (figure 6.5-6.7).

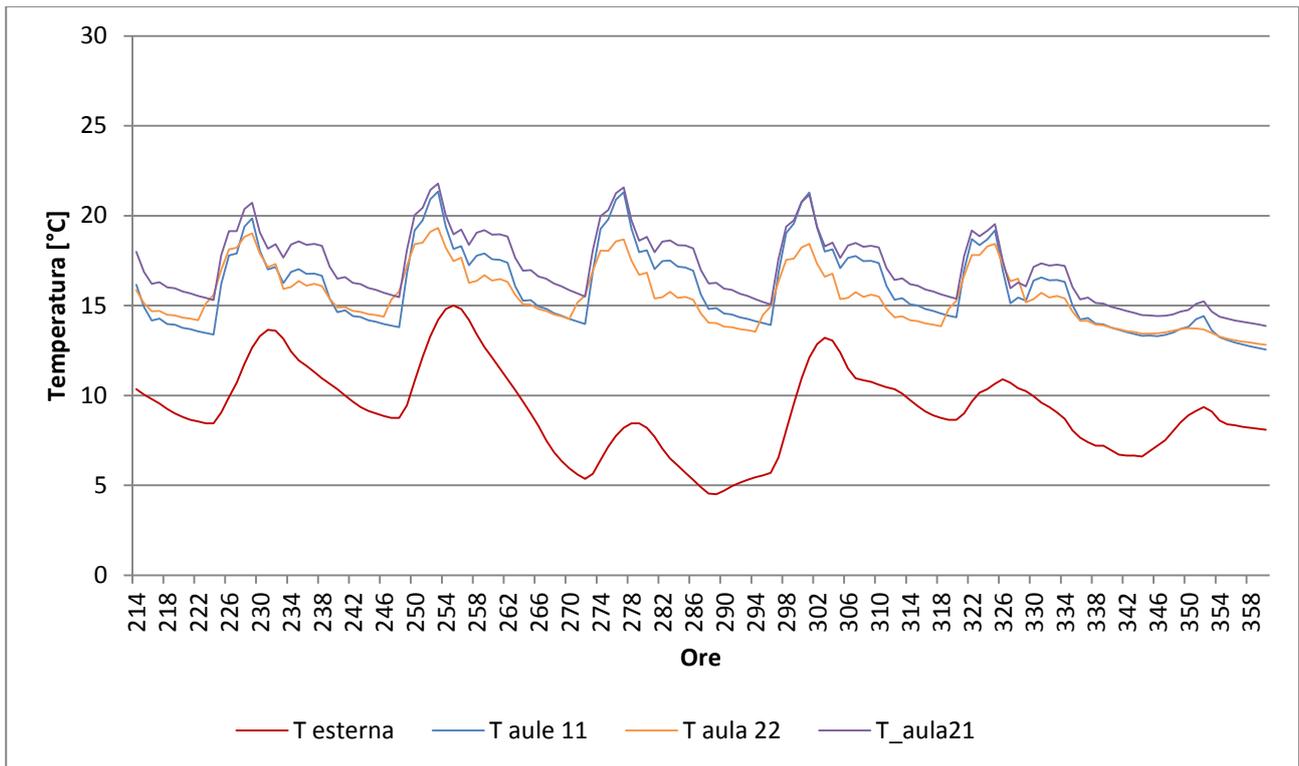


Figura 6.5: andamento delle temperature dell'Edificio 1 nella settimana più fredda

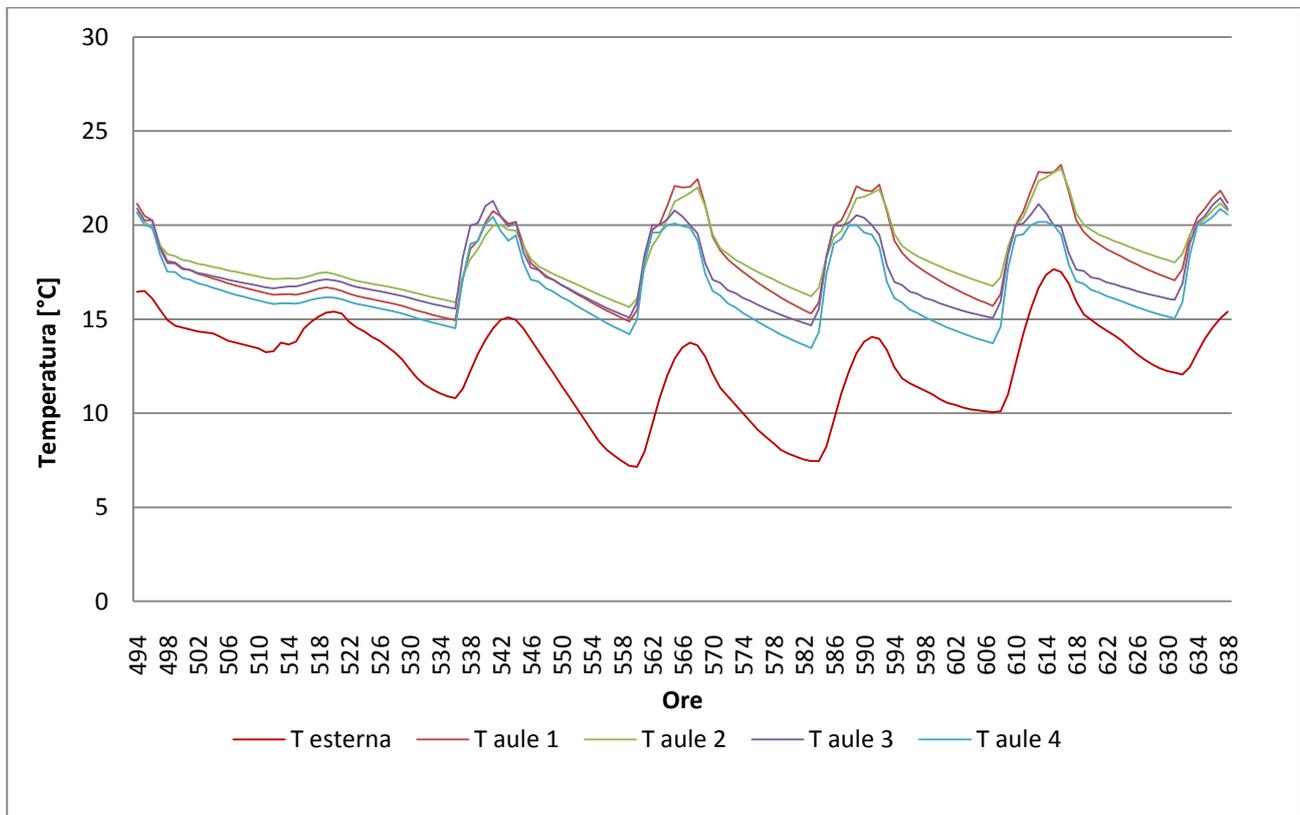


Figura 6.6: Andamento delle temperature dell'Edificio 2 nella settimana più fredda

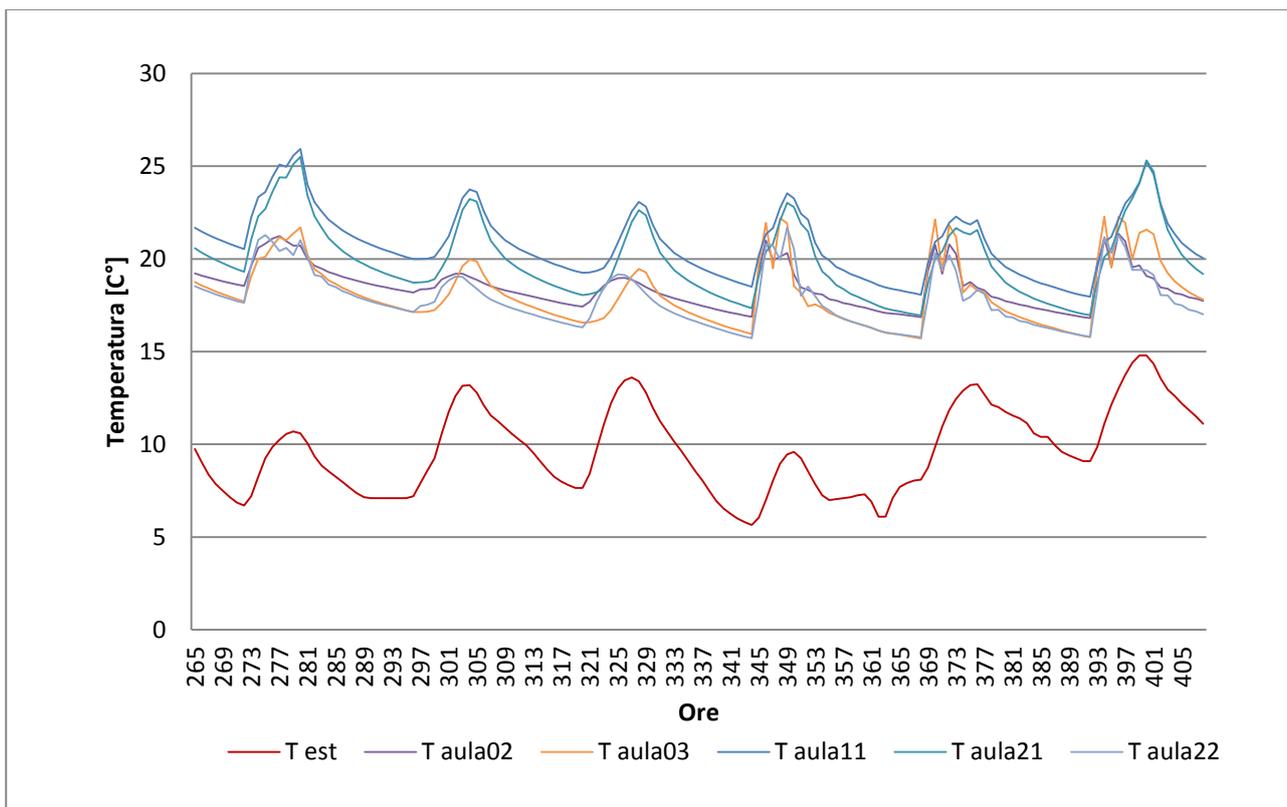


Figura 6.7: Andamento delle temperature dell'edificio 3 nella settimana più fredda

Nelle figure 6.5-6.7 sono riportati gli andamenti orari delle temperature nelle zone termiche adibite ad aule e della temperatura esterna della località di appartenenza per ognuno dei tre edifici.

Dall'esame delle suddette figure si nota che nei primi due edifici (figura 6.5 e 6.6), sebbene siano caratterizzati da un consumo di energia maggiore rispetto all'Edificio 3, la temperatura è sempre al di sotto dei 20°C nell'arco dell'intera giornata ad eccezione delle ore in cui l'impianto termico risulta essere in funzione, .

L'Edificio 3 presenta i valori di temperatura riportati in Figura 6.7, riportanti un campione rappresentativo di tutte le aule dell'edificio.

A titolo esemplificativo, nelle figure 6.8, 6.9 e 6.10 sono altresì riportati gli andamenti delle temperature delle zone termiche adibite ad aule nel periodo di Maggio.

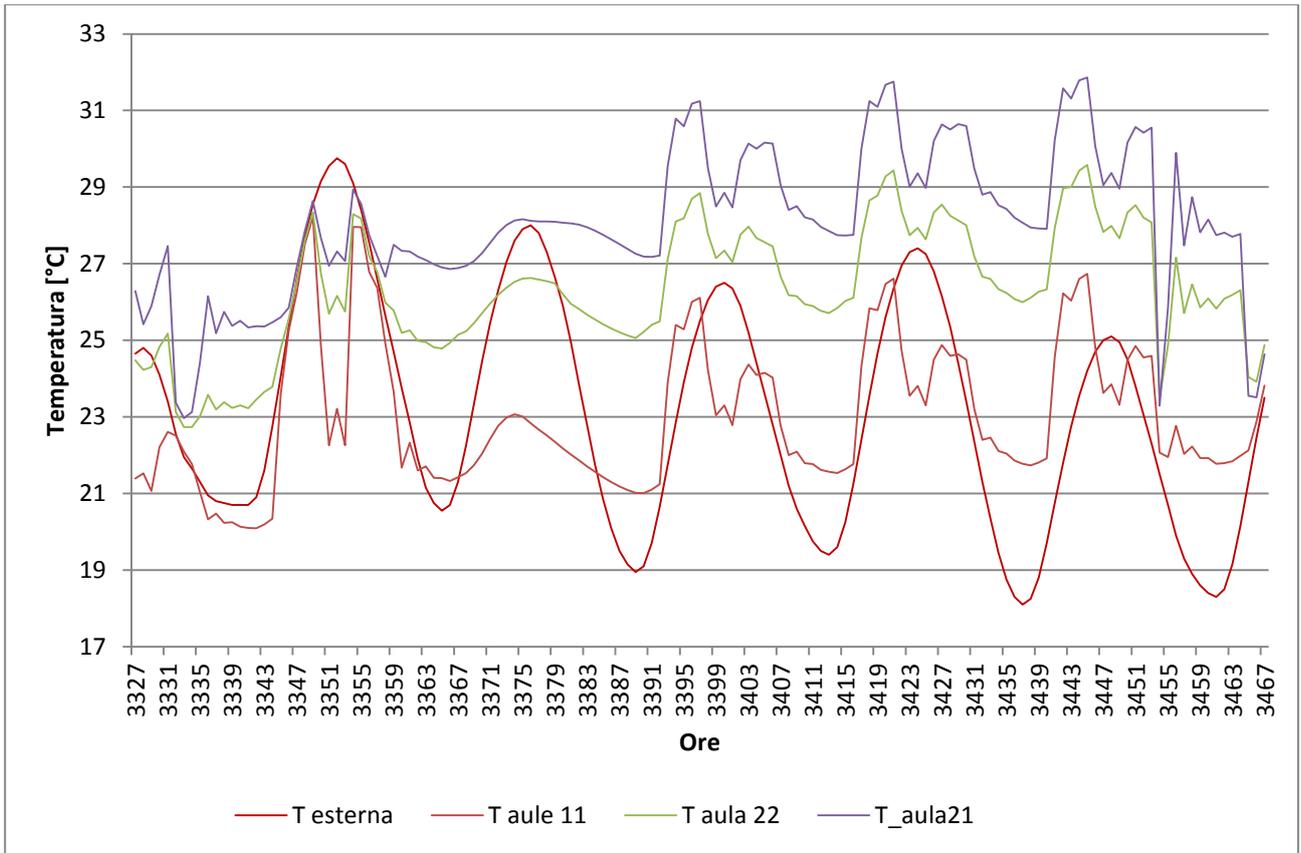


Figura 6.8: andamento delle temperature dell'edificio 1 - Maggio

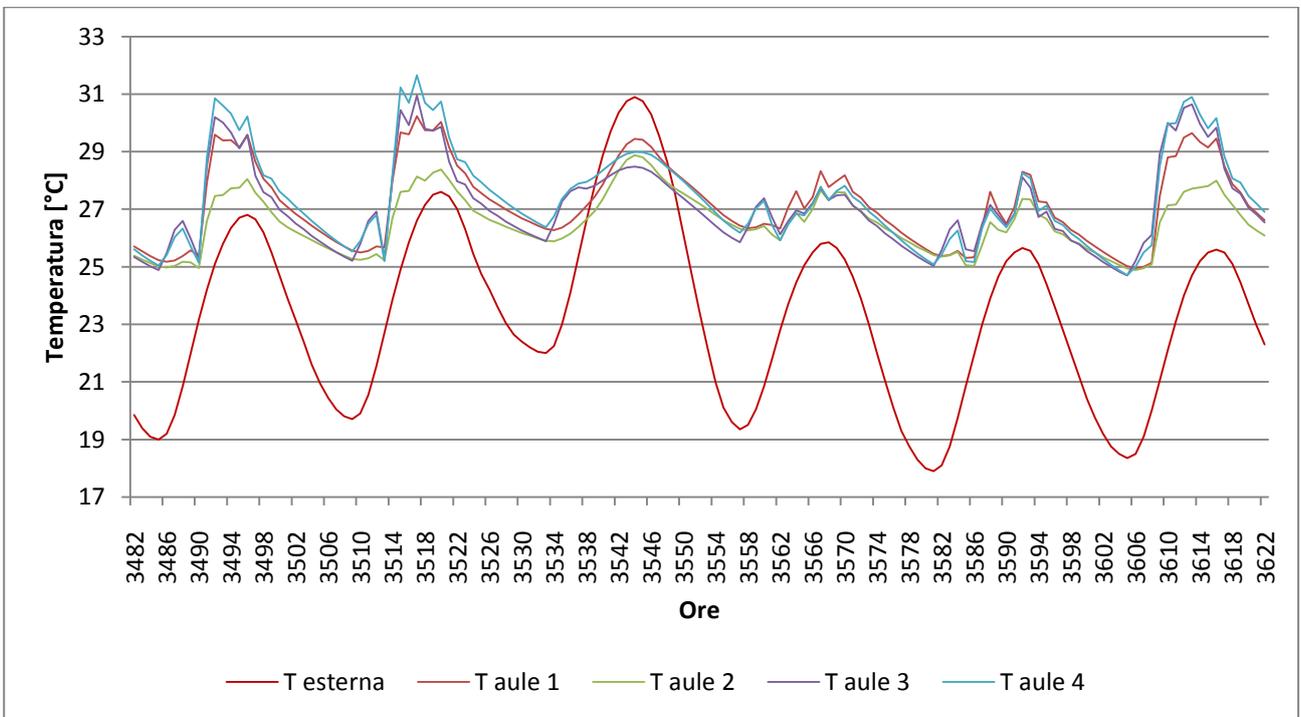


Figura 6.9: andamento delle temperature dell'edificio 2 - Maggio

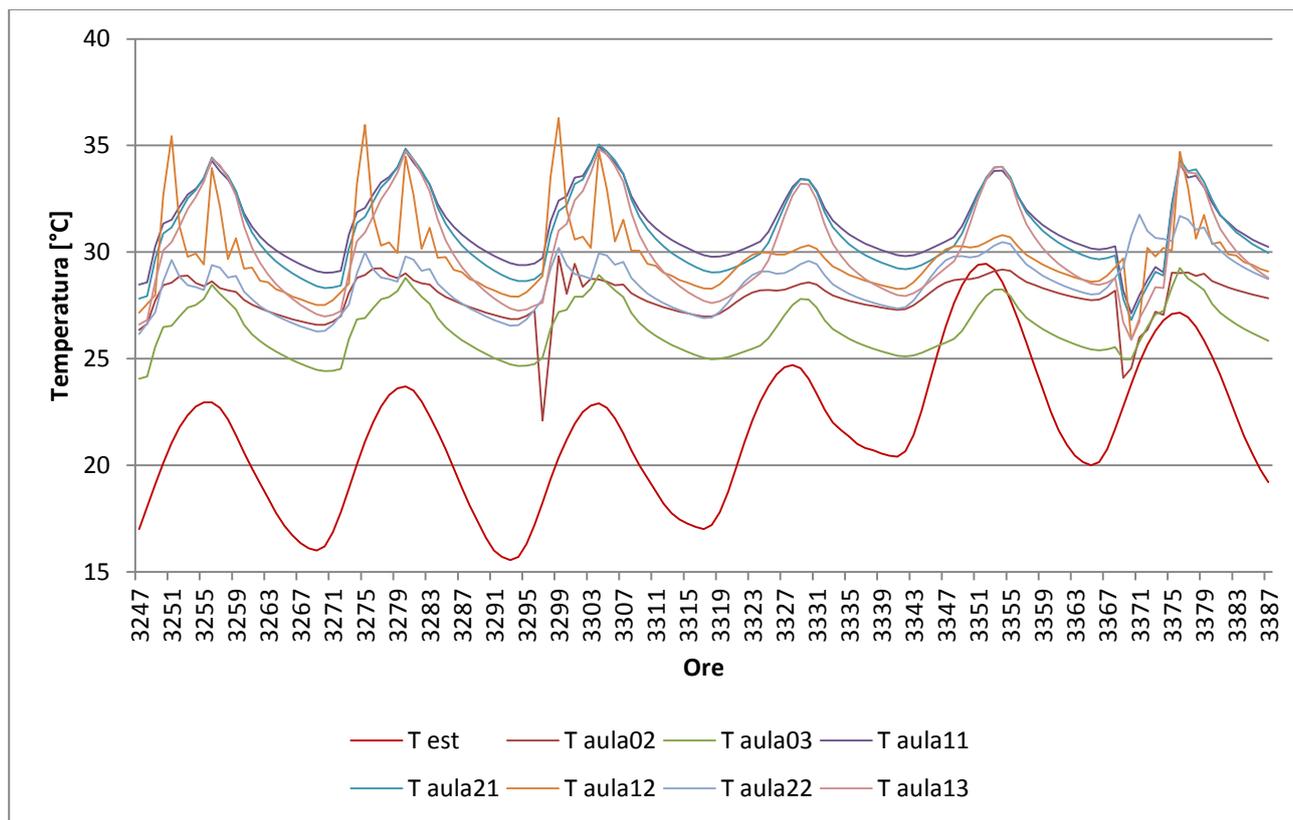


Figura 6.10: Andamento delle temperature dell'edificio 3 - Maggio

Dall'analisi della figura 6.8, nelle zone termiche "aula 22" e "aula 21" dell'Edificio 1 la temperatura si mantiene sempre al di sopra di 26 °C.

In figura 6.9 sono riportate le temperature dell'Edificio 2, nel quale quasi tutte le zone termiche, ad eccezione della zona termica "aule 2", hanno un'esposizione a sud e presentano dei picchi di temperatura superiori a 30 °C.

In figura 6.10, si riportano le temperature dell'Edificio 3. Si osserva che nelle zone termiche maggiormente esposte alla radiazione solare, la temperatura indoor assume valori dai quali potrebbero scaturire condizioni di "discomfort".

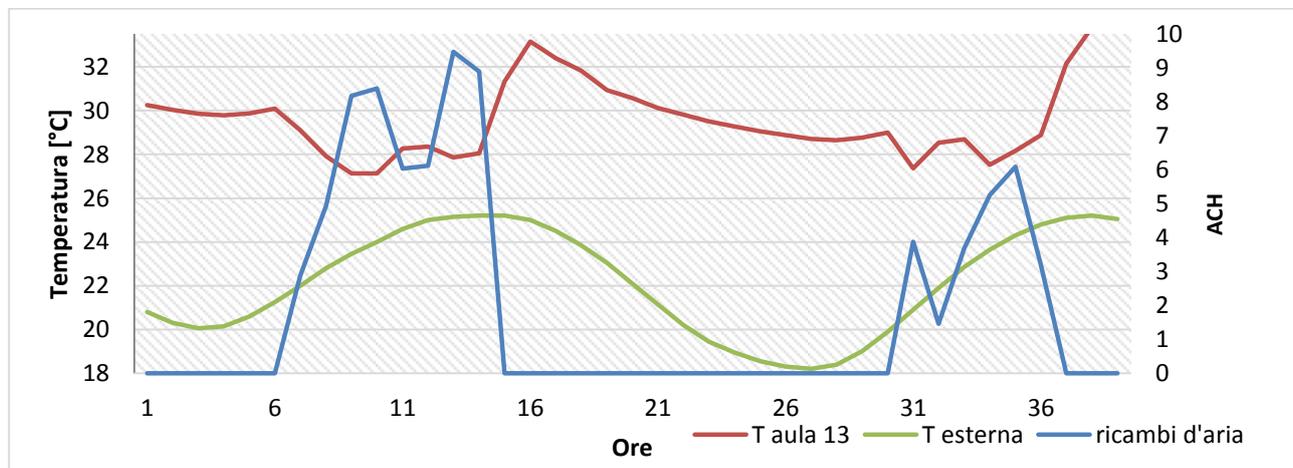


Figura 6.11: Andamento delle temperature indoor di una zona termica dell'edificio 3 - Giugno

Il raffrescamento degli edifici esaminati, che non è stato approfondito in quanto gli edifici non sono dotati di impianto di climatizzazione estiva, potrebbe essere eseguito applicando tecniche di “Ventilative Cooling”, sia tramite ventilazione naturale, sia tramite un approccio di ventilazione meccanica. Dalla figura 6.11 è possibile verificare quantitativamente l’influenza del “Ventilative Cooling” sui picchi di temperatura interna. Con un numero di ricambi d’aria per ora prossimo a 10 , la temperatura all’interno della zona termica decresce di più di 3°C, nonostante la temperatura esterna sia vicina al suo picco giornaliero.

PARTE B

7 Ventilative cooling

La necessità di combinare i requisiti di comfort indoor con il contenimento dei consumi energetici per raffrescamento nell'edilizia ha favorito la diffusione dell'utilizzo di tecniche di ventilazione naturale, meccanica e ibrida proprie del "ventilative cooling".

Generalmente il "ventilative cooling" si riferisce all'uso di strategie di ventilazione naturale o meccanica aventi per obiettivo il raffrescamento degli ambienti indoor. L'uso di aria esterna può ridurre il consumo di energia dei sistemi di raffrescamento mantenendo elevati standard di comfort.

La tecnica più semplice da utilizzare è l'aumento del numero di ricambi d'aria in un ambiente durante il giorno o la ventilazione notturna, ma è possibile considerare anche l'utilizzo di sistemi tecnologici mirati. Il "ventilative cooling" è applicabile in un ampio range di edifici e potrebbe essere di importanza significativa nella realizzazione di edifici ad energia netta zero, oggetto delle più recenti direttive e legislazioni europee e nazionali [1-2].

Lo stato dell'arte del "ventilative cooling" mostra come esistano applicazioni di vario tipo sia in paesi a climi freddi che a climi caldi, in applicazioni tipicamente residenziali o in edifici scolastici o del terziario. Appare tuttavia comune a tutti i casi studio disponibili in letteratura l'idea che, con un'ottimale schermatura solare, un appropriato utilizzo della massa termica e una sistematica riduzione dei carichi interni di picco, sia possibile ridurre in misura rilevante o in alcuni casi anche annullare i carichi di raffrescamento tramite "ventilative cooling".

Nel contesto degli standard CEN, il "ventilative cooling" è citato e regolamentato (EN 15242, EN 15241, EN 15251 e EN 13779), tuttavia sono ancora presenti alcune critiche limitazioni per le tecnologie di riferimento a livello nazionale e nei paesi dell'Unione Europea non si è ancora raggiunto un quadro unitario di recepimento. Ad esempio, non è condiviso il procedimento di calcolo del potenziale di raffrescamento dell'aria esterna, variabile a livello giornaliero, mensile o stagionale.

Si esamineranno brevemente nel seguito le principali tipologie di "ventilative cooling" ed i principali elementi tecnologici utilizzabili per massimizzarne gli effetti e alcune applicazioni. Nella seconda parte della sezione saranno descritti nel dettaglio alcuni casi-studio utili a comprendere le potenzialità di alcune tecniche di "ventilative cooling" e quantificarne gli effetti.

7.1 Stato dell'arte: Classificazione delle principali tecniche di "Ventilative Cooling"

I più significativi processi di raffrescamento ventilativo sviluppati in letteratura e utilizzati nella pratica sono i seguenti:

- 1) Raffrescamento geotermico basato sulla connessione dell'edificio con il terreno,
- 2) Raffrescamento evaporativo utilizzando l'acqua come pozzo termico,
- 3) Raffrescamento convettivo basato sull'uso dell'aria esterna.

7.1.1 Raffrescamento Geotermico

Il raffrescamento geotermico si basa sull'andamento quasi costante nel corso dell'anno della temperatura del terreno a circa 2,5 – 3 m di profondità. L'idea di dissipare il calore in eccesso da un edificio tramite scambio con un pozzo termico naturale come il terreno è ben nota sin dall'antichità. La tecnica più comune che sfrutta questo principio è quella che prevede un'interazione con il terreno tramite delle condotte sotterranee in cui fluisca l'aria.

Tali scambiatori di calore consistono in condotte interrato nel terreno nelle quali un sistema di circolazione dell'aria forza la stessa all'interno del sistema e la miscela con l'aria interna dell'edificio.

Le prestazioni di un sistema del genere variano in funzione delle sue caratteristiche come ad esempio la lunghezza o il diametro della condotta, la portata d'aria, la profondità a cui il sistema è interrato, le caratteristiche termiche del suolo, i materiali componenti il sistema.

Molte applicazioni di questo metodo sono disponibili in letteratura.

L'applicazione di uno scambiatore di calore terra-aria in un edificio adibito ad ufficio in Belgio è descritta in [15]. L'edificio ha una superficie di circa 2000 m². Lo scambiatore include due condotte di circa 80 cm di diametro e 40 m di lunghezza interrate rispettivamente a 3 e 5 m di profondità. Le condotte, costruite in calcestruzzo, sono collegate al sistema di ventilazione dell'edificio e utilizzate per fini di pre-riscaldamento o di pre-raffrescamento. Il monitoraggio dell'edificio ha permesso di stimare che l'aria in uscita dalle condotte interrate non supera mai la temperatura di 22 °C e che lo scambiatore di calore terra – aria, garantisce una riduzione delle ore di discomfort variabili tra il 20-30% durante l'intero periodo estivo.

L'applicazione di uno scambiatore terra-aria a tre edifici adibiti ad ufficio in Germania è descritta in [16]. Nel primo ufficio 26 scambiatori interrati sono stati progettati per un flusso d'aria di 12.000 m³/h. La superficie dell'edificio è prossima ai 6.000 m² e la lunghezza delle condotte varia tra i 67 e i 107 metri. Durante il periodo estivo, quando la temperatura ambiente è prossima ai 30°C, la temperatura di uscita dallo scambiatore è prossima ai 18°C. Il risparmio energetico calcolato è pari a 13,5 kWh/(m² anno).

Nel secondo ufficio (Fraunhofer IFE) sette scambiatori gestiscono un flusso d'aria di 9000m³/h, interrati a una profondità di 2m. La superficie calpestabile dell'edificio è pari a 13.150 m² e la lunghezza delle condotte a circa 95 m. Quando la temperatura esterna durante l'estate è prossima ai 36°C, la temperatura dell'aria registrata all'uscita degli scambiatori di calore è pari a 24 °C. I risparmi energetici calcolati sono pari a 23,8 kWh/(m² anno).

Nel terzo edificio (Lamparter) due condotte sono interrate a una profondità di 2,3 m ed è gestito un flusso d'aria pari a 1100 m³/h. La superficie dell'edificio è pari a 1000 m², la lunghezza delle condotte è pari a 90 m. Ad una temperatura esterna superiore ai 30°C corrisponde un valore di temperatura dell'aria in uscita dagli scambiatori di calore è pari a 20°C. I risparmi di energia sono prossimi a 12,1 kWh/(m² anno).

7.1.2 Raffrescamento evaporativo

Il raffrescamento evaporativo è usato diffusamente come tecnica di raffrescamento passivo nell'edilizia. Esistono generalmente due differenti tipologie di tecniche di raffrescamento evaporativo:

- Raffrescamento evaporativo diretto, comunemente utilizzato per gli edifici residenziali. In questo tipo di raffrescamento evaporativo la riduzione delle temperature è seguita da un aumento dell'umidità del flusso d'aria;
- Raffrescamento evaporativo indiretto in cui il raffrescamento evaporativo è fornito tramite uno scambiatore di calore, che mantiene separata l'aria umida dall'ambiente da condizionare, non causando un aumento dell'umidità relativa dell'aria della stanza da raffrescare.

Le tecniche di raffrescamento evaporativo sono le più semplici e antiche tecniche di condizionamento dell'aria.

Basate sull'utilizzo di sistemi convettivi volti a incanalare l'aria nell'edificio dopo averla forzata nel sistema di evaporazione, tali tecniche risultano essere semplici nella realizzazione, a basso costo e di utilizzo comune nelle applicazioni residenziali e non residenziali.

Il limite teorico del potenziale dei sistemi basati su raffrescamento evaporativo è fissato dalla temperatura di bulbo umido.

Gli sforzi della ricerca degli ultimi decenni si sono concentrati principalmente sull'aumento dell'efficienza dei sistemi cercando di abbassare la temperatura dell'aria in uscita a valori più vicini alla temperatura di bulbo umido.

Ad esempio in [17] si propone uno studio volto alla combinazione di un sistema di raffrescamento evaporativo con un camino solare in un edificio adibito ad ufficio. Il camino solare è collegato ad un elemento costruttivo opaco rivolto verso sud. Il raffrescamento evaporativo è effettuato attraverso un sistema a soffitto in cui il canale "umido" è adiacente alla stanza. L'aria all'interno del camino solare è riscaldata dalla radiazione solare, creando un flusso ascendente causato dall'effetto di galleggiamento. Nel

collegare l'uscita dell'aria del sistema evaporativo con l'ingresso del camino solare, l'aria fluisce attraverso il sistema di raffrescamento prima di essere introdotta nel camino solare. Il sistema è testato attraverso simulazioni e mostra la capacità di ridurre il carico di raffrescamento di picco (dell'ordine di 40-50 W/m²) del 10% grazie all'applicazione del sistema proposto sul 25% della superficie del soffitto.

A differenza dei sistemi diretti, i **sistemi indiretti** trovano ampia applicazione in regioni a clima caldo-umido.

In queste regioni, in cui generalmente le fluttuazioni di temperatura esterna sono contenute e l'umidità è considerevolmente elevata nel corso di tutto il giorno, il raffrescamento diretto non risulterebbe efficace: sistemi a raffrescamento evaporativo indiretto possono diventare un'alternativa dalle buone prestazioni.

Tali sistemi di solito incorporano uno scambiatore di calore aria-aria per rimuovere il calore dall'aria che ha subito l'effetto "evaporativo" senza aumentare la quota di umidità contenuta nello stesso.

L'evoluzione di questi sistemi è rappresentata dai sistemi di raffrescamento evaporativo bi-stadio (fig. 8.1).

Tali sistemi pre-raffreddano l'aria prima che fluisca attraverso il sistema evaporativo. I sistemi evaporativi bi-stadio possono ridurre i consumi energetici dal 60% al 75% rispetto ai sistemi tradizionali.

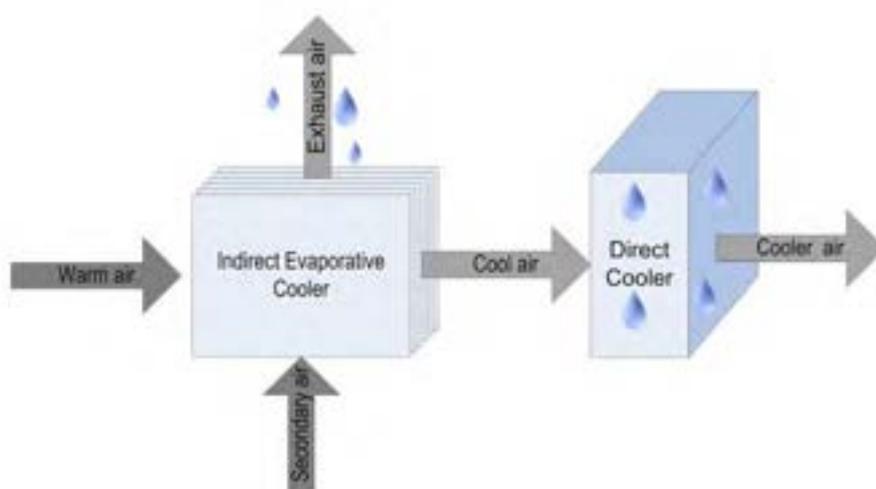


Fig.8.

8.1 – Sistema di raffrescamento evaporativo bi-stadio

Le applicazioni di raffrescamento evaporativo indiretto sono sistemi che richiedono una quota moderata di energia per funzionare e sono efficaci in edifici non residenziali particolarmente ampi in cui l'utilizzo di soluzioni tecniche passive non è sufficiente a creare condizioni di comfort nell'ambiente indoor.

7.1.3 Ventilazione diurna e notturna

Il raffrescamento convettivo notturno sfrutta l'aria esterna a temperatura inferiore rispetto all'interno durante la notte per raffrescare l'edificio, dissipare il calore assorbito dalla massa termica e ridurre le temperature dell'aria interna dell'edificio durante il giorno seguente.

La ventilazione notturna può essere sia naturale, e quindi causata da differenza di temperatura e/o gradiente di pressione, oppure essere supportata efficacemente da sistemi di ventilazione forzata quando le forzanti naturali sono deboli. L'efficienza di questa tecnica è principalmente basata sulla differenza relativa di temperatura tra interno ed esterno durante la notte. Generalizzando il concetto tuttavia, il potenziale di raffrescamento ventilativo notturno è funzione del flusso d'aria disponibile, della capacità termica dell'edificio e dell'appropriata connessione tra massa termica e flusso d'aria.

Come approfondito da Givoni [18], l'efficacia delle tecniche di ventilazione passiva è particolarmente rilevante in regioni dal clima tropicale o arido, in cui la variazione di temperatura tra giorno e notte è particolarmente rilevante nel corso di tutto l'anno e in cui la ventilazione effettuata durante il giorno non risulta sufficiente a garantire adeguati livelli di comfort termigrometrico indoor. Givoni altresì sottolinea

come la capacità di adattamento degli occupanti sia fondamentale nella definizione di criteri di comfort indoor e come questi non possano essere universali: da studi effettuati in zone a clima tropicale Givoni ha verificato infatti come temperature apparentemente troppo elevate (fino a 32°C), se combinate con un adeguato flusso d'aria all'interno dell'edificio, fossero percepite come accettabili dagli occupanti.

Santamouris et al. [19] ha verificato come l'applicazione di tecniche di ventilazione notturna in edifici residenziali possa raggiungere una riduzione dei carichi di raffrescamento pari quasi a 40 kWh/(m² anno) con una media di 12 kWh/(m² anno). In aree urbane tuttavia, il fenomeno dell'isola di calore urbana – ovvero l'aumento di temperatura nelle zone urbane in confronto alle circostanti aree urbane e rurali - può avere un diretto impatto sui carichi termici, sulle condizioni ambientali e conseguentemente sull'efficacia del "ventilative cooling".

Nell'analisi è riportato uno studio di letteratura[19], comprendente più di 200 edifici in Grecia. La figura 8.2 mostra l'andamento dei consumi energetici evitabili grazie alla ventilazione notturna in tutti i casi studio documentati. Gli autori stimano una potenziale riduzione dei consumi per raffrescamento variabile tra il 15 – 40 % del totale.

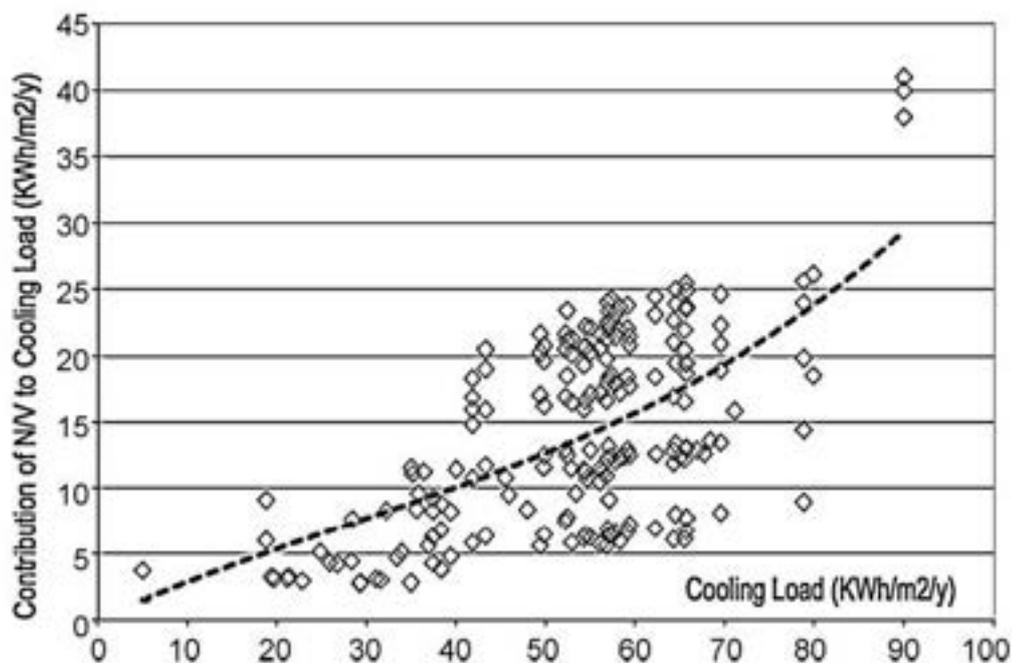


Fig. 8.2 Consumo energetico specifico evitato tramite tecniche di ventilazione notturna come funzione del carico totale di raffrescamento (asse x) [19]

Dall'analisi di letteratura si evince altresì che il contributo specifico della ventilazione notturna per unità di flusso d'aria (1 ach) decresce in misura molto marcata all'aumentare del numero di ricambi d'aria utilizzato. In particolare, nei casi studio riportati in [19], ai quali si rimanda per eventuali e ulteriori approfondimenti, gli autori stimano un risparmio energetico indotto dalla ventilazione notturna stimabile in 3,3 , 2,5 , 1,8 , 1,2 e 0,7 kWh/(m² y) per valori di ricambi d'aria pari a 2, 5, 10, 20 e 30 rispettivamente (Fig. 8.3).

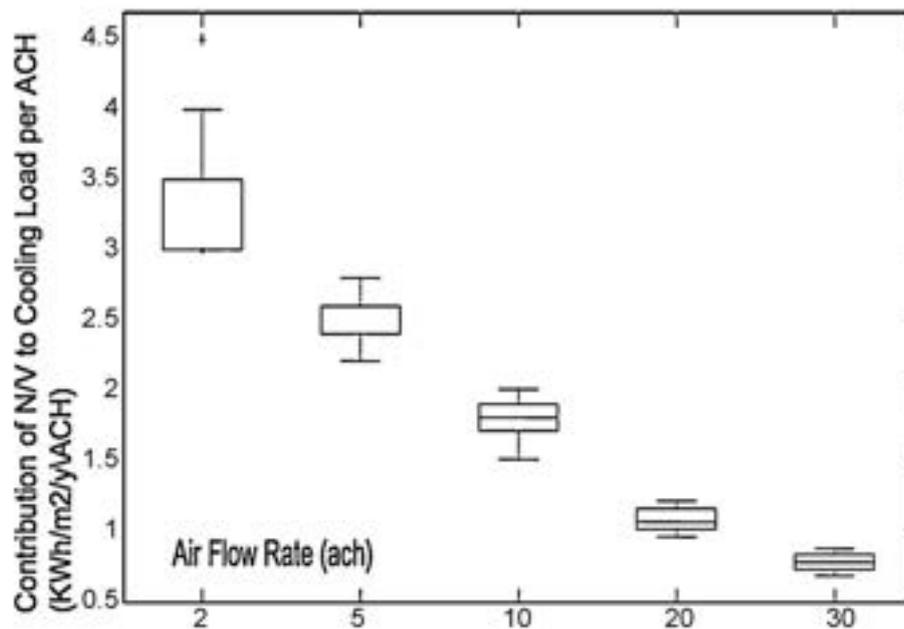


Fig 8.3 Consumo energetico specifico evitato grazie al raffrescamento notturno per unità di ricambio d'aria [19]

Givoni [20] sottolinea l'importanza della velocità dell'aria come mezzo per aumentare la traspirazione della pelle e ridurre il discomfort causato dalla pelle umida. E' inoltre fondamentale il ruolo degli utenti, per la potenziale capacità di gestione della temperatura interna in accordo alle necessità di comfort aprendo e chiudendo le finestre e attivando o disattivando i sistemi ombreggianti.

7.2 Componenti e soluzioni tecniche

Negli ultimi decenni, il rapido sviluppo tecnico dei sistemi di climatizzazione ha causato un progressivo abbandono dei sistemi tipici del design passivo e dei tipici stili architettonici sviluppati da secoli di pratica in favore di un'architettura "internazionale" dalle scarse prestazioni termofisiche.

Il "ventilative cooling" è un effetto che scaturisce da una progettazione efficace: non esiste una soluzione ottimale, né delle soluzioni architettoniche "internazionali", che siano valide ed efficaci per qualunque caso studio. E' necessaria infatti una soluzione accurata in armonia alle caratteristiche climatiche del sito e basata sui requisiti di comfort del microclima interno, sull'ottimizzazione degli usi dell'energia e dei costi, delle richieste degli occupanti. La progettazione non può che essere "integrata" e "multidisciplinare".

La progettazione deve senza dubbio ottimizzare:

- La forma dell'involucro edilizio,
- La disposizione e le funzioni degli spazi interni,
- La dimensione e il posizionamento delle aperture,
- Le caratteristiche e le dimensioni della massa termica esposta,
- Le interazioni con i sistemi impiantistici.

Questa sezione passa in rassegna i principali e più innovativi elementi tecnici utilizzati in letteratura al fine di massimizzare l'effetto di raffrescamento proprio del "ventilative cooling":

- **Sistemi a camino.** Si tratta dell'elemento utilizzato più comunemente per sfruttare i naturali gradienti di temperatura e garantire l'instaurarsi della ventilazione naturale. Il fenomeno fisico di riferimento è la variazione di densità dell'aria che induce il fenomeno di galleggiamento. L'aumento di temperatura dell'aria causa un decremento di densità e quindi una creazione di un flusso ascensionale verso l'esterno del camino. Tali sistemi possono essere utilizzati in combinazione con componenti basati su tetti "Venturi" o con sistemi a ventilazione forzata che ne aumentino le prestazioni. Possibili campi di ottimizzazione e ricerca allo stato attuale sono:



la massimizzazione dell'effetto di galleggiamento, lo sviluppo di un design ottimale di ventilazione negli edifici del terziario, la creazione di un controllo dinamico del flusso dell'aria nello spazio e nel tempo e il potenziamento dell'efficacia della ventilazione notturna con un utilizzo ottimale degli effetti di accumulo termico;

- **Camini solari.** I possibili miglioramenti nel design di questi sistemi riguardano principalmente lo sviluppo di soluzioni modulari per sistemi solari e a galleggiamento e la creazione di linee guida per la progettazione e il funzionamento di tali sistemi;
- **Torri del vento.** Si tratta di elementi tipici dell'architettura Araba. Fanno uso della velocità del vento in luoghi elevati rispetto al terreno, tramite costruzioni che favoriscono l'ingresso all'interno della torre e lo forzano all'interno dell'edificio. In molti casi, l'effetto ventilativo è rafforzato da elementi evaporativi all'interno della torre stessa. Esiste un'ampia casistica bibliografica dedicata a questo argomento e ampi margini di miglioramento tecnologico, con riferimento in particolare al miglioramento dell'efficacia di questi sistemi per velocità del vento basse e variabili dinamicamente.
- **Doppie facciate.** Le doppie facciate sono utilizzate dagli anni '90 come strumento potenzialmente efficace in fasce climatiche differenti. L'idea era quella di offrire una zona temperata di "buffer" tra interno ed esterno. I risultati non sono stati pari alle aspettative e il bilancio energetico di questi spazi dipende prevalentemente dagli apporti solari. La loro principale funzione è comunque quella di formare un filtro con l'esterno e realizzare delle soluzioni tecnologiche di ventilazione a confine con l'involucro interno. Da un esame delle principali esperienze internazionali, le doppie facciate sono prevalentemente utilizzate negli edifici non-residenziali e sono generalmente progettate senza un particolare riferimento al clima locale. Per questa ragione è frequente che si verifichino fenomeni di surriscaldamento non previsti all'interno dei locali. Un utile ausilio alla progettazione può essere costituito dalla redazione di linee guida funzionali alle caratteristiche climatiche del sito di intervento. Una maggiore diffusione di questi sistemi è legata anche alla riduzione del loro costo.
- **Sistemi ad atrio.** Gli atrii sono zone di "buffer" tipicamente non-climatizzate, generalmente circondate dalle facciate dell'edificio e talvolta delimitate da coperture vetrate nella parte superiore. Se progettato correttamente il rischio di surriscaldamento in questi sistemi può essere controllato in modo più efficace che nelle doppie facciate. Tali sistemi possono essere integrati a soluzioni di "ventilative cooling", generalmente creando flussi d'aria basati su effetti di galleggiamento. Uno dei principali temi di ricerca è rappresentato dalla definizione di soluzioni progettuali adattate alle caratteristiche climatiche del sito. Un ulteriore ambito di ricerca in fase di sviluppo è rappresentato dall'ottimizzazione delle prestazioni energetiche di tecnologie di "cool pavements", "cool plaster" e schermature solari basso-emissive.

7.3 Casi studio significativi del settore non-residenziale

Questa sezione ha come finalità la descrizione di alcuni casi studio per descrivere le potenzialità di risparmio energetico connesse all'utilizzo di soluzioni di "Ventilative Cooling" in edifici del settore terziario. In particolare si è approfondita la potenzialità delle tecniche di ventilazione notturna in quanto una delle più applicate in tutti i contesti geografici.

7.3.1 Studio sulla ventilazione notturna in tre edifici non residenziali ad Atene, Grecia

Geros et al. [21] descrivono l'analisi sperimentale dell'efficacia di tecniche di "ventilative cooling" e più in generale di tecniche di ventilazione notturna applicate a edifici non residenziali, tra cui uno utilizzato a fini scolastici situati ad Atene.

Lo studio si è avvalso di un'estesa campagna sperimentale durante due estati consecutive in edifici che presentano caratteristiche differenti:

- Un edificio adibito ad ufficio della zona urbana di Atene, chiamato “Meletitiki”. L’edificio è composto da sette zone e non ha partizioni interne, visto che è stato progettato come un unico volume. La struttura è **leggera**, l’edificio è ampiamente ventilato durante la notte tramite ventilazione ibrida.
- Un edificio universitario climatizzato nel centro di Atene. La campagna sperimentale è stata effettuata su una zona specifica localizzata al terzo piano dello stesso. L’edificio presenta **un’inerzia termica maggiore** rispetto al precedente ed è caratterizzato da **carichi interni particolarmente rilevanti**. In tutti gli edifici è stata effettuata una campagna di misurazione della distribuzione di temperatura e dei ricambi di aria in condizioni di ventilazione naturale e sono stati studiati sia l’andamento in “free-floating” che con temperatura impiantistica prefissata.

Nell’ambito dello studio sono stati definiti dei modelli in ambiente TRNSYS [22] validati sui dati monitorati.

Il primo edificio ‘Meletitiki’ è stato simulato sia in condizioni di “free-floating”, sia in condizioni di funzionamento dell’impianto di climatizzazione. In figura 8.4 sono mostrate le temperature dell’aria per lo scenario in cui è stata implementata la ventilazione notturna (N/V) e per quello in cui tale tecnica non è stata adoperata (NO N/V).

In condizioni di free floating, l’uso di alti tassi di ricambio d’aria contribuisce a un decremento della temperatura interna di picco dell’edificio durante il giorno successivo, sino quasi a raggiungere i 3°C. Inoltre, la diminuzione oraria della temperatura dell’edificio a causa della ventilazione notturna varia da 1,8 °C a 3°C, come descritto in tabella 8.1.

Tabella 8.1 Riduzione delle temperatura interna nell’edificio Meletitiki (°C)

Ricambi d'aria orari	Zona 2	Zona 4	Zona 6	Zona 7	Media
10	1.59	2.41	2.61	2.42	2.26
20	1.87	2.77	3.02	2.85	2.63
30	1.99	2.9	3.18	3.02	2.77

La figura 8.5 mostra la distribuzione delle temperature in una zona dell’edificio con e senza ventilazione naturale per un giorno specifico (8 Agosto). Appare evidente come la ventilazione notturna causi un decremento nella temperatura interna all’inizio del periodo diurno di circa 2°C se confrontato al caso in cui tale tecnica non sia applicata. Per studiare l’impatto dei differenti tassi di ricambio d’aria (10, 20, 30 ricambi d’aria) sono state effettuate differenti simulazioni. La riduzione massima della temperatura interna indotta dalla ventilazione notturna è pari a 7.3°C mentre i valori medi variano tra 2,3 e 2,8 °C rispettivamente per 10 e 30 ricambi d’aria.

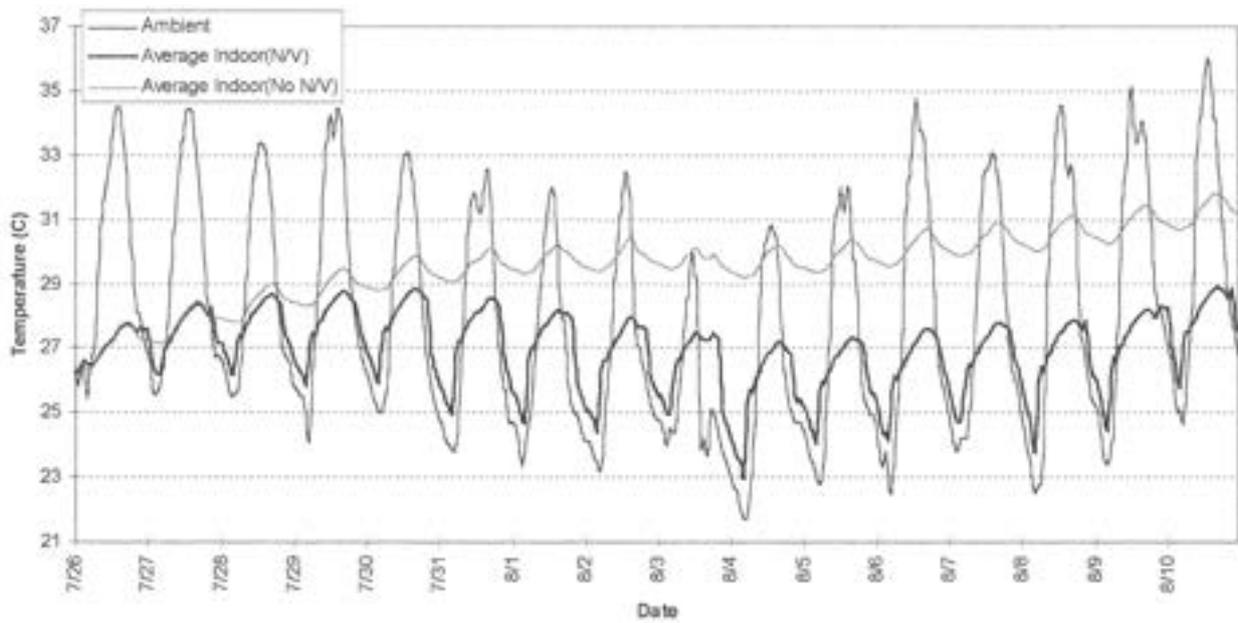


Fig. 8.4 – Andamento delle temperature simulate per l'edificio 1

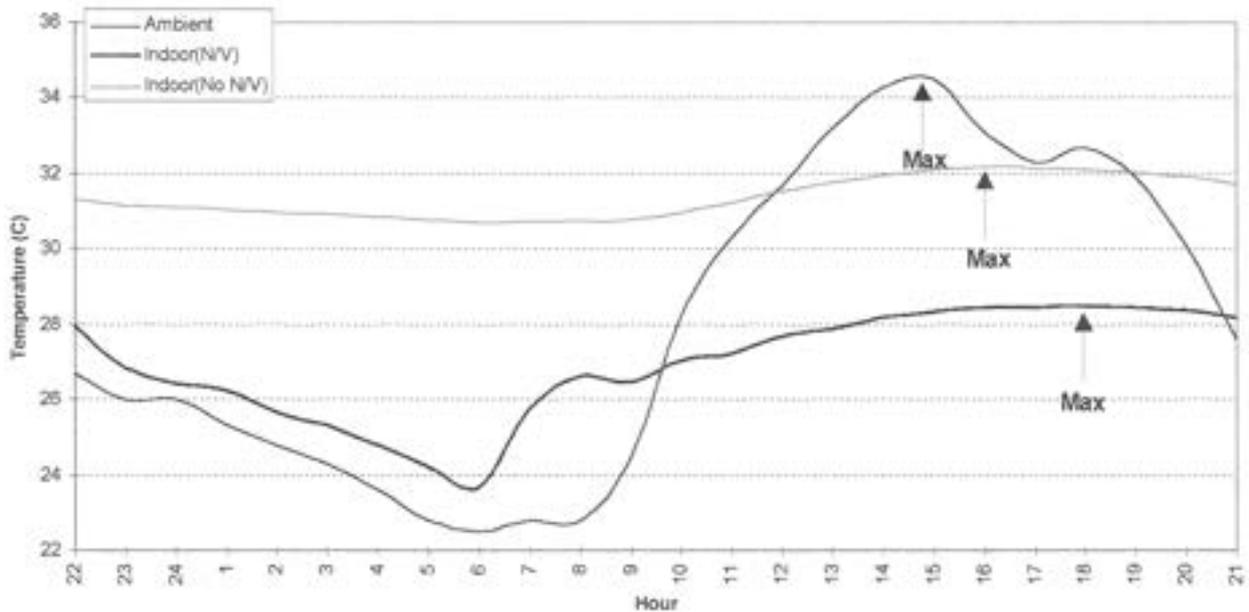


Fig. 8.5 Andamento orario delle temperature simulate per 24 ore (8 Agosto)

Per stimare l'impatto della ventilazione notturna sui consumi energetici sono state effettuate differenti simulazioni in ambiente Trnsys con diverse temperature di setpoint: 25, 27 e 29 °C. I risultati sono riepilogati nella tabella 8.2. I consumi energetici dell'edificio esistente sono comparati a differenti scenari di "Ventilative cooling" in cui il tasso di ricambi d'aria (ACH air change per hour) varia da 10 a 30. Gli autori sottolineano che per temperature di setpoint pari a 25°C il risparmio di energia è contenuto in un intervallo variabile dal 48 al 56%, per un setpoint di 27°C la riduzione dei carichi termici di raffreddamento varia dal 72 all' 80% dei carichi originari [21].

Tabella 8.2 Edificio 1: consumi energetici per raffrescamento [kWh/m²] [21]

Setpoint °C	25	27	29
0 ACH	21,32	14,09	8,27
10 ACH	10,99	3,99	0,85
20ACH	9,80	3,22	0,60
30ACH	9,35	2,94	0,52

Anche il secondo edificio, “Università”, è stato simulato in ambiente TRNSYS e il modello risultante è stato calibrato sui dati sperimentali rilevati, sia in “free floating” sia nel calcolo dei carichi termici di raffrescamento.

In figura 8.6 sono riportate le temperature simulate per differenti valori di ricambi d’aria e la temperatura ambiente reale.

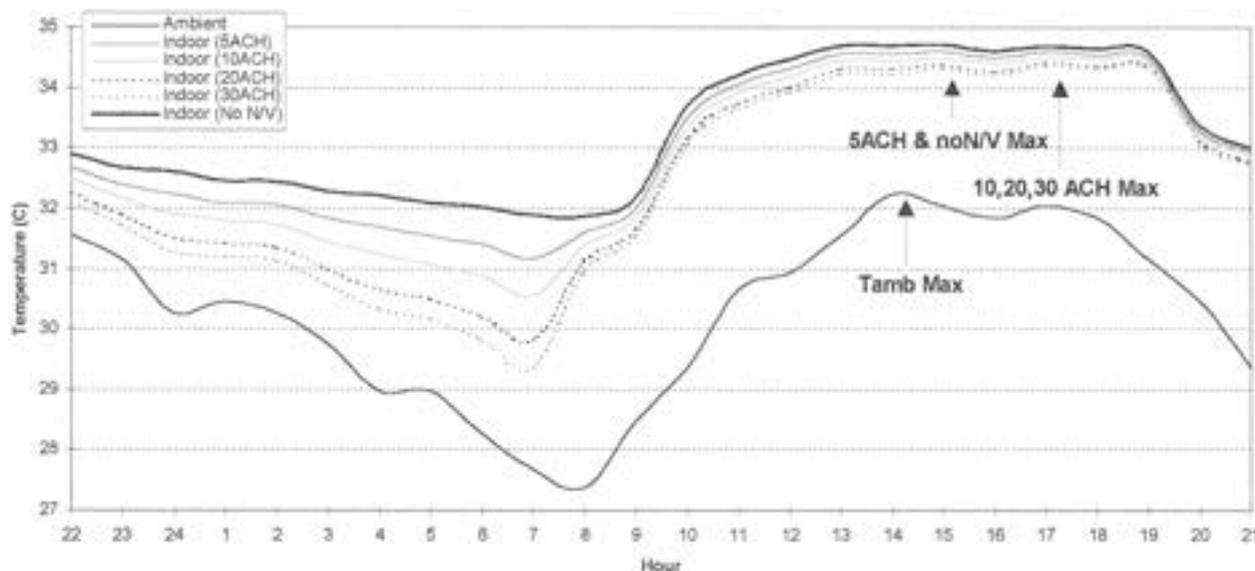


Fig. 8.6 Temperature simulate e reali della zona termica analizzata

Il risparmio energetico calcolato per i tre differenti setpoint è riepilogato nella tabella 8.3. Per un setpoint di 25°C, il risparmio di energia raggiunge il 36%, raggiunge il 54% per i 27°C e il 71 % per un setpoint di 29°C.

Tabella 8.3 Edificio 2: consumi energetici per raffrescamento [kWh/m²]

Setpoint °C	25	27	29
0 ACH	105,62	98,64	91,66
10 ACH	82,02	64,58	47,28
20ACH	72,31	51,68	32,77
30ACH	67,41	45,70	26,86

8 Conclusioni

L'edilizia scolastica siciliana è caratterizzata, in termini di prestazioni energetiche, da un ampio bacino potenziale di miglioramento delle caratteristiche energetiche, su cui investire per raggiungere gli ambiziosi obiettivi fissati nelle direttive comunitarie e nella più recente legislazione nazionale. Come descritto in [3] l'edilizia scolastica dell'isola presenta un corpo di edifici dalle scarse prestazioni termofisiche risalenti, per una considerevole percentuale, ad anni antecedenti al 1950.

Partendo dall'analisi delle condizioni del patrimonio edilizio scolastico siciliano [3] lo studio, nella presente annualità, ha previsto la selezione e l'analisi energetica di un campione di edifici rappresentativi.

In dettaglio è stato individuato un campione ristretto di tre edifici che sono stati modellizzati, dal punto di vista termofisico, in regime dinamico. Successivamente è stato definito un set di indicatori sintetici delle prestazioni energetiche degli edifici scolastici studiati.

I consumi energetici per riscaldamento calcolati sono appena superiori a circa 20 kWh/(m² anno) di metano per i primi due edifici e raggiungono circa 3 kWh/m² anno per il terzo edificio, che ha subito negli ultimi anni interventi efficaci e diffusi di riqualificazione energetica.

Una prima conclusione dello studio scaturisce dal confronto comparato dei risultati ottenuti per i tre edifici. L'edificio riqualificato energeticamente consentirebbe di risparmiare l'85% di energia limitandosi al solo riscaldamento.

L'ultima parte del report riassume i primi risultati conseguiti all'interno dell'Annex 62 dell'IEA, denominato "Ventilative Cooling". Dai risultati si evince come l'implementazione di tecniche di "Ventilative Cooling" garantirebbe riduzioni significative nei consumi energetici del settore civile di utenza.

9 Riferimenti bibliografici

1. The Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings, Official Journal of the European Union, 53, 2010.
2. DIRETTIVA 2012/27/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 25 ottobre 2012 sull'efficienza energetica, che modifica le direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE e abroga le direttive 2004/8/CE e 2006/32/CE.
3. M. Cellura, M. Beccali, F. Guarino, V. Lo Brano: Redesign di edifici a energia netta zero e caratterizzazione degli edifici scolastici nella Regione Sicilia, settembre 2013.
4. DECRETO DEL PRESIDENTE DELLA REPUBBLICA 412/93 aggiornata al 31 ottobre 2009 - Zone climatiche Elenco dei comuni italiani diviso per regioni e provincie - Tab.A allegata.
5. Decreto Ministeriale 18 dicembre 1975 - Norme tecniche aggiornate relative all'edilizia scolastica, ivi compresi gli indici di funzionalità didattica, edilizia ed urbanistica, da osservarsi nella esecuzione di opere di edilizia scolastica.
6. UNI EN ISO 7730:2006 - Ergonomia degli ambienti termici - Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale, 2006.
7. Jeffrey D. Spitler: Load Calculation Application Manual – SI Edition, ISBN: 978-1-933742-72-4, 2010.
8. Prospetto XIII del d.d.g. n. 5796 dell'11 Giugno 2009 - Valori globali degli apporti interni.
9. ASHRAE Handbook 2009 – Fundamentals, Inch-Pound Edition, ISBN: 978-1-933742-54-0.
10. ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2013 - Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality.
11. DECRETO DEL PRESIDENTE DELLA REPUBBLICA 16 aprile 2013, n. 74 - Regolamento recante definizione dei criteri generali in materia di esercizio, conduzione, controllo, manutenzione e ispezione degli impianti termici per la climatizzazione invernale ed estiva degli edifici e per la preparazione dell'acqua calda per usi igienici sanitari, a norma dell'articolo 4, comma 1, lettere a) e c), del decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192.
12. Legge 28 marzo 2003, n. 53 - Delega al Governo per la definizione delle norme generali sull'istruzione e dei livelli essenziali delle prestazioni in materia di istruzione e di formazione professionale.
13. UNI 10339 - Impianti aeraulici a fini di benessere, rev. 06/2011.
14. M. Santamouris, D. Kolokotsa, Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures: The state of the art, *Energy and Buildings*, 57 (0) (2013) 74-94.
15. H. Breesch, A. Bossaer, A. Janssens, Passive cooling in a low-energy office building, *Solar Energy*, 79 (6) (2005) 682-696.
16. J. Pfafferoth, Evaluation of earth-to-air heat exchangers with a standardised method to calculate energy efficiency, *Energy and Buildings*, 35 (10) (2003) 971-983.
17. T. Miyazaki, A. Akisawa, T. Kashiwagi, The effects of solar chimneys on thermal load mitigation of office buildings under the Japanese climate, *Renewable Energy*, 31 (7) (2006) 987-1010.
18. B. Givoni, Performance and applicability of passive and low-energy cooling systems, *Energy and Buildings*, 17 (3) (1991) 177-199.
19. M. Santamouris, A. Sfakianaki, K. Pavlou, On the efficiency of night ventilation techniques applied to residential buildings, *Energy and Buildings*, 42 (8) (2010) 1309-1313.
20. B. Givoni, Indoor temperature reduction by passive cooling systems, *Solar Energy*, 85 (8) (2011) 1692-1726.
21. V. Geros, M. Santamouris, A. Tsangrasoulis, G. Guarracino, Experimental evaluation of night ventilation phenomena, *Energy and Buildings*, 29 (2) (1999) 141-154.
22. <http://www.trnsys.com/>, TRNSYS - Transient System Simulation Tool.